

Г. Е. Лустенберг

ВВЕДЕНИЕ В SPICE3

ДЛЯ ИЗУЧАЮЩИХ ЭЛЕКТРОТЕХНИКУ

ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ

Г. Е. Лустенберг

**ВВЕДЕНИЕ В SPICE3
ДЛЯ ИЗУЧАЮЩИХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКУ**

Линейные цепи



**Москва
2022**

УДК 621.3:004.434:004.94(075)
ББК 32.972.131.2я73+31.21-05я73
Л82

Лустенберг, Г. Е.

Л82 Введение в SPICE3. Для изучающих электротехнику. Линейные цепи / Г. Е. Лустенберг. — Москва : Директ-Медиа, 2022. — 380 с.

ISBN 978-5-4499-2972-3

Наметившаяся в последнее время тенденция цифровизации образования связана с более глубоким внедрением компьютерного моделирования в учебный процесс. Изучение электрических и электронных цепей охватывает широкий класс моделей и связано с большим объемом вычислений. В данной книге рассматриваются основы языка SPICE, являющегося основой многих современных систем схемотехнического моделирования. Рассмотрение проводится применительно к линейным цепям.

Основной методический принцип книги состоит во введении конструкций языка SPICE по мере необходимости, диктуемой логической последовательностью изложения теории цепей. Таким образом, достигается постепенность усвоения новой информации при минимальном отвлечении внимания от содержательной стороны предмета. Данный подход, называемый иногда «неформальным введением», эффективен на начальной стадии, когда обучающийся еще не владеет основными понятиями осваиваемой дисциплины. Поэтому весьма желательно работать с этой книгой *в процессе* изучения теории линейных цепей. Для этого в книге рассмотрено более 100 примеров анализа электрических цепей, которые необходимо проделать самостоятельно с помощью свободно распространяемой программы WinSpice3. Схемные файлы примеров можно загрузить по ссылке <https://yadi.sk/d/-H8MW2qYpzsnpw>. Предполагается, что читатель имеет элементарный опыт работы с Windows XP/7/8/10/11.

Книга не является учебником по теории цепей. В краткой форме приводятся только те теоретические сведения, которые нашли отражение в языке SPICE и могут служить «мостиком» между теорией цепей и SPICE.

Книга будет полезна студентам технических вузов, изучающим следующие дисциплины: «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ), «Теория линейных электрических цепей» (ТЛЭЦ), «Основы теории цепей» (ОТЦ), «Основы теории цепей и электроники» (ОТЦиЭ). Возможно, данная работа заинтересует преподавателей соответствующих дисциплин, желающих включить компьютерное моделирование цепей в учебный процесс.

УДК 621.3:004.434:004.94(075)
ББК 32.972.131.2я73+31.21-05я73

ISBN 978-5-4499-2972-3

© Лустенберг Г. Е., текст, 2022
© Издательство «Директ-Медиа», оформление, 2022

ПРЕДИСЛОВИЕ

Раздел теории электрических цепей является одним из важнейших в электротехническом образовании. Он составляет значительную часть дисциплины «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) [1, 3], изучаемой студентами электротехнических, электроэнергетических и некоторых других специальностей вузов и колледжей. Дисциплины «Основы теории цепей» (ОТЦ), «Основы теории цепей и электроники» (ОТЦиЭ) преподаются в вузах связи и других учебных заведениях, связанных с подготовкой специалистов электротехнического направления.

По вышеупомянутым дисциплинам существуют авторитетные учебники и учебные пособия, отражающие современные научные достижения. Следует отметить, однако, что характерное для последнего времени бурное развитие компьютеризации весьма слабо повлияло как на содержание учебной литературы, так и на методику преподавания. Использование современных коммерческих систем схемотехнического моделирования, обладающих достаточно сложным интерфейсом, не всегда целесообразно, особенно в условиях дефицита учебного времени и финансовых средств. Эти системы ориентированы на профессионалов в области электроники или, по крайней мере, на пользователей, изучивших электротехнику и электронику в достаточно полном объеме.

Часто в учебном процессе применяются программы с весьма ограниченными возможностями, позволяющие быстро выполнять отдельные этапы расчетно-графических работ. Отсутствие общего подхода к описанию схем затрудняет использование данных программ в качестве базового математического обеспечения при изучении теории цепей. То же самое относится к математическим пакетам (Mathcad, Mathematica, Maple и др.). Кроме этого, процедуру формирования системы уравнений электрической цепи должен разработать сам пользователь. Математические пакеты изначально не поддерживают понятийный базис электротехники и являются весьма дорогостоящими.

В результате после окончания курса теории цепей студент может прекрасно знать теорию, но при возникновении сложной цепной задачи оказывается без «инструмента» ее решения.

Эта книга призвана дать понятие о таком «инструменте» на примерах раздела «Теория линейных электрических цепей» дисциплины ТОЭ. По мнению автора, освоение зарекомендовавших себя компьютерных методов и программ должно начинаться на ранних стадиях изучения дисциплины. Цель книги состоит в ознакомлении с общим подходом к описанию и расчету схем на основе входного языка системы схемотехнического моделирования электрических и электронных цепей SPICE. Эта система, давно и успешно применяемая в области электроники, доказала свою надежность, простоту и универсальность. Язык SPICE воспринимается большинством систем автоматизированного проектирования электронных устройств. Текстовые описания схем на этом языке включаются во многие зарубежные учебные и научные издания. Однако в отечественной учебной литературе соответствующие систематические пособия встречаются довольно редко. Данная работа, возможно, частично восполнит этот пробел.

Основной методический принцип книги состоит во введении конструкций языка SPICE *по мере необходимости, диктуемой логической последовательностью изложения теории цепей*. Таким образом, достигается постепенность усвоения новой информации при минимальном отвлечении внимания от содержательной стороны предмета. Данный подход, называемый иногда «неформальным введением», эффективен на начальной стадии процесса обучения, когда студент еще не владеет основными

понятиями осваиваемой дисциплины. Поэтому весьма желательно работать с этой книгой *в процессе* изучения теории линейных цепей.

Во введении рассматривается история и современное состояние SPICE, обосновывается выбор программы WinSpice3 для обучения и рассматривается пример ее применения для расчета цепи постоянного тока.

В последующих восьми главах приводятся основные сведения по линейным электрическим цепям, связанные с соответствующими конструкциями языка SPICE. Названия глав и их последовательность соответствуют разделу «Линейные электрические цепи». Каждая глава заканчивается выводами, совокупность которых можно использовать в качестве краткого справочного руководства.

В приложениях описана процедура загрузки и установки WinSpice3, приведен справочный материал по текстовому описанию схем и применению WinSpice3 в качестве калькулятора выражений с комплексными числами.

Книга не является учебником по теории цепей. В краткой форме приводятся только те теоретические сведения, которые нашли отражение в языке SPICE и могут служить «мостиком» между теорией цепей и SPICE. Важнейшую роль играют примеры анализа электрических цепей (более 100 с учетом вариантов), которые *необходимо проделать самостоятельно* с помощью свободно распространяемой программы WinSpice3. Схемные файлы примеров можно загрузить по ссылке <https://yadi.sk/d/-H8MW2qYpzsnpw>. Предполагается, что читатель имеет элементарный опыт работы с Windows XP/7/8/10.

В результате освоения основ SPICE читатель будет в состоянии:

- самостоятельно экспериментировать с линейными схемами любой сложности с целью исследования установившихся и переходных процессов;
- получать надежные проверочные результаты при выполнении расчетно-графических работ по дисциплинам, в которых используется анализ электрических цепей;
- понимать, составлять и модифицировать SPICE-описания электрических цепей и контролировать их правильность;
- сравнивать варианты реализации SPICE в различных моделирующих программах и переносить данные из одной программы в другую;
- составлять простейшие сценарии анализа схем и обработки результатов на командном языке ICL.

Знание основ SPICE также способствует более осознанной работе в средах с графическим интерфейсом, например, в системе Multisim [8, 13], аналоговое ядро которой базируется на версии SPICE3.

Материал книги основан на авторском опыте преподавания студентам электроэнергетических специальностей. Полагаю, что книга может быть полезна студентам неэлектротехнических направлений, изучающим дисциплину «Электротехника и электроника», а также инженерно-техническим работникам, желающим повысить свою квалификацию в области компьютерного моделирования. Возможно, книга заинтересует преподавателей соответствующих дисциплин. Автор с благодарностью примет все предложения, пожелания и возражения по адресу basic.electro@yandex.ru

ВВЕДЕНИЕ

Общие сведения о SPICE

Развитие электротехники и электроники приводит к усложнению электрических цепей и расширению их элементной базы. Наиболее интенсивно этот процесс протекает в области электроники. К началу 70-х годов возникла настоятельная потребность применения вычислительной техники для анализа процессов в электронных цепях интегральных микросхем. С этой целью на факультете электротехники и информатики Калифорнийского университета (Berkeley EECS) в 1972 г. была разработана программа схемотехнического моделирования SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) [18]. Она быстро завоевала популярность и стала интенсивно развиваться усилиями специалистов Калифорнийского университета и других научных центров.

В результате, в 1975 г. появилась версия SPICE2. Были улучшены модели электронных приборов (диодов, транзисторов), повышена надежность численных методов. Однако в основном ядро программы сохранило прежний вид. Наибольшую популярность получила версия SPICE2G.6.

В 1984 г. появляется версия SPICE3A7, а в 1985 г. исходный код был переведен с алгоритмического языка FORTRAN на язык C, что сделало программу переносимой между различными операционными системами. Однако судьба этой версии была не слишком успешной, и только с появлением в 1992 г. версии SPICE3E2 стало возможным использовать SPICE3 в качестве полноценной замены SPICE2G.6.

В настоящее время SPICE3 является общедоступной программой, исходный C-код которой можно загрузить с сайта разработчика [18]. Последняя версия на момент написания этих строк — SPICE3F5. Для улучшения интерактивного взаимодействия с пользователем существует специальная программа NUTMEG, реализующая внешний интерфейс в стиле командной строки. Интерактивное руководство пользователя содержит полное описание команд SPICE3 и NUTMEG [15].

На базе SPICE разработаны более универсальные программы XSPICE и HSPICE, позволяющие моделировать на элементном и функциональном уровнях системы, содержащие не только аналоговые, но и цифровые компоненты. Несмотря на то, что система SPICE была создана для расчета микроэлектронных устройств, нет никаких препятствий для ее использования в области электротехники.

Следует отметить, что все вышеупомянутые версии SPICE ориентированы на операционную систему UNIX. Пользователи других систем должны откомпилировать исходный текст SPICE3 в своей операционной среде, что представляет некоторые трудности для непрограммистов. В связи с этим для системы Windows на базе исходного C-кода была создана программа WinSpice3¹ [19, 20], объединяющая в себе SPICE3F5 и NUTMEG.

WinSpice3 является условно-бесплатной программой (shareware) и имеет некоторые ограничения функциональности после окончания 30-дневного пробного периода, которые не оказывают влияния на выполнение примеров из данной книги. Текущая версия² WinSpice3 доступна для загрузки с сайта разработчика [20]. Процедура загрузки и установки подробно описана в Приложении 1.

С появлением персональных компьютеров круг пользователей SPICE значительно расширился. Ряд фирм-производителей программного обеспечения положили

¹ Программа разработана английской компанией OuseTech Ltd.

² На момент написания данной книги текущей являлась версия 1.06.00.

SPICE в основу своих программных продуктов, которые часто называют EDA-приложениями³. Наиболее распространенной программой такого рода является PSpICE корпорации MicroSim (1984 г.). Она входит в пакет DesingLab8.0 [4, 5, 7] и основана на версии SPICE 2G.6. После слияния MicroSim и OrCAD (1998 г.) PSpICE A/D 9.0 стала основным моделирующим компонентом новой системы схмотехнического моделирования OrCAD 9.0. К настоящему времени актуальной является версия OrCAD 2019-17.4, распространяемая фирмой Cadence Design Systems.

Из других программ схмотехнического моделирования для Windows, непосредственно воспринимающих язык SPICE, следует отметить LTspice (Analog Devices)[2], AimSpice (AIM-software), TopSPICE (Penzar Development). В статье [10] приведены ссылки на подобные разработки для системы Windows. Таким образом, язык SPICE стал фактическим стандартом для систем схмотехнического моделирования в диапазоне от постоянного тока до 100 МГц.

Кроме перечисленных выше программ, на различных модификациях SPICE3 базируется множество профессиональных EDA-приложений (Multisim [13], IsSpice4 [11] и др.). Следует отметить, что в настоящее время образовательная версия Multisim получила широкое распространение и общее признание в области обучения электротехнике и электронике [8]. Этому во многом способствует удобный графический интерфейс с большим набором виртуальных измерительных приборов. Тем не менее, на сайте фирмы-разработчика присутствует довольно подробная справка по SPICE [16].

Выбор SPICE-программы для обучения

При изучении языка SPICE можно использовать любой из упомянутых программных продуктов. Однако существуют два обстоятельства, ограничивающих их применение:

- данные программы являются, чаще всего, весьма дорогостоящими;
- они ориентированы на специалистов в области разработки электронных устройств и поэтому сложны для первоначального ознакомления.

Можно применять для обучения демонстрационные или студенческие версии этих программ, доступные для загрузки с сайтов фирм-производителей. Следует иметь в виду, что они имеют ограничения по числу узлов и элементов в схеме. Часто работоспособность демо-версий лимитируется пробным периодом (обычно 30 дней). Однако по своим функциям они обычно не отличаются от своих коммерческих прототипов и обладают достаточно сложным интерфейсом. Поэтому трудность освоения демо-версий ничуть не меньше, чем их коммерческих аналогов.

В связи с этим для реализации целей, поставленных в этой книге, была выбрана условно-бесплатная программа WinSpice3 [20], представляющая собой мощное и надежное 32-битовое приложение с простейшим текстовым интерфейсом.

Следует отметить, что существует свободно-распространяемая программа SpiceOpus⁴ [17], которая тоже базируется на версии SPICE3 и вполне сопоставима по вычислительным возможностям с WinSpice3. Читатель может использовать SpiceOpus для работы с примерами данной книги с учетом некоторых особенностей, отмеченных в материалах раздела Online Documents на сайте [17].

³ EDA — Electronics Design Automation (автоматизация электронного проектирования).

⁴ Разработчик — University of Ljubljana. Faculty of Electrical Engineering

Программа схемотехнического моделирования WinSpice3

Программа предназначена в общем случае для моделирования процессов в нелинейных электрических и электронных цепях, которые могут содержать:

- резисторы, конденсаторы, индуктивности (в том числе, взаимные);
- независимые источники напряжения и тока;
- четыре типа линейных зависимых источников напряжения и тока;
- четыре типа полиномиальных зависимых источников напряжения и тока;
- обобщенные нелинейные зависимые источники напряжения или тока;
- ключи, управляемые напряжением и током;
- длинные линии (с потерями и без потерь);
- полупроводниковые приборы (диоды, транзисторы биполярные и полевые JFET, MOSFET, MESFET).

Будем полагать, что программа WinSpice3 установлена на компьютере, как описано в Приложении 1. Запуск программы осуществляется из меню **Программы** (Пуск/Программы/WinSpice3/wspice3). На экране появляется главное окно

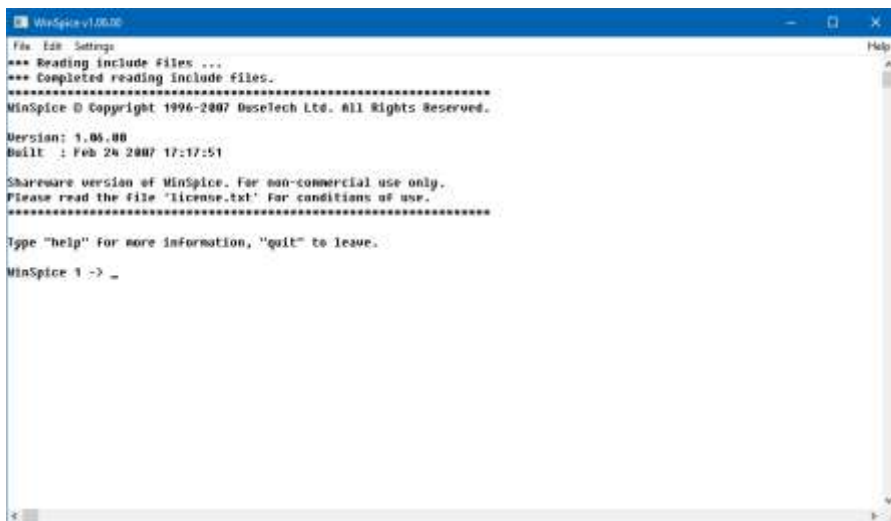


Рис. 1. Главное окно программы WinSpice3

В окне содержится информация о производителе программы, версии и дате разработки, а также ссылка на файл `license.txt`, содержащий перечень лицензионных условий.

Ниже находится фраза, предлагающая ввести команду **help** для получения помощи или команду **quit** для выхода. Еще ниже располагается командная строка, состоящая из приглашения (`WinSpice 1->`) и поля ввода команды, которое пока пусто.

Наберем в поле ввода команду **help** и нажмем клавишу `Enter` после чего в окне появляется краткая справка на английском языке, а приглашение принимает вид `WinSpice 2->`. Можно вводить следующую команду и т. д.

Тот, кто когда-либо работал с командной строкой в Windows или UNIX уже почувствовал аналогию. И это не удивительно. Ведь, как уже было сказано ранее, WinSpice3 практически имитирует SPICE3 при работе в UNIX через NUTMEG. В текущей версии WinSpice3 поддерживается 67 команд и 9 управляющих операторов. С их помощью можно создавать весьма гибкие сценарии анализа электрических цепей, обра-

батывать результаты, объединять данные из различных схем и т. д. Некоторые команды генерируются автоматически при работе с меню и графическими окнами.

На начальном этапе работы в среде WinSpice3 главное окно программы необходимо, в основном, для вывода результатов в виде чисел и таблиц, а также индикации ошибок, предупреждений и сообщений самой программы.

Пример использования WinSpice3 для расчета цепи постоянного тока

Рассмотрим работу с WinSpice3 на примере расчета цепи постоянного тока, схема которой показана на рис. 2.

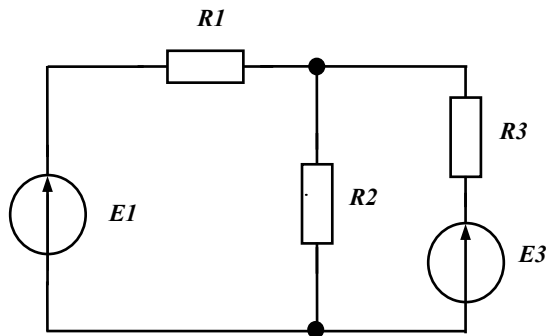


Рис. 2. Схема цепи постоянного тока:

$$E_1 = 5 \text{ В}, E_3 = 20 \text{ В}, R_1 = 10 \text{ Ом}, R_2 = 20 \text{ Ом}, R_3 = 30 \text{ Ом}$$

Схема состоит из двух идеальных источников напряжения E_1 , E_3 и трех резистивных элементов R_1 , R_2 , R_3 . Стрелка внутри круга в обозначении источника напряжения указывает на его положительный вывод (плюс). Обратите внимание, что на схеме элементы обозначаются заглавными буквами и цифрами без индексов, например, R_1 , а параметры элементов обозначаются в тексте и формулах заглавными буквами с индексом. Например, сопротивление резистивного элемента R_1 , обозначается как R_1 .

Составим текстовое описание этой схемы. Общие правила составления будут рассмотрены в дальнейшем, а пока ограничимся теми из них, которые необходимы для данного случая. Сначала надо обозначить на схеме все точки соединения элементов, которые принято называть узлами электрической цепи. Затем каждому узлу присваивается уникальное имя. Имя узла в SPICE3 должно быть произвольной неразрывной символьной строкой, состоящей, например, из цифр и (или) знаков английского алфавита. Именами могут быть одиночные цифры и группы цифр, причем они рассматриваются программой как символы, а не числа. Один из узлов, называемый «земля»⁵, должен иметь имя «0» (ноль). Его потенциал равен нулю и на схемах он обозначается знаком \perp . Кстати, если присвоить одному из узлов имя «00», то программа будет считать узлы «0» и «00» разными, поскольку они обозначены разными символьными строками.

Необходимо также дать имена элементам цепи. Согласно правилам SPICE, первый символ имени однозначно определяет тип элемента. Например, R — резистивный эле-

⁵ Применяются также названия «базисный узел», «опорный узел», «общий узел», «общая точка».

мент, V — идеальный источник напряжения, I — идеальный источник тока. После первого символа без пробела может следовать символьная строка.

После указания имен элементов, узлов и числовых значений параметров элементов, схема приобретает вид

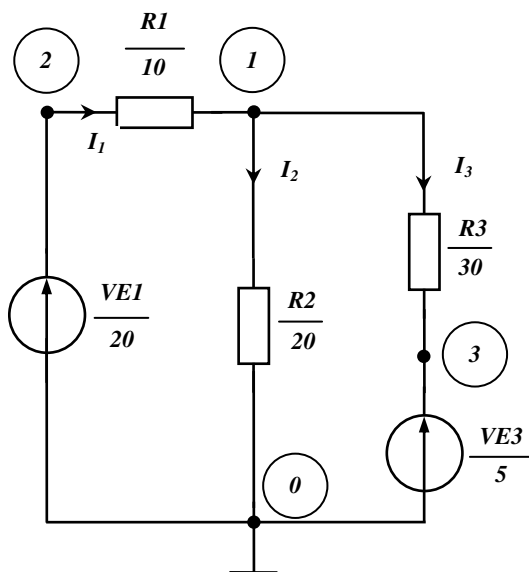


Рис. 3. Схема в Spice-обозначениях, подготовленная к составлению текстового описания

Составим текстовое описание схемы, располагая построчно описания элементов. Регистр символов в данном случае не играет роли, т. е. можно использовать заглавные или строчные буквы.

```
PRIMER 1
*Resistors
R1 2 1 10
R2 1 0 20
R3 1 3 30
*Istochniki
VE1 2 0 DC 20
VE3 3 0 DC 5
.OP
.END
```

Первая строка является заголовком описания схемы. Это любая последовательность латинских символов. Строки, начинающиеся со знака «*» (звездочка), являются комментариями и предназначены для пояснений. Они могут располагаться в любом месте описания и не влияют на результаты расчета. Далее следуют строки-описания элементов. Они задаются в следующем формате:

<имя элемента> <+узел> <-узел> <числовое значение параметра элемента>

Например, в строке

```
R1 2 1 10
```

$R1$ — <имя элемента>; 2 — <+узел>; 1 — <-узел>; 10 — числовое значение сопротивления резистивного элемента $R1$ в омах (10 Ом).

Таким образом, эта строка описывает резистивный элемент $R1$, с сопротивлением 10 Ом, включенный между узлами 2 и 1. Причем предполагается, что *ток и падение напряжения направлены от узла 2 к узлу 1*. Можно поменять местами узлы, т. е. записать

```
R1 1 2 10
```

и это не скажется на результатах расчета потенциалов узлов.

Аналогично описываются источники напряжения. Так строка

```
VE1 2 0 DC 20
```

задает идеальный источник постоянного напряжения $VE1$ с напряжением (или ЭДС), равным 20 В, включенный плюсом к узлу 2, а минусом к узлу 0. Аббревиатура DC обозначает постоянный ток (Direct Current)⁶. Следует отметить, что в отличие от резистивного элемента перемена местами узлов подключения источника недопустима, поскольку смена полярности противоречит условию задачи. Итак, совокупность строк-описаний задает параметры элементов и способ их соединения в данной схеме.

Две предпоследние строки начинаются со знака «точка». Это, так называемые, управляющие строки или директивы. Они задают определенные действия в программе. Директива .OP активизирует расчет режима по постоянному току или, пользуясь терминологией электроники, расчет рабочей точки (Operating Point). Директива .END обозначает конец текстового описания.

Порядок следования строк текстового описания произвольный, за исключением строк заголовка и окончания.

Данное описание нужно оформить в виде текстового файла (ASCII- файла) с помощью соответствующей программы-редактора. Лучше всего использовать текстовый редактор Блокнот, являющийся стандартным приложением Windows. Набор текстового описания необходимо проводить, переключившись на *английскую* раскладку клавиатуры. При сохранении файлу лучше присвоить расширение «cir», воспринимаемое по умолчанию программой WinSpice3 как текстовое описание схемы электрической цепи. Полное имя файла (с учетом пути) *не должно содержать русских букв*. Пусть созданный файл имеет имя primer1.cir и находится в папке cirfiles на диске C. Подобные файлы будем далее называть *цепными файлами*.

Запустим WinSpice3 и выполним команду **Open** из меню **File**. В открывшемся стандартном диалоговом окне перейдем в папку cirfiles , содержащую цепной файл primer1.cir, и откроем его. Это приведет к автоматическому запуску программы на счет и появлению в ее окне следующего текста (сообщения программы, помеченные «***», опущены, нумерация строк в первом столбце добавлена для возможности ссылок):

```
1 WinSpice 1 -> cd
2 Current directory: C:\cirfiles
3 WinSpice 2 -> source "primer1.cir"
4 Reading .\primer1.cir
5 NOTE: This is a Spice2 circuit file
6 Spice3 commands added:-
7 .control
8 destroy all
```

⁶ В данном случае аббревиатуру DC можно было бы опустить, т. к. она применяется при вариации параметров постоянных источников напряжения и тока (см. далее пп. 3.2.4). Однако мы не будем этого делать, т. к. DC напоминает о том, что рассчитывается цепь постоянного тока.

```

9  set units=degrees
10 save all
11 op
12 print all
13 .endc

14  Circuit: PRIMER 1

15  TEMP=27 deg C
16  DC Operating Point ... 100%

17  v(1) = 1.181818e+01
18  v(2) = 2.000000e+01
19  v(3) = 5.000000e+00
20  ve1#branch = -8.18182e-01
21  ve3#branch = 2.272727e-01
22  Command execution done.
23  WinSpice 3 ->

```

Рассмотрим смысл полученного текста.

Строки 1–4 соответствуют выполненной команде меню **Open**: команда **cd** в 1-й строке задает папку `cirfiles` в качестве текущей папки, а команда **source** загружает из нее файл `primer1.cir` в программу.

Строка 5 информирует о том, что файл `primer1.cir` составлен в стиле SPICE2.

Строка 6 сообщает, что программа автоматически добавила команды, соответствующие стилю SPICE3.

Строки 7–13 представляют собой эти команды, добавляемые программой WinSpice3 *автоматически* для соответствия исходного файла стандарту SPICE3. Следует отметить, что команды добавляются в виде *управляющего блока*, начинающегося директивой **.control** и заканчивающегося директивой **.endc**. Подробное рассмотрение этого блока см. п.3.3.2

Строка 14 — это заголовок описания схемы (первая строка файла `primer1.cir`).

Строка 15 сообщает о том, что температура при расчете полагается равной 27 °C. В рассматриваемой задаче это не влияет на результаты.

В строке 16 указано, что расчет рабочей точки по постоянному току выполнен на 100%.

В строках 17–21 представлены собственно результаты расчета: $v(1)$, $v(2)$, $v(3)$ — потенциалы в вольтах узлов 1, 2 и 3 соответственно; $ve1\#branch$, $ve3\#branch$ — токи в амперах, протекающие через источники $E1$ и $E3$. Отметим, что результаты представлены в экспоненциальной форме записи: мантисса слева от буквы *e*, порядок — справа. Например, $1.181818e+01 = 1.181818 \cdot 10^1 = 11.81818$.

Таким образом, в общепринятой для отечественной учебной и технической литературы форме записи чисел с десятичной запятой имеем

$v(1) = 11,81818 \text{ В}$; $v(2) = 20,0 \text{ В}$; $v(3) = 5,0 \text{ В}$;
 $ve1\#branch = -0,818182 \text{ А}$; $ve3\#branch = 0,2272727 \text{ А}$.

Итак, результатами SPICE-расчета являются узловые потенциалы и токи, протекающие через источники напряжения. Не следует забывать о нулевом потенциале «земли» $v(0) = 0$. Через потенциалы можно найти напряжение на каждом элементе.

Отрицательное значение тока источника $E1$, равное $-0,818182$ А, свидетельствует о протекании этого тока через источник в направлении от «минуса» к «плюсу». Таким образом, ток источника $E1$ совпадает по направлению с ЭДС и, следовательно, этот источник отдает энергию в цепь. Источник $E3$, наоборот, потребляет энергию из цепи, т. е. является активным приемником.

Теперь изменим сопротивление резистора $R2$. Для этого надо будет внести изменения в исходный файл `primer1.cir`. Его можно открыть в текстовом редакторе Блокнот обычным способом, но проще выполнить команду **edit**. Для этого в поле командной строки WinSpice3 набираем **edit** и нажимаем клавишу Enter. В результате открывается окно Блокнота в котором находится текст файла `primer1.cir`. Заменяем сопротивление $R_2 = 20$ Ом на 50 Ом, и строка, описывающая резистивный элемент $R2$, примет вид

```
R2 1 0 50
```

После изменения сохраним файл под прежним именем командой меню Блокнота **File/Save**. Обратите внимание, что выполнение этой команды в Блокноте приводит к автоматическому запуску WinSpice3 на счет. В окне WinSpice3 появляются новые значения токов и потенциалов, соответствующие $R_2 = 50$ Ом:

```
v(1) = 1.413043e+01  
v(2) = 2.000000e+01  
v(3) = 5.000000e+00  
ve1#branch = -5.86957e-01  
ve3#branch = 3.043478e-01
```

Любой участок текста, находящийся в окне программы, можно выделить командой **Mark** из меню **Edit**, а затем скопировать в буфер обмена Windows командой **Copy**. Далее содержимое буфера можно вставить в любое Windows-приложение, поддерживающее текстовый тип данных (Блокнот, WordPad, Word и др.).

Рассмотренный способ работы называется пакетным режимом (batch mode). Он характерен тем, что все данные и директивы находятся в файле. Чтобы произвести какие-либо изменения, надо изменить файл. Такой способ применяется в SPICE2 и в PSPICE, причем выходные данные автоматически записываются в специальный внешний выходной файл. Несмотря на некоторую архаичность пакетного режима, будем пока его использовать ввиду простоты и распространенности в учебной литературе.

Альтернативой пакетному режиму является интерактивный командный режим, поддерживаемый в WinSpice3. Его целесообразно применять для исследования цепей, когда могут потребоваться различные виды анализа, нестандартная обработка выходных данных и т. п. Как уже было сказано, WinSpice3 поддерживает 67 команд, которые делают WinSpice3 весьма мощным инструментом.

Рассмотрим, каким образом можно решить предыдущую задачу в интерактивном режиме. Следует отметить, что в данном случае используются *только строчные буквы*. Вернемся к исходному файлу `primer1.cir`, в котором $R_2 = 20$ Ом, запустим WinSpice3 и откроем файл `primer1.cir`. В главном окне после результатов появится поле командной строки WinSpice 3->, в котором наберем команду `alter @R2[resistance]=50`, присваивающую сопротивлению R_2 новое значение 50 Ом. *Ввод команды осуществляется нажатием клавиши Enter.*

В следующей строке даем команду **run**, запускающую процесс выполнения задачи. О ее успешном завершении информируют уже известные нам сообщения: `TEMP=27 deg C; DC Operating Point ... 100 %`, но никаких результатов расчета на экране не появляется. Для их вывода надо выполнить команду **print**. Если требуется вывод всех резуль-

татов, то команда дается с параметром all, т. е. **print all**, после чего в окне появляются результаты. Текст в окне, соответствующий описанным действиям, приведен ниже.

```
WinSpice 3 -> alter @R2[resistance]=50
WinSpice 4 -> run
```

```
TEMP=27 deg C
DC Operating Point ... 100%
```

```
WinSpice 5 -> print all
v(1) = 1.413043e+01
v(2) = 2.000000e+01
v(3) = 5.000000e+00
ve1#branch = -5.86957e-01
ve3#branch = 3.043478e-01
WinSpice 6 ->
```

Следует отметить, что выполнение команды, изменяющей сопротивление R_2 , не повлияло на файл primer1.cir.

В интерактивном режиме можно выполнять вычисления с полученными результатами, т. е. использовать WinSpice3 в качестве калькулятора. Определим, например, ток I_1 , проходящий через R_1 в направлении от узла 2 к узлу 1. По закону Ома падение напряжения на R_1 надо разделить на его сопротивление (10 Ом). Напряжение определяется через разность потенциалов как $\varphi_2 - \varphi_1$ и ток имеет вид $I_1 = (\varphi_2 - \varphi_1) / 10$.

Итак, необходимо ввести новую переменную i1, что осуществляется командой **let**.

```
WinSpice 7 -> let i1=(v(2)-v(1))/10
Далее результат выводится в окно командой print
WinSpice 8 -> print i1
i1 = 5.869565e-01
```

Отметим, что полученный результат равен по абсолютной величине току, проходящему через источник E_1 (ve1#branch = -5.86957e-01), поскольку E_1 и R_1 соединены последовательно.

Разделение на пакетный и командный (или интерактивный) режимы в некоторой степени условно. Дело в том, что WinSpice3 допускает включение команд в текстовое описание (стиль SPICE3). Более того, WinSpice3 поддерживает язык сценариев ICL, позволяющий реализовать достаточно сложные многовариантные расчеты и алгоритмы обработки результатов. Текст сценария может также включаться в цепной файл.

Итак, в большинстве примеров, приводимых ниже, будет использоваться пакетный режим в стиле SPICE2/ PSPICE. В тех случаях, когда возникнет необходимость в командах SPICE3, будут сделаны соответствующие пояснения.

Выводы

1. SPICE — это входной язык одноименной системы схемотехнического моделирования электронных и электрических цепей, который, развиваясь в течение длительного времени, стал фактическим стандартом в большинстве EDA-приложений.

2. Наиболее современным вариантом SPICE является версия SPICE3F5, хотя и предыдущая версия SPICE2G.6 также широко применяется, особенно в популярной программе PSpice фирм OrCAD-Cadence.

3. Для изучения SPICE в книге используются свободно распространяемая программа WinSpice3, реализующая в ОС Windows все возможности версии SPICE3F5, в том числе, интерактивные.

4. Для составления текстового описания схемы необходимо:

— начертить схему, обозначить узлы, присвоить имена узлам и элементам.

Один из узлов («земля») должен иметь имя «0»;

— составить текстовое описание схемы по следующей форме:

Заголовок
Строки-описания элементов схемы
Директивы
.END

Строки-описания записываются в следующем формате: **<имя элемента> <+узел> <-узел> <числовое значение параметра элемента>**. Между строками текстового описания можно вставлять комментарии, начинающиеся со «звездочки» в первой позиции строки; оформить составленное описание схемы в виде текстового ASCII-файла и сохранить его с расширением `cir` (цепной файл).

5. Открыть данный файл программой WinSpice3. При этом автоматически запускаются те виды анализа, которые заданы в разделе «Директивы». Например, директива `.OP` задает анализ цепи по постоянному току. Результаты расчетов и сообщения программы выводятся в окно WinSpice3. Такой режим работы называется пакетным и характерен для SPICE2/PSpice. Пакетный режим является наиболее простым и, вследствие этого, будет использоваться в книге довольно часто. WinSpice3 автоматически распознает и транслирует конструкции SPICE2 в SPICE3, добавляя блок команд, ограниченный директивами `.control` и `.endc`.

6. WinSpice3 поддерживает интерактивное взаимодействие с пользователем в режиме командной строки. В текущей версии поддерживается 67 команд. В данном разделе использовались следующие команды:

edit — вызывает запуск текстового редактора Блокнот с одновременной загрузкой в его окно текста схемного файла, открытого в WinSpice3;

alter — позволяет изменять параметры элементов в ходе интерактивного сеанса;

let — создает новую переменную и присваивает ей значение выражения;

run — выполняет директивы, содержащиеся в загруженном цепном файле;

print — выводит результаты.

В командной строке WinSpice3 можно выполнять различные дополнительные расчеты, т. е. использовать эту программу в качестве калькулятора (см. Приложение 3).

7. WinSpice3 поддерживает язык сценариев ICL, которые можно включать в файлы текстового описания схем с целью организации многовариантных расчетов, обработки результатов и т. п. В сценарии можно включать директивы, команды интерактивного режима и специальные управляющие операторы.

Глава 1. ИДЕАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ (ЛЭЦ)

Несмотря на разнообразие электрических цепей, в них можно выделить две группы элементов: *источники (генераторы)* и *приемники* электрической энергии.

Источники, преобразующие различные виды энергии (химическую, механическую, тепловую, световую) в электрическую, называют первичными источниками. К ним относятся аккумулятор, электромашинный генератор, термopара, фотоэлемент. Устройства, преобразующие электрическую энергию первичных источников в электрическую энергию с требуемыми параметрами, называют преобразователями или вторичными источниками (электронный генератор, выпрямитель, инвертор и т. д.). Источники являются *активными элементами* электрических цепей, т. е. поставщиками электрической энергии в цепь.

Приемники электрической энергии — устройства, осуществляющие обратное преобразование по отношению к источникам. Примерами преобразующих приемников являются: резистор, рассеивающий тепловую энергию в окружающем пространстве; аккумулятор в режиме зарядки, преобразующий электрическую энергию в энергию химических реакций; электрический двигатель, преобразующий электрическую энергию в механическую энергию.

Резистор относится к *пассивным элементам* электрических цепей, поскольку в нем энергия, полученная от внешнего источника, рассеивается во внешнюю среду посредством теплопередачи⁷. В заряжающемся аккумуляторе и работающем двигателе, кроме рассеяния, развивается так называемая «противо-ЭДС», поэтому данные устройства принято называть активными приемниками.

Принципиально иной тип приемников представляют собой энергозапасающие элементы — катушки индуктивности и конденсаторы. Энергия, запасаемая катушкой индуктивности, обусловлена в основном магнитной составляющей электромагнитного поля. Энергия, запасаемая конденсатором, обусловлена в основном электрической составляющей электромагнитного поля. В процессе работы цепи энергия этих элементов может возрастать (зарядка) или убывать (разрядка), но энергия, запасенная в элементе к некоторому моменту времени всегда неотрицательна. Таким образом, катушки и конденсаторы также являются пассивными элементами.

Работа реального элемента связана с одновременным проявлением многих физических процессов. Например, резистор не только преобразует электрическую энергию в тепловую, но и в какой-то мере запасает энергию в электромагнитном поле. Поэтому в теории цепей используют так называемые идеализированные или виртуальные элементы, отражающие *только один* физический процесс. Идеализированные элементы — это упрощенные математические модели реальных элементов, т. е. своеобразные «кирпичики» теории цепей, из которых можно построить сложные модели, более близкие к реальности.

Необходимо иметь в виду, что идеализированные элементы могут использоваться для моделирования многих устройств, внешне не похожих на реальные источники, резисторы, катушки и конденсаторы. Например, длинная линия из двух проводов может быть представлена соединением из идеализированных элементов. Схема, составленная из идеализированных элементов, называется *схемой замещения электрической цепи*.

⁷ В физике процесс необратимого рассеяния энергии во внешнем пространстве называется *диссипацией*, поэтому резистор можно назвать диссипативным элементом.

1.1. Простейшие пассивные идеализированные элементы ЛЭЦ

Линейными называют элементы, описываемые линейными уравнениями. К простейшим пассивным элементам ЛЭЦ относятся линейные резистивный, индуктивный и емкостной элементы. Все они *двухполюсные*, т. е. имеют два зажима (полюса), через один из которых в данный момент времени t ток втекает в элемент, а через другой — вытекает. Примем условно-положительные (или опорные) направления тока и напряжения для некоторого произвольного момента времени совпадающими (см. стрелки на рис. 1.1).

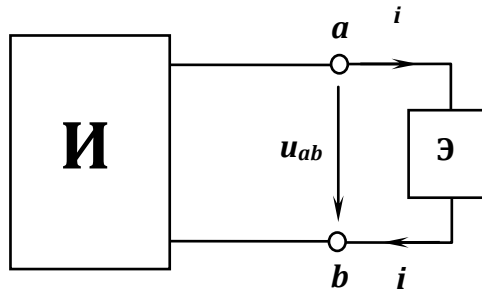


Рис. 1.1. Условно-положительные направления тока и напряжения двухполюсника:

И — источник, Э — элемент

Отметим, что при указанном направлении напряжения потенциал узла a (φ_a) предполагается большим потенциала узла b (φ_b), т. е. узел a является «плюсом», а узел b — «минусом», следовательно, мгновенное значение напряжения $u_{ab}(t)$ имеет положительное значение.

$$u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b > 0.$$

Мгновенная мощность $p(t)$ двухполюсника с напряжением $u_{ab}(t)$ и током $i(t)$, определяется выражением

$$p(t) = u_{ab}(t) \cdot i(t). \quad (1.1)$$

В течение интервалов времени, на которых направления $u_{ab}(t)$ и $i(t)$ совпадают, $p(t) > 0$, что соответствует потреблению электрической энергии двухполюсником от источника. В противном случае $p(t) < 0$, и энергия отдается двухполюсником источнику. Энергия, поступившая в двухполюсник за промежуток времени от t_0 до t , имеет вид

$$w(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\tau) d\tau = \int_{t_0}^t u_{ab}(\tau) \cdot i(\tau) d\tau, \quad (1.2)$$

где τ — переменная интегрирования.

Условие пассивности элемента состоит в выполнении неравенства $w(t_0, t) \geq 0$.

Далее в тексте для краткости функциональная зависимость от времени не будет указываться. В электротехнике принято обозначать изменяющиеся во времени величины (их мгновенные значения) строчными буквами:

$$i(t) \equiv i; \quad u(t) \equiv u; \quad p(t) \equiv p; \quad w(t_0, t) \equiv w.$$

Ниже рассматриваются условные графические обозначения (УГО) пассивных элементов, их основные характеристики, связи между мгновенными значениями тока и напряжения, выражения мощности, энергии и SPICE-описания.

1.1.1. Резистивный элемент

Идеальный двухполюсный элемент, замещающий преобразование электрической энергии в тепловую энергию, называется резистивным элементом или R -элементом. Идеализация состоит в допущении отсутствия накопления электрической и магнитной энергии. R -элемент — простейшая модель резистора.

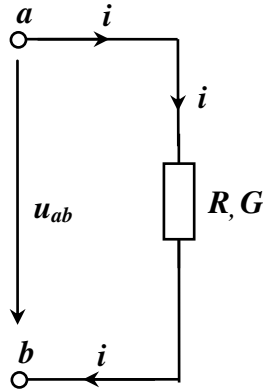


Рис. 1.2. Условное графическое обозначение R -элемента: стрелками указаны условно-положительные направления тока и напряжения

Основной характеристикой R -элемента является прямо пропорциональная зависимость, связывающая ток и напряжение. Это известный *закон Ома*, который может быть записан в двух формах:

$$u_{ab} = Ri; \quad i = Gu_{ab}, \quad (1.3)$$

где u_{ab} — напряжение на R -элементе, В; R — сопротивление R -элемента, Ом; i — сила тока, А; $G=1/R$ — проводимость R -элемента, См.

Из закона Ома следует, что ток и напряжение R -элемента описываются одной функцией времени, причем какие-либо ограничения на её непрерывность отсутствуют. Отметим, что у реальных пассивных резисторов $R>0$ ($G>0$). В идеальном случае, когда $R=0$ ($G\rightarrow\infty$), используется термин «закоротка». Теоретически можно рассматривать $R<0$ ($G<0$), но в этом случае R -элемент превращается в источник, что противоречит физическим понятиям. Итак, будем рассматривать сопротивление как положительную константу при данной температуре.

Мгновенная мощность рассеяния, развиваемая R -элементом $p = R \cdot i^2 = G \cdot u^2$ всегда положительна. Энергия, рассеиваемая в течение интервала времени от t_0 до t , определяется выражениями, вытекающими из (1.2):

$$w = \int_{t_0}^t p(\tau) d\tau = R \int_{t_0}^t i^2(\tau) d\tau = G \int_{t_0}^t u_{ab}^2(\tau) d\tau.$$

Неизвестными величинами в SPICE являются потенциалы узлов (или *узловые потенциалы*), измеряемые по отношению к базисному узлу, потенциал которого равен нулю. В электронике базисный узел часто называют «общим узлом» или «землей». Иногда вместо узловых потенциалов используют понятие «узловые напряжения».

Обозначения, соответствующие SPICE, показаны на рис. 1.3. Мы будем применять заглавные буквы в SPICE-описаниях, хотя это не обязательно.

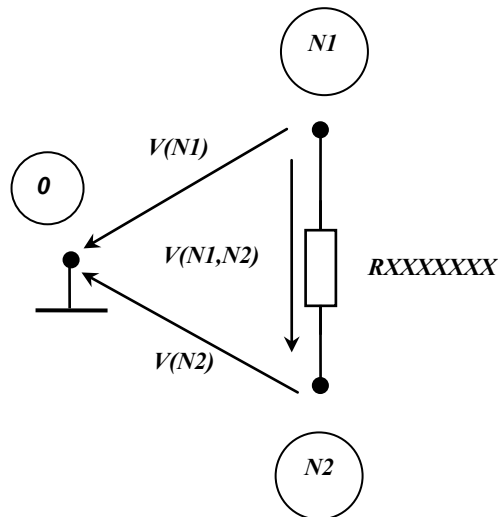


Рис. 1.3. R-элемент в SPICE-обозначениях

Имя R-элемента должно начинаться с буквы R. Далее *без пробела* может следовать произвольная символьная строка, не содержащая русских букв, обозначенная на рисунке как XXXXXXXX. Для имитации пробела допускается использование символа подчеркивания. Примеры правильных имен: R, R12, RSHUNT, R2OUT_5, RF17_IMPULSE.

Для обозначения потенциала вместо греческой буквы Φ в SPICE используется латинская буква V. Обозначение узла, называемое в SPICE *именем узла*, записывается в круглых скобках сразу после V. Имена узлов могут быть произвольными символьными строками, причем под символами понимаются не только буквы, но и цифры. Базисный узел должен иметь имя «0» (ноль, а не буква O!). На схеме, размеченной в SPICE-обозначениях, имена узлов целесообразно обводить кружками для большей наглядности.

Например, потенциал узла с именем N1 на рис. 1.3, обозначен как V(N1), потенциал узла N2 — V(N2). Напряжение также обозначается буквой V, но с двумя именами узлов, разделенными запятой: первое имя — узел «плюс», второе имя — узел «минус». Таким образом, $V(N1,N2) = V(N1) - V(N2)$.

Предложение, описывающее R-элемент, показанный на рис. 1.3, имеет вид:

RXXXXXXX N1 N2 VALUE

где RXXXXXXX — имя R-элемента;

N1, N2 — имена узлов, к которым подключен R-элемент, причем N1 — имя узла с предположительно более высоким потенциалом, чем потенциал узла N2. Таким образом, N1 — «плюс», а N2 — «минус»;

VALUE — *ненулевое* числовое значение сопротивления R-элемента в омах.

Значение VALUE может быть целым (например, 12000) или вещественным числом (например, 856.3). В обоих случаях может использоваться экспоненциальная форма записи (12e3; 8.563e2). Целая и дробная части в SPICE отделяются *точкой*. Если после числа следует пробел или любая последовательность символов, кроме тех, что указаны в табл.1.1, то SPICE воспринимает это число как сопротивление в омах.

Таблица 1.1

Суффикс	Масштаб- ный мно- житель	Приставка кратной или дольной едини- цы	Обозначение приставки	
			международ- ное	русское
F	10^{-15}	фемто	f	ф
P	10^{-12}	пико	p	п
N	10^{-9}	нано	n	н
U	10^{-6}	микро	μ	мк
MIL	$25.4 \cdot 10^{-6}$			
M	10^{-3}	милли	m	м
K	10^3	кило	k	к
MEG	10^6	мега	M	М
G	10^9	гига	G	Г
T	10^{12}	тера	T	Т

Если после числа следует один из символов табл. 1.1, называемых суффиксами, то сопротивление имеет значение, соответствующее десятичным кратным или дольным единицам системы СИ, указанным в таблице.

Любые знаки, следующие после суффикса, игнорируются программой. Поэтому, если в качестве VALUE задано одно из следующих значений: 10, 0.01K, 0.01KILOOM, 1E4M, 1E-5MEG, 100M, 10_OM, 100NM, то в любом случае оно будет соответствовать сопротивлению 10 Ом.

Относительно суффиксов следует сделать следующие замечания:

- суффиксы, как и другие элементы текстового описания, могут записываться как заглавными, так и строчными буквами;
- суффиксы P, M, K, MEG, T должны набираться *английскими* буквами: использование совпадающих по виду русских букв вызовет ошибку и останов программы;
- особое внимание надо обратить на суффиксы M и MEG. Если при записи в системе СИ суффикс M обозначает приставку «мега» (10^6), то в SPICE — «милли» (10^{-3});
- суффикс MIL обозначает 1/1000 дюйма и *не имеет отношения* к приставке «милли»;
- суффикс U используется в SPICE для обозначения приставки «микро», поскольку строчная буква u похожа по начертанию на μ — международное обозначение этой приставки;
- применение суффиксов сокращает запись, уменьшает вероятность ошибочного задания параметров и, кроме того, значения параметров элементов часто задаются уже с суффиксами, и переводить их в единицы системы СИ нецелесообразно.

Необходимо отметить, что в SPICE допускается не только положительное, но и отрицательное значение сопротивления. Однако *нулевое значение не допускается*. Поэтому не следует моделировать закоротку при помощи R-элемента с нулевым сопротивлением. Закоротку можно представить двумя последовательно соединенными R-элементами с равными по абсолютной величине, но противоположными по знаку сопротивлениями. Другой способ основан на применении источника напряжения с нулевой ЭДС (см. ниже п. 1.2.1).

Приведем примеры описания R-элементов.

1. Предложение

R10 27 17 4.62K

описывает R -элемент с именем R10 и сопротивлением 4,62 кОм, подключенный между узлами 27 и 17, причем условно-положительные направления тока и напряжения ориентированы от узла 27 к узлу 17. Сопротивление можно было бы задать в виде 4.62E3.

2. Предложение

RFIX 2TERM COIL12 16.8

описывает R -элемент с именем RFIX и сопротивлением 16,8 Ом, подключенный между узлами 2TERM и COIL12, причем условно-положительные направления тока и напряжения ориентированы от узла 2TERM к узлу COIL12.

3. Предложение

RES25 0 OUTS 2.58MEG

описывает R -элемент с именем RES25 и сопротивлением 2,58 МОм=2,58·10⁶ Ом, подключенный между узлами 0 («земля») и OUTS, причем условно-положительные направления тока и напряжения ориентированы от узла 0 к узлу OUTS. Сопротивление можно было бы задать в виде 2.58E6.

1.1.2. Индуктивный элемент

Идеализированный двухполюсный элемент, замещающий явление накапливания магнитной энергии, обусловленное протеканием тока, называют индуктивным элементом (L -элементом). Идеализация состоит в допущении отсутствия преобразования электрической энергии в тепло и накапливания энергии в электрическом поле. L -элемент — простейшая модель катушки индуктивности.

Основной характеристикой L -элемента является прямо пропорциональная зависимость потокосцепления от тока:

$$\psi = L \cdot i, \quad (1.4)$$

где ψ — потокосцепление, Вб; L — коэффициент самоиндукции или индуктивность, Гн.

Выберем, как и ранее, совпадающие условно-положительные направления тока и напряжения.

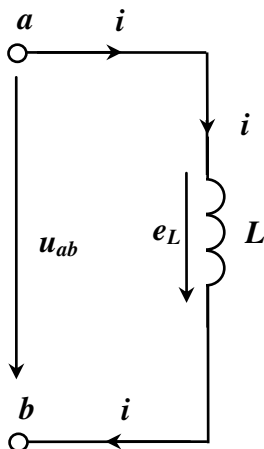


Рис. 1.4. Условное графическое обозначение L -элемента: стрелками указаны условно-положительные направления тока, напряжения и ЭДС самоиндукции

Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, при всяком изменении потокосцепления контура в нем наводится ЭДС самоиндукции

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt}. \quad (1.5)$$

Ее направление на схеме выберем совпадающим с напряжением и током (рис. 1.4). Знак «минус» в (1.5) необходим для приведения в соответствие действительного и условно-положительного направлений e_L при возрастании потокосцепления [1, с.13, с.20]. Подстановка (1.4) в (1.5) приводит к уравнению связи тока и напряжения L -элемента

$$u_{ab} = -e_L = L \frac{di}{dt}. \quad (1.6)$$

Для моделей реальных индуктивностей $L > 0$. При $L = 0$ или в случае, когда $di/dt = 0$ при любом t (постоянный ток), L -элемент представляет собой короткую, поскольку $u_{ab} = 0$.

Из (1.6) следует, что временные функции тока и напряжения для L -элемента в общем случае различны и ток через элемент во времени не может изменяться скачком. Если допустить обратное, то значение производной тока в (1.6) становится неопределенным. Таким образом, ток через L -элемент есть непрерывная функция времени.

Уравнение L -элемента можно записать в интегральной форме

$$i = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u_{ab}(\tau) d\tau, \quad (1.7)$$

где $i(t_0)$ — значение тока через L -элемент в момент времени t_0 (начальный ток); t — текущий момент времени; τ — переменная интегрирования.

Отсюда следует, что при $i(t_0) = 0$ и $L \rightarrow \infty$, L -элемент представляет собой разрыв, т.к. $i = 0$ при любом u_{ab} . Выражения (1.6) и (1.7) описывают L -элемент в дифференциальной и интегральной формах соответственно.

Мгновенная мощность L -элемента согласно (1.1) и (1.6) имеет вид

$$p = L \frac{di}{dt} \cdot i. \quad (1.8)$$

Очевидно, мощность может быть положительной (зарядка) и отрицательной (разрядка). Зарядка происходит на интервалах времени, когда знаки тока и его производной совпадают, а разрядка — в противоположном случае. Выражение для энергии можно получить в результате подстановки (1.8) в (1.2) и интегрирования по частям. Пренебрегая начальным запасом энергии, имеем

$$w = \frac{Li^2}{2}. \quad (1.9)$$

Рассмотрим SPICE-описание L -элемента. На рис. 1.5 приведены соответствующие обозначения.

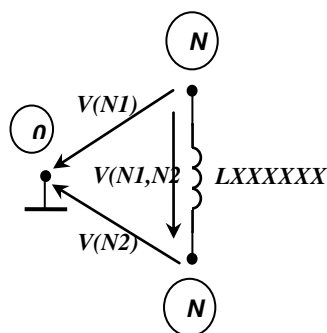


Рис. 1.5. L -элемент в SPICE-обозначениях

Предложение, описывающее L -элемент, показанный на рис. 1.5, имеет вид

LXXXXXXX N1 N2 VALUE <IC=INCOND>

где LXXXXXXX — имя L -элемента;

N1, N2 — имена узлов, к которым подключен L -элемент, причем N1 — имя узла с предположительно более высоким потенциалом, чем потенциал узла N2. Таким образом, N1 — «плюс», а N2 — «минус»;

VALUE — ненулевое числовое значение индуктивности L -элемента в генри;

<IC= INCOND> — ток, протекающий через L -элемент в начальный момент времени $t_0=0$ (т. е. $i(t_0)$ в формуле (1.7))⁸, INCOND — числовое значение начального тока в амперах, причем положительное значение соответствует направлению от N1 к N2. Угловые скобки здесь и далее обозначают элемент описания, который можно опустить при определенных условиях. В рассматриваемом случае параметр IC используется только для моделирования переходных процессов с помощью директивы **.tran** при заданном ключе UIC (см. п. 7.2). Если ключ не задан, то и параметр IC можно опустить.

Правила применения суффиксов при задании VALUE и INCOND соответствуют табл. 1.1. Например, если в качестве VALUE задано одно из следующих значений: 55E-6, 55U, 0.055M, 0.055MHENRY, то в любом случае оно будет соответствовать индуктивности 55 мкГн = $55 \cdot 10^{-6}$ Гн.

Если в качестве INCOND задано одно из следующих значений: 0.32, 32E-2, 0.32AMPER, 320M, 320MA, то в любом случае оно будет соответствовать начальному току 0,32 А.

Отметим, что допускается $L < 0$, но не $L = 0$. Разумеется, физический смысл имеют элементы с $L > 0$, для которых выполнения условие пассивности ($w > 0$, см. (1.9)).

Приведем примеры описания L -элементов.

1. Предложение

L6 12 2 0.005

описывает L -элемент с именем L6 и индуктивностью 0.005 Гн, подключенный между узлами 12 и 2, причем условно-положительные направления тока и напряжения ориентированы от узла 12 к узлу 2. Индуктивность можно было бы задать в виде 5E-3 или 5M. Начальный ток равен нулю и будет учитываться, если предполагается использование директивы **.tran** при заданном ключе UIC.

2. Предложение

LPAR A 5 46.3U IC=30M

⁸ Аббревиатура IC обозначает Initial Condition (начальное условие).

описывает L -элемент с именем LPAR и индуктивностью 46,3 мкГн, подключенный между узлами А и 5, причем условно-положительные направления тока и напряжения ориентированы от узла А к узлу 5. Начальный ток равен 30 мА и будет учитываться, если предполагается использование директивы **.tran** при заданном ключе UIC.

3. Предложение

L_DROSSEL24 1VYNOD VHOD 5.67M IC=2.5

описывает L -элемент с именем L_DROSSEL24 и индуктивностью 5,67 мГн, подключенный между узлами 1VYNOD и VHOD, причем условно-положительные направления тока и напряжения ориентированы от узла 1VYNOD к узлу VHOD. Индуктивность можно было бы записать в виде 5670U. Начальный ток равен 2,5 А и будет учитываться, если предполагается использование директивы **.tran** при заданном ключе UIC.

1.1.3. Емкостной элемент

Идеализированный двухполюсный элемент, замещающий явление накапливания электрической энергии, обусловленное приложенным напряжением, называется емкостным элементом (C -элементом). Идеализация состоит в допущении отсутствия преобразования электрической энергии в тепло и накапливания энергии в магнитном поле. C -элемент — простейшая модель конденсатора.

Основной характеристикой C -элемента является прямо пропорциональная зависимость его заряда от напряжения

$$q = C \cdot u_{ab}, \quad (1.10)$$

где q — заряд C -элемента, Кл; C — емкость, Ф.

Условно-положительные направления тока и напряжения, выбираем совпадающими.

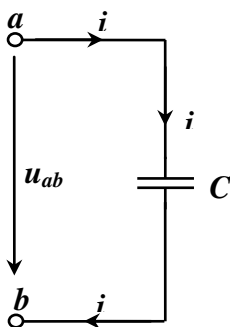


Рис. 1.6. Условное графическое обозначение C -элемента: стрелками указаны условно-положительные направления тока и напряжения

При изменении заряда C -элемента во времени возникает ток [1, с.19]

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (1.11)$$

Подстановка (1.10) в (1.11) приводит к уравнению связи тока и напряжения C -элемента

$$i = C \frac{du_{ab}}{dt}. \quad (1.12)$$

Для моделей реальных конденсаторов $C > 0$. При $C = 0$ или в случае, когда $du_{ab}/dt = 0$ при любом t (постоянное напряжение), C -элемент представляет собой разрыв, поскольку $i = 0$.

Из (1.12) следует, что временные функции тока и напряжения для C -элемента в общем случае различны и напряжение на элементе во времени не может изменяться скачком. Если допустить обратное, то значение производной напряжения в (1.12) становится неопределенным. Таким образом, напряжение на C -элементе есть непрерывная функция времени.

Уравнение C -элемента можно записать в интегральной форме

$$u_{ab} = u_{ab}(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau, \quad (1.13)$$

где $u_{ab}(t_0)$ — величина напряжения на C -элементе в момент времени t_0 (начальное напряжение).

Из выражения (1.13) следует, что при $u_{ab}(t_0) = 0$ и $C \rightarrow \infty$, C -элемент представляет собой короткую, т.к. u_{ab} оказывается равным нулю при любом токе. Выражения (1.12) и (1.13) описывают C -элемент в дифференциальной и интегральной формах соответственно.

Мгновенная мощность C -элемента согласно (1.1) и (1.12) имеет вид

$$p = u_{ab} \cdot C \frac{du_{ab}}{dt}. \quad (1.14)$$

Очевидно, мощность может быть положительной (зарядка) и отрицательной (разрядка). Зарядка происходит на интервалах времени, когда знаки напряжения и его производной совпадают, а разрядка — в противоположном случае. Выражение для энергии можно получить в результате подстановки (1.14) в (1.2) и интегрирования по частям. Пренебрегая начальным запасом энергии, имеем

$$w = \frac{Cu_{ab}^2}{2}. \quad (1.15)$$

Рассмотрим SPICE-описание C -элемента. На рис. 1.7 приведены соответствующие обозначения.

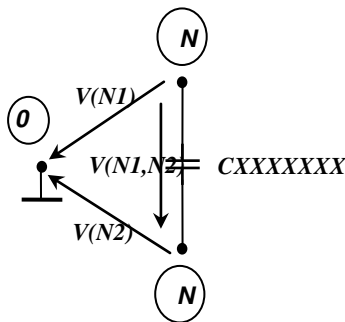


Рис. 1.7. C -элемент в SPICE-обозначениях

Предложение, описывающее C -элемент, показанный на рис. 1.7, имеет вид
CXXXXXXX N1 N2 VALUE <IC=INCOND>

где CXXXXXXX — имя C-элемента;

N1, N2 — имена узлов, к которым подключен C-элемент, причем N1 — имя узла с предположительно более высоким потенциалом, чем потенциал узла N2. Таким образом, N1 — «плюс», а N2 — «минус»;

VALUE — ненулевое числовое значение емкости C-элемента в фарадах;

<IC= INCOND> — напряжение на C-элементе в начальный момент времени $t_0=0$ (т. е. $u_{ab}(t_0)$ в формуле (1.13)), INCOND — числовое значение начального напряжения в вольтах, причем положительное значение соответствует направлению от N1 к N2. Параметр IC используется при расчете переходных процессов с помощью директивы **.tran** при заданном ключе UIC (см. п.7.2). Если ключ не задан, то и параметр IC можно опустить.

Правила применения суффиксов при задании VALUE и INCOND соответствуют табл. 1.1. Например, если в качестве VALUE задано одно из следующих значений: 120E-12, 120P, 120PF, 0.12N, то в любом случае оно будет соответствовать емкости $120 \text{ пФ} = 120 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$.

Если в качестве INCOND задано одно из следующих значений: 0.57, 57E-2, 0.57VOLT, 570M, 570MV, то в любом случае оно будет соответствовать начальному напряжению 0,57 В.

Приведем примеры описания C-элементов.

1. Предложение

C26 3 18 20E-6

описывает C-элемент с именем C26 и емкостью $20 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, подключенный между узлами 3 и 18, причем условно-положительные направления тока и напряжения ориентированы от узла 3 к узлу 18. Емкость можно было задать в виде 20U. Начальное напряжение равно нулю и будет учитываться, если предполагается использование директивы **.tran** при заданном ключе UIC.

2. Предложение

CFILTER 0 STAB 120.5P IC=850M

описывает C-элемент с именем CFILTER и емкостью 120,5 пФ, подключенный между узлами 0 («земля») и STAB, причем условно-положительные направления тока и напряжения ориентированы от узла 0 к узлу STAB. Начальное напряжение равно 850 мВ и будет учитываться, если предполагается использование директивы **.tran** при заданном ключе UIC.

3. Предложение

CVHOD_15 17 TEST3 4.8U IC=2.5

описывает C-элемент с именем CVHOD_15 и емкостью 4,8 мкФ, подключенный между узлами 17 и TEST3, причем условно-положительные направления тока и напряжения ориентированы от узла 17 к узлу TEST3. Емкость можно было бы задать в виде 4.8E-6 или 4800N. Начальное напряжение равно 2,5 В и будет учитываться, если предполагается использование директивы **.tran** при заданном ключе UIC.

1.2. Простейшие активные идеализированные элементы ЛЭЦ

Идеализация первичных источников состоит в допущении отсутствия потерь энергии внутри источника при его работе. Накапливанием энергии в электромагнитном поле также пренебрегается. Различают независимые источники напряжения (ЭДС) и тока. Определение «независимый» свидетельствует об отсутствии влияния токов и напряжений цепи на параметр источника (ЭДС или ток).

1.2.1. Идеализированный независимый источник напряжения

Двухполюсный элемент, напряжение которого задано в виде некоторой функции времени $e(t)$ и не зависит от тока, называют идеализированным независимым источником напряжения (или ЭДС). Внутреннее сопротивление такого источника равно нулю (проводимость стремится к бесконечности)

Стрелка внутри кружка (рис. 1.8) указывает на узел с более высоким потенциалом («плюс») в моменты времени, соответствующие $e(t) > 0$, т. е. $\varphi_a = \varphi_b + e(t)$ и $\varphi_a > \varphi_b$.

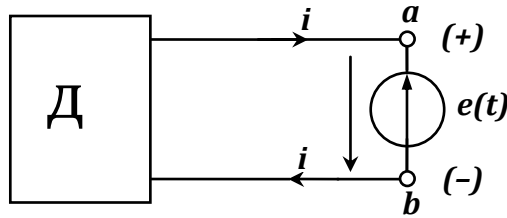


Рис. 1.8. Условное графическое обозначение идеализированного независимого источника напряжения

Отметим, что направление этой стрелки *не произвольное* и должно быть задано. Направления напряжения и тока, как и для пассивных элементов, выберем самосогласованными. Для пассивных элементов при таком выборе $p(t) > 0$ (см. п.1.1). Источник, однако, является активным элементом. Поэтому в те интервалы времени, когда источник отдает энергию в цепь, его мгновенная мощность (1.1) будет отрицательной ($p(t) < 0$). При истинном направлении u_{ab} , указанном на рис. 1.8, истинное направление тока источника будет противоположным, указанному на этом рисунке, т. е. $i < 0$. Иными словами, истинное направление тока источника совпадает с направлением ЭДС.

Итак, идеализированный независимый источник напряжения описывается уравнением

$$u_{ab} = e(t), \quad (1.16)$$

где $u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$; $e(t)$ — заданная функция времени.

Таким образом, напряжение идеального источника не зависит от тока, потребляемого подключенным к нему приемником, и равно ЭДС. При разомкнутых зажимах a и b (холостой ход) ток равен нулю, а напряжение по-прежнему равно ЭДС. При $e(t) \neq 0$ соединение зажимов a и b между собой (короткое замыкание) недопустимо, так как при этом $\varphi_a = \varphi_b$, что противоречит определению $\varphi_a = \varphi_b + e(t)$. Если же $e(t) = 0$ для всех моментов времени, то $\varphi_a = \varphi_b$ и источник превращается в закоротку.

Рассмотрим SPICE-предложение, описывающее ветвь с независимым источником *постоянного* напряжения (рис. 1.9):⁹

⁹ SPICE-описания источников как функций времени будут рассмотрены позднее.

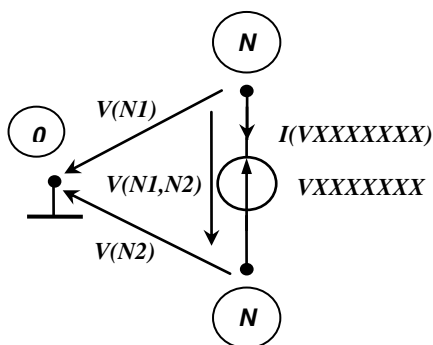


Рис. 1.9. Идеализированный независимый источник напряжения в SPICE-обозначениях

VXXXXXXX N1 N2 <DC> VALUE

Где VXXXXXXX — имя источника;

N1, N2 — имена положительного и отрицательного зажимов источника соответственно;

DC — идентификатор режима постоянного тока;

VALUE — числовое значение напряжения источника (или ЭДС) в вольтах.

Правила применения суффиксов при задании VALUE соответствуют табл. 1.1. Например, если в качестве VALUE задано одно из следующих значений: 4.12, 412E-2, 4.12V, 4.12VOLT, 4120M, то в любом случае оно будет соответствовать ЭДС 4,12 В.

Приведем примеры описания идеальных источников постоянного напряжения.

1. Предложение

V5 1 0 DC 5

описывает источник постоянного напряжения с именем V5 и ЭДС 5 В, подключенный между узлами 1 и 0 («земля»), причем «плюс» источника подключен к узлу 1, а «минус» — к узлу 0.

2. Предложение

VE10 1NODE 8 DC 250M

Описывает источник постоянного напряжения с именем VE10 и ЭДС 250 мВ, подключенный между узлами 1NODE и 8, причем «плюс» источника подключен к узлу 1NODE, а «минус» — к узлу 8. ЭДС можно было бы задать в виде 0.25

3. Предложение

V_EVHOD ONE TWO DC 1K

описывает источник постоянного напряжения с именем V_EVHOD и ЭДС 1 кВ=1000 В, подключенный между узлами ONE и TWO, причем «плюс» источника подключен к узлу ONE, а «минус» — к узлу TWO. ЭДС можно было бы задать в виде 1000.

В результате расчетов всегда известен ток, протекающий через источник напряжения, в направлении от N1 к N2. Это позволяет использовать в SPICE-описании цепи источники напряжения с нулевой ЭДС в качестве *идеальных амперметров*. Например, описание источника.

VA1 12 8 DC 0

задает идеальный амперметр, включенный между узлами 12 и 8, как показано на рис. 1.10.

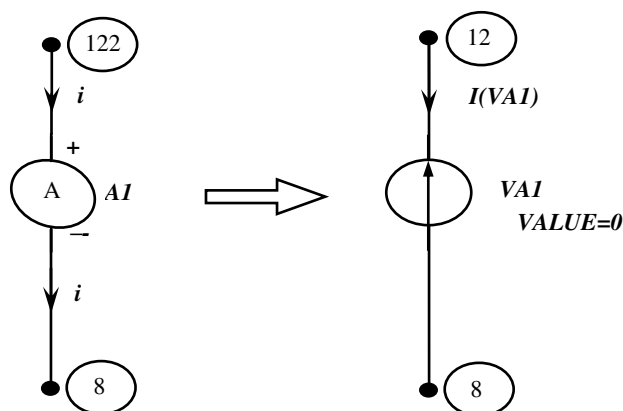


Рис. 1.10. Идеализированный независимый источник напряжения, используемый в качестве идеального амперметра или закоротки

Положительное показание амперметра в этом случае будет соответствовать току с истинным направлением, показанным на рис. 1.10. Этот ток доступен под именем $I(VA1)$, если используется стиль SPICE2 или $VA1\#branch$, если используется стиль SPICE3. Поскольку идеальный амперметр обладает нулевым сопротивлением, то его можно рассматривать как закоротку.

1.2.2. Идеализированный независимый источник тока

Двухполюсный элемент, ток которого задан в виде некоторой функции времени $j(t)$ и не зависит от напряжения, называют идеализированным независимым источником тока. Внутренняя проводимость такого источника *равна нулю* (сопротивление стремится к бесконечности). Это подчеркивается разрывной стрелкой в обозначении (рис. 1.11), указывающий истинное направление тока источника при $j(t) > 0$.

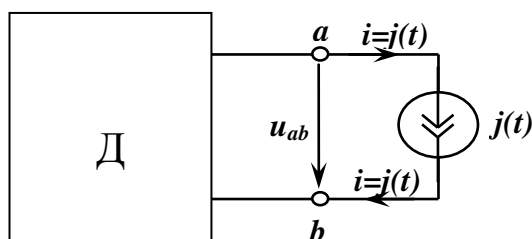


Рис. 1.11. Условное графическое обозначение идеализированного независимого источника тока

Отметим, что направление этой стрелки *не произвольное* и должно быть задано. Так же, как и источник напряжения, в моменты отдачи энергии в цепь источник тока развивает отрицательную мощность (1.1) при самосогласованных условно-положительных направлениях, показанных на рис. 1.11. Например, при истинном направлении тока, показанном на рис. 1.11, истинное направление u_{ab} будет противоположно указанному.

Рассматриваемый источник описывается уравнением

$$i = j(t), \quad (1.17)$$

где $j(t)$ — заданная функция времени.

Итак, ток идеального источника тока не зависит от напряжения, создаваемого подключенным приемником. При соединении зажимов a и b между собой (короткое замыкание) напряжение равно нулю, а ток по-прежнему равен току источника. При $j(t) \neq 0$ размыкание зажимов a и b (холостой ход) недопустимо, так как отсутствует путь для замыкания тока, что противоречит одному из физических условий существования тока. Если $j(t)=0$ для всех моментов времени, то источник тока превращается в разрыв.

Рассмотрим SPICE- предложение, описывающее ветвь с независимым источником постоянного тока (рис. 1.12).

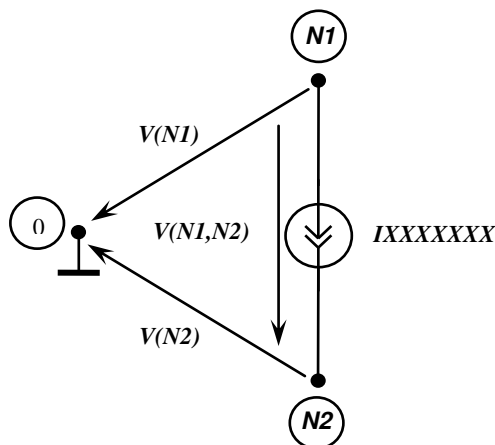


Рис. 1.12. Идеализированный независимый источник тока в SPICE-обозначениях

IXXXXXXX N1 N2 <DC> VALUE

где IXXXXXXX — имя источника тока;

N1 — имя узла, через который ток втекает в источник («плюс»);

N2 — имя узла, через который ток вытекает из источника («минус»);

DC — идентификатор режима постоянного тока;

VALUE — числовое значение тока источника в амперах.

Приведем примеры описания идеальных источников постоянного тока.

1. Предложение

I6 4 6 DC 15.6

описывает источник постоянного тока с именем I6 и током 15,6 А, подключенный между узлами 4 и 6, причем через узел 4 ток втекает в источник, а через узел 6 — вытекает. Иными словами, ток протекает внутри источника в направлении от узла 4 к узлу 6.

2. Предложение

IOFFSET1 1A IN DC 17.5U

описывает источник постоянного тока с именем IOFFSET1 и током 17,5 мкА, подключенный между узлами 1A и IN, причем через узел 1A ток втекает в источник, а через узел IN — вытекает. Иными словами, ток протекает внутри источника в направлении от узла 1A к узлу IN. Ток можно было бы задать в виде 17.5E-6 или 17500N.

3. Предложение

I_E8 V6T V7U DC 2.2K

описывает источник постоянного тока с именем I_E8 и током $2,2 \text{ кА} = 2200 \text{ А}$, подключенный между узлами V6T и V7U, причем через узел V6T ток втекает в источник, а через узел V7U — вытекает. Иными словами, ток протекает внутри источника в направлении от узла V6T к узлу V7U. Ток можно было бы задать в виде 2200.

1.3. Выводы

1. Рассмотренные простейшие элементы электрических цепей являются идеальными моделями, отражающими только одно существенное свойство реального элемента.

2. Рассмотренные пассивные двухполюсные элементы являются линейными, так как описываются линейными уравнениями (1.3—1.7), (1.10—1.13). Предполагается, что параметры R , L , C пассивных элементов не зависят от времени (так называемые элементы с постоянными параметрами).

3. Пассивные двухполюсные R -, L - и C -элементы описываются соответственно следующими SPICE-предложениями:

RXXXXXXX N1 N2 VALUE

LXXXXXXX N1 N2 VALUE <IC=INCOND>

CXXXXXXX N1 N2 VALUE <IC=INCOND>

4. Активные двухполюсные элементы — идеальные независимые источники постоянного напряжения и тока — описываются следующими SPICE-предложениями соответственно:

VXXXXXXX N1 N2 <DC> VALUE

IXXXXXXX N1 N2 <DC> VALUE

5. В предложениях-описаниях элементов тип элемента определяется первой буквой имени элемента. Узлы, к которым подключены элементы, перечисляются в порядке «+», «-». Для L и C элементов при расчете переходных процессов можно учесть начальные условия вида **IC=INCOND**. Величины параметров элементов могут задаваться либо в единицах СИ (числами без суффиксов), либо с суффиксами, обозначающими десятичные кратные и дольные единицы системы СИ (см. табл. 1.1). Параметры могут быть положительными или отрицательными. Параметры пассивных элементов не могут быть нулевыми.

Глава 2. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ, ЗАКОНЫ КИРХГОФА

2.1. Схемы электрических цепей

Схемой электрической цепи называют ее графическое изображение, выполненное с помощью УГО, отражающее взаимосвязь элементов (топологию) и их тип. Если на схеме используются стандартные УГО реальных устройств (компонентов), то такую схему принято называть принципиальной.

С целью расчета и анализа цепи каждый компонент замещается схемной моделью, содержащей только идеализированные элементы, простейшие из которых рассмотрены в предыдущей главе. Полученную схему можно назвать *схемой замещения* реальной электрической цепи. Более полному учету свойств цепи соответствует более сложная схема замещения. Составление адекватной схемы замещения устройства является самостоятельной задачей теоретической электротехники. Схемы, которые рассматриваются в данной книге — это схемы замещения, которые заданы по условию задачи.

Итак, схема замещения состоит из идеализированных элементов и задает топологию цепи, тип элементов и, как правило, их параметры. Следует отметить, что стандартов на УГО элементов схем замещения пока нет, но принято использовать символы, приведенные в главе 1. В дальнейшем будем использовать термин «схема», понимая под ним схему замещения.

2.2. Основные топологические понятия

Основными топологическими понятиями теории электрических цепей являются узел, ветвь, сечение и контур. Рассмотрим их на примере схемы рис. 2.1.

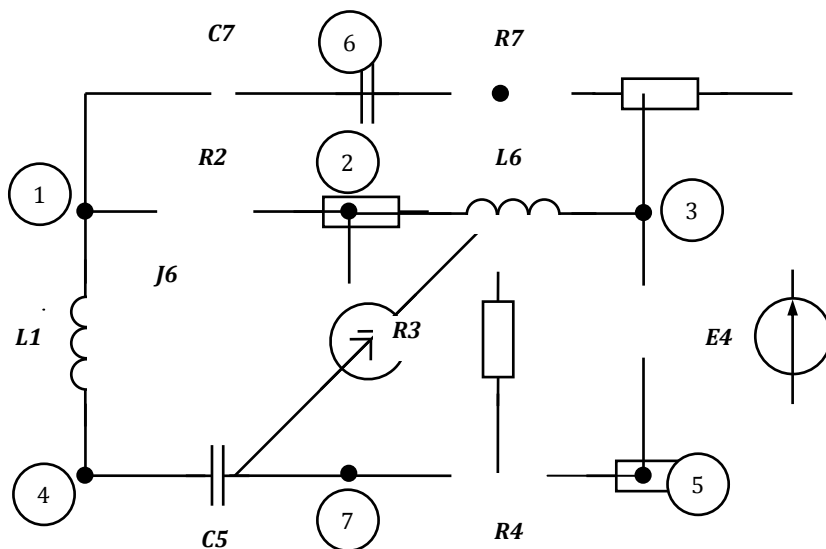


Рис. 2.1. Схема замещения разветвленной электрической цепи: $R_2=100\ \text{Ом}$; $R_3=2,5\ \text{кОм}$; $R_4=20\ \text{кОм}$; $R_7=20,5\ \text{Ом}$; $L_1=1\ \text{мГн}$; $L_6=250,6\ \text{мкГн}$; $C_5=60\ \text{нФ}$; $C_7=0,12\ \text{мкФ}$

Узел — место соединения 2-х или более элементов. Если узел является местом соединения *только* 2-х элементов, то его называют простым или устранимым узлом, поскольку ток в нем не разветвляется (например, узлы 5 и 6). Таким образом, схема рис. 2.1 содержит 7 узлов. Узлы принято изображать на схемах замещения четко различимыми точками и обозначать числами и (или) буквами.

Необходимо отметить, что во многих учебниках под узлом понимают место соединения 3-х или более элементов. Такой узел можно назвать сложным или неустраиваемым. Тогда рассматриваемая схема будет иметь всего 5 узлов (1, 2, 3, 4, 7). Вообще, чем меньше узлов, тем меньше неизвестных в системе узловых уравнений, тем проще и быстрее она решается. Однако с позиции текстового описания схемы такой подход сложнее, поскольку между двумя сложными узлами может быть включено произвольное количество двухполюсных элементов с произвольной полярностью. Соответствующая строка описания будет иметь довольно громоздкий вид.

В отличие от этой ситуации, между двумя простыми узлами может быть включен *только один элемент*, что упрощает описание. Поэтому, несмотря на то, что использование простых узлов несколько увеличивает количество неизвестных, это понятие широко используется в компьютерных программах. Кроме этого, по найденным потенциалам простых узлов сразу определяются напряжения на всех элементах схемы.

Итак, под узлом будем понимать место соединения 2-х или более элементов.

Ветвь — участок электрической цепи, заключенный между двумя узлами. Тогда из принятого определения узла следует, что каждый двухполюсный элемент является ветвью. Таким образом, схема рис. 2.1 содержит 10 ветвей. Каждая ветвь характеризуется напряжением и током. Токи некоторых ветвей могут совпадать. Например, ток ветви 1-6 равен току ветви 6-3, так как эти ветви соединены последовательно. То же самое относится к ветвям 7-5 и 5-3.

Отметим, что при традиционном определении узла (сложный узел), ветвей будет меньше (8), поскольку каждое последовательное соединение ($C7-R7$ и $R4-E4$) будет учитываться как одна ветвь.

Сечение — множество ветвей, удаление которых из схемы делит ее на две под-схемы, не соединенные между собой. Наиболее быстрый способ выявления сечения состоит в проведении замкнутой поверхности, рассекающей схему на две несвязные части. Например, в схеме рис. 2.1 проведем поверхность $S1$, след которой показан пунктиром на рис. 2.2.

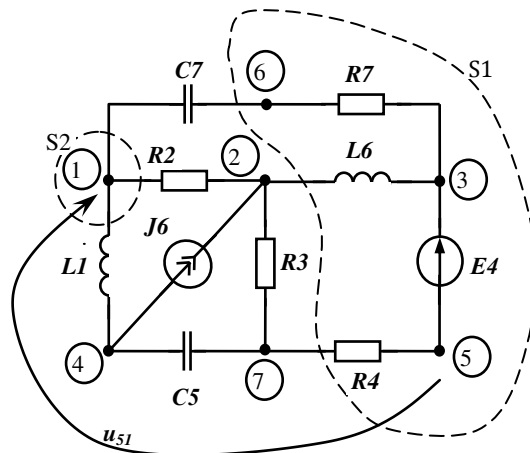


Рис. 2.2. Некоторые сечения схемы рис. 2.1

Нетрудно заметить, что после удаления ветвей с элементами $R4$, $L6$, $C7$, пересеченных поверхностью, схема распадается на две несвязные части, показанные на рис. 2.3

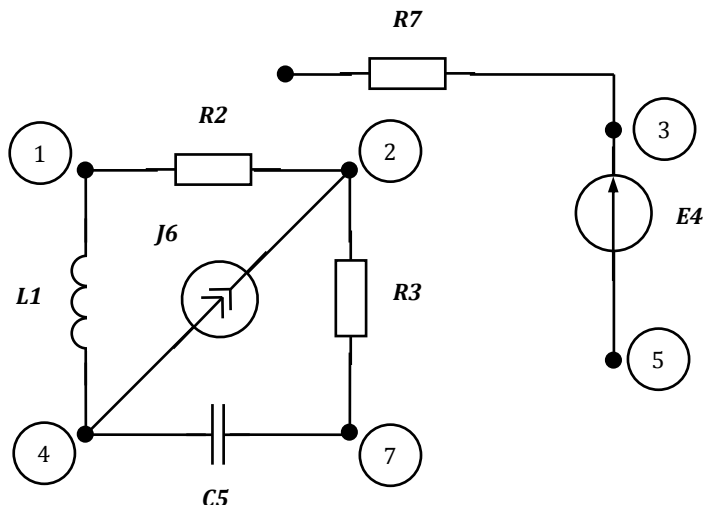


Рис. 2.3. Две несвязные части схемы рис. 2.1, образовавшиеся после удаления рассеченных поверхностью $S1$ ветвей с элементами $R4$, $L6$, $C7$

Следовательно, согласно определению, ветви $R4$, $L6$, $C7$ образуют сечение.

В частном случае несвязной частью схемы может быть один из ее узлов. При этом сечением является множество ветвей, подключенных к этому узлу. На рис.2.2 такое сечение обозначено как $S2$. Если удалить ветви $L1$, $R2$, $C7$, то получим две части, одной из которых является узел1.

Контур — замкнутый путь, проходящий через несколько ветвей и узлов разветвленной схемы. Замкнутость пути можно толковать в электрическом и геометрическом смысле. Например, контур 1-6-3-2-1 на рис.2.2 замкнут электрически, т.е. представляет собой замкнутую последовательность ветвей. Еще один пример электрически замкнутого контура — 7-5-3-6-1-2-7.

При геометрически замкнутом контуре учитывается наличие напряжений между двумя узлами цепи. Например, если обозначить стрелкой напряжение u_{51} , то контур 1-2-3-5-1 будет замкнут геометрически.

2.3. Составление текстового SPICE-описания.

Подсхемы

Схему можно задать не только графически, но и в виде текста, например на SPICE, что менее наглядно, но более компактно и не зависит от особенностей начертания УГО в различных стандартах. Составим текстовое описание схемы рис. 2.1 по правилам, приведенным во Введении (см. вывод 4).

1. Перечертим схему, обозначив узлы прежними номерами, которые теперь будут являться именами узлов (рис. 2.4). В качестве базисного (заземленного) узла выберем узел 7 и поэтому присвоим ему имя «0» (ноль, а не буква O). Следовательно, его потенциал будет равен нулю. Вместо 7-го можно было заземлить любой другой узел.

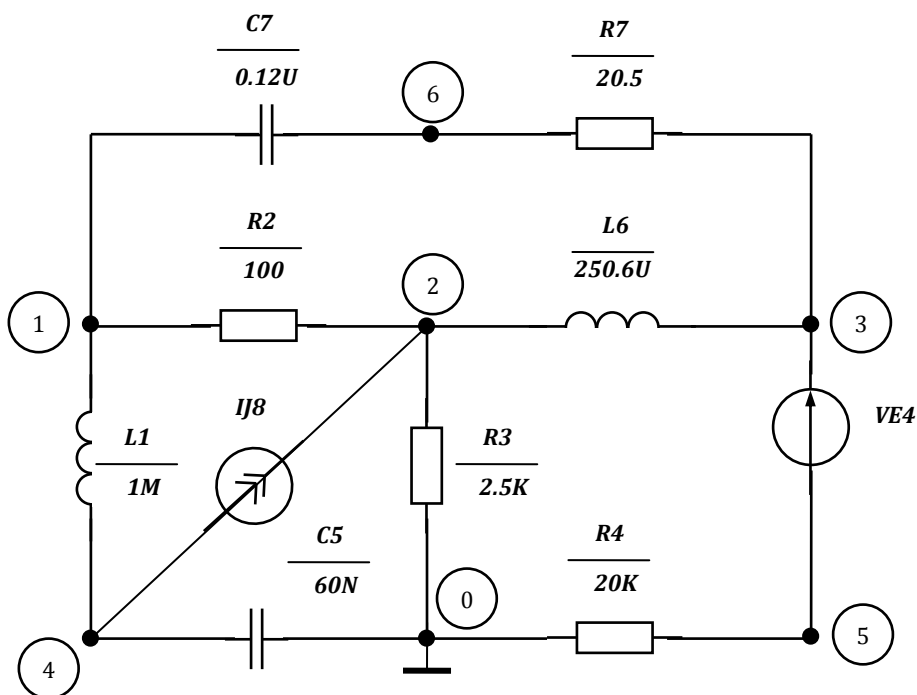


Рис. 2.4. Схема рис. 2.1 в SPICE-обозначениях

2. Присвоим имена элементам согласно правилам, приведенным в главе 1, и нанесем их на схему.

3. Озаглавим текстовое описание как PRIMER 2.1. Ниже запишем строки-описания элементов согласно правилам, изложенным в главе 1. Для наглядности сгруппируем их по типам элементов, поместив в текст комментарии (строки со звездочками). Для определенности предположим, что для реактивных элементов заданы нулевые начальные условия ($IC=0$). Поскольку зависимости источников от времени не заданы, в описании для них указаны только узлы подключения. Итак, используя правила, приведенные в главе 1, получим:

PRIMER 2.1

*R-elements

R2 1 2 100

R3 2 0 2.5K

R4 0 5 20K

R7 3 6 20.5

*L-elements

L1 1 4 1M IC=0

L6 2 3 250.6U IC=0

*C-elements

C5 4 0 60N IC=0

C7 6 1 0.12U IC=0

*Istochniki

VE4 3 5

IJ6 4 2

.END

4. Этот текст наберем в редакторе Блокнот и сохраним в папке cirfiles в виде текстового primer2_1.cir. Отметим, что в описании нет директив, задающих вид анализа схемы, поскольку параметры источников не заданы. Поэтому загрузка этого файла в WinSpice3 не вызовет никаких действий в программе, направленных на расчет схемы.

Запустим WinSpice3 и выполним команду **Open** из меню **File**. В открывшемся стандартном диалоговом окне перейдем в папку cirfiles, содержащую файл primer2_1.cir, и откроем его. Это приведет к автоматическому запуску программы на счет и появлению в окне следующего текста (информационные сообщения, начинающиеся с 3-х «звездочек» опущены)

```
WinSpice 1 -> cd
Current directory: C:\cirfiles
WinSpice 2 -> source "primer2_1.cir"
Reading .\primer2_1.cir
NOTE: This is a Spice2 circuit file
Spice3 commands added:-
.control
destroy all
set units=degrees
.endc

Circuit: PRIMER 2.1 (ris. 2.1)
Executing commands ...
Command execution done.
WinSpice 3 ->
```

В результате в оперативную память компьютера будут введены данные, соответствующие схеме замещения, но система уравнений не формируется, так как не заданы параметры источников и вид анализа.

Итак, в схеме рис. 2.4 и тексте файла primer2_1.cir заключена одна и та же информация. Очевидно, по тексту можно всегда восстановить схему, то есть между ними существует взаимнооднозначное соответствие.

Схему в SPICE3 можно задать не только соединением простейших двухполюсных элементов, но и объединением отдельных подсхем. *Подсхема* — это часть схемы, имеющая обычно много полюсов, и поэтому относящаяся к многополюсникам. Иногда используют термин «подцепь», что является дословным переводом с английского слова «subcircuit».

Выше было показано разбиение схемы рис. 2.2 на две подсхемы (рис. 2.3) в результате сечения поверхностью *S1*. Опишем их согласно правилам SPICE3. Заголовок подсхемы описывается директивой.

.SUBCKT subname N1 < N2 N3...>

где **subname** — имя подсхемы; **N1 < N2 N3...>** — внешние полюсы подсхемы. Ни один из полюсов не может иметь имя «0».

После заголовка располагаются строки — описания элементов, входящих в подсхему. Их количество не ограничено. Директивы в описании подсхемы не допускаются. Исключением является сама директива **.SUBCKT**. Таким образом, описание подсхемы может включать в себя описание другой подсхемы (вложенные подсхемы). Следует подчеркнуть, что имена узлов, используемые в описании подсхемы, являются *локальными*, то есть они определены только внутри самого описания. Поэтому одноименные узлы могут быть *разными* реальными узлами схемы, если их имена используются в описаниях схемы и подсхемы. Во избежание путаницы, лучше в описании подсхемы

использовать уникальные имена узлов. Узел «0» (земля) всегда является глобальным. Описание подсхемы заканчивается директивой.

.ENDS <subname>.

Имя subname необходимо указывать только в случае вложенных подсхем, что обозначает завершение описания данной подсхемы. При отсутствии вложенности имя subname можно опустить.

Итак, в общем случае, описание подсхемы имеет вид:

.SUBCKT subname N1 < N2 N3...>
Описание подсхемы, включающее, возможно, вложенные подсхемы
.ENDS <subname>

В качестве примера опишем подсхемы, показанные на рис. 2.3. Присвоим им имена PODS1 и PODS2, а также изменим имена узлов на буквенные (рис. 2.5)

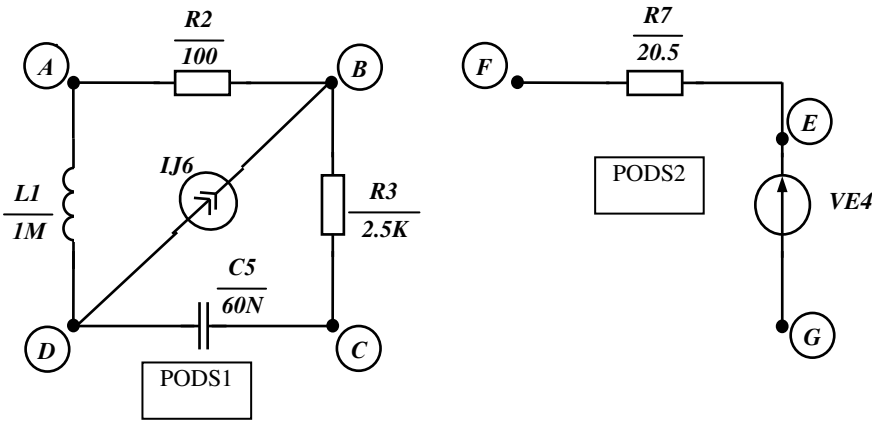


Рис. 2.5. Подсхемы схемы рис. 2.1

Текстовые описания подсхем PODS1 и PODS2 имеют вид:

```
.SUBCKT PODS1 A B C
R2 A B 100
R3 B C 2.5K
L1 A D 1M
C5 D C 60N
IJ6 D B
.ENDS
```

```
.SUBCKT PODS2 F E G
R7 F E 20.5
VE4 E G
```

.ENDS

В качестве внешних узлов подсхем указаны A, B, C, F, E, G, так как именно через эти узлы можно объединить подсхемы в исходную схему рис. 2.2.

Обращение к подсхемам из описания основной схемы осуществляется предложением

YYYYYYYY N1 < N2, N3...> subname

где **YYYYYYYY** — имя псевдо-элемента, являющегося экземпляром подсхемы subname;

N1 < N2, N3.....> — узлы схемы к которым подключается экземпляр подсхемы subname (глобальные узлы).

Обращения к вложенным подсхемам могут содержаться в описаниях подсхем.

Приведем полное текстовое описание схемы рис.2.4, использующее подсхемы PODS1 и PODS2

PRIMER 2.2

.SUBCKT PODS1 A B C

R2 A B 100

R3 B C 2.5 K

L1 A D 1M

C5 D C 60N

IJ6 D B

.ENDS

*

.SUBCKT PODS2 F E G

R7 F E 20.5

VE4 E G

.ENDS

*

* SHEMA RIS. 2.4

C7 1 6 0.12U

L6 2 3 250.6U

R4 5 0 20K

XP1 1 2 0 PODS1

XP2 6 3 5 PODS2

.END

Трехполюсные псевдо — элементы XP1 и XP2 представляют собой экземпляры подсхем PODS1 и PODS2 соответственно.

В предложениях — обращениях к подсхемам указаны реальные номера узлов основной схемы, к которым они подключены. В процессе раскрытия подсхем программой локальные имена узлов заменяются реальными и образуется полное описание.

Подсхемы целесообразно применять в следующих случаях:

1) в процессе разработки схемы одна ее часть подвергается интенсивным изменениям, а другая — неизменна. Неизменяемую часть можно оформить в виде подсхемы, что сократит текст описания и уменьшит вероятность ошибок;

2) схема содержит повторяющийся участок (например, лестничная схема (рис. 2.6). В этом случае его целесообразно описать, как подсхему

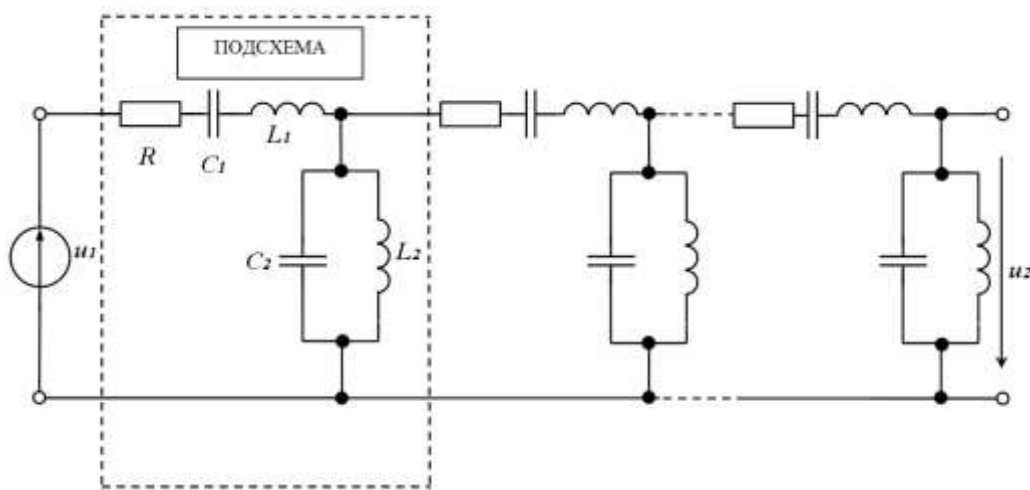


Рис. 2.6. Схема лестничной структуры

3) математические модели различных электрических и электронных устройств часто доступны в виде текстовых SPICE-описаний подсхем. В этом случае их, как правило, называют макромоделями. Например, ведущие фирмы — производители электронных компонентов размещают на своих сайтах целые библиотеки макромоделей. В литературе можно также найти макромоделі электротехнических устройств: трансформаторов, электродвигателей, многополюсников и т. д.

Проводя аналогично с языками программирования, можно заметить, что понятия «подсхема» и «подпрограмма» довольно близки. И хотя подсхемы, в отличие от подпрограмм, не выполняют никаких действий, их использование дает те же преимущества, что и применение подпрограмм в языках высокого уровня: сокращается текст, уменьшается возможность ошибок кодирования, улучшается читаемость и понимание текста, упрощается его модификация.

2.4. Законы Кирхгофа

Законы Кирхгофа являются основными системными законами электрических цепей с сосредоточенными параметрами [1, с. 33].

Первый закон Кирхгофа или закон Кирхгофа для токов (ЗКТ):

Алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в узле, равна нулю в любой момент времени.

$$\sum_k i_k = 0. \quad (2.1)$$

Ток включаются в сумму со знаком «плюс», если он отходит от узла. При направлении тока к узлу используется «минус»¹⁰.

ЗКТ можно сформулировать для сечения:

Алгебраическая сумма токов ветвей сечения равна нулю в любой момент времени.

Ток включаются в сумму (2.1) со знаком «плюс», если он исходит из поверхности, образующей сечение (см. п. 2.2).

Второй закон Кирхгофа или закон Кирхгофа для напряжений (ЗКН):

¹⁰ Разумеется, можно применять и прямо противоположное правило.

Алгебраическая сумма напряжений ветвей в контуре равна нулю в любой момент времени.

$$\sum_k u_k = 0. \quad (2.2)$$

Напряжение ветви включается в сумму со знаком «плюс», если оно совпадает с заранее произвольно выбранным направлением обхода контура. При несовпадении этих направлений используется «минус».

Замечания:

1) оба закона представляют собой линейные однородные алгебраические уравнения;

2) при записи ЗКТ поверхность, образующую сечение, можно рассматривать как узел;

3) формулировки законов (2.1), (2.2) не зависят от типа элементов и поэтому справедливы для любых цепей с сосредоточенными параметрами (линейных, нелинейных, параметрических). Таким образом, линейность цепей обусловлена не законами Кирхгофа, а линейностью основных характеристик идеализированных элементов (см. главу 1).

4) в SPICE запрещаются контуры, состоящие из идеальных источников напряжения и (или) L -элементов, а также узлы и сечения, состоящие из идеальных источников тока и (или) C -элементов. Причины этого будут ясны из главы 3.

Проверим выполнение законов Кирхгофа по результатам расчета цепи постоянного тока примера 1 (схема рис. 2, рис. 3). Запишем ЗКТ для узла 1 с учетом направлений токов, указанных на рис. 3 (постоянные токи обозначаются заглавными буквами):

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0.$$

В SPICE3-коде это выражение имеет вид

$$-@r1[i]+@r2[i]+@r3[i].$$

Проверку выполнения законов Кирхгофа произведем в интерактивном режиме. Запустим WinSpice3 и загрузим файл primer1.cir из папки cirfiles. В командной строке после приглашения введем команду print и уравнение для узла 1 в SPICE3-коде

WinSpice 3 -> print -@r1[i]+@r2[i]+@r3[i]

и нажмем клавишу Enter, после чего ниже появится строка

$$-@r1[i]+@r2[i]+@r3[i] = -3.05311e-16$$

Очевидно, полученный результат пренебрежимо мал и может быть принят за ноль, что соответствует (2.1), т. е. ЗКТ в узле 1 выполняется.

Составим уравнение ЗКН для внешнего контура, включающего обе ЭДС. Согласно (2.2) при выбранном направлении обхода по часовой стрелке имеем (постоянные напряжения и ЭДС обозначаются заглавными буквами):

$$U_{21} + U_{13} = E_1 - E_3.$$

Падения напряжения на элементах $R1$ (U_{21}), $R3$ (U_{13}) могут быть записаны в формах $v(2,1)$ и $v(1,3)$ соответственно. ЭДС источников $E1$ и $E3$ в WinSpice3 могут быть записаны в формах $@ve1[dc]$ и $@ve3[dc]$ соответственно. Подсчитаем левую часть последнего выражения

WinSpice 4 -> print $v(2,1)+v(1,3)$

и нажмем клавишу Enter, после чего ниже появится строка

$$(v(2)-v(1))+(v(1)-v(3)) = 1.500000e+01,$$

т. е. суммарное падение напряжения в контуре составляет 15 В. Отметим, что программа автоматически заменила напряжения соответствующими разностями потенциалов.

Определим суммарную ЭДС контура:

WinSpice 5 -> print $@ve1[dc]-@ve3[dc]$

@ve1[dc]-@ve3[dc] = 1.500000e+01,
т. е. суммарная ЭДС равна тоже 15 В. Таким образом, ЗКН для рассматриваемого контура выполняется.

2.5. Теорема Телледжена, баланс мощности

Непосредственно из закона сохранения энергии вытекает *теорема Телледжена*: алгебраическая сумма мгновенных мощностей всех ветвей электрической цепи равна нулю в любой момент времени

$$\sum_{k=1}^m u_k i_k = 0, \quad (2.3)$$

где m — число ветвей в схеме.

В (2.3) направления полагаются самосогласованными. При этом, как было показано ранее, мощности источников при отдаче энергии отрицательны.

Проверим выполнение теоремы Телледжена по результатам расчета примера 1 (схемы рис. 2, рис. 3). Напряжения источников $E1$ и $E3$ в WinSpice3 могут быть записаны в формах @ve1[dc] и @ve3[dc] соответственно, а токи этих источников — @ve1[i] и @ve3[i]. Напряжение на элементе $R1$ — v(2,1), а ток, протекающий через него — @r1[i]. Аналогичные обозначения позволяют записать напряжения и токи элементов $R2$ и $R3$. Тогда теорема (2.3) для рассматриваемой схемы в SPICE3-коде примет вид

$$@ve1[dc]*@ve1[i]+@ve3[dc]*@ve3[i]+v(2,1)*@r1[i]+v(1,0)*@r2[i]+v(1,3)*@r3[i]$$

Продолжаем предыдущий сеанс работы с программой. В командной строке после команды print введем формулировку теоремы в SPICE3-коде

WinSpice 6 -> print @ve1[dc]*@ve1[i]+@ve3[dc]*@ve3[i] + v(2,1)*@r1[i]+v(1,0)*@r2[i]+v(1,3)*@r3[i]

и нажмем клавишу Enter, после чего ниже появится строка

$$@ve1[dc]*@ve1[i]+@ve3[dc]*@ve3[i]+(v(2)-v(1))*@r1[i]+v(1)*@r2[i]+(v(1)-v(3))*@r3[i] = 1.554312e-15.$$

Очевидно, полученный результат пренебрежимо мал и может быть принят за ноль, что соответствует (2.3).

Иногда применяют несогласованные условно-положительные направления для источников, чтобы отдаваемые мощности были положительными. Для этого направление стрелки тока i на рис. 1.8 необходимо изменить на противоположное. То же самое нужно сделать со стрелкой напряжения u_{ab} на источнике тока (рис. 1.11). Тогда (2.3) можно записать в виде *баланса мощностей*

$$\sum_{k=1}^m P_{ик} = \sum_{k=1}^m P_{пк}, \quad (2.4)$$

где $p_{ик}$ и $p_{пк}$ — мгновенные мощности источника и приемника k -й ветви.

Проверим выполнение баланса мощности по результатам расчета примера 1 (схемы рис. 2, рис. 3). Мощности источников $E1$ и $E3$ при несогласованных направлениях можно получить в формах @ve1[p] и ve3[p] соответственно, а мощности, рассеиваемые на R -элементах — @r1[p], @r2[p], @r3[p]. Сначала вычислим левую часть баланса мощности, т. е. мощность источников:

WinSpice 7 -> print @ve1[p]+@ve3[p].

Нажмем клавишу Enter, после чего ниже появится строка

$$@ve1[p]+@ve3[p] = 1.522727e+01,$$

из которой следует, что источники отдают в цепь суммарную мощность 15,22727 Вт.

Теперь вычислим правую часть баланса мощности, т. е. мощность приемников:

WinSpice 8 -> print @r1[p]+@r2[p]+@r3[p].

Нажмем клавишу Enter, после чего ниже появится строка

@r1[p]+@r2[p]+@r3[p] = 1.522727e+01,

из которой следует, что на R -элементах рассеивается суммарная мощность 15,22727 Вт.

Таким образом, баланс мощности (2.4) выполняется.

Выводы

1. При теоретическом анализе процессов в электрических цепях обычно используют схемы замещения. Основными топологическими понятиями таких схем являются узел (сечение), ветвь и контур.

2. Схему замещения электрической цепи можно задать не только графически, но и в виде текста, например на языке SPICE, что менее наглядно, но более компактно и не зависит от особенностей начертания УГО в различных стандартах. Узлам и элементам цепи присваиваются имена, и составляется текстовое описание, в котором каждая строка задает конкретный элемент.

3. Схему в SPICE3 можно задать не только соединением простейших двухполюсных элементов, но и объединением отдельных подсхем. В SPICE3 заголовок подсхемы описывается директивой.

SUBCKT subname N1 < N2 N3...>

где **subname** — имя подсхемы; **N1 < N2 N3...>** — внешние полюсы подсхемы.

Обращение к подсхемам из описания основной схемы осуществляется предложением

XXXXXX N1 < N2, N3...> subname

где **XXXXXX** — имя псевдо-элемента, являющегося экземпляром подсхемы subname; **N1 < N2, N3...>** — узлы схемы к которым подключается экземпляр подсхемы subname (глобальные узлы).

4. Законы Кирхгофа являются основными системными законами электрических цепей с сосредоточенными параметрами и формулируются в виде линейных однородных алгебраических уравнений.

5. Законы Кирхгофа являются чисто топологическими и не зависят от типа элементов электрической цепи.

6. Первый закон Кирхгофа можно сформулировать не только для узлов, но и для сечений.

7. В SPICE запрещаются контуры, состоящие из идеальных источников напряжения и (или) L -элементов, а также узлы и сечения, образуемые идеальными источниками тока и (или) C -элементами.

8. Для любой электрической цепи выполняется закон сохранения энергии в формах теоремы Телледжена или баланса мощности, что можно использовать для проверки правильности расчетов токов и напряжений.

9. В интерактивном режиме можно использовать @-синтаксис для получения токов и мощностей элементов, а также ЭДС источников напряжения.

Глава 3. ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Если источники в цепи, состоящей из рассмотренных выше элементов, характеризуются неизменными во времени значениями, и процесс можно считать установившимся, то такую цепь называют цепью постоянного тока. В этом случае все токи и напряжения в цепи не зависят от времени. В электронике также применяются эквивалентные понятия «статический режим» и «рабочая точка». Постоянные токи, напряжения, ЭДС, мощности в электротехнике и электронике принято обозначать *заглавными* буквами (I, U, E, P).

Реактивные элементы (L и C) не влияют на работу цепи постоянного тока. Ранее было показано, что в этом случае L -элемент можно заменить закороткой, а C -элемент — разрывом, т. е. отключить от схемы (см. пп. 1.1.2, 1.1.3).

Проверим это утверждение на примере схемы рис. 3.1. На рис. 3.2 изображена эта же схема, подготовленная к составлению SPICE-описания

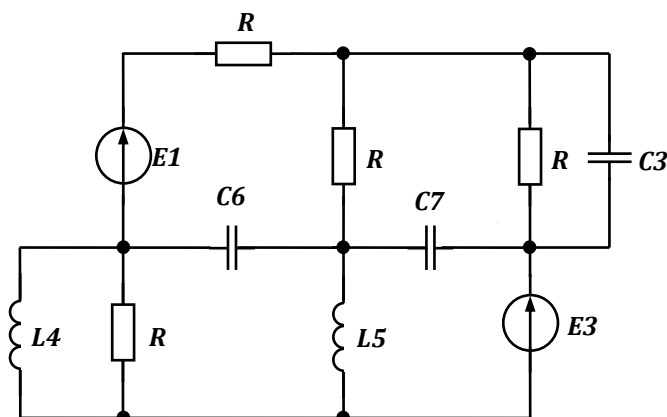


Рис. 3.1. Схема цепи с реактивными элементами на постоянном токе: $R_1=10$ Ом; $R_2=20$ Ом; $R_3=30$ Ом; $R_4=2$ кОм; $L_4=250$ мкГн; $L_5=2,5$ мГн; $C_3=20$ пФ; $C_6=10$ нФ; $C_7=2,5$ мкФ; $E_1=20$ В; $E_3=5$ В

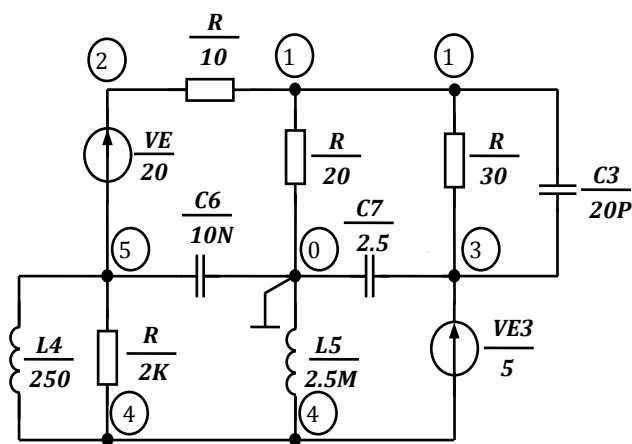


Рис. 3.2. Схема рис. 3.1 в SPICE-обозначениях

Текстовое описание (см. ниже) сохранено в файле primer3_1.cir, папка cirfiles.

```

PRIMER 3.1
* R-elements
R1 2 1 10
R2 1 0 20
R3 1 3 30
R4 5 4 2K
* L-elements
L4 5 4 250U
L5 0 4 2.5M
* C-elements
C3 1 3 20P
C6 5 0 10N
C7 3 0 2.5U
* Istochniki
VE1 2 5 DC 20
VE3 3 4 DC 5
* Analiz po postoyannomu toku
.OP
.END

```

Напомним, что директива .OP задает режим расчета цепи по постоянному току.

Запустим WinSpice3 и выполним команду **Open** из меню **File**. В открывшемся стандартном диалоговом окне перейдем в папку cirfiles, содержащую файл primer3_1.cir, и откроем его. Это приведет к автоматическому запуску программы на счет и появлению в окне следующего текста:

```

WinSpice 1 -> cd
Current directory: C:\cirfiles
WinSpice 2 -> source "primer3_1.cir"
Reading .\primer3_1.cir
NOTE: This is a Spice2 circuit file
Spice3 commands added:-
.control
destroy all
set units=degrees
save all
op
print all
.endc

```

Circuit: PRIMER 3.1

```

TEMP=27 deg C
DC Operating Point ... 100%

```

```

v(1) = 1.181818e+01
v(2) = 2.000000e+01
v(3) = 5.000000e+00
v(4) = -3.55271e-15
v(5) = -3.55271e-15
l4#branch = -8.18182e-01

```



```

l5#branch = 5.909091e-01
ve1#branch = -8.18182e-01
ve3#branch = 2.272727e-01
WinSpice 3 ->

```

Данный текст имеет ту же структуру, что и рассмотренный во введении (пример 1). Команды открытия файла и блок SPICE3-команд, заключенный между директивами **.control** и **.endc**, генерируются автоматически. Далее следует заголовок описания, информационные сообщения и собственно результаты анализа цепи по постоянному току.

Значения потенциалов и токов совпадают с результатами примера, рассмотренного во введении (см. рис. 2). Действительно, если заменить закоротками все L -элементы на рис. 3.1, а C -элементы отключить, то полученная схема совпадет с рис. 2. Отметим, что $R4$ закорочено индуктивным элементом $L4$, следовательно, $R4$ можно удалить из схемы, заменив его закороткой.

Потенциалы $V(4)$ и $V(5)$ пренебрежимо малы ($-3,55271 \cdot 10^{-15}$), поскольку узлы 4 и 5 соединены с узлом 0 через индуктивности-закоротки L_4 и L_5 . Наряду с токами источников напряжения $ve1\#branch$ и $ve3\#branch$ выводятся также токи, протекающие через L -элементы ($l4\#branch$, $l5\#branch$).

Итак, на схемах замещения постоянного тока могут присутствовать только R -элементы и источники. На примере схем постоянного тока проще пояснить принципы, свойства и методы расчета электрических цепей. Начнем рассмотрение с наиболее простых цепей постоянного тока, содержащих *только один* независимый источник напряжения или тока.

3.1. Цепи с одним источником электрической энергии, системные функции цепи

Цепи постоянного тока с одним источником электрической энергии имеют большое практическое и теоретическое значение. Для таких цепей, кроме обычной проблемы анализа, заключающейся в определении токов, напряжений и мощностей, могут быть поставлены и другие задачи.

Рассмотрим одну из них (рис. 3.3).

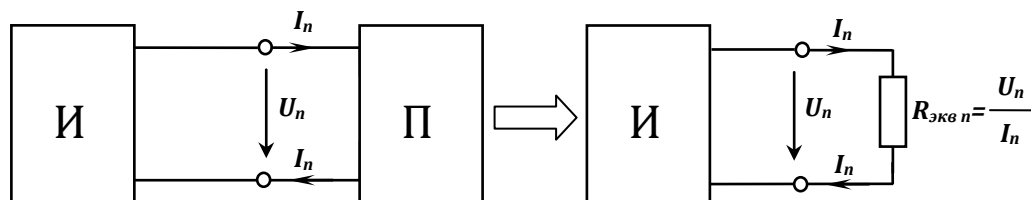


Рис. 3.3. К определению понятия эквивалентного сопротивления двухполюсника

По отношению к зажимам источника $И$ цепь представляет собой пассивный резистивный двухполюсник $П$. Следовательно, можно рассматривать задачу определения эквивалентного сопротивления¹¹ $R_{экв}$ данного двухполюсника. Предположим, что идеальный источник напряжения с ЭДС E_n включен последовательно в ветвь с номе-

¹¹ В данном случае также можно использовать понятие «входное сопротивление двухполюсника относительно зажимов источника».

ром n . Согласно закону Ома величину $R_{\text{экв.п}}$ можно определить по отношению напряжения к току:

$$R_{\text{экв.п}} = \frac{E_n}{I_n}. \quad (3.1)$$

Эквивалентная проводимость двухполюсника — величина, обратная эквивалентному сопротивлению, т.е

$$G_{\text{экв.п}} = \frac{I_n}{E_n} = R_{\text{экв.п}}^{-1}. \quad (3.2)$$

Если цепь предназначена для передачи энергии или информации, то напряжение или ток источника рассматривается как входная (заданная) величина, а напряжение или ток некоторой *другой ветви* рассматривается в качестве выходной величины. Отношение выходной величины к входной величине называют *передаточной функцией* или *функцией передачи*.

Если передаточная функция безразмерна и является постоянной величиной, то говорят о коэффициенте передачи (коэффициент передачи напряжения, коэффициент передачи тока). Если она имеет размерность, то используется название соответствующей величины (передаточное сопротивление, передаточная проводимость).

На рис. 3.4 входной является n -я ветвь, в которую последовательно включен источник напряжения с ЭДС E_n , а выходной — k -я ветвь.

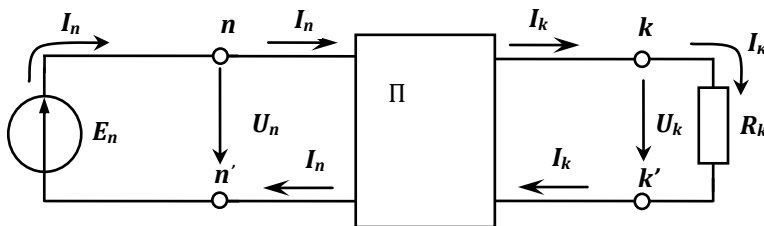


Рис. 3.4. К определению понятия передаточной функции

Если выходной величиной считать напряжение k -й ветви, то можно определить коэффициент передачи напряжения $K_{U_{kn}}$ и передаточное (взаимное) сопротивление

R_{kn} по формулам

$$K_{U_{kn}} = \frac{U_k}{E_n}, \quad R_{kn} = \frac{U_k}{I_n}. \quad (3.3)$$

Входное сопротивление n -й ветви определяется формулой (3.1) и обозначается R_{nn} .

Если выходной величиной считать ток k -й ветви, то можно определить коэффициент передачи тока $K_{I_{kn}}$ и передаточную (взаимную) проводимость G_{kn} по формулам

$$K_{I_{kn}} = \frac{I_k}{I_n}, \quad G_{kn} = \frac{I_k}{E_n}. \quad (3.4)$$

Входная проводимость n -й ветви определяется формулой (3.2) и обозначается G_{nn} . Отметим, что $G_{nn} = R_{nn}^{-1}$, но $G_{kn} \neq R_{kn}^{-1}$.

Рассмотренные выше величины объединяют под общим названием «системные функции цепи». Они не зависят от параметров источника, а определяются исключи-

тельно схемой и параметрами элементов цепи. Если в схеме рис. 3.4 вместо источника напряжения включить источник тока, то в формулах (3.1) — (3.4) под E_n следует понимать напряжение на источнике тока, а под I_n — его ток. Входные сопротивления и проводимости всегда положительны, поскольку направления тока и напряжения на входе всегда согласованы. Передаточные функции могут быть как положительными, так и отрицательными в зависимости от выбора условно-положительных направлений на входе и выходе.

Для цепи постоянного тока, состоящей из пассивных элементов, всегда $K_{U_{kn}} \leq 1$, $K_{I_{kn}} \leq 1$. Следовательно, усиление в данной цепи по напряжению, току и мощности невозможно. С практической точки зрения рассматриваемая цепь с выделенным входом и выходом может рассматриваться как *делитель* напряжения или тока. Действительно, поскольку $K_{U_{kn}} \leq 1$, $K_{I_{kn}} \leq 1$, выходные величины всегда меньше входных, что и отражается термином «делитель».

Рассмотрим возможности SPICE по отношению к задачам определения системных функций. Существуют два способа их определения: имитация физического эксперимента и применение специализированного SPICE-анализа.

Рассмотрим применение обоих способов на простом примере. Пусть требуется определить системные функции цепи, показанной на рис. 3.5.

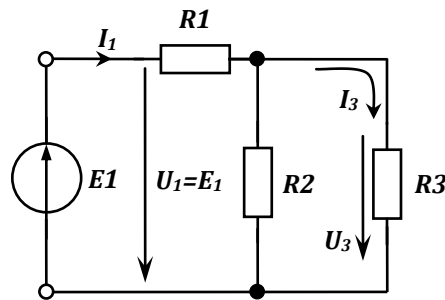


Рис. 3.5. Цепь постоянного тока с одним источником:

$$R_1 = 60 \text{ Ом}; R_2 = 80 \text{ Ом}; R_3 = 100 \text{ Ом}$$

Входной является ветвь с источником, а выходной — ветвь с R_3 . Выбранные условно-положительные направления для входных и выходных величин указаны на схеме.

3.1.1. SPICE-модель эксперимента по определению системных функций цепи

В реальном эксперименте подключаются электроизмерительные приборы, как показано на рис. 3.6, снимаются их показания и по ним определяются системные функции с помощью формул (3.1)–(3.4). Полярности включения приборов соответствуют условно-положительным направлениям, показанным на рис. 3.5.

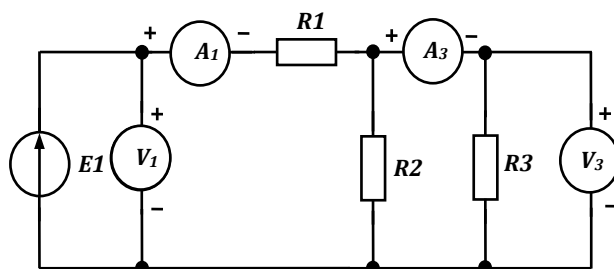


Рис. 3.6. Схема проведения эксперимента по определению системных функций:

V_1 и V_3 — входной и выходной вольтметры соответственно;

A_1 и A_3 — входной и выходной амперметры соответственно

Перечертим схему в SPICE-обозначениях (рис. 3.7). Во входную и выходную цепь включим «амперметры» — источники напряжения VA1 и VA3 с нулевыми значениями ЭДС. Напряжение источника зададим равным 1 В.

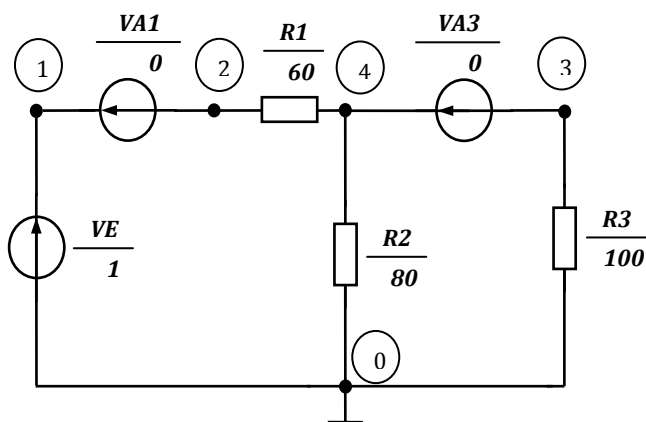


Рис. 3.7. Цепь постоянного тока рис. 3.5 в SPICE-обозначениях

Отметим, что полярности включения источников VA1 и VA3 соответствуют полярностям включения амперметров на рис. 3.6. Необходимость имитации вольтметров отсутствует, поскольку SPICE вычисляет потенциалы узлов, а через них можно найти любое напряжение.

Составим текстовое описание (файл primer3_2.cir, папка cirfiles)

PRIMER 3.2

*

* Resistors

R1 2 4 60

R2 4 0 80

R3 3 0 100

*

* Ampermeters

VA1 1 2 DC 0

VA3 4 3 DC 0

*

* Istochnik

VE 1 0 DC 1

* Analiz po postoyannomu toku

.OP

.END

После загрузки файла primer3_2.cir в WinSpice3 получим следующие результаты:

WinSpice 1 -> cd

Current directory: C:\cirfiles

WinSpice 2 -> source "primer3_2.cir"

Reading.\primer3_2.cir

NOTE: This is a Spice2 circuit file

Spice3 commands added:-

.control

destroy all

set units=degrees

save all

op

print all

.endc

Circuit: PRIMER 3.2

TEMP=27 deg C

DC Operating Point ... 100%

v(1) = 1.000000e+00

v(2) = 1.000000e+00

v(3) = 4.255319e-01

v(4) = 4.255319e-01

va1#branch = 9.574468e-03

va3#branch = 4.255319e-03

ve#branch = -9.57447e-03

Поясним полученные результаты. Потенциал $v(1)$ первого узла равен ЭДС источника 1 В и равен потенциалу второго узла $v(2)$, поскольку «амперметр» VA1 представляет собой короткую. Аналогично $v(3) = v(4) = 4.255319e-01$, что соответствует выходному напряжению U_3 .

Ток первого «амперметра» $va1\#branch = 9.574468e-03$ соответствует входному току I_1 . Ток второго «амперметра» $va3\#branch = 4.255319e-03$ соответствует выходному току I_3 . Ток $ve\#branch$ источника VE отрицателен, так как источник отдает энергию в цепь. По абсолютной величине этот ток равен току включенного последовательно с ним первого «амперметра». Округляя до пяти значащих цифр, получим:

$E_1 = 1 \text{ В}; I_1 = 9,5745 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 9,5745 \text{ мА}; U_3 = 4,2553 \cdot 10^{-1} \text{ В} = 0,42553 \text{ В}; I_3 = 4,2553 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 4,2553 \text{ мА}.$

Подставляя полученные результаты в (3.1)–(3.4), вычислим системные функции

$$R_{\text{экв.1}} = R_{11} = \frac{E_1}{I_1} = \frac{1}{9,5745 \cdot 10^{-3}} = 104,44 \text{ Ом};$$

$$G_{\text{экв.1}} = G_{11} = \frac{I_1}{E_1} = \frac{9,5745 \cdot 10^{-3}}{1} = 9,5745 \cdot 10^{-3} \text{ СМ} = 9,5745 \text{ мСМ};$$

$$K_{U_{31}} = \frac{U_3}{E_1} = \frac{0,42553}{1} = 0,42553; \quad R_{31} = \frac{U_3}{I_1} = \frac{0,42553}{9,5745 \cdot 10^{-3}} = 44,444 \text{ Ом};$$

$$K_{I_{31}} = \frac{I_3}{I_1} = \frac{4,2553 \cdot 10^{-3}}{9,5745 \cdot 10^{-3}} = 0,44444;$$

$$G_{31} = \frac{I_3}{E_1} = \frac{4,2553 \cdot 10^{-3}}{1} = 4,2553 \cdot 10^{-3} \text{ См} = 4,2553 \text{ мСм}.$$

Эти расчеты можно выполнить в интерактивном режиме WinSpice3. Например, для определения R_{31} можно ввести команду

WinSpice 3 -> print v(3)/va1#branch

и получить результат

v(3)/va1#branch = 4.444444e+01

Если вместо источника напряжения E подключить источник тока J величиной 1А, то в файле строку

VE 1 0 DC 1

надо заменить описанием источника тока

IJ 0 1 DC 1.

Обратите внимание, что ток источника направлен от узла 0 к узлу 1, для соответствия условно-положительному направлению тока I_1 на рис. 3.5. После загрузки измененного файла в WinSpice3 получим следующие результаты:

v(1) = 1.044444e+02

v(2) = 1.044444e+02

v(3) = 4.444444e+01

v(4) = 4.444444e+01

va1#branch = 1.000000e+00

va3#branch = 4.444444e-01

Вместо ЭДС E_1 в (3.1)-(3.4) будем подставлять потенциал первого узла $v(1)$, т. е. напряжение на источнике тока U_J . Итак, в данном случае имеем

$U_J=104,44 \text{ В}; I_1=J=1 \text{ А}; U_3=44,444 \text{ В}; I_3=0,44444 \text{ А}.$

Подстановка этих данных в (3.1)-(3.4) дает те же значения системных функций, что были получены при использовании источника напряжения. Таким образом, подтверждается факт независимости системных функций от типа источника. Вместо использованных единичных значений параметров источников можно было бы задать любые другие значения и это не повлияло бы на результаты (проверьте самостоятельно!). Однако значения источников, равные единице, несколько упрощают определение системных функций и могут рассматриваться как тестовые воздействия. Недостатком имитации физического эксперимента является необходимость дополнительных расчетов.

3.1.2. Применение специализированного *spice*-анализа системных функций цепи (директива *.TF*)

Поскольку задача расчета системных функций встречается весьма часто, в SPICE имеется специальный режим, который активируется директивой *.TF* (Transfer Function — передаточная функция). Директива имеет следующий вид:

.TF OUTVAR INSRC,

где OUTVAR — имя выходной величины; INSRC — имя входного источника напряжения или тока.

Данная директива активирует расчет одной передаточной функции, а также входного и выходного сопротивлений. Если выходной величиной должен быть ток, то это ток через источник напряжения с нулевым значением (т. е. через выходной «амперметр»). Подключение входного «амперметра» не обязательно. Можно также не задавать величину входного источника, т.к. цепь линейна и системные функции не зависят от входной величины.

SPICE-схема примера рис.3.5 для рассматриваемого случая приведена ниже

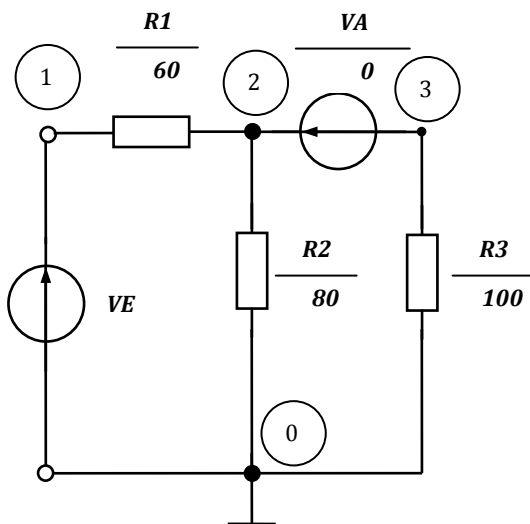


Рис. 3.8. Цепь постоянного тока рис. 3.5 в SPICE-обозначениях

Определим коэффициент передачи напряжения $K_{U_{31}}$ и эквивалентное (входное) сопротивление R_{11} относительно зажимов источника. Соответствующее текстовое описание имеет вид (цепной файл primer3_3.cir, папка cirfiles)

```
*PRIMER 3.3
VE 1 0
VA 2 3 DC 0
R1 1 2 60
R2 2 0 80
R3 0 3 100
.TF V(3,0) VE
.END
```

В директиве .TF в качестве выходной величины указано напряжение $V(3,0)$ на 3-й ветви, содержащей $R3$. Вторым аргумент директивы задает имя входного источника, в данном случае VE . Результаты расчета

Circuit: *PRIMER 3.3

TEMP=27 deg C

Warning: ve: has no value, DC 0 assumed

Transfer function analysis ...

transfer_function = 4.255319e-01

output_impedance_at_v(3,0) = 2.553191e+01

ve#input_impedance = 1.044444e+02

Программа выдает предупреждение (warning: ve:...) о том, что величина ЭДС источника VE не задана и автоматически полагается равной нулю. Как было отмечено выше, при использовании директивы .TF величину источника можно не задавать.

Строка transfer_function = 4.255319e-01 содержит результат расчета искомого коэффициента передачи напряжения, т. е. $K_{U31}=0,42553$, что совпадает с величиной, найденной ранее (см. пп.3.1.1).

Строка output_impedance_at_v(3,0) = 2.553191e+01 содержит результат расчета выходного сопротивления по отношению к узлам 3 и 0 при обнуленном источнике VE . Смысл этой величины станет ясен после изучения теоремы об активном двухполюснике.

Строка ve#input_impedance = 1.044444e+02 содержит результат расчета эквивалентного (входного) сопротивления относительно зажимов источника VE , т. е. $R_{экв1} = R_{11}=104,44$ Ом. Результат совпадает с полученным ранее значением.

Определим передаточную проводимость G_{31} , для чего заменим в файле primer3_3.cir директиву

.TF V(3,0) VE директивой .TF I(VA) VE.

В данном случае в качестве выходной величины указан ток через выходной «амперметр». Результаты имеют вид

Circuit: *PRIMER 3.3

TEMP=27 deg C

Warning: ve: has no value, DC 0 assumed

Transfer function analysis ...

transfer_function = 4.255319e-03

va#output_impedance = 1.000000e+20

ve#input_impedance = 1.044444e+02

Строка transfer_function = 4.255319e-03 содержит результат расчета искомой передаточной проводимости, т. е. $G_{31}=0,0042553$ См=4,2553 мСм, что совпадает с величиной, найденной ранее (см. п.3.1.1).

Строка va#output_impedance = 1.000000e+20 не имеет смысла, поскольку не заданы зажимы относительно которых определяется выходное сопротивление.

Строка ve#input_impedance = 1.044444e+02 повторяется и уже описана выше.

Определим коэффициент передачи тока K_{I31} , для чего заменим в файле primer3_3.cir источник напряжения источником тока IJ и директиву .TF I(VA) VE директивой .TF I(VA) IJ. Текст в файле после изменений:

*PRIMER 3.3

IJ 0 1


```

VA 2 3 DC 0
R1 1 2 60
R2 2 0 80
R3 3 0 100
.TF I(VA) IJ
.END

```

В директиве .TF в качестве выходной величины указан ток через выходной «амперметр». Второй аргумент директивы задает имя входного источника, в данном случае IJ. Результаты расчета:

Circuit: *PRIMER 3.3

```

TEMP=27 deg C
Warning: Source ij has no value, DC 0 assumed

```

```

Transfer function analysis ...
transfer_function = 4.444444e-01
ij#input_impedance = 1.044444e+02
va#output_impedance = 1.000000e+20

```

Строка `transfer_function = 4.444444e-01` содержит результат расчета искомого коэффициента передачи тока, т. е. $K_{I3I}=0,44444$, что совпадает с величиной, найденной ранее (см. п.3.1.1).

Строка `ij#input_impedance = 1.044444e+02` содержит результат расчета эквивалентного (входного) сопротивления относительно зажимов источника IJ, т. е. $R_{экв1} = R_{1I}=104,44$ Ом. Результат совпадает с полученным ранее значением.

Определим передаточное сопротивление R_{3I} , для чего заменим в файле `primer3_3.cir` директиву `.TF I(VA) IJ` директивой `.TF V(3,0) IJ`. В данном случае в качестве выходной величины указано напряжение $V(3,0)$ на 3-й ветви, содержащей $R3$. Результаты имеют вид:

Circuit: *PRIMER 3.3

```

TEMP=27 deg C
Warning: Source ij has no value, DC 0 assumed

```

```

Transfer function analysis ...
transfer_function = 4.444444e+01
ij#input_impedance = 1.044444e+02
output_impedance_at_v(3,0) = 4.444444e+01

```

Строка `transfer_function = 4.444444e+01` содержит результат расчета искомого передаточного сопротивления, т. е. $R_{3I}=44,444$ Ом, что совпадает с величиной, найденной ранее (см. п.3.1.1).

Строка `ij#input_impedance = 1.044444e+02` имеет прежний смысл.

Строка `output_impedance_at_v(3,0) = 4.444444e+01` одержит результат расчета выходного сопротивления по отношению к узлам 3 и 0 при обнуленном источнике тока IJ. Смысл этой величины станет ясен после изучения теоремы об активном двухполюснике. Видно, что значение выходного сопротивления имеет иное значение по сравнению со случаем, когда на входе был источник напряжения. По этой причине выходное сопротивление обычно не относят к системным функциям, которые не зависят от типа источника.

Рассмотренная схема рис. 3.5 весьма проста и, разумеется, в данном случае проще найти системные функции «на бумажке», применяя простые правила преобразования последовательного и параллельного соединений. Так, например, эквивалентное (входное) сопротивление относительно зажимов источника определяется формулой

$$R_{\text{экв1}} = R_{11} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 60 + \frac{80 \cdot 100}{80 + 100} = 104,44 \text{ Ом.}$$

Коэффициент передачи напряжения $K_{U_{31}}$ выражается соотношением

$$K_{U_{31}} = \frac{R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} = \frac{80 \cdot 100}{60 \cdot 80 + 60 \cdot 100 + 80 \cdot 100} = 0,42553.$$

Результат совпадает с полученными ранее значениями. По подобным формулам можно найти и остальные системные функции.

Однако если цепь достаточно сложна, то ручные вычисления становятся затруднительными и применение SPICE иногда является единственно возможным способом получения результата. На рис. 3.9 приведена пассивная схема, для которой надо определить эквивалентные сопротивления относительно узлов a, c (R_{ac}) и d, b (R_{db}).

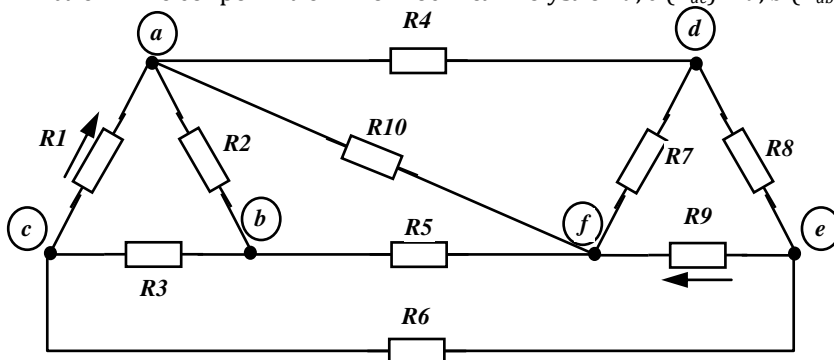


Рис. 3.9. Пассивная резистивная цепь: $R_1=R_2=R_3=30 \text{ Ом}$; $R_4=R_5=6 \text{ Ом}$; $R_6=2,8 \text{ Ом}$; $R_7=10 \text{ Ом}$; $R_8=R_9=20 \text{ Ом}$; $R_{10}=15,5 \text{ Ом}$

Выберем в качестве базисного узел f . Текстовое описание для случая определения R_{ac} (файл `primer3_4.cir`, папка `cirfiles`) имеет вид

```
PRIMER 3.4
* RESISTORS
R1 A C 30
R2 A B 30
R3 C B 30
R4 A D 6
R5 B 0 6
R6 C E 2.8
R7 0 D 10
R8 D E 20
R9 0 E 20
R10 A 0 15.5
* ISTOCHNIK
VE A C DC 1
*VE D B DC 1
```

* NAHODIM VHODNOE SOPROTIVLENIE

.TF V(0,B) VE

.END

Источник VE с ЭДС 1 В подключен к узлам *a* и *c*, относительно которых надо определить R_{ac} . В директиве .TF в качестве выходной величины произвольно указано напряжение между узлами 0 и *b*, хотя можно было бы задать любое другое допустимое напряжение.

Вариант подключения VE между узлами *d* и *b* «закомментирован» («звездочка» в начале строки), т. е. превращен в комментарий и поэтому не исполняется программой. После загрузки цепного файла primer3_4.cir в WinSpice3 получим

Circuit: PRIMER 3.4

TEMP=27 deg C

Transfer function analysis ...

transfer_function = 4.442440e-02

output_impedance_at_v(f,b) = 4.655224e+00

ve#input_impedance = 9.182294e+00

Искомая величина указана в строке ve#input_impedance = 9.182294e+00, т. е. $R_{ac}=9,1823$ Ом.

Закомментируем источник, подключенный к узлам *a* и *c*, и удалим знак комментария в описании источника подключенного между узлами *d* и *b*. Описание источника примет вид

*VE A C DC 1

VE D B DC 1

После сохранения измененного цепного файла и загрузки его в WinSpice3 получим ve#input_impedance = 8.334402e+00, т. е. $R_{db}=8,3344$ Ом. По аналогии можно найти эквивалентное сопротивление относительно любой пары узлов.

Определим системные функции цепи, считая ветвь *ac* с *R*-элементом *R1* входной ветвью, а ветвь с *R*-элементом *R9* — выходной. Направления ветвей указаны стрелками на рис. 3.9. Разомкнем входную ветвь и включим в нее последовательно источник напряжения VE с ЭДС 1 В как показано на рис. 3.10.

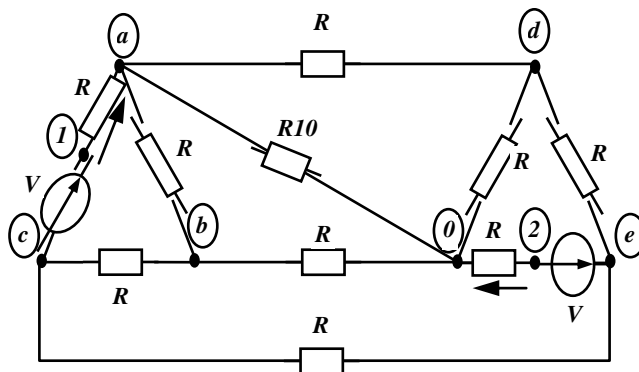


Рис. 3.10. Резистивная цепь рис. 3.9 с включенным во входную ветвь источником напряжения VE и «амперметром» VA в выходной ветви

В результате появляется еще один узел (1), поэтому описание *R1* изменяется. Полярность подключения источника согласована с заданным на рис. 3.9 направлением

ем входной ветви. В выходную ветвь включим «амперметр» VA, в соответствии с направлением выходной ветви. При этом появляется новый узел (2) и описание R9 изменяется.

Для определения коэффициента передачи напряжения K_{U91} в директиве .TF в качестве выходной величины укажем напряжение на выходной ветви V(E,0) в соответствии с направлением выходной ветви. Соответствующее текстовое описание (цепной файл primer3_5.cir, папка cirfiles) приведено ниже

```
PRIMER 3.5
* RESISTORS
R1 A 1 30
R2 A B 30
R3 C B 30
R4 A D 6
R5 B 0 6
R6 C E 2.8
R7 0 D 10
R8 D E 20
R9 0 2 20
R10 A 0 15.5
* ISTOCHIK NA VHODE
VE 1 C DC 1
* AMPERMETR NA VYHODE
VA E 2 DC 0
* NAOHODIM R11,Ku91
.TF V(E,0) VE
.END
```

После загрузки цепного файла primer3_5.cir в WinSpice3 получим следующие результаты:

Circuit: PRIMER 3.5

```
TEMP=27 deg C
Transfer function analysis ...
transfer_function = -1.53319e-01
output_impedance_at_v(e,0) = 7.827750e+00
ve#input_impedance = 4.323243e+01
```

Отсюда следует, что $K_{U91} = -0,15332$, $R_{11} = 43,232$ Ом.

Определим передаточную проводимость G_{91} и входное сопротивление первой ветви R_{11} , для чего заменим в файле primer3_5.cir директиву

.TF V(E,0) VE директивой .TF I(VA) VE.

В данном случае в качестве выходной величины указан ток через выходной "амперметр". Результаты имеют вид

Circuit: PRIMER 3.5

```
TEMP=27 deg C
Transfer function analysis ...
transfer_function = -7.66594e-03
va#output_impedance = 1.000000e+20
ve#input_impedance = 4.323243e+01
```

Таким образом, $G_{91} = -7,6659 \cdot 10^{-3}$ См.

Определим коэффициент передачи тока K_{I91} , для чего заменим в файле primer3_5.cir источник напряжения источником тока IJ, направленным от узла с к узлу 1, и директиву .TF I(VA) VE заменим директивой .TF I(VA) IJ. Текст после изменений (файл primer3_5i.cir):

```
PRIMER 3.5
* RESISTORS
R1 A 1 30
R2 A B 30
R3 C B 30
R4 A D 6
R5 B 0 6
R6 C E 2.8
R7 0 D 10
R8 D E 20
R9 0 2 20
R10 A 0 15.5
* ISTOCHIK NA VHODE
IJ C 1 DC 1
* AMPERMETR NA VYNODE
VA E 2 DC 0
* NAOHODIM Ki91
.TF I(VA) IJ
.END
```

Результаты расчета:
Circuit: PRIMER 3.5

```
TEMP=27 deg C
Transfer function analysis ...
transfer_function = -3.31417e-01
ij#input_impedance = 4.323243e+01
va#output_impedance = 1.000000e+20
```

Таким образом, $K_{I91} = -0,33142$.

Определим передаточное сопротивление R_{91} , для чего заменим в файле primer3_5i.cir директиву .TF I(VA) IJ директивой .TF V(E,0) IJ. В данном случае в качестве выходной величины указано напряжение V(E,0) на 9-й ветви, содержащей R9. Результаты имеют вид:

Circuit: PRIMER 3.5

```
TEMP=27 deg C
Transfer function analysis ...
transfer_function = -6.62834e+00
ij#input_impedance = 4.323243e+01
output_impedance_at_v(e,0) = 8.843999e+00
```

Таким образом, $R_{91} = -6,6283$ Ом.

Следует отметить, что все передаточные функции получились отрицательными, что обусловлено заданными направлениями (см. рис. 3.9). Изменение одного из этих

направлений на противоположное приведет к смене знака передаточных функций (но не входного сопротивления R_{11}).

Выводы

1. Директива **.OP** выполняет расчет цепи, содержащей источники постоянного тока, автоматически заменяя L -элементы коротками, а C -элементы — разрывами.

2. Для цепи постоянного тока с одним источником, рассматриваемым как входное воздействие, и одной из ветвей, рассматриваемой в качестве выхода, можно ввести пять функций, называемых системными функциями. Наиболее часто используемыми системными функциями являются эквивалентное (входное) сопротивление и коэффициенты передачи напряжения и тока.

3. Системные функции линейной цепи не зависят от типа источника (напряжения или тока), и от величины его параметра.

4. Любая цепь постоянного тока с одним источником может рассматриваться в качестве делителя тока или делителя напряжения.

5. Системные функции можно определить с помощью SPICE двумя способами:

— имитацией физического эксперимента с последующим расчетом по формулам (3.1)—(3.4);

— с использованием специального вида анализа (директива **.TF**).

6. Директива **.TF** предназначена для расчета системных функций цепи и имеет вид

.TF OUTVAR INSRC,

где OUTVAR — имя выходной величины; INSRC— имя входного источника напряжения или тока.

По данной директиве производится расчет входного сопротивления и соответствующей OUTVAR и INSRC передаточной функции. Для определения всех 4-х передаточных функций необходимо 4-х кратное применение директивы **.TF**.

3.2. Основные принципы и теоремы

В данном разделе SPICE используются для проведения вычислительных экспериментов, иллюстрирующих основные принципы и теоремы ЛЭЦ на примерах цепей постоянного тока.

3.2.1. Принцип наложения и метод наложения

Принцип наложения (суперпозиции) справедлив для *линейных* систем любой физической природы и формулируется следующим образом: реакция линейной системы на сумму воздействий равна сумме реакций на каждое воздействие в отдельности.

Воздействиями в электрических цепях являются независимые источники, а реакциями — токи и напряжения ветвей. Таким образом, в случае ЛЭЦ принцип состоит в том, что ток (напряжение) каждой ветви определяется как алгебраическая сумма частичных токов (напряжений), возникающих в этой ветви от действия *каждого источника в отдельности*.

Пусть цепь имеет b ветвей, l из которых состоят из источников напряжения и R -элементов, а остальные ветви содержат только источники тока. Пронумеруем ветви последовательными номерами, причем номера от 1 до l присвоим ветвям, содержащим источники напряжения. Тогда ток некоторой k -й ветви с источником напряжения E_k определяется линейным соотношением при $k = \overline{1, l}$

$$I_k = G_{kk} E_k + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^l G_{kn} E_n + \sum_{q=l+1}^b K_{I_{kq}} J_q, \quad (3.5)$$

где G_{kk} — входная проводимость k -й ветви; G_{kn} — передаточная (взаимная) проводимость ветвей k и n ; E_n — ЭДС источника напряжения n -й ветви; $K_{I_{kq}}$ — коэффициент передачи тока из ветви q в ветвь k ; J_q — ток источника тока q -й ветви.

Напряжение k -й ветви имеет вид при $k = \overline{1, b}$

$$U_k = R_{kk} J_k + \sum_{\substack{q=l+1 \\ q \neq k}}^b R_{kq} J_q + \sum_{n=1}^l K_{U_{kn}} E_n, \quad (3.6)$$

где R_{kk} — входное сопротивление k -й ветви; R_{kq} — передаточное (взаимное) сопротивление ветвей k и q ; $K_{U_{kn}}$ — коэффициент передачи напряжения от ветви n на ветвь k .

Если рассматриваемая k -я ветвь пассивна, т. е. не содержит источников, то первые слагаемые в (3.5) и (3.6) равны нулю. Если в k -й ветви есть источник напряжения, то первое слагаемое присутствует только в (3.5). Если k -я ветвь содержит источник тока J_k , то первое слагаемое присутствует в (3.6). В этом случае (3.5) не имеет смысла, т.к. $I_k = J_k$.

Из данных выражений следует, что токи и напряжения ветвей могут быть найдены с использованием системных функций (3.1)-(3.4), рассмотренных в предыдущем разделе. Это позволяет рассматривать системные функции, входящие в формулировку принципа наложения (3.5), (3.6), как коэффициенты влияния источников (воздействий) на токи и напряжения ветвей (реакции цепи). В пп. 3.1.2 было показано, каким образом системные функции определяются с помощью директивы TF.

Метод наложения, основанный на принципе наложения, позволяет выявить влияние каждого источника на искомую величину, что часто необходимо для понимания работы цепи. Данный метод позволяет свести задачу анализа цепи с несколькими источниками к совокупности задач с одним источником, причем количество этих задач равно числу источников.

Рассмотрим применение метода наложения на примере. Пусть в схеме рис. 3.11 необходимо найти ток и напряжение 3-й ветви методом наложения. Условно-положительные направления искомых величин заданы стрелками.

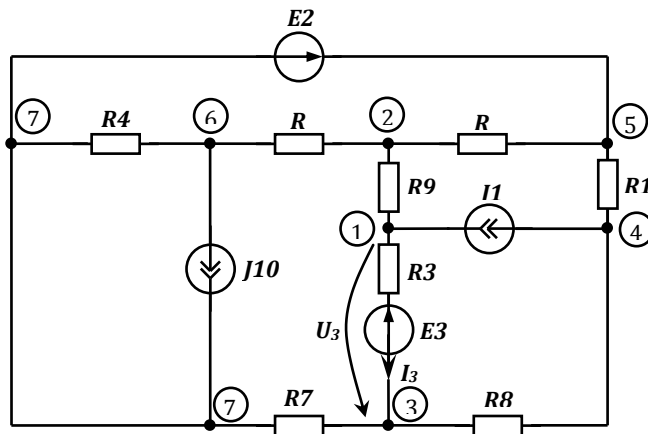


Рис. 3.11. Схема замещения цепи постоянного тока с несколькими источниками: $R_1=1,5$ кОм; $R_3=850$ Ом; $R_4=2$ кОм; $R_5=3$ кОм; $R_6=2$ кОм; $R_7=10$ кОм; $R_8=2,5$ кОм; $R_9=120$ Ом

Схема имеет 7 сложных узлов и 11 ветвей и содержит идеальные независимые источники напряжения (E_2, E_3) и тока (J_{10}, J_{11}). Номер элемента соответствует номеру ветви. Входами (воздействиями) являются источники. Выходами (реакциями) по условию являются ток I_3 и напряжение U_{13} 3-й ветви, состоящей из последовательного соединения источника напряжения E_3 и R -элемента R_3 .

На основании принципа наложения (3.5), (3.6) для искомых величин имеем:

$$I_3 = G_{33}E_3 + G_{32}E_2 + K_{I3,10}J_{10} + K_{I3,11}J_{11}, \quad (3.7)$$

$$U_3 = U_{13} = R_{3,10}J_{10} + R_{3,11}J_{11} + K_{U32}E_2 + K_{U33}E_3. \quad (3.8)$$

Итак, необходимо найти 8 системных функций, входящих в данные выражения. Поскольку параметры источников не заданы, они останутся в виде символов. Схема в SPICE-обозначениях приведена ниже.

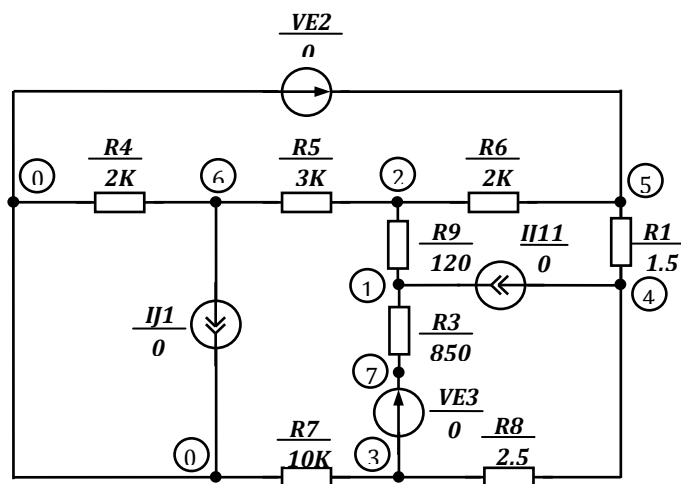


Рис. 3.12. Схема рис. 3.11 в SPICE-обозначениях

Обратите внимание, что в выходной ветви нет «амперметра», присутствовавшего в предыдущих примерах. Его роль выполняет сам источник E_3 . Узел 7 на рис. 3.11 выбран в качестве базисного (общего) и обозначен как «0» на схеме рис. 3.12. На этой же схеме 7-й узел теперь обозначает место соединения E_3 и R_3 . Текстовое описание (цепной файл primer3_6.cir) имеет вид

```
PRIMER 3.6
* RESISTORS
R1 5 4 1.5K
R3 1 7 850
R4 6 0 2K
R5 2 6 3K
R6 5 2 2K
R7 3 0 10K
R8 3 4 2.5K
R9 1 2 120
* ISTOCHNIKI
```



```

VE2 5 0 DC 0
VE3 7 3 DC 0
IJ10 6 0 DC 0
IJ11 4 1 DC 0
* OPREDELENIE Rkn, Kukn
.TF V(1,3) VE2
* OPREDELENIE Gkn, Kikn
*.TF I(VE3) VE2
.END

```

Одна из директив .TF должна быть закомментирована, поскольку при использовании стиля SPICE2 WinSpice3 может выполнить только одну такую директиву. В данном тексте закомментирована вторая директива, поэтому первая директива .TF V(1,3) VE2 будет активной. Заменяя каждый раз обозначение источника, и сохраняя цепной файл, будем получать искомые системные функции, в данном случае коэффициенты передачи напряжения K_{U32} , K_{U33} и передаточные сопротивления $R_{3,10}$, $R_{3,11}$. Аналогично, после активизации второй директивы получим G_{32} , G_{33} и $K_{I3,10}$, $K_{I3,11}$. Результаты приведены в табл. 3.1. Подставляя их в (3.7), (3.8) и сохраняя цепной файл, получаем решение поставленной задачи:

$$I_3 = -1,9027 \cdot 10^{-4} E_3 - 2,3534 \cdot 10^{-19} E_2 - 0,10873 J_{10} + 0,49850 J_{11}, \quad (3.9)$$

$$U_3 = U_{13} = -92,416 J_{10} + 423,73 J_{11} - 2,2204 \cdot 10^{-16} E_2 + 0,83827 E_3. \quad (3.10)$$

Таблица 3.1

Директива	Результаты WinSpice3 (искомая величина выделена жирным шрифтом)	Найденная системная функция	Название системной функции
.TF V(1,3) VE2	transfer_function = -2.22045e-16 output_impedance_at_v(1,3) = 7.125306e+02 ve2#input_impedance = 4.666667e+03	$K_{U32} = -2,2204 \cdot 10^{-16}$	Коэффициент передачи напряжения источника E_2 на 3-ю ветвь
.TF V(1,3) VE3	transfer_function = 8.382713e-01 output_impedance_at_v(1,3) = 7.125306e+02 ve3#input_impedance = 5.255714e+03	$K_{U33} = 0,83827$	Коэффициент передачи напряжения источника E_3 на 3-ю ветвь
.TF V(1,3) IJ10	transfer_function = -9.24164e+01 ij10#input_impedance = 1.366443e+03 output_impedance_at_v(1,3) = 7.125306e+02	$R_{3,10} = -92,416 \text{ Ом}$	Передаточное сопротивление 3-й и 10-й ветвей
.TF V(1,3) IJ11	transfer_function = 4.237293e+02 ij11#input_impedance = 1.581774e+03 output_impedance_at_v(1,3) = 7.125306e+02	$R_{3,11} = 423,73 \text{ Ом}$	Передаточное сопротивление 3-й и 11-й ветвей
.TF I(VE3) VE2	transfer_function = -2.35343e-19 ve2#input_impedance = 4.666667e+03 ve3#output_impedance = 1.000000e+20	$G_{32} = -2,3534 \cdot 10^{-19} \text{ См}$	Передаточная проводимость 3-й и 2-й ветвей
.TF I(VE3) VE3	transfer_function = -1.90269e-04 ve3#input_impedance = 5.255714e+03 ve3#output_impedance = 1.000000e+20	$G_{33} = -1,9027 \cdot 10^{-4} \text{ См}$	Входная проводимость 3-й ветви
.TF I(VE3) IJ10	transfer_function = -1.08725e-01 ij10#input_impedance = 1.366443e+03 ve3#output_impedance = 1.000000e+20	$K_{I3,10} = -0,10873$	Коэффициент передачи тока источника J_{10} в 3-ю ветвь

.TF I(VE3) IJ11	transfer_function = 4.985050e-01 ij11#input_impedance = 1.581774e+03 ve3#output_impedance = 1.000000e+20	$K_{I\ 3,11} = 0,49850$	Коэффициент передачи тока источника $J11$ в 3- ю ветвь
-----------------	---	-------------------------	---

Проанализируем влияние источников на ток I_3 . Будем полагать значения параметров источников неотрицательными. Из рассмотрения первых двух слагаемых в (3.9) следует, что влияние источника $E3$ во много раз сильнее, чем $E2$ (в 10^{15} раз!). Увеличение $E3$ приводит к уменьшению I_3 (знак «минус» перед первым слагаемым). Влияния источников тока $J10$ и $J11$ частично взаимно компенсируются, т.к. знаки перед соответствующими слагаемыми противоположны: увеличение $J11$ приводит к возрастанию I_3 , а увеличение $J10$ влияет противоположным образом. Влияние $J11$ примерно в 5 раз больше по абсолютной величине, чем влияние $J10$. Итак, при увеличении параметров источников только $J11$ влияет на повышение I_3 .

Анализ выражения (3.10) приводит, в основном, к аналогичным выводам за исключением оценки влияния $E3$, которое сказывается в возрастании U_3 . Поэтому увеличение параметров источников $E3$ и $J11$ приводит к повышению U_3 .

Следует отметить, что коэффициенты влияния E_2 в (3.9), (3.10) очень малы, и ими можно пренебречь по сравнению с коэффициентами влияния E_3 . Попытаемся понять причину этого явления. Рассмотрим схему рис. 3.11 при обнуленных источниках $E3, J10, J11$. Напомним, что источник напряжения с нулевой ЭДС заменяется короткой, а источник нулевого тока — разрывом. Соответствующая схема показана на рис. 3.13

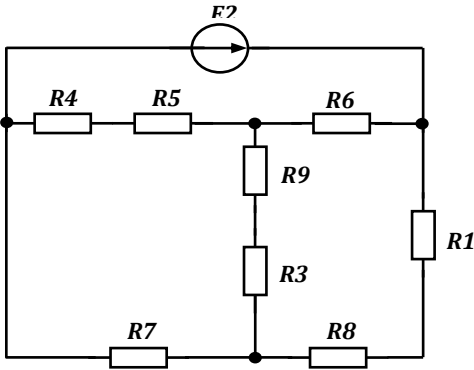


Рис. 3.13. Схема рис. 3.11 при обнуленных источниках $E3, J10, J11$

Заменяя последовательно соединенные резисторы их эквивалентами, получим схему

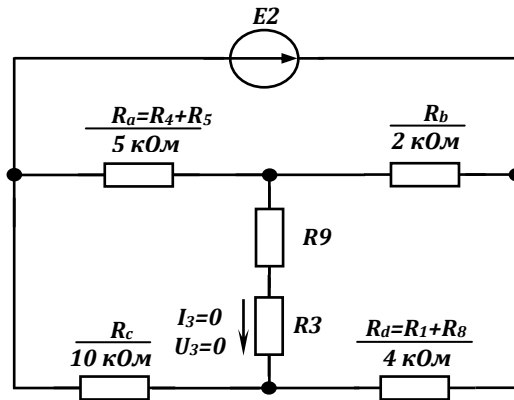


Рис. 3.14. Преобразованная схема рис. 3.13

Это так называемая мостовая схема, широко используемая в электротехнике и электронике. Она обладает одним замечательным свойством: при выполнении соотношения $R_a R_d = R_b R_c$ мост будет сбалансирован (или уравновешен). При этом $I_3 = 0$, $U_3 = 0$. В нашем случае мост оказывается сбалансированным. Этот факт объясняет малые значения коэффициентов влияния E_2 , которые можно принять за нуль. Строго нулевые значения не могут быть получены при вычислениях с вещественными числами ввиду ограниченной разрядности процессора и ошибок округления. Итак, окончательно, пренебрегая влиянием E_2 , получаем

$$I_3 = -1,9027 \cdot 10^{-4} E_3 - 0,10873 J_{10} + 0,49850 J_{11}, \quad (3.11)$$

$$U_3 = U_{13} = -92,416 J_{10} + 423,73 J_{11} + 0,83827 E_3. \quad (3.12)$$

Проверить полученные выражения можно, подставив их в уравнение, составленное по II закону Кирхгофа для 3-й ветви $U_{13} - R_3 I_3 = E_3$.

В выражения (3.11), (3.12) можно подставлять любые значения параметров источников (не только положительные и отрицательные константы, но и произвольные функции времени). Ограничимся источниками постоянного тока. Пусть, например, $E_3 = 100$ В, $J_{10} = 1$ А, $J_{11} = 0,5$ А. Тогда из (3.11), (3.12) имеем $I_3 = 0,12149$ А, $U_{13} = 203,27$ В. Для окончательной проверки читателю рекомендуется заменить в тексте примера 3.6 нулевые значения источников на приведенные выше

```
VE2 5 0 DC 50
VE3 7 3 DC 100
IJ10 6 0 DC 1
IJ11 4 1 DC 0.5
```

и задать директиву **.OP**. Источник VE2 можно оставить нулевым или задать произвольное значение, например, 50 В — это не повлияет на результат, поскольку выше было показано, что схема сбалансирована относительно 3-й ветви и источника E_2 .

3.2.2. Принцип взаимности

Принцип взаимности, установленный Кирхгофом, формируется следующим образом: если источник напряжения, включенный в n -ю ветвь цепи, не содержащей других источников, вызывает в k -й ветви ток I , то, перенесенный в k -ю ветвь тот же источник напряжения, вызовет в n -й ветви тот же ток I .

Иными словами, принцип взаимности устанавливает равенство передаточных проводимостей $G_{kn}=G_{nk}$ между ветвями n и k . Поэтому и применяется термин «взаимная проводимость». Принцип справедлив для линейных цепей с независимыми источниками. Такие цепи называются взаимными или обратимыми.

Принцип взаимности можно переформулировать, заменив в вышеприведенной формулировке «источник напряжения» на «источник тока» и «ток I » на «напряжение U ». Тогда можно записать $R_{kn}=R_{nk}$.

При переносе источника необходимо согласовать его включение с условно-положительным направлением величины k -й ветви (тока или напряжения).

В примере 3.5 была найдена передаточная проводимость $G_{91} = -7,6659 \cdot 10^{-3}$ См для схемы рис.3.10. Найдем передаточную проводимость G_{19} , для чего поменяем местами источник VE и «амперметр» VA, как показано на рис. 3.15

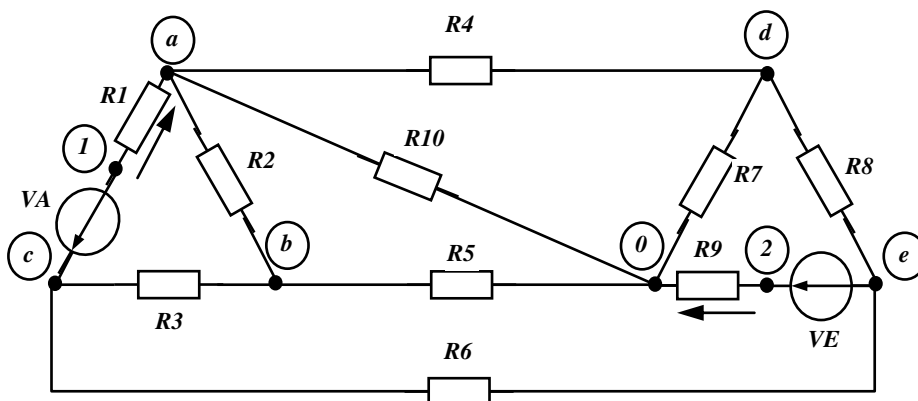


Рис. 3.15. Схема определения передаточной проводимости G_{19}

Соответствующий текст цепного файла primer3_7.cir:

```
PRIMER 3.7
* RESISTORS
R1 A 1 30
R2 A B 30
R3 C B 30
R4 A D 6
R5 B 0 6
R6 C E 2.8
R7 0 D 10
R8 D E 20
R9 0 2 20
R10 A 0 15.5
* ISTOCHNIK NA VYNODE
VE 2 E DC 1
* AMPERMETR NA VHODE
VA C 1 DC 0
* NAHODIM G19
.TF I(VA) VE
.END
```

После загрузки данного файла в WinSpice3 получаем результат
Circuit: PRIMER 3.7

```
TEMP=27 deg C
Transfer function analysis ...
transfer_function = -7.66594e-03
va#output_impedance = 1.000000e+20
ve#input_impedance = 3.286163e+01
```

Из строки $\text{transfer_function} = -7.66594e-03$ следует $G_{19} = -7,6659 \cdot 10^{-3} \text{ См} = G_{91}$, что подтверждает принцип взаимности.

3.2.3. Принцип компенсации

Принцип компенсации может быть сформулирован относительно идеализированных независимых источников. Токи и напряжения произвольной электрической цепи не изменятся, если

- любую ветвь заменить (скомпенсировать) идеальным источником напряжения с ЭДС, равной напряжению ветви и направленной противоположно ему;
- любую ветвь заменить (скомпенсировать) идеальным источником тока с током, равным току ветви и направленным согласно с ним.

В результате такой замены токи и напряжения цепи сохраняют прежние значения. Если в схеме произвести изменения параметров элементов, то необходимо пересчитать величину компенсирующего источника напряжения.

Проверим принцип компенсации на примере схемы рис. 3.11 со значениями параметров источников, использовавшимися выше в методе наложения: $E_2=50 \text{ В}$, $E_3=100 \text{ В}$, $J_{10}=1 \text{ А}$, $J_{11}=0.5 \text{ А}$. Взяв за основу текст из файла `primer3_6.cir`, получим следующее текстовое описание (цепной файл `primer3_8.cir`) :

```
PRIMER 3.8
* RESISTORS
R1 5 4 1.5K
R3 1 7 850
R4 6 0 2K
R5 2 6 3K
R6 5 2 2K
R7 3 0 10K
R8 3 4 2.5K
R9 1 2 120
* ISTOCHNIKI
VE2 5 0 DC 50
VE3 7 3 DC 100
IJ10 6 0 DC 1
IJ11 4 1 DC 0.5
* RASCHET PO POSTOYANNO MU TOKU
.OP
.END
```

После загрузки данного файла в WinSpice получаем

Circuit: PRIMER 3.8

TEMP=27 deg C

DC Operating Point ... 100%

```
v(1) = 5.041937e+01
v(2) = 4.999418e+00
v(3) = -1.52856e+02
v(4) = -4.94821e+02
v(5) = 5.000000e+01
v(6) = -1.19800e+03
v(7) = -5.28560e+01
ve2#branch = -3.85714e-01
ve3#branch = 1.215004e-01
```

Как обычно, имеем потенциалы узлов и токи, протекающие через источники ЭДС. Заметим, что ток через источник E_3 (ve3#branch = 1.215004e-01) совпадает со значением I_3 , полученным в конце пп. 3.2.1 методом наложения.

Согласно принципу компенсации, заменим, например, 3-ю ветвь источником напряжения. Для этого сначала определим напряжение ветви U_{13} , для чего дадим команду **print v(1,3)** и нажмем клавишу Enter. В результате имеем

```
WinSpice 3 -> print v(1,3)
```

```
(v(1)-v(3)) = 2.032753e+02
```

Таким образом, $U_{13}=203,2753$ В, что совпадает со значением, полученным в конце пп. 3.2.1 методом наложения. Теперь в тексте файла primer3_8.cir сделаем следующие изменения:

- отключим 3-ю ветвь, закомментировав элементы E_3 и R_3 ;

- добавим источник компенсирующего напряжения $E_{comp} = U_{13}=203,2753$ В, подключив его вместо 3-й ветви «плюсом» к узлу 1, а «минусом» к узлу 3. При этом направление ЭДС противоположно направлению U_{13} , что соответствует принципу компенсации.

Текст, соответствующий данным изменениям, приведен ниже

```
PRIMER 3.8comp
```

```
* RESISTORS
```

```
R1 5 4 1.5K
```

```
*R3 1 7 850
```

```
R4 6 0 2K
```

```
R5 2 6 3K
```

```
R6 5 2 2K
```

```
R7 3 0 10K
```

```
R8 3 4 2.5K
```

```
R9 1 2 120
```

```
* ISTOCHNIKI
```

```
VE2 5 0 DC 50
```

```
*VE3 7 3 DC 100
```

```
VECOMP 1 3 203.2753
```

```
IJ10 6 0 DC 1
```

```
IJ11 4 1 DC 0.5
```

```
* RASCHET PO POSTOYANNOMU TOKU
```

.OP
.END

Результаты расчета компенсированной схемы:
Circuit: PRIMER 3.8

TEMP=27 deg C
DC Operating Point ... 100%

v(1) = 5.041935e+01
v(2) = 4.999402e+00
v(3) = -1.52856e+02
v(4) = -4.94821e+02
v(5) = 5.000000e+01
v(6) = -1.19800e+03
ve2#branch = -3.85714e-01
vecomp#branch = 1.215004e-01

Сравнение показывает практическое совпадение результатов, полученных для исходной и компенсированной схем, что подтверждает принцип компенсации.

3.2.4. Линейные соотношения

Если в ЛЭЦ изменяется параметр *одной из ветвей* (ЭДС, ток источника тока, сопротивление), *то две любые величины* (напряжение и ток) *двух любых ветвей* связаны друг с другом линейными зависимостями вида $y = a + bx$.

Таким образом, возможны следующие варианты записи линейных соотношений:

$$I_k = a + bI_n, \quad U_k = c + dU_n, \quad U_k = e + fI_n, \quad I_k = g + hU_n, \quad (3.13)$$

где a, b, c, d, e, f, g, h — коэффициенты, зависящие от сопротивлений R -элементов;

k, n — индексы двух любых ветвей, не содержащих изменяемого параметра.

Рассмотрим сначала способы изменения (вариации) параметров источников, а затем — сопротивлений.

3.2.4.1. ВАРИАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ

Рассмотрим реализацию изменения параметров источников в SPICE. Простейший способ заключается в многократном повторении процесса, состоящего из следующих шагов:

- изменение значения параметра источника в цепном файле;
- сохранение файла;
- загрузка файла в WinSpice3;
- фиксация результатов в табличной и графической формах.

Очевидно, при большом количестве значений параметра (расчетных точек) такой способ является громоздким и чреват ошибками. Поэтому во всех вариантах SPICE, в частности и в WinSpice3, существует специальная директива **.DC**, позволяющая варьировать параметр источника постоянного тока от начального значения до конечного значения с заданным шагом. Директива записывается в следующем формате:

.DC SRCNAM VSTART VSTOP VINCR

где SRCNAM — имя независимого источника напряжения или тока; VSTART, VSTOP и VINCR — начальное, конечное значения параметра и шаг приращения соответственно.

Количество полученных расчетных точек N определяется соотношением
$$N = [VSTOP - VSTART] / VINCR + 1.$$

Здесь квадратные скобки обозначают округление до целого путем отбрасывания дробной части. Таким образом, программа N раз повторит анализ по постоянному току при различных значениях параметра источника.

Например, директива

.DC VIN 0.25 5.0 0.25

задает изменение ЭДС идеального независимого источника напряжения VIN от 0,25 В до 5 В с шагом 0,25 В. При этом будет вычислено 20 расчетных точек

Директива

.DC IJ 1m 250m 10m

задает изменение тока идеального независимого источника тока IJ от 1 мА до 250 мА с шагом 10 мА. При этом будет вычислено 25 расчетных точек

Можно варьировать и два источника одновременно, добавив в директиву аналогичное описание второго источника, но здесь эта возможность не рассматривается.

Результаты вариации источника постоянного тока можно вывести в виде таблицы директивой

.PRINT DC OV1 <OV2 ... OV8>

где OV1-OV8 — значения напряжений, потенциалов или токов, протекающих через источники напряжения (максимально — 8 величин).

Число строк в таблице равно N , причем их нумерация начинается с нуля. Количество директив .PRINT в одном файле не ограничено.

Например, директива

.PRINT DC V(2) I(VSRC) V(23,17)

выводит в табличной форме потенциал узла 2, ток через источник напряжения VSRС и напряжение между узлами 23 и 17.

Результаты вариации источника постоянного тока можно вывести в виде графика директивой

.PLOT DC OV1 <OV2 ... OV8>

По оси абсцисс откладывается параметр источника SRCNAM, заданный директивой .DC и обозначаемый на графике как sweep (развертка, вариация). Заданные величины OV1-OV8 отображаются в одной системе координат. Количество директив .PLOT в одном файле не ограничено. Поскольку диапазоны изменения выходных величин могут резко отличаться и иметь разные единицы измерения, целесообразно каждую величину выводить в виде отдельного графика. Например, директивы

.PLOT DC V(2)

.PLOT DC I(VSRC)

.PLOT DC V(23,17)

выводят в *разных* окнах графики величин, выведенных ранее директивой .PRINT.

Рассмотрим на примере вариацию ЭДС E_3 в схеме рис. 3.11 со значениями параметров источников, использовавшимися выше в методе наложения: $E_2=50$ В, $E_3=100$ В, $J_{10}=1$ А, $J_{11}=0.5$ А. Будем считать источник E_3 отдельной ветвью, причем его ЭДС будем изменять от 0 до 150 В с шагом 30 В. В качестве выходной величины используем напряжение U_{34} на R_8 . Таким образом, линейное соотношение имеет вид

$$U_8 = U_{34} = c + dE_3. \quad (3.14)$$

Взяв за основу текст из файла primer3_8.cir, получим следующее текстовое описание (цепной файл primer3_9.cir):

PRIMER 3.9

* RESISTORS


```

R1 5 4 1.5K
R3 1 7 850
R4 6 0 2K
R5 2 6 3K
R6 5 2 2K
R7 3 0 10K
R8 3 4 2.5K
R9 1 2 120
* ISTOCHNIKI
VE2 5 0 DC 50
VE3 7 3 DC 100
IJ10 6 0 DC 1
IJ11 4 1 DC 0.5
* RASCHET PO POSTOYANNOMU TOKU
* VE3 VOZRASTAET
.DC VE3 0 150 30
.PRINT DC V(3,4)
.PLOT DC V(3,4)
.END

```

Несмотря на то, что для VE3 в описании элемента указано значение ЭДС 100 В, директива .DC задает свои значения. Результаты работы WinSpice3 (полный листинг):

```

WinSpice 1 -> cd
Current directory: C:\cirfiles
WinSpice 2 -> source "primer3_9.cir"
Reading .\primer3_9.cir
NOTE: This is a Spice2 circuit file
Spice3 commands added:-
.control
destroy all
set units=degrees
save 3 4 3 4
dc ve3 0 150 30
print (v(3)-v(4))
plot (v(3)-v(4))
.endc

```

Circuit: PRIMER 3.9

TEMP=27 deg C

DC analysis ... 100%

PRIMER 3.9

DC transfer

Index	sweep	(v(3)-v(4))
0	0.000000e+00	3.759416e+02
1	3.000000e+01	3.657487e+02
2	6.000000e+01	3.555557e+02
3	9.000000e+01	3.453627e+02
4	1.200000e+02	3.351697e+02

5 1.500000e+02 3.249767e+02

В колонке Index указаны номера расчетных точек. Колонка sweep содержит значения E_3 , а в колонке (v(3)-v(4)) приведены значения U_{34} . С помощью полученных результатов можно легко найти коэффициенты c и d в (3.14) по двум любым расчетным точкам таблицы ($c=375,942$ В; $d=-0,339767$). Кстати, коэффициент d по существу является коэффициентом передачи напряжения $K_{U_{83}}$.

Кроме таблицы, на экране появляется отдельное окно рис. 3.16 с графиком передаточной характеристики (3.14).

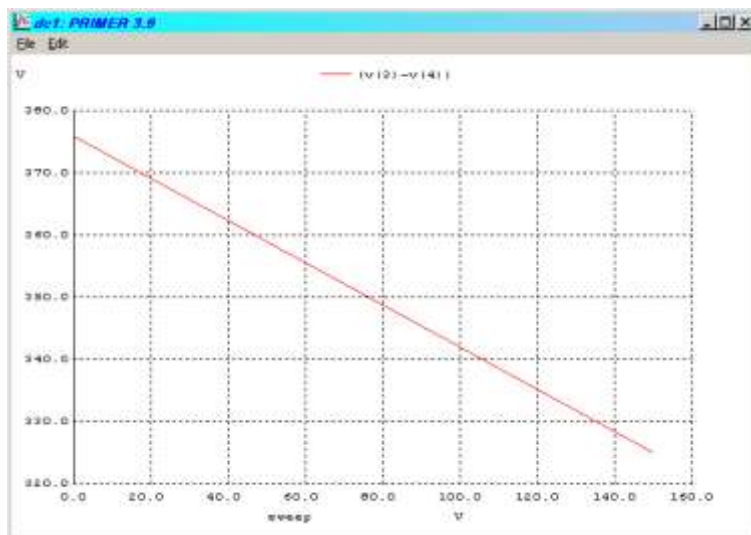


Рис. 3.16. Линейная зависимость передаточной характеристики (3.14) в графическом окне программы WinSpice3

С графическим окном можно производить те же манипуляции, что и с обычными окнами в Windows: перемещать, изменять размеры, сворачивать. В окне имеется строка меню, содержащая всего две команды: File и Edit. Меню File позволяет установить параметры печати (Print Setup) и напечатать график на принтере (Print). Команда Edit дает возможность скопировать график в буфер обмена (Copy), откуда он может быть вставлен в любое приложение, поддерживающее графический формат (например, в Word). Если при нажатой левой кнопке мыши выделить прямоугольную область графика, то после отпускания кнопки откроется новое окно, содержащее выбранный участок в более крупном масштабе.

Интересно посмотреть результаты команды **display**, показывающей активные векторы, в которых WinSpice3 сохраняет результаты расчетов. В поле командной строки наберем **display** и нажмем клавишу Enter. Результаты работы команды приведены ниже

WinSpice 3 -> display

Here are the vectors currently active:

Title: PRIMER 3.9

Name: dc1 (DC transfer characteristic)

Date: Wed Jul 20 12:03:41 2019

V(3) : voltage, real, 6 long

V(4) : voltage, real, 6 long

sweep : voltage, real, 6 long [default scale]

Видно, что программа создала и запомнила в процессе анализа передаточной характеристики (DC transfer characteristic) с именем dc1 три вектора (массива): V(3), V(4) и sweep. Все они имеют длину (long) 6 элементов действительных чисел (real) размерности напряжения (voltage). Вектор sweep является величиной VE3, заданной в директиве .DC и рассматривается по умолчанию как переменная, откладываемая по оси абсцисс (default scale). Все эти векторы являются активными (active), т. е. их можно использовать в дальнейших интерактивных вычислениях, выводить в окно программы командой **print** и т. д. Аналогичные результаты выводит команда **let**.

В вышеприведенном примере рассматривалось линейное соотношение (3.14) с позиции передаточной характеристики. Однако выражения (3.13) имеют более общий характер и, согласно принципу линейности, связывают величины в двух *других* ветвях, *не содержащих* варьруемого источника.

Пусть по-прежнему изменяется ЭДС источника E3. Рассмотрим соотношение $I_6 = g + hU_{34}$. Для получения значений тока в 6-ю ветвь включим "амперметр" VA. При этом появляется новый узел 8. Внеся некоторые изменения в цепной файл primer3_9.cir получим файл primer3_10.cir:

```
PRIMER 3.10
* RESISTORS
R1 5 4 1.5K
R3 1 7 850
R4 6 0 2K
R5 2 6 3K
R6 5 8 2K
R7 3 0 10K
R8 3 4 2.5K
R9 1 2 120
* ISTOCHNIKI
VE2 5 0 DC 50
VE3 7 3 DC 100
IJ10 6 0 DC 1
IJ11 4 1 DC 0.5
* AMPERMETR
VA 2 8 DC 0
* RASCHET PO POSTOYANNOMU TOKU
* VE3 VOZRASTAET
.DC VE3 0 150 30
.PRINT DC V(3,4) I(VA)
.PLOT DC I(VA) vs V(3,4)
.END
```

Здесь применяется специфическая для WinSpice3 форма записи директивы .PLOT, позволяющая построить график в зависимости от желаемой величины, *не являющейся* параметром варьруемого источника. В этой директиве I(VA) является функцией, а V(3,4) — аргументом. Аббревиатура «vs» от английского слова «versus» (против) имеет смысл «от» (зависимость функции **от** аргумента).

После загрузки файла primer3_10.cir в WinSpice3 получаем результаты:
Circuit: PRIMER 3.10

TEMP=27 deg C
DC analysis ... 100%

PRIMER 3.10
DC transfer character

Index	sweep	(v(3)-v(4))	va#branch
0	0.000000e+00	3.759416e+02	-3.609094e-02
1	3.000000e+01	3.657487e+02	-3.201375e-02
2	6.000000e+01	3.555557e+02	-2.793655e-02
3	9.000000e+01	3.453627e+02	-2.385936e-02
4	1.200000e+02	3.351697e+02	-1.978216e-02
5	1.500000e+02	3.249767e+02	-1.570497e-02

Колонки sweep и (v(3)-v(4)) содержат по-прежнему значения E_3 и U_{34} соответственно. В колонке va#branch находятся величины тока, протекающего через «амперметр» VA. С помощью полученных результатов можно легко найти коэффициенты g и h по двум любым расчетным точкам таблицы ($g=0,114286$ А; $h=-0,00040$ См).

Кроме таблицы, на экране появляется окно с графиком $I_6 = g + hU_{34}$ (см. рис. 3.17)

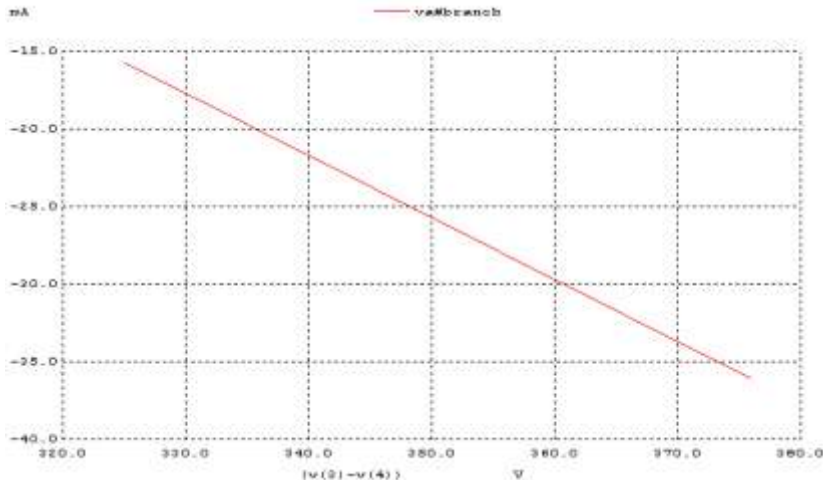


Рис. 3.17. Линейная зависимость $I_6 = g + hU_{34}$ в графическом окне программы WinSpice3

Подобным образом можно получить любые линейные соотношения при вариации источника E_3 .

Пусть теперь варьируется источник тока $J11$ в пределах от $-0,5$ А до $+0,5$ А с шагом $0,2$ А. Необходимо определить линейные соотношения $I_6 = g + hU_{34}$ и $U_{26} = c + dU_{45}$. Взяв за основу текстовое описание предыдущего примера, получаем файл primer3_11.cir. Приведем только директивы, поскольку описание схемы не изменилось:

```
.DC IJ11 -0.5 0.5 0.2
.PRINT DC V(3,4) I(VA)
.PRINT DC V(2,6) V(4,5)
.PLOT DC I(VA) vs V(3,4)
.PLOT DC V(2,6) vs V(4,5)
```

Поскольку задано две директивы .PRINT и две директивы .PLOT, то программа напечатает две таблицы и соответствующие им графики.

Circuit: PRIMER 3.11

TEMP=27 deg C

DC analysis ... 100%

PRIMER 3.11

DC transfer characteri

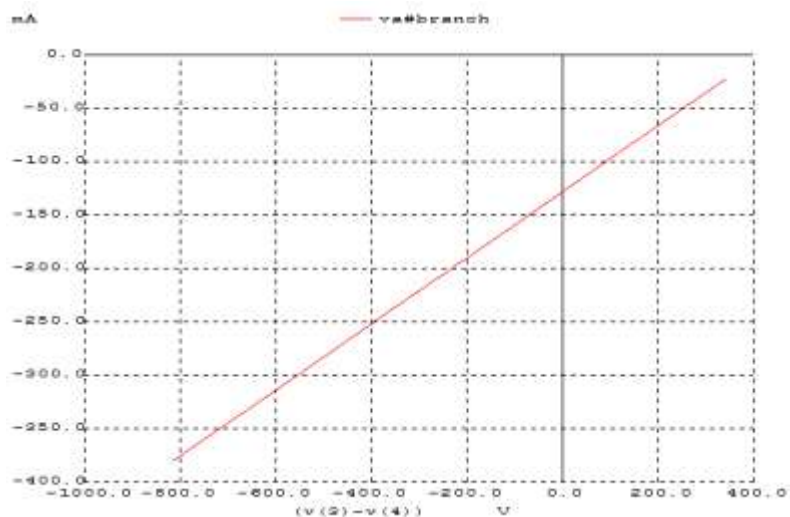
Index	sweep	(v(3)-v(4))	va#branch
0	-5.000000e-01	-8.160797e+02	-3.807110e-01
1	-3.000000e-01	-5.844707e+02	-3.090688e-01
2	-1.000000e-01	-3.528618e+02	-2.374267e-01
3	1.000000e-01	-1.212529e+02	-1.657846e-01
4	3.000000e-01	1.103561e+02	-9.414243e-02
5	5.000000e-01	3.419650e+02	-2.250029e-02

PRIMER 3.11

DC transfer characteri

Index	sweep	(v(2)-v(6))	(v(4)-v(5))
0	-5.000000e-01	7.731468e+02	2.603522e+02
1	-3.000000e-01	8.591174e+02	9.931756e+01
2	-1.000000e-01	9.450880e+02	-6.171708e+01
3	1.000000e-01	1.031059e+03	-2.227517e+02
4	3.000000e-01	1.117029e+03	-3.837864e+02
5	5.000000e-01	1.203000e+03	-5.448210e+02

Как и ранее, коэффициенты в линейных соотношениях могут быть найдены по двум точкам соответствующей таблицы. Графики искомых зависимостей показаны на рис.3.18 а, б.



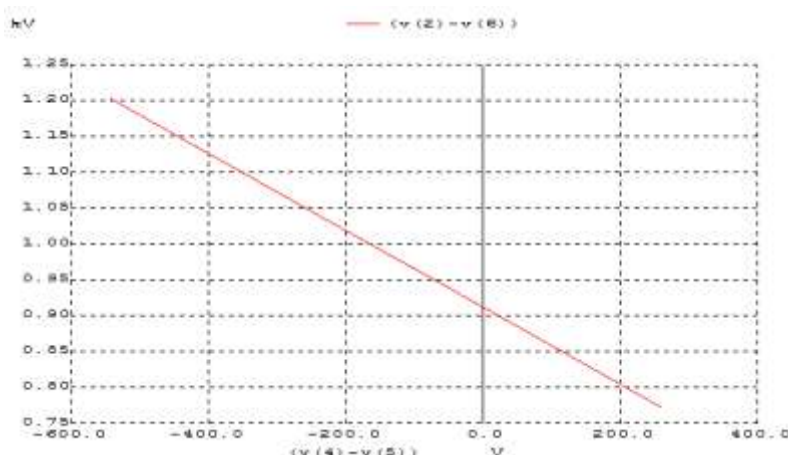


Рис. 3.18. Линейные зависимости при изменении тока источника тока J11:
а — зависимость $I_6 = g + h U_{34}$; б — зависимость $U_{26} = c + d U_{45}$

3.2.4.2. ВАРИАЦИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ. СТИЛЬ SPICE3

Рассмотренная выше директива **.DC** позволяет варьировать параметры независимых источников тока и напряжения. При необходимости вариации сопротивлений можно многократно перезагружать файл с измененным значением сопротивления, и каждый раз фиксировать результаты, но о недостатках такого подхода говорилось выше.

Для реализации поставленной задачи можно использовать возможность WinSpice3 выполнять сценарии на языке ICL (Interactive Command Language) (см. ВВЕДЕНИЕ). Язык очень похож на Basic и поддерживает характерные конструкции: оператор присвоения, циклы различного типа, условный оператор. Основным элементом хранения данных в WinSpice3, как это было показано выше, является вектор (или массив). Простые переменные представляются векторами единичной длины.

Сценарий помещается обычно в конце текстового описания между директивами **.CONTROL** и **.ENDC**. Наличие этих директив указывает программе, что текст данного цепного файла составлен в стиле SPICE3. Напомним, что до сих пор мы использовали стиль SPICE2.

Характерной особенностью стиля SPICE3 является четкое разделение текстового описания на собственно описательную часть, определяющую топологическую структуру цепи и параметры компонентов, и управляющую часть (сценарий), реализующую анализ и обработку данных. В управляющей части размещаются операторы, а также директивы, записываемые *без точки* и имеющие несколько расширенные возможности. Из сценария можно изменять параметры элементов схемы, чем мы и воспользуемся.

Пусть в схеме рис. 3.11 изменяется сопротивление R_3 от 0 до 1000 Ом с шагом 100 Ом. Требуется найти коэффициенты зависимости $U_{34} = c + d U_{30}$ и построить график. Алгоритм сценария состоит из следующих шагов:

1) создать два пустых вектора X и Y длины $[1000 - 0]/100 + 1 = 11$, предназначенных для запоминания величин U_{30} и U_{34} соответственно. Векторы должны иметь размерность напряжения;

2) организовать цикл с числом повторений 11, в котором изменяется сопротивление, цепь рассчитывается по постоянному току, и искомые величины заносятся в векторы X и Y;

3) напечатать результаты в табличной и графической формах.

Текст цепного файла в стиле SPICE3 (primer3_12.cir) приведен ниже (нумерация строк добавлена для удобства ссылок).

```
1 | PRIMER 3.12
2 | * RESISTORS
3 | R1 5 4 1.5K
4 | R3 1 7 850
5 | R4 6 0 2K
6 | R5 2 6 3K
7 | R6 5 2 2K
8 | R7 3 0 10K
9 | R8 3 4 2.5K
10 | R9 1 2 120
11 | * ISTOCHNIKI
12 | VE2 5 0 DC 50
13 | VE3 7 3 DC 100
14 | IJ10 6 0 DC 1
15 | IJ11 4 1 DC 0.5
16 | .CONTROL
17 | * CONTROL BLOCK (SCRIPT)
18 | echo *****
19 | echo LINEINYE SOOTNOSHENIYA
20 | echo IZMENENIE R3
21 | echo *****
22 | DESTROY ALL
23 | LET X=VECTOR(11)
24 | LET Y=VECTOR(11)
25 | SETTYPE VOLTAGE X
26 | SETTYPE VOLTAGE Y
27 | LET RES = 1p
28 | LET K=0
29 | WHILE K <= 10
30 |     ALTER @R3[resistance] = RES+ 100*K
31 |     OP
32 | * PRINT v(3) v(3,4) @R3[RESISTANCE] K
33 |     LET X[K]=V(3)
34 |     LET Y[K]=V(3,4)
35 |     LET K=K+1
36 | END
37 | *****TABLICA *****
38 | PRINT X Y
39 | *****GRAFIK *****
40 | PLOT Y vs X TITLE "Linear Relation"
41 | + XLABEL V(3,0) YLABEL V(3,4)
42 | .ENDC
43 | .END
```

Опишем содержание этого текста:

- строки 1-15 содержат описание схемы рис.3.11;

- строка 16 — начало сценария;

- строка 17 — комментарий;

- строки 18-21 предназначены для вывода пояснительного текста командой **ECHO** (эхо) в окно WinSpice3;

- строка 22 содержит команду **DESTROY ALL** (стереть все), освобождающую память от результатов предыдущих построений графиков;

- строки 23-26 реализуют п.1 алгоритма (см. выше). Команда **LET** присваивает вектор правой части вектору левой части. Функция **VECTOR(11)** создает вектор с 11-ю элементами (0, 1, 2, ...10), которые впоследствии будут заменены найденными значениями. Команда **SETTYPE** (установить тип физической величины) задает X и Y в качестве векторов напряжений (voltage). В данном случае это необходимо для правильного отображения единиц измерения на графике;

- в строке 27 сопротивлению RES присваивается очень малое значение 10^{-12} Ом ($1p=10^{-12}$), поскольку задание нулевого сопротивления недопустимо в SPICE;

- в строке 28 переменной-счетчику повторений цикла K присваивается нулевое начальное значение;

- строка 29 содержит заголовок цикла типа «выполнять до тех пор, пока». В данном случае тело цикла (строки 30-35) будет выполняться до тех пор, пока K не превосходит 10. Поскольку начальное значение $K=0$, то тело цикла выполнится 11 раз;

- в строке 30 сопротивление резистора R3 (@R3[resistance]) наращивается с шагом 100 Ом. Команда **ALTER** (изменить) использовалась ранее (см. пример во ВВЕДЕНИИ);

- строка 31 задает режим расчета цепи по постоянному току известной нам директивой **.OP**, но *без точки*;

- строка 32 предназначена для печати всех величин, изменяющихся в цикле, в режиме отладки. В рабочем режиме эта директива закомментирована "звездочкой" в первой позиции строки и поэтому не активна;

- в строках 33, 34 производится занесение искоемых величин в векторы X и Y, предназначенные для вывода графика;

- в строке 35 значение счетчика цикла K наращивается на 1;

- строка 36 обозначает конец тела цикла;

- строки 37, 39 — комментарии;

- строка 38 печатает таблицу со значениями векторов X и Y;

- строки 40, 41 содержат директиву **PLOT**, имеющую расширенные возможности, по сравнению с ранее использовавшимся ее вариантом в SPICE2-стиле (с точкой). После аргумента TITLE (заголовок) указан заголовок графического окна английскими буквами в кавычках. Вместо кавычек можно использовать обратные апострофы. После аргументов XLABEL, YLABEL (X-метка, Y-метка) задаются обозначения величин, откладываемых по осям графика. Команда имеет еще много других аргументов, которые пока не рассматриваются. Поскольку запись директивы может оказаться весьма длинной, можно ее часть перенести на другую строку (строку продолжения). Она должна начинаться со знака + в первой позиции (см. строку 41);

- строка 42 обозначает конец сценария;

- строка 43 обозначает конец текстового описания.

После загрузки файла primer3_12.cir получаем следующие результаты (полный листинг):


```
WinSpice 1 -> cd
Current directory: C:\cirfiles
WinSpice 2 -> source "primer3_12new.cir"
Reading .\primer3_12new.cir
```

Circuit: PRIMER 3.12

```
*****
LINEINYE SOOTNOSHENIYA
IZMENENIE R3
*****
```

```
TEMP=27 deg C
DC Operating Point ... 100%
(эти две строки повторяются 11 раз, что соответствует числу повторений цикла)
      Constant values
      constants Sat
```

Index	X	Y

0	-8.588189e+01	3.838238e+02
1	-9.507202e+01	3.780800e+02
2	-1.038639e+02	3.725851e+02
3	-1.122821e+02	3.673237e+02
4	-1.203499e+02	3.622813e+02
5	-1.280889e+02	3.574445e+02
6	-1.355186e+02	3.528009e+02
7	-1.426573e+02	3.483392e+02
8	-1.495217e+02	3.440489e+02
9	-1.561274e+02	3.399204e+02
10	-1.624887e+02	3.359446e+02

Обратите внимание, что в начале листинга отсутствует автоматически добавляемый сценарий, имевший место в стиле SPICE2 (например, см. выше пример 3.9). Это означает, что программа воспринимает текст примера 3.12 в соответствии со стилем SPICE3. Как и ранее, коэффициенты c и d линейного соотношения могут быть найдены по любым двум точкам таблицы. Кроме нее, на экране отображается окно рис. 3.19, содержащее график искомой зависимости

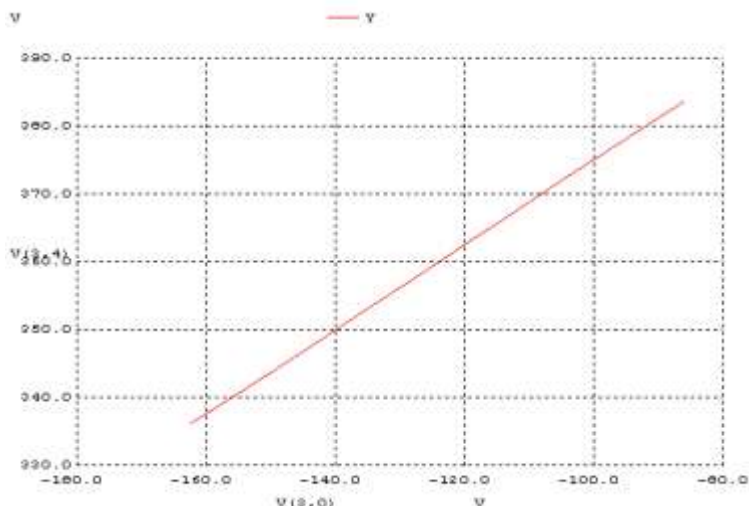


Рис. 3.19. Линейная зависимость $U_{34} = c + d U_{30}$ при изменении сопротивления R_3

Подобным образом можно найти любое соотношение при изменении любого резистора. Пусть необходимо определить функции $I_8 = a + b I_9$ и $I_8 = f(R_5)$ при изменении R_5 в диапазоне от 10 Ом до 4550 Ом с шагом 750 Ом. Блок сценария имеет вид (цепной файл primer3_13.cir):

```
.CONTROL
* CONTROL BLOCK (SCRIPT)
echo *****
echo LINEINYE SOOTNOSHENIYA
echo IZMENENIE R5
echo *****
DESTROY ALL
LET X=VECTOR(7)
LET Y=VECTOR(7)
LET RVAR=VECTOR(7)
SETTYPE CURRENT X
SETTYPE CURRENT Y
SETTYPE IMPEDANCE RVAR
LET RES = 10
LET K=0
WHILE K <= 6
  ALTER @R5[resistance] = RES+ 750*K
  OP
* PRINT @R9[i] @R8[i] @R5[RESISTANCE] K
  LET RVAR[K]=@R5[resistance]
  LET X[K]=@R9[i]
  LET Y[K]=@R8[i]
  LET K=K+1
END
****TABLICA ****
PRINT RVAR X Y
****ГРАФИК ****
```

```

PLOT Y vs X TITLE "Linear Relation"
+   XLABEL ***I9*** YLABEL ***I8***
PLOT Y vs RVAR XLABEL ***R5*** YLABEL ***I8***
.ENDC

```

По сравнению с ранее рассмотренным примером 3.12, данный сценарий имеет следующие отличия:

- количество расчетных точек равно $[4550 - 10] / 750 + 1 = 7$, что отражено в описании векторов;
- добавлено определение нового вектора RVAR длины 7 типа сопротивления (impedance), который будет использоваться для вывода сопротивлений в таблице;
- начальное значение сопротивления RES по условию задано равным 10 Ом;
- предельное значение счетчика цикла в операторе while заменено на 6;
- изменены оператор **ALTER** и отладочный оператор **PRINT** в соответствии с условием задачи;
- добавлен оператор присвоения элементам вектора RVAR значений сопротивления R_5 ;
- токи I_8 , I_9 , входящие в искомое линейное соотношение, присваиваются векторам X и Y в формах @R8[i], @R9[i] соответственно. Использование токов дополнительных "амперметров" в данном контексте невозможно;
- в операторе печати таблицы **PRINT** добавлена колонка сопротивлений RVAR;
- добавлен вывод еще одного графика $I_8 = f(R_5)$ для оценки его линейности.

Загружая файл primer3_13.cir в WinSpice3, получаем следующие результаты:

Index	RVAR	X	Y
0	1.000000e+01	5.023184e-01	4.834400e-02
1	7.600000e+02	4.541816e-01	8.272741e-02
2	1.510000e+03	4.210141e-01	1.064185e-01
3	2.260000e+03	3.967729e-01	1.237336e-01
4	3.010000e+03	3.782819e-01	1.369415e-01
5	3.760000e+03	3.637121e-01	1.473485e-01
6	4.510000e+03	3.519357e-01	1.557602e-01

Полученные графики представлены на рис. 3.20 и рис. 3.21.

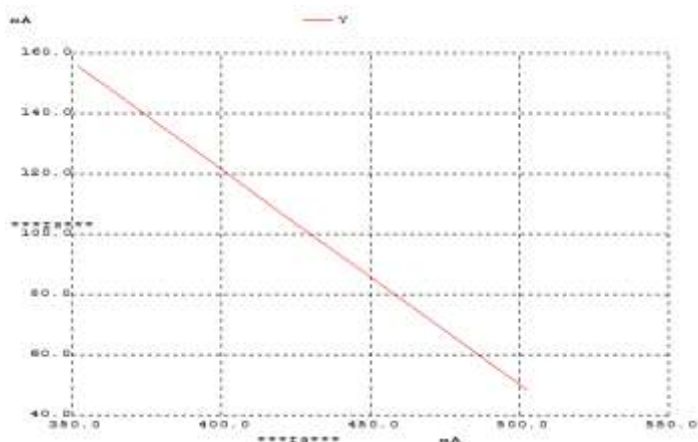


Рис. 3.20. Линейная зависимость $I_8 = a + b I_9$ при изменении сопротивления R_5

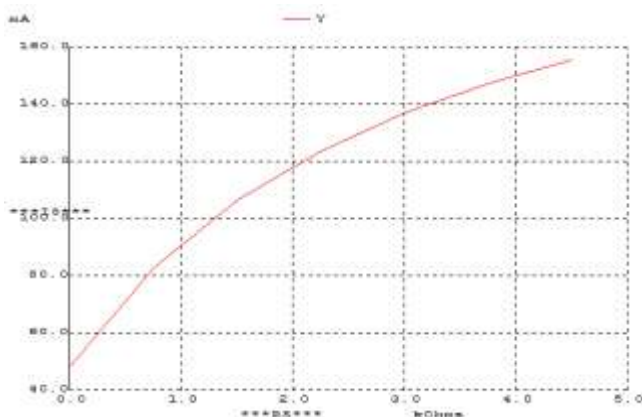


Рис. 3.21. Нелинейная зависимость $I_8 = f(R_5)$ при изменении сопротивления R_5

На последнем рисунке видна явно *нелинейная* зависимость тока I_8 от изменяемого сопротивления R_5 . Следует помнить, что при изменении сопротивления линейные соотношения (3.13) связывают токи и напряжения. Однако зависимости этих величин от сопротивления являются нелинейными.

3.2.5. Теорема об активном двухполюснике

Данная теорема позволяет заместить активный двухполюсник любой сложности одной из двух простейших двухэлементных схем замещения. Соответственно различают два варианта теоремы:

- теорема об эквивалентном источнике напряжения (теорема Тевенина¹²);
- теорема об эквивалентном источнике тока (теорема Нортон).

Часто эти два варианта называют теоремой об эквивалентном генераторе.

Теорема об эквивалентном генераторе напряжения: активный двухполюсник A (рис. 3.22) эквивалентен реальному источнику напряжения с ЭДС E_Γ , равной напряжению холостого хода $U_{ab\text{xx}}$ на зажимах разомкнутого двухполюсника и внутренним сопротивлением $R_{вн}$, равным сопротивлению этого же двухполюсника, но без источников энергии.

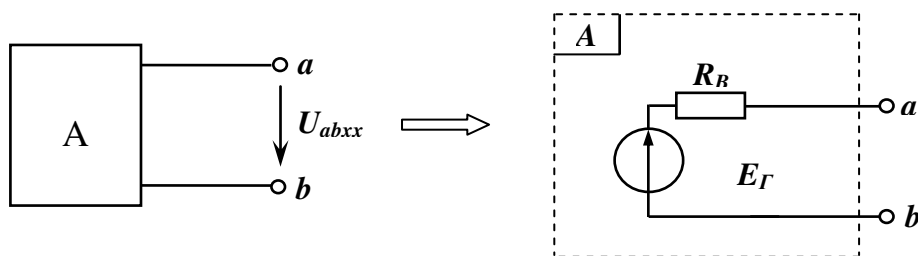


Рис. 3.22. Замена активного двухполюсника A эквивалентом Тевенина

¹² В литературе также встречается название "теорема Гельмгольца-Тевенина"

Теорема об эквивалентном генераторе тока: активный двухполюсник A (рис. 3.23) эквивалентен реальному источнику тока с током J_Γ , равным току короткого замыкания $I_{кз}$ двухполюсника и внутренней проводимостью $G_{вн}$, равной проводимости этого же двухполюсника, но без источников энергии.

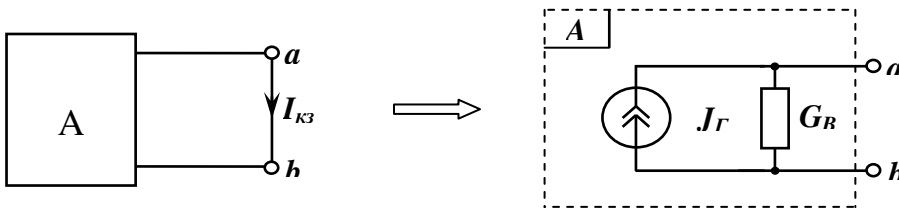


Рис. 3.23. Замена активного двухполюсника A эквивалентом Нортон

Доказательство теоремы основано на применении принципа наложения [1, с.64-67].

Таким образом, один и тот же активный двухполюсник может быть замещен либо эквивалентом Тевенина (реальным источником напряжения), либо эквивалентом Нортон (реальным источником тока). Между параметрами этих схем замещения существует связь

$$J_\Gamma = \frac{E_\Gamma}{R_{вн}}; G_{вн} = \frac{1}{R_{вн}}. \quad (3.15)$$

Как следует из теоремы, внутреннее сопротивление эквивалентного источника можно определить, если предварительно обнулить все источники в схеме и после этого найти входное сопротивление относительно зажимов двухполюсника a и b . Возможен и другой путь, основанный на соотношении (3.15)

$$R_{вн} = \frac{E_\Gamma}{J_\Gamma} = \frac{U_{abxx}}{I_{кз}}, \quad (3.16)$$

и называемый методом холостого хода и короткого замыкания.

При использовании SPICE, кроме указанных методов определения $R_{вн}$, можно использовать директиву **.TF**. Ранее при изучении этой директивы (см. пример 3.3, пп. 3.1.2) отмечалось, что строка `output_impedance_at_v(...)` содержит результат расчета выходного сопротивления. Теперь должно быть ясно, что эта величина и есть искомое $R_{вн}$.

Рассмотрим схему рис. 3.11 относительно узлов 2 и 3 как активный двухполюсник и представим его эквивалентным источником напряжения. Пусть параметры источников соответствуют примеру 3.8 (п. 3.2.3, файл `primer3_8.cir`), т. е. $E_2=50$ В, $E_3=100$ В, $J_{10}=1$ А, $J_{11}=0.5$ А. Из приведенных в п. 3.2.3 результатов расчета следует, что $U_{23}=V(2)-V(3)=157,855$ В.

По теореме Тевенина найденное значение является ЭДС эквивалентного источника напряжения, т. е. $E_\Gamma=157,855$ В.

Для определения $R_{вн}$ воспользуемся директивой **.TF**, указав в ней напряжение $V(2,3)$ в качестве выходной величины. За входную величину можно принять любой источник в схеме, например, $VE3$. Тогда директива, добавленная в файл `primer3_8.cir` будет иметь вид

.TF V(2,3) VE3.

Полученные результаты:

Transfer function analysis ...

```

transfer_function = 8.154390e-01
output_impedance_at_v(2,3) = 7.909758e+02
ve3#input_impedance = 5.255714e+03

```

Здесь нас интересует только величина $\text{output_impedance_at_v}(2,3)=7.909758e+02$. Таким образом, $R_{BH}=790,976$ Ом. Соответствующий эквивалентный источник напряжения показан на рис. 3.24, а.

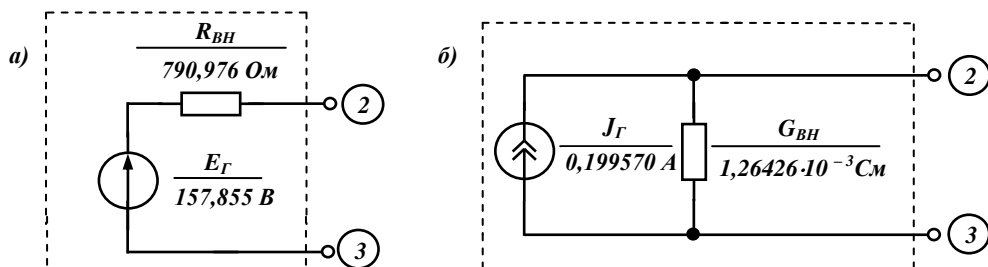


Рис. 3.24. Эквиваленты Тевенина (а) и Нортон (б) активного двухполюсника рис. 3.11 (полюса — узлы 2 и 3)

Теперь представим этот же двухполюсник эквивалентным источником тока. Для определения $J_{Г=I_{кз}}$ замкнем накоротко узлы 2 и 3 идеальным «амперметром» VA. Измененный текст файла предыдущего примера имеет вид (primer3_14.cir):

```

PRIMER 3.14
* RESISTORS
R1 5 4 1.5K
R3 1 7 850
R4 6 0 2K
R5 2 6 3K
R6 5 2 2K
R7 3 0 10K
R8 3 4 2.5K
R9 1 2 120
* AMPERMETR-ZAKOROTKA
VA 2 3 DC 0
* ISTOCHNIKI
VE2 5 0 DC 50
VE3 7 3 DC 100
IJ10 6 0 DC 1
IJ11 4 1 DC 0.5
* RASCHET PO POSTOYANNOMU TOKU
.OP
.END

```

Результаты:
Circuit: PRIMER 3.14

TEMP=27 deg C
DC Operating Point ... 100%

v(1) = 1.732941e+01

```

v(2) = -4.76190e+01
v(3) = -4.76190e+01
v(4) = -4.55357e+02
v(5) = 5.000000e+01
v(6) = -1.21905e+03
v(7) = 5.238095e+01
va#branch = 1.995704e-01
ve2#branch = -3.85714e-01
ve3#branch = -4.12371e-02

```

Отсюда следует, что $J_{Г} = I_{КЗ} = 0,199570$ А, что соответствует (3.15). Внутреннюю проводимость можно найти также согласно (3.15): $G_{вн} = 1,26426 \cdot 10^{-3}$ См. Соответствующий эквивалентный источник тока показан на рис. 3.24, б.

3.2.6. Передача энергии от активного двухполюсника к приемнику

Если к зажимам активного двухполюсника a , b (рис. 3.25) подключить пассивный приемник (нагрузку) с регулируемым сопротивлением $R_{нагр}$ (реостат), то при его изменении будут изменяться ток, напряжение и мощность приемника. Особый интерес при изучении передачи энергии имеют зависимости мощности от тока или сопротивления. Рассмотрим методику их расчета в программе WinSpice3.

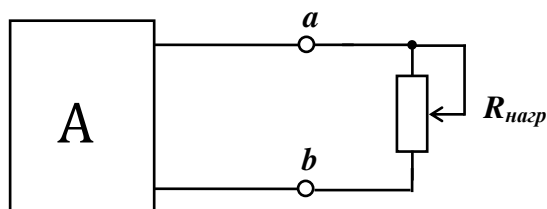


Рис. 3.25. Активный двухполюсник, нагруженный на реостат

В предыдущем примере схема рис. 3.11 рассматривалась относительно узлов 2 и 3 как активный двухполюсник. Подключим к этим узлам реостат с сопротивлением $R_{нагр} = 1$ кОм, которое задано произвольно для определенности описания реостата. Будем изменять его сопротивление от 0 до 5000 Ом с шагом 50 Ом с помощью сценария, подобного использованному ранее в примере 3.13. Количество расчетных точек равно $[5000-0]/50+1=101$, что отражено в описании векторов. Полный текст цепного файла primer3_15.cir приведен ниже

```

PRIMER 3.15
* RESISTORS
R1 5 4 1.5K
R3 1 7 850
R4 6 0 2K
R5 2 6 3K
R6 5 2 2K
R7 3 0 10K
R8 3 4 2.5K
R9 1 2 120
* NAGRUZKA
RNAGR 2 3 1K
* ISTOCHNIKI
VE2 5 0 DC 50

```

```

VE3 7 3 DC 100
IJ10 6 0 DC 1
IJ11 4 1 DC 0.5
.CONTROL
* PROGRAM BLOCK
echo *****
echo ZAVISIMOSTI TOKA I MOSHNOSTI
echo PRI IZMENENII RNAGR
echo *****
DESTROY ALL
LET XI=VECTOR(101)
LET XR=VECTOR(101)
LET YP=VECTOR(101)
SETTYPE CURRENT XI
SETTYPE IMPEDANCE XR
SETTYPE POWER YP
LET RES = 1p
LET K=0
WHILE K <= 100
  ALTER @RNAGR[resistance] = RES+ 50*K
  OP
  LET XI[K]=@RNAGR[I]
  LET XR[K]=@RNAGR[resistance]
  LET YP[K]=@RNAGR[P]
  LET K=K+1
END
****TABLICA ****
PRINT XR XI YP
****GRAFIK ****
PLOT YP vs XI TITLE "Power vs Current"
+ XLABEL Current YLABEL Power
PLOT YP vs XR TITLE "Power vs Resistance"
+ XLABEL Resistance YLABEL Power

.ENDC
.END

```

Отметим, что тип вектора YP указан как POWER (мощность) и он предназначен для запоминания значений мощности на нагрузке (LET YP[K]=@RNAGR[P]).

В результате получаем таблицу и графики, показанные на рис. 3.26, рис. 3.27.

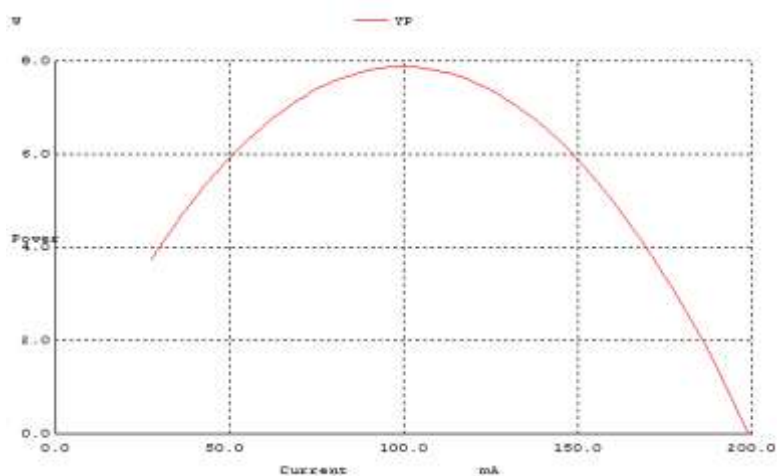


Рис. 3.26. Зависимость мощности приемника от тока при изменении его сопротивления

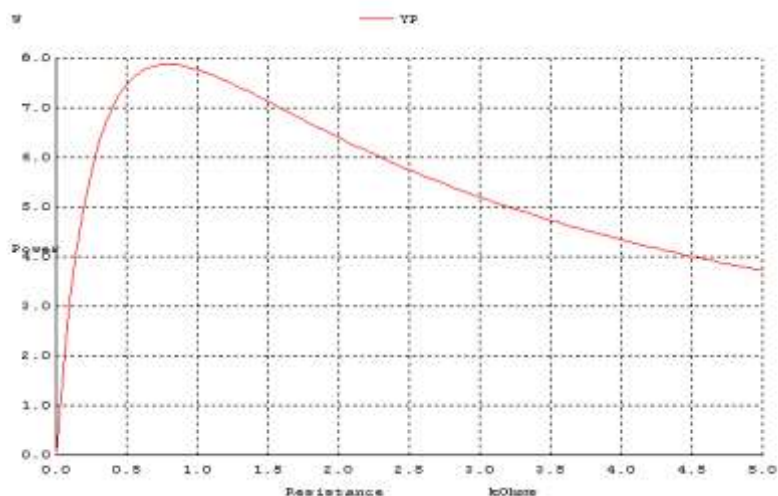


Рис. 3.27. Зависимость мощности приемника от его сопротивления

Полученные зависимости имеют экстремальный характер, что соответствует теории. Как известно, максимальная мощность развивается при согласованном режиме работы, а именно, когда $R_{нагр} = R_{зн}$. Из графика рис. 3.27, что $R_{нагр}$ в точке максимума составляет примерно 750 Ом. Этот результат можно уточнить, выделив область графика вблизи максимума прямоугольной рамкой и, затем, отпустив клавишу мыши. Обратите внимание, что WinSpice3 автоматически генерирует команду **plot** с соответствующими параметрами, в результате чего появляется новое окно, содержащее график рис. 3.28

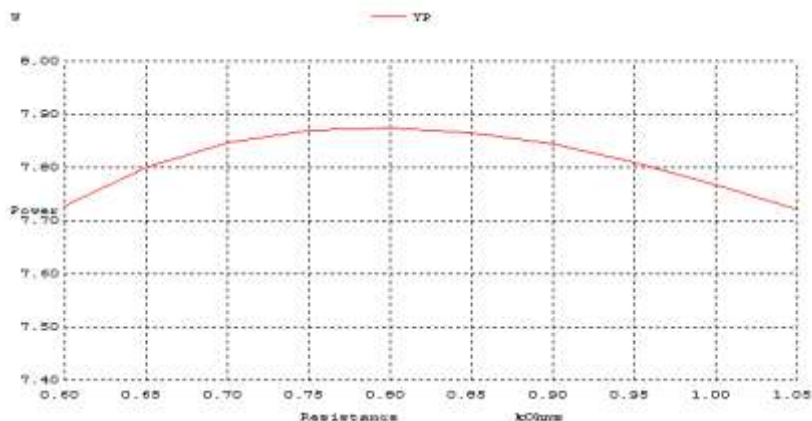


Рис. 3.28. Зависимость мощности приемника от его сопротивления вблизи максимума

Из графика следует, что уточненное значение $R_{нагр}=800$ Ом. Выше в п. 3.2.5 было найдено значение $R_{вн}=790,976$ Ом. Таким образом, условие согласования можно считать выполненным. Более близкое соответствие может быть получено при уменьшении шага изменения сопротивления.

Значение максимальной мощности, найденное по рис. 3.28, равно 7,87 Вт, что приблизительно соответствует теоретическому значению

$$P_{\max} = \frac{E_{\Gamma}^2}{4R_{\text{вн}}} = \frac{157,855^2}{4 \cdot 790,976} = 7,87578 \text{ Вт.}$$

3.2.7. Теорема вариаций

Теорема вариаций применяется в тех случаях, когда требуется рассчитать, насколько изменятся токи или напряжения в ветвях схемы, если в одной из ветвей этой схемы изменилось сопротивление. Пусть в n -й ветви сопротивление изменилось на ΔR . Тогда изменения токов в этой ветви (ΔI_n) и в некоторой k -й ветви (ΔI_k) определяются выражениями:

$$\Delta I_n = -\frac{\Delta R_n I_n}{1 + \Delta R_n G_{nn}} G_{nn}, \quad \Delta I_k = -\frac{\Delta R_n I_n}{1 + \Delta R_n G_{nn}} G_{kn}, \quad (3.17)$$

где ΔR_n — приращение сопротивления n -й ветви; I_n — ток в n -й ветви до изменения ее сопротивления; G_{nn} — входная проводимость n -й ветви; G_{kn} — передаточная проводимость ветвей k и n .

Доказательство теоремы базируется на теореме компенсации и последующем применении принципа наложения [1, с. 52, 53].

Входная и передаточная проводимости G_{nn} , G_{kn} могут быть найдены согласно п. 3.1.2 с помощью директивы **.TF**. Однако в SPICE существует специализированный вид анализа **.SENS**, позволяющий определить чувствительности токов или напряжений цепи к изменению ее параметров. Директива записывается в следующем формате

.SENS OUTVAR

где OUTVAR — узловой потенциал, напряжение или ток источника напряжения.

Чувствительностью к некоторому параметру называется степень влияния отклонения этого параметра на ток или напряжение ветви. Чувствительность тока k -й ветви к изменению сопротивления R_n в n -й ветви определяется частной производной

$$S_{kn}^I = \frac{\partial I_k}{\partial R_n}. \quad (3.18)$$

В частном случае, когда $k=n$ имеем

$$S_{nn}^I = \frac{\partial I_n}{\partial R_n}. \quad (3.19)$$

Установим связь между чувствительностями (3.18), (3.19) и формулировкой теоремы вариаций (3.17), из которой следует

$$\frac{\Delta I_n}{\Delta R_n} = -\frac{I_n}{1 + \Delta R_n G_{nn}} G_{nn}, \quad \frac{\Delta I_k}{\Delta R_n} = -\frac{I_n}{1 + \Delta R_n G_{nn}} G_{kn}. \quad (3.20)$$

Переходя к пределу при $\Delta R_n \rightarrow 0$, получаем выражения для чувствительностей

$$S_{nn}^I = \lim_{\Delta R_n \rightarrow 0} \frac{\Delta I_n}{\Delta R_n} = -G_{nn} I_n, \quad S_{kn}^I = \lim_{\Delta R_n \rightarrow 0} \frac{\Delta I_k}{\Delta R_n} = -G_{kn} I_n. \quad (3.21)$$

С учетом данных соотношений теорему вариаций (3.17) можно записать в следующем виде:

$$\Delta I_n = S_{nn}^I \Delta R'_n, \quad \Delta I_k = S_{kn}^I \Delta R'_n, \quad (3.22)$$

где $\Delta R'_n = \frac{\Delta R_n}{1 + \Delta R_n G_{nn}}.$

Рассмотрим применение метода вариаций на схеме примера 3.10. Пусть необходимо найти ΔI_6 и ΔI_3 , обусловленные увеличением сопротивления R_6 на 1 кОм. Согласно (3.22) имеем

$$\Delta I_6 = S_{66}^I \Delta R'_6, \quad \Delta I_3 = S_{36}^I \Delta R'_6, \quad (3.23)$$

где $\Delta R'_6 = \frac{\Delta R_6}{1 + \Delta R_6 G_{66}}.$

Чтобы найти S_{66}^I и S_{36}^I необходимо включить в 6-ю и 3-ю ветви виртуальные «амперметры». В примере 3.10 6-я ветвь содержит источник VA с нулевой ЭДС, а в 3-й ветви по условию также имеется источник VE3. С помощью директивы **.TF** найдем входную проводимость G_{66} . Директивы **.SENS** пока прокомментируем. Изменим текст файла primer3_10.cir и сохраним его в файле primer3_16.cir:

```
PRIMER 3.16
* RESISTORS
R1 5 4 1.5K
R3 1 7 850
R4 6 0 2K
R5 2 6 3K
R6 5 8 2K
R7 3 0 10K
R8 3 4 2.5K
R9 1 2 120
```

```

* ISTOCHNIKI
VE2 5 0 DC 50
VE3 7 3 DC 100
IJ10 6 0 DC 1
IJ11 4 1 DC 0.5
* AMPERMETR
VA 2 8 DC 0
* RASCHET VHODNOI PROVODIMOSTI G66
.TF I(VA) VA
* RASCHET CHUVSTVITELNOSTI S66
*.SENS I(VA)
* RASCHET CHUVSTVITELNOSTI S36
*.SENS I(VE3)
.END
Результаты расчета
Circuit: PRIMER 3.16

```

```

TEMP=27 deg C
Transfer function analysis ...
transfer_function = -2.39933e-04
va#input_impedance = 4.167827e+03
va#output_impedance = 1.000000e+20

```

Из полученных данных следует, что $G_{66}=2,39933 \cdot 10^{-4}$ (знак минус опускаем, полагая направления тока и напряжения согласованными). Далее активизируем директиву .SENS I(VA), убрав знак комментария перед ней и поставив его перед .TF. В WinSpice3 при использовании стиля SPICE2 вывод результатов анализа по директиве .SENS не осуществляется. После загрузки файла primer3_16.cir, получаем пустой листинг

```

WinSpice 1 -> cd
Current directory: C:\cirfiles
WinSpice 2 -> source "primer3_16.cir"
Reading .\primer3_16.cir
NOTE: This is a Spice2 circuit file
Spice3 commands added:-
.control
destroy all
set units=degrees
sens i(va)
.endc
Circuit: PRIMER 3.16

```

```

TEMP=27 deg C
WinSpice 3 ->

```

Для вывода результатов выполним команду **print all** и получим чувствительности тока, протекающего через источник VA по всем параметрам схемы. Интерес представляет величина S_{66}^I , обозначенная как гб.

```

WinSpice 3 -> print all
ij10 = -2.08053e-01
ij10_c = -2.08053e-01
ij11 = 3.582107e-01

```

```

ij11_c = 3.582107e-01
r1 = -3.52594e-05
r3 = 1.651268e-05
r4 = -6.23120e-05
r5 = 4.171466e-05
r6 = 5.398562e-06
r7 = -5.93546e-07
r8 = 1.327863e-05
r9 = -5.14405e-05
va = -2.39933e-04
ve2 = -1.42857e-04
ve3 = 1.359065e-04

```

Таким образом, $S_{66}^I = 5,398562 \cdot 10^{-6}$ А·См.

По аналогии определяем S_{36}^I , активизируя директиву .SENS I(VE3) и получая следующие результаты:

Circuit: PRIMER 3.16

```

TEMP=27 deg C
WinSpice 3 -> print all
ij10 = -1.08725e-01
ij10_c = -1.08725e-01
ij11 = 4.985050e-01
ij11_c = 4.985050e-01
r1 = 4.936309e-05
r3 = -2.31177e-05
r4 = -3.25632e-05
r5 = 2.179937e-05
r6 = -3.05793e-06
r7 = 8.309640e-07
r8 = -1.85901e-05
r9 = 7.201670e-05
va = 1.359065e-04
ve2 = 3.308722e-20
ve3 = -1.90269e-04

```

Таким образом, $S_{36}^I = -3,05793 \cdot 10^{-6}$ А·См.

Подставляя $\Delta R_6 = 1000$ Ом и найденные значения G_{66} , S_{66}^I , S_{36}^I в (3.23), получаем искомые приращения токов: $\Delta I_6 = 0,0043539$ А, $\Delta I_3 = -0,0024662$ А.

Выводы

1. В формулировку принципа наложения (3.5), (3.6) входят системные функции, которые можно определить с помощью директивы .TF. Это позволяет рассматривать их в качестве коэффициентов влияния источников (воздействий) на токи и напряжения (реакции цепи). Метод наложения, основанный на принципе наложения, позволяет выявить влияние каждого источника на искомую величину, что часто необходимо для понимания работы цепи. Данный метод позволяет свести задачу анализа цепи с

несколькими источниками к совокупности задач с одним источником, причем количество этих задач равно числу источников.

2. С помощью директивы **.TF** можно определять взаимные проводимости и сопротивления в ЛЭЦ и убедиться в выполнении принципа взаимности (обратимости).

3. Теорема компенсации позволяет заменить (скомпенсировать) любую ветвь или часть схемы идеальными источниками напряжения или тока.

4. Напряжения и токи двух любых ветвей при изменении параметра третьей ветви связаны друг с другом во всех возможных вариантах линейными соотношениями вида (3.13). Вариация параметров источников в SPICE осуществляется директивой **.DC**, имеющей следующий формат:

.DC SRCNAM VSTART VSTOP VINCR

Результаты вариации источника постоянного тока можно вывести в табличной форме директивой

.PRINT DC OV1 <OV2 ... OV8>,

а в графическом виде директивой

.PLOT DC OV1 <OV2 ... OV8>.

По оси абсцисс откладывается параметр источника SRCNAM, указанный в директиве **.DC** и обозначаемый на графике как sweep (развертка, вариация).

В WinSpice3 можно в директиве **.PLOT** использовать формат

.PLOT DC OV1 vs OV2

позволяющая построить график величины OV1 в зависимости от желаемой величины OV2, не являющейся параметром варьируемого источника.

При использовании стиля SPICE3 все описанные выше директивы записываются в сценарии *без точки*, причем в директиве **PLOT** можно указывать математические выражения и задавать следующие дополнительные аргументы:

[TITLE word] — заголовок графика (word), являющийся одновременно заголовком графического окна. Если заголовок состоит из нескольких слов, то он должен быть заключен в кавычки или в обратные апострофы;

[XLABEL word], [YLABEL word] — метки осей x и y (word), задающие обозначения величин, откладываемых по осям графика. Если метки состоят из нескольких слов, то они должны быть заключены в кавычки или в обратные апострофы

[XLIMIT xlo xhi], [YLIMIT ylo yhi] — минимальные (xlo, ylo) и максимальные (xhi, yhi) отображаемые на графике значения аргумента и функции соответственно.

5. Изменение сопротивления ветви можно реализовать с помощью сценария на языке ICL (Interactive Command Language). Язык очень похож на Basic и поддерживает характерные конструкции: оператор присвоения (LET), циклы различного типа (например, WHILE — END), условный оператор (IF — THEN — ELSE). Основным элементом хранения данных в WinSpice3 является вектор (или массив), который можно создать функцией VECTOR. Простые переменные представляются векторами единичной длины. Для векторов командой SETTYPE могут быть объявлены типы тока (CURRENT), напряжения (VOLTAGE), мощности (POWER), сопротивления (IMPEDANCE) и др. Это необходимо для правильного отображения единиц измерения на графиках. Команда ECHO позволяет выводить сообщения в окно WinSpice3. Сценарий помещается обычно в конце текстового описания между директивами **.CONTROL** и **.ENDC**. *Наличие этих директив указывает программе, что текст данного цепного файла составлен в стиле SPICE3.*

Характерной особенностью стиля SPICE3 является четкое разделение текстового описания на собственно описательную часть, определяющую топологическую структуру цепи и ее параметры, и управляющую часть (сценарий), реализующую анализ и обработку данных. В управляющей части размещаются директивы, записыва-

ваемые **без точки**, и операторы. Из сценария можно изменять параметры элементов схемы оператором (ALTER).

6. Теорема об активном двухполюснике (генераторе) позволяет заместить любую часть схемы (или всю схему) с двумя полюсами реальным источником напряжения (теорема Тевенина) или реальным источником тока (теорема Нортонa). С помощью директивы **.TF** можно определить внутреннее сопротивление (или проводимость) эквивалентного генератора, а применение директивы **.OP** дает возможность найти его напряжение холостого хода и (или) ток короткого замыкания. В последнем случае в качестве закоротки целесообразно применять идеальный амперметр, реализуемый источником напряжения с нулевой ЭДС.

7. Передачу энергии от активного двухполюсника к приемнику можно исследовать с помощью сценария, реализующего изменение сопротивления приемника (реостата). Полученные при этом графики зависимостей мощности от тока и сопротивления имеют экстремальный характер и соответствуют теоретическим значениям для согласованного режима. Подобным образом можно рассчитать зависимости и других величин в данной задаче.

8. Теорема вариаций применяется в тех случаях, когда требуется рассчитать, насколько изменятся токи или напряжения в ветвях схемы, если в одной из ветвей этой схемы изменилось сопротивление. Используя понятия чувствительности (3.18), (3.19), можно преобразовать классическую формулировку теоремы вариаций (3.17) в форму (3.23). Чувствительность величины OUTVAR по всем параметрам схемы определяется директивой

.SENS OUTVAR,

где OUTVAR — узловой потенциал, напряжение или ток источника напряжения.

Для определения входной проводимости ветви с изменяющимся сопротивлением можно использовать директиву **.TF**.

3.3. Цепи с несколькими источниками электрической энергии

В предыдущих разделах уже рассматривался расчет цепей постоянного тока с несколькими независимыми источниками с помощью SPICE (см. ВВЕДЕНИЕ, п. 2.4, п. 2.5, п. 3.2). Как следует из этих примеров, необходимо правильно описать пассивные элементы, источники, а затем для определения искомых величин применить директивы **.OP**, **.DC**, **TF**, **SENS**. Нет никаких ограничений на число источников и пассивных элементов, кроме объема оперативной памяти компьютера. Должны соблюдаться лишь два условия, вытекающие из законов Кирхгофа: в цепи не должно быть контуров, состоящих только из идеальных источников напряжения, и узлов (сечений), образованных исключительно идеальными источниками тока.

В теории цепей рассматривается несколько методов анализа:

- метод эквивалентных преобразований;
- метод наложения;
- метод законов Кирхгофа;
- метод контурных токов;
- метод узловых потенциалов (МУП);
- метод эквивалентного генератора.

Эти методы, разумеется, дают один и тот же результат и отличаются, в основном, трудоемкостью реализации. Все SPICE-программы базируются на МУП, который поэтому и рассматривается ниже в со свойственными ему особенностями.

Кроме этого, в данном разделе сравниваются различные стили текстового описания схем (SPICE2, SPICE3 и гибридный стиль SPICE2/SPICE3), поддерживаемые программой WinSpice3, и указываются области их рационального использования.

В схемах замещения электронных цепей, содержащих электронные приборы (лампы, транзисторы, операционные усилители), широко используются так называемые управляемые или зависимые источники. Поэтому необходимо изучить их SPICE-описания и особенности применения.

3.3.1. Метод узловых потенциалов и SPICE-алгоритм

Метод узловых потенциалов (МУП) [1, 56-60], предложенный Максвеллом, является наиболее простым в реализации и универсальным, что обусловило его применение в программах моделирования электрических цепей, в частности, в SPICE.

Метод основан на первом законе Кирхгофа и законе Ома для участка цепи с ЭДС. Один из узлов принимается за базисный или опорный, т. е. его потенциал полагается нулевым ($\varphi_n=0$). Поскольку в электротехнике за нулевой потенциал принимается потенциал земной поверхности, говорят, что базисный узел «заземлен». В SPICE базисному узлу соответствует узел с именем «0». Остальные потенциалы измеряются относительно базисного узла. Для цепи с n узлами формулировка МУП в матричной форме имеет следующий вид:

$$\mathbf{G}_y \mathbf{V} = \mathbf{I}_y, \quad (3.24)$$

где \mathbf{G}_y — квадратная матрица узловых проводимостей порядка $n-1$; \mathbf{V} — вектор-столбец неизвестных узловых потенциалов длины $n-1$; \mathbf{I}_y — вектор-столбец узловых токов длины $n-1$.

На главной диагонали матрицы находятся собственные проводимости узлов G_{ii} , представляющие собой арифметические суммы проводимостей ветвей, присоединенных к узлу i . Собственные проводимости всегда положительны. Вне диагонали расположены коэффициенты, называемыми смежными проводимостями узлов. Например, на пересечении i -й строки и j -го столбца ($i \neq j$) расположена смежная проводимость i -го и j -го узлов G_{ij} . Это арифметическая сумма проводимостей ветвей, включенных между узлами i и j , взятая со знаком минус. Если узлы i и j не имеют соединения, то смежная проводимость равна нулю. Следует иметь в виду, что для взаимных (обратимых) цепей матрица \mathbf{G}_y симметрична относительно главной диагонали, т. е. $G_{ki}=G_{ik}$.

Элементы вектора узловых токов представляют собой алгебраические суммы токов источников тока, подключенные к узлу с номером равным индексу элемента в векторе \mathbf{I}_y . Подтекающие к узлам токи включаются в суммы со знаком «плюс». Ветви, содержащие последовательно включенные источники напряжения и резисторы, должны быть преобразованы в эквивалентные источники тока с параллельными резисторами по формулам (3.15).

В результате решения системы МУП (3.24) определяются потенциалы всех $(n-1)$ узлов, через которые можно найти все токи, напряжения на ветвях и элементах, а также их мощности.

Однако МУП в традиционной форме, изложенной выше, имеет одно серьезное ограничение: его нельзя применять к цепям, содержащим хотя бы одну ветвь с независимым источником напряжения. Действительно, его проводимость бесконечна и в узловой матрице появятся бесконечные элементы, что делает невозможным решение системы. Поскольку в SPICE используются простые узлы, то каждый элемент является ветвью (см. п. 2.2), и, следовательно, традиционная формулировка МУП неприменима.

Существует несколько вариантов обхода этого ограничения, основанных на преобразованиях. Например, можно воспользоваться известной из теории цепей процедурой переноса источника через узел [1, с. 63, 64]. Можно последовательно с источником

включить некоторое достаточно малое сопротивление и т. д. Однако все эти способы имеют определенные недостатки, анализ которых выходит за рамки данной книги.

Описанная проблема радикально решается модификацией МУП с помощью добавления токов через источники напряжения в качестве дополнительных неизвестных. Поэтому порядок модифицированной системы уравнений определяется как $n-1+m_E$, где m_E — количество независимых источников напряжения. Вот почему после выполнения директивы **.OP** рассчитываются и выводятся значения не только узловых потенциалов, но и токов, протекающих через независимые источники напряжения. Поскольку число уравнений в модифицированном МУП больше, чем в традиционной формулировке, говорят о *расширенных узловых уравнениях*.

Итак, алгоритм функционирования SPICE при расчете ЛЭЦ постоянного тока можно представить следующим образом:

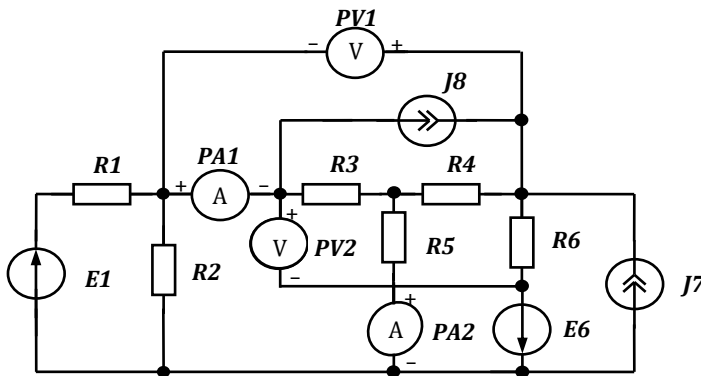
- 1) в результате чтения цепного файла, строки-описания ветвей вводятся в оперативную память компьютера, и создается структура данных, соответствующая исходной схеме и содержащая всю информацию о топологии цепи и ее параметрах;
- 2) директивы **.OP**, **.DC**, **.TF** активизируют режим расчета цепи по постоянному току в процессе которого формируется система расширенных узловых уравнений;
- 3) система решается численным методом *LU*-разложения¹³ (в случае директивы **.DC** — многократно при различных значениях параметра варьируемого источника);
- 4) в зависимости от заданных директив результаты выводятся в текстовой и (или) графической форме.

Данный алгоритм используется в качестве подпроцесса при анализе нелинейных цепей и переходных режимов, т.к. в этих случаях процедура решения сводится к расчетам последовательности схем постоянного тока.

ПРИМЕР 3.17. Пусть в схеме рис. 3.29 необходимо определить показания приборов для следующих случаев:

- 1) все приборы идеальные;
- 2) амперметры идеальные, а внутренние сопротивления вольтметров равны по 400 кОм.

Надо также выявить прибор, на показания которого изменение внутренних сопротивлений вольтметров оказало наибольшее влияние. Полярности подключения приборов указаны на схеме.



¹³ Методом *LU*-разложения (факторизации) называется один из вариантов метода исключения Гаусса.

Рис. 3.29. Схема замещения цепи постоянного тока: $R_1=100\text{ кОм}$; $R_2=150\text{ кОм}$; $R_3=75\text{ кОм}$; $R_4=100\text{ кОм}$; $R_5=120\text{ кОм}$; $R_6=65,5\text{ кОм}$; $E_1=12\text{ В}$; $E_6=10,5\text{ В}$; $J_7=5,6\text{ мкА}$; $J_8=10\text{ мкА}$; $PA1, PA2$ — амперметры; $PV1, PV2$ — вольтметры

Схема в SPICE-обозначениях приведена ниже. Здесь, как уже это неоднократно делалось ранее, идеальные амперметры $PA1$ и $PA2$ замещены источниками напряжения $VA1, VA2$ с нулевыми ЭДС. Их полярности соответствуют полярностям подключения амперметров, указанным на рис. 3.29. Реальные вольтметры $PV1$ и $PV2$ замещены R -элементами $RV1, RV2$.

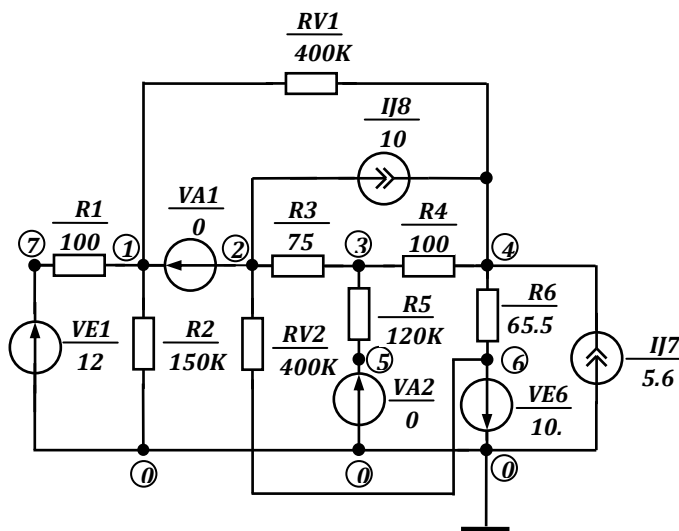


Рис. 3.30. Схема рис. 3.29 в SPICE-обозначениях: $VA1, VA2$ — идеальные «амперметры», замещающие $PA1$ и $PA2$ соответственно; $RV1, RV2$ — R -элементы, замещающие вольтметры $PV1$ и $PV2$ соответственно

Текстовое описание, составленное в стиле SPICE2 (цепной файл primer3_17.cir), имеет вид:

PRIMER 3.17 (STYLE SPICE2)

* RESISTORS

R1 7 1 100K

R2 1 0 150K

R3 2 3 75K

R4 4 3 100K

R5 3 5 120K

R6 4 6 65.5K

* ISTOCHNIKI

VE1 7 0 DC 12

VE6 0 6 DC 10.5

IJ7 0 4 DC 5.6U

IJ8 2 4 DC 10U

* AMPERMETERS

VA1 1 2 DC 0

VA2 5 0 DC 0

* VOLTMETERS

```
*RV1 1 4 400K
*RV2 2 6 400K
.OP
.END
```

Строки-описания вольтметров пока закомментированы «звездочками», что соответствует первому условию задачи (вольтметры идеальные). Действительно, идеальный вольтметр имеет внутреннее сопротивление, стремящееся к бесконечности. Можно задать очень большие значения внутренних сопротивлений вольтметров (например $1\text{G} = 10^9\text{ Ом}$), но в данном случае проще отключить их от цепи, т. е. закомментировать соответствующие строки-описания.

После загрузки цепного файла `primer3_17.cir` в WinSpice3 получаем следующие результаты (полный выходной листинг):

```
WinSpice 1 -> cd
Current directory: C:\cirfiles
WinSpice 2 -> source "primer3_17.cir"
Reading .\primer3_17.cir
NOTE: This is a Spice2 circuit file
Spice3 commands added:-
.control
destroy all
set units=degrees
save all
op
print all
.endc
```

Circuit: PRIMER 3.17 (STYLE SPICE2)

```
TEMP=27 deg C
DC Operating Point ... 100%
```

```
v(1) = 3.495663e+00
v(2) = 3.495663e+00
v(3) = -3.84758e-01
v(4) = -5.87928e+00
v(5) = 0.000000e+00
v(6) = -1.05000e+01
v(7) = 1.200000e+01
va1#branch = 6.173895e-05
va2#branch = -3.20632e-06
ve1#branch = -8.50434e-05
ve6#branch = -7.05453e-05
WinSpice 3 ->
```

Итак, для первого условия задачи получаем показание *PA1* (`va1#branch = 6.173895e-05`) или 61,739 мкА. Показание амперметра *PA2* (`va2#branch = -3.20632e-06`) или —3,2063 мкА.

Показания вольтметра *PV1* можно найти как разность $v(4)-v(1)$, поскольку он подключен плюсом к узлу 4, а минусом к узлу 1. Однако проще выполнить команду **print v(4,1)** в командной строке:

```
WinSpice 3 -> print v(4,1)
(v(4)-v(1)) = -9.37495e+00
WinSpice 4 ->
```

По аналогии найдем показание *PV2*:

```
WinSpice 4 -> print v(2,6)
(v(2)-v(6)) = 1.399566e+01
WinSpice 5 ->
```

Таким образом, показания вольтметров *PV1* и *PV2* равны —9,3750 В и 13,996 В соответственно.

Теперь выполним второе условие задачи и найдем показания тех же приборов, полагая амперметры идеальными, а внутренние сопротивления вольтметров равными 400 кОм. Для этого удалим «звездочки» перед строками-описаниями вольтметров в тексте примера 3.17 и сохраним файл *primer3_17.cir*.

Circuit: PRIMER 3.17 (STYLE SPICE2)

```
TEMP=27 deg C
DC Operating Point ... 100%
```

```
v(1) = 1.607314e+00
v(2) = 1.607314e+00
v(3) = -1.04171e+00
v(4) = -5.44183e+00
v(5) = 0.000000e+00
v(6) = -1.05000e+01
v(7) = 1.200000e+01
va1#branch = 7.558858e-05
va2#branch = -8.68089e-06
ve1#branch = -1.03927e-04
ve6#branch = -1.07492e-04
WinSpice 7 ->
```

Таким образом, для второго условия задачи получаем:

- показание амперметра *PA1* ($va1\#branch = 7,558858e-05$) или 75,589 мкА;
- показание амперметра *PA2* ($va2\#branch = -8,68089e-06$) или —8,6809 мкА;
- показание вольтметра *PV1* ($(v(4)-v(1)) = -7,04914e+00$) или —7,0491 В;
- показание вольтметра *PV2* ($(v(2)-v(6)) = 1,210731e+01$) или 12,107 В.

Сравнение результатов первого и второго условий задачи говорит о том, что влияние изменения внутренних сопротивлений вольтметров сказывается на всех приборах, а более всего — на токе, измеряемом амперметром *PA2*.

3.3.2. Сравнение различных SPICE-стилей текстового описания

Теперь на основе предыдущего примера обсудим различные стили текстового описания. Пример 3.17 составлен в стиле SPICE2, который, как уже упоминалось ранее, характеризуется наличием директив «с точкой». Этот стиль, являющийся базовым для популярной программы PSpICE, свойственен пакетному режиму (batch mode). При этом все данные и директивы находятся в цепном файле. Чтобы произвести какие-либо

изменения, надо изменить файл. Программа WinSpice3, как всегда в этом случае, автоматически добавила блок сценария, ограниченный директивами .control и .endc (см. выше полный выходной листинг). Рассмотрим его подробно. Сценарий состоит из следующих действий:

- освобождается память от результатов предыдущих построений графиков (команда destroy all);
- в качестве единицы измерения угла сдвига фаз устанавливаются градус (команда set units=degrees);
- сохраняются в оперативной памяти все векторы по умолчанию, а именно, узловые потенциалы и токи источников напряжения (команда save all);
- осуществляется расчет схемы по постоянному току (директива op);
- вывод всех результатов в числовой форме (директива print all).

ПРИМЕР 3.18. Если рассмотренный блок сценария, ограниченный директивами .control и .endc, добавить в текстовое описание, то это будет соответствовать пакетному стилю SPICE3 и, разумеется, этот блок уже не будет генерироваться автоматически. В этом случае текстовое описание примет вид (primer3_18.cir):

PRIMER 3.18 (STYLE SPICE3)

```
* RESISTORS
R1 7 1 100K
R2 1 0 150K
R3 2 3 75K
R4 4 3 100K
R5 3 5 120K
R6 4 6 65.5K
* ISTOCHNIKI
VE1 7 0 DC 12
VE6 0 6 DC 10.5
IJ7 0 4 DC 5.6U
IJ8 2 4 DC 10U
* AMPERMETERS
VA1 1 2 DC 0
VA2 5 0 DC 0
* VOLTMETERS
*RV1 1 4 400K
*RV2 2 6 400K
.CONTROL
DESTROY ALL
SET UNITS=DEGREES
SAVE ALL
OP
PRINT ALL
.ENDC
.END
```

Результаты загрузки данного файла в WinSpice3 имеют вид (полный выходной листинг):

```
WinSpice 1 -> cd
Current directory: C:\cirfiles
WinSpice 2 -> source "primer3_18.cir"
Reading .\primer3_18.cir
```

Circuit: PRIMER 3.18 (STYLE SPICE3)

TEMP=27 deg C

DC Operating Point ... 100 %

v(1) = 3.495663e+00

v(2) = 3.495663e+00

v(3) = -3.84758e-01

v(4) = -5.87928e+00

v(5) = 0.000000e+00

v(6) = -1.05000e+01

v(7) = 1.200000e+01

va1#branch = 6.173895e-05

va2#branch = -3.20632e-06

ve1#branch = -8.50434e-05

ve6#branch = -7.05453e-05

Как и следовало ожидать, в стиле SPICE3 блок сценария автоматически *не добавляется* и выходной листинг более компактен, по сравнению со стилем SPICE2. Отметим, что команда SET UNITS=DEGREES при расчете цепи постоянного тока не нужна, и ее можно удалить.

Может показаться, что существенного различия между пакетными стилями SPICE2 и SPICE3 нет. Но это будет справедливо лишь для рассмотренного достаточно простого примера. Предположим, что в сложной цепи надо найти все токи и мощности R -элементов. В случае использования стиля SPICE2 надо будет в каждую ветвь включить «амперметр», либо перейти к интерактивному режиму (см. ВВЕДЕНИЕ). Мощности вообще невозможно получить в пакетном режиме SPICE2 и придется опять использовать интерактивные вычисления. Команды, выполненные в интерактивном режиме, запоминаются только в текущем сеансе работы WinSpice3. Если параметры цепи изменились и программа перезагружена, то эти команды придется вводить повторно с клавиатуры, что затруднительно и чревато ошибками.

В отличие от этого, пакетный стиль SPICE3 позволяет в блоке сценария, ограниченном директивами **.CONTROL** и **.ENDC**, задавать почти все интерактивные команды. Ток и мощность, например, 10-го резистора можно вывести командой `print @R10[I], @R10[P]`.

Еще проще в рассматриваемом примере записать в блоке сценария команду `show all`, позволяющую вывести параметры, токи, напряжения и мощности для каждого элемента.

Иными словами, команды интерактивного режима можно использовать в блоке сценария текстового описания, сохраняемого в цепном файле. Следовательно, команды хранятся в этом файле и не требуют каждый раз повторного набора с клавиатуры. Напомним, что директивы записываются в блоке сценария «без точки». Кроме этого, при использовании пакетного стиля SPICE3 можно создавать сценарии, реализующие циклы (см. примеры 3.12, 3.13, 3.15).

Важно отметить, что пакетный и интерактивный режимы не исключают, а взаимно дополняют друг друга. Например, если при анализе полученных результатов возникает какая-нибудь идея, требующая немедленной проверки, то целесообразно использовать команды в интерактивном режиме. В дальнейшем они могут быть включены в сценарий, если идея оказалась плодотворной.

Теперь обсудим проблему обратной совместимости стилей. Если текстовое описание составлено в стиле SPICE3, то оно не будет полностью воспринято программой, базирующейся на SPICE2 (например, PSPICE или LTspice). Поэтому была бы весьма желательна поддержка некоторого совместимого (или гибридного) стиля SPICE2/SPICE3, что и осуществлено в WinSpice3

Гибридный стиль характеризуется следующими особенностями:

- директивы **.OP**, **.DC**, **.AC**, **TRAN**¹⁴ записываются, как и в SPICE2, «с точкой», но *вне блока сценария*;

- в блоке сценария *обязательно* задается команда RUN, которая выполняет директивы, записанные *вне* блока. Это дает возможность не дублировать данные директивы внутри блока. Директивы **.PLOT** и **.PRINT** не выполняются командой RUN и поэтому они должны быть продублированы в блоке сценария без ключа DC. Кроме этого, здесь также могут быть указаны любые директивы, допустимые в SPICE3;

- директивы **.CONTROL** и **.ENDC** не используются, и все строки блока сценария начинаются с двух символов ***#**.

Таким образом, если такой цепной файл загрузить в программу, базирующуюся на стиле SPICE2 (например, в PSPICE), то, как обычно, выполняются директивы «с точкой». Все строки, начинающиеся «звездочкой» (в т.ч. блок сценария), рассматриваются программой PSPICE как комментарии и, естественно, не исполняются.

Если этот же файл загружен в программу, базирующуюся на стиле SPICE3 (например, WinSpice3), то директивы **.OP**, **.DC**, **.AC** и **.TRAN** активизируются командой RUN, а наличие знака «решетка» (**#**) позволяет программе распознать и выполнить блок сценария.

ПРИМЕР 3.19. Соответственным образом модифицированный текст цепного файла из примера 3.18 имеет вид (файл primer3_19.cir):

PRIMER 3.19 (STYLE SPICE2/SPICE3)

```
* RESISTORS
R1 7 1 100K
R2 1 0 150K
R3 2 3 75K
R4 4 3 100K
R5 3 5 120K
R6 4 6 65.5K
* ISTOCHNIKI
VE1 7 0 DC 12
VE6 0 6 DC 10.5
IJ7 0 4 DC 5.6U
IJ8 2 4 DC 10U
* AMPERMETERS
VA1 1 2 DC 0
VA2 5 0 DC 0
* VOLTMETERS
*RV1 1 4 400K
*RV2 2 6 400K
.OP
*
* SCRIPT
```

¹⁴ Директивы **.AC** и **.TRAN** предназначены для расчета гармонических и переходных процессов соответственно и будут рассмотрены в последующих главах.

```

*#DESTROY ALL
*#SET UNITS=DEGREES
*#SAVE ALL
*#RUN
*#PRINT ALL
.END

```

В начале листинга, после строки Reading \primer3_19.cir выводится сообщение: NOTE: This is a hybrid Spice2/Spice3 circuit file, говорящее о том, что стиль файла опознан как гибридный.

Результаты расчета полностью совпадают с предыдущим примером и поэтому не приводятся.

Итак, подведем итог рассмотрению различных вариантов текстового описания:

- стиль SPICE2 является наиболее простым и распространенным, благодаря программе PSPICE, но наименее гибким. Он не позволяет организовать обработку результатов и реализацию сценариев;

- стиль SPICE3 лишен вышеуказанных недостатков, но более сложен, поскольку включает в себя возможности программирования сценариев;

- гибридный стиль SPICE2/SPICE3 позволяет создавать универсальные текстовые описания, что удобно для пользователей программ, базирующихся на различных версиях SPICE. Так, например, многие демонстрационные цепные файлы¹⁵, входящие в дистрибутив программы WinSpice3, написаны именно в гибридном стиле. Однако универсальность текстового описания не означает, что пользователь PSPICE получит результаты всегда в том виде и в том объеме, что и пользователь SPICE3. Просто они будут соответствовать возможностям PSPICE для данной задачи (см. ниже пример 3.21).

При составлении текстового описания необходимо учитывать возможности различных стилей. Так в случае простой задачи, где надо найти только потенциалы, напряжения и некоторые токи целесообразно использовать стиль SPICE2. При большем разнообразии выходных данных лучше подойдет стиль SPICE3. Если же требуется реализовать изменение параметров элементов схемы или произвести нестандартную обработку данных, то этот стиль становится единственно возможным. При необходимости обеспечения обратной совместимости необходимо перейти к гибриднему стилю.

ПРИМЕР 3.20. В качестве заключительного примера рассмотрим схему рис. 3.29, рис. 3.30, где E_6 изменяется в диапазоне $(-10...10)$ В. Необходимо выполнить следующие условия:

- 1) найти значение E_6 , при котором разность показаний идеальных вольтметров $PV1$ и $PV2$ равна нулю;

- 2) построить таблицу и график зависимости разности показаний идеальных вольтметров от E_6 ;

- 3) построить таблицу и график зависимости тока, протекающего через $R2$ сверху вниз по схеме, в зависимости от E_6 ;

- 4) ток и мощность каждого R -элемента при $R_2 = 50$ кОм и $E_6 = 10,5$ В.

Для решения поставленной задачи целесообразно использовать стиль SPICE3. Текст цепного файла primer3_20.cir приведен ниже:

PRIMER 3.20 (STYLE SPICE3)

¹⁵ По умолчанию цепные файлы примеров находятся в папке C:\Program Files\OuseTech\WinSpice\examples


```

* RESISTORS
R1 7 1 100K
R2 1 0 150K
R3 2 3 75K
R4 4 3 100K
R5 3 5 120K
R6 4 6 65.5K
* ISTOCHNIKI
VE1 7 0 DC 12
VE6 0 6 DC 10.5
IJ7 0 4 DC 5.6U
IJ8 2 4 DC 10U
* AMPERMETERS
VA1 1 2 DC 0
VA2 5 0 DC 0
* VOLTMETERS
*RV1 1 4 400K
*RV2 2 6 400K
*
* SCRIPT
.CONTROL
DESTROY ALL
SAVE ALL @R2[I]
ECHO
ECHO ===== ISTOCHNIK VE6 IZMEN. OT -10V DO 10V =====
DC VE6 -10 10 2
SETTYPE CURRENT @R2[I]
PRINT V(4,1) V(2,6) V(4,1)-V(2,6) @R2[i]
PLOT V(4,1)-V(2,6)
PLOT @R2[I]
ECHO
ECHO ===== RASCHET PO POST. TOKU PRI SOPROTIVLENIИ R2=50 kOm =====
ALTER @R2[RESISTANCE]=50K
OP
SHOW ALL
PRINT @R1[I] @R1[P] @R2[I] @R2[P] @R3[I] @R3[P]
+ @R4[I] @R4[P] @R5[I] @R5[P] @R6[I] @R6[P]
.ENDC
.END

```

В тексте сценария использованы команды, применявшиеся ранее, и поэтому отметим лишь некоторые особенности:

— команда SETTYPE, задающая токовый тип вектору @R2[I], должна использоваться после директивы DC, когда все векторы уже созданы. В противном случае возникает неустранимая ошибка, и программа аварийно завершается. Если команду SETTYPE вообще не использовать, то ось токов на графике будет размечена в вольтах, что некорректно;

— в командах PRINT и PLOT для вычисления разности показаний вольтметров использовано арифметическое выражение V(4,1)-V(2,6), что не допускается в стиле SPICE2;

— команда SHOW ALL выводит результаты расчета по всем элементам максимум с тремя значащими цифрами. Для получения большей разрядности использована команда PRINT, разбитая на две строки.

После загрузки цепного файла primer3_20.cir в WinSpice3 получаем следующие результаты (полный листинг):

```
WinSpice 1 -> cd
Current directory: C:\cirfiles
WinSpice 2 -> source "primer3_20.cir"
Reading .\primer3_20.cir
```

Circuit: PRIMER 3.20 (STYLE SPICE3)

===== ISTOCHNIK VE6 IZMEN. OT -10V DO 10V =====

TEMP=27 deg C

DC analysis ... 100%

PRIMER 3.20 (STYLE SPICE3)

DC transfer characteristic Sun Aug 21 23:16:29 2005

Index	sweep	(v(4)-v(1))	(v(2)-v(6))	(v(4)-v(1))-(v(2)-v(6))
0	-1.000000e+01	2.734979e+00	-3.977048e+00	6.712027e+00
1	-8.000000e+00	1.553523e+00	-2.223613e+00	3.777135e+00
2	-6.000000e+00	3.720663e-01	-4.701775e-01	8.422437e-01
3	-4.000000e+00	-8.093900e-01	1.283258e+00	-2.092648e+00
4	-2.000000e+00	-1.990846e+00	3.036693e+00	-5.027539e+00
5	0.000000e+00	-3.172303e+00	4.790128e+00	-7.962431e+00
6	2.000000e+00	-4.353759e+00	6.543563e+00	-1.089732e+01
7	4.000000e+00	-5.535215e+00	8.296999e+00	-1.383221e+01
8	6.000000e+00	-6.716671e+00	1.005043e+01	-1.676711e+01
9	8.000000e+00	-7.898128e+00	1.180387e+01	-1.970200e+01
10	1.000000e+01	-9.079584e+00	1.355730e+01	-2.263689e+01

PRIMER 3.20 (STYLE SPICE3)

DC transfer characteristic Sun Aug 21 23:16:29 2005

Index	sweep	@R2[i]
0	-1.000000e+01	4.015301e-05
1	-8.000000e+00	3.850925e-05
2	-6.000000e+00	3.686548e-05
3	-4.000000e+00	3.522172e-05
4	-2.000000e+00	3.357795e-05
5	0.000000e+00	3.193419e-05
6	2.000000e+00	3.029042e-05
7	4.000000e+00	2.864666e-05
8	6.000000e+00	2.700289e-05
9	8.000000e+00	2.535913e-05
10	1.000000e+01	2.371536e-05

===== RASCHET PO POST. TOKU PRI SOPROTIVLENI R2=50 kOm =====

TEMP=27 deg C

DC Operating Point ... 100 %

Isource: Independent current source

device	ij8	ij7
dc	1e-05	5.6e-06
acmag	0	0
v	-8.35	-6.12
p	8.35e-05	3.43e-05

Resistor: Simple linear resistor

device	r6	r5	r4	r3	r2	r1
model	R	R	R	R	R	R
resistance	6.55e+04	1.2e+05	1e+05	7.5e+04	5e+04	1e+05
i	6.69e-05	-8.27e-06	-5.13e-05	4.3e-05	4.47e-05	9.77e-05
p	0.000293	8.21e-06	0.000263	0.000139	9.97e-05	0.000954
tc1	0	0	0	0	0	0
tc2	0	0	0	0	0	0

Vsource: Independent voltage source

device	va2	va1	ve6	ve1
dc	0	0	10.5	12
acmag	0	0	0	0
i	-8.27e-06	5.3e-05	-6.69e-05	-9.77e-05
p	0	0	0.000702	0.00117

@r1[i] = 9.766853e-05
@r1[p] = 9.539141e-04
@r2[i] = 4.466295e-05
@r2[p] = 9.973895e-05
@r3[i] = 4.300558e-05
@r3[p] = 1.387110e-04
@r4[i] = -5.12745e-05
@r4[p] = 2.629074e-04
@r5[i] = -8.26892e-06
@r5[p] = 8.205009e-06
@r6[i] = 6.687450e-05
@r6[p] = 2.929290e-04
WinSpice 3 ->

После таблицы, выведенной командой PRINT, следуют результаты работы команды SHOW ALL. Здесь можно выделить три раздела:

- 1) Isource: Independent current source — независимые источники тока;
- 2) Resistor: Simple linear resistor — резистивные элементы;
- 3) Vsource: Independent voltage source — независимые источники напряжения.

Разобраться в содержимом этих разделов не составляет труда, т. к. оно представлено в табличной форме. Сделаем лишь некоторые пояснения:

— в разделах Isource и Vsource аббревиатуры dc и acmag обозначают параметры источников на постоянном и переменном токе соответственно;

— в разделе Resistor аббревиатуры tc1 и tc2 обозначают температурные коэффициенты сопротивлений (нули по умолчанию).

Обратите внимание, что сопротивление $R_2 = 5 \cdot 10^4 = 50 \text{ кОм}$ (раздел Resistor, строка resistance, столбец r2) соответствует четвертому условию задачи и является результатом выполнения команды alter. ЭДС E_6 при этом равна 10,5 В (раздел Vsource, строка dc, столбец ve6).

Кроме вышеописанных данных, на экране появляются два графических окна, содержащих искомые зависимости (рис. 3.31, рис. 3.32).

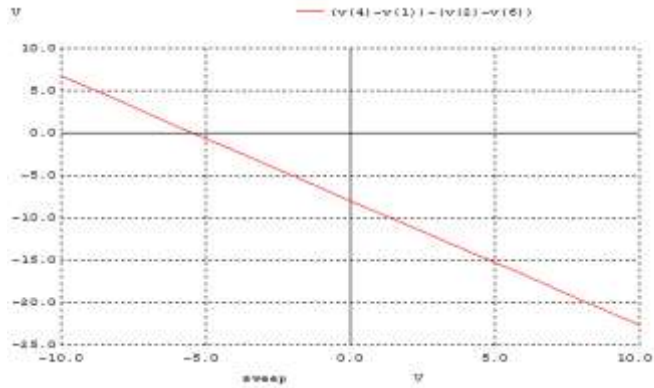


Рис. 3.31. Зависимость разности показаний вольтметров PV1 и PV2 от напряжения источника VE6.

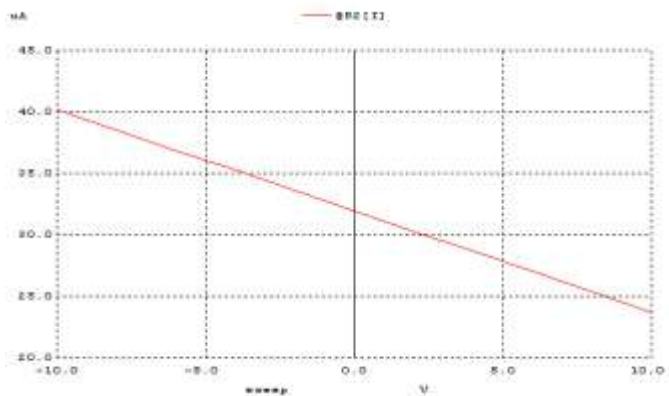


Рис. 3.32. Зависимость тока I_2 от напряжения источника VE6

Из анализа зависимости рис. 3.31 следует, что искомое значение E_6 примерно равно $-5,5 \text{ В}$. Этот результат можно уточнить последовательным укрупнением участка графика вблизи нуля. Соответствующая процедура, использующая мышь, описана при анализе графика рис. 3.16. Уточненное значение равно $-5,426 \text{ В}$.

ПРИМЕР 3.21. Текст примера 3.20, оформленный в гибридном стиле, имеет вид (primer3_21.cir):

```
PRIMER 3.21 (STYLE SPICE2/SPICE3)
* RESISTORS
R1 7 1 100K
R2 1 0 150K
R3 2 3 75K
R4 4 3 100K
R5 3 5 120K
R6 4 6 65.5K
```

```

* ISTOCHNIKI
VE1 7 0 DC 12
VE6 0 6 DC 10.5
IJ7 0 4 DC 5.6U
IJ8 2 4 DC 10U
* AMPERMETERS
VA1 1 2 DC 0
VA2 5 0 DC 0
* VOLTMETERS
*RV1 1 4 400K
*RV2 2 6 400K
*
* DIRECTIVES SPICE2 (PSPICE)
.DC VE6 -10 10 2
.PRINT DC V(4,1) V(2,6) I(R2)
.PLOT DC V(4,1) V(2,6)
.PLOT DC I(R2)
*
* SCRIPT SPICE3
*# DESTROY ALL
*# SAVE ALL @R2[I]
*# ECHO
*# ECHO ===== ISTOCHNIK VE6 IZMEN. OT -10V DO 10V =====
*# RUN
*# SETTYPE CURRENT @R2[I]
*# PRINT V(4,1) V(2,6) V(4,1)-V(2,6) @R2[i]
*# PLOT V(4,1)-V(2,6)
*# PLOT @R2[I]
*# ECHO
*# ECHO === RASCHET PO POST. TOKU PRI SOPROTIVLENI R2=50 kOm ===
*# ALTER @R2[RESISTANCE]=50K
*# OP
*# SHOW ALL
*# PRINT @R1[I] @R1[P] @R2[I] @R2[P] @R3[I] @R3[P]
*# PRINT @R4[I] @R4[P] @R5[I] @R5[P] @R6[I] @R6[P]
.END

```

Сделаем некоторые пояснения. Директива DC перенесена в раздел SPICE2. Там же находятся директивы .PRINT и .PLOT, не позволяющие вывести разность показаний вольтметров. Аналогичные директивы, имеющиеся в блоке сценария SPICE3, дают такую возможность.

Директива OP осталась на месте в блоке сценария, после команды ALTER, изменяющей сопротивление R_2 . Перенос этой директивы в раздел SPICE2 не имеет смысла, поскольку в данном случае нет возможности изменить R_2 после загрузки цепного файла.

В сценарий SPICE3 вместо директивы DC добавлена команда RUN, запускающая директиву .DC, находящуюся теперь в разделе SPICE2.

3.3.3. Цепи с управляемыми источниками

Рассмотренные ранее независимые источники генерируют напряжение или ток в виде известной функции времени, которая не зависит от токов и напряжений, возникающих в цепи. Поэтому данные источники называют независимыми. Напомним, что они являются идеализированными элементами, замещающими первичные источники электрической энергии.

Введем в рассмотрение зависимые или управляемые источники, напряжение или ток которых однозначно определяются напряжением или током *другой* ветви, называемой *управляющей ветвью*. Основное отличие от независимых источников состоит в том, что напряжение или ток источника, находящегося в *управляемой* ветви, заранее неизвестен, так как определяется напряжением (током) управляющей ветви. Сами по себе управляемые источники не могут отдавать энергию в цепь и возбуждать в ней токи и напряжения. Для этого в цепи должен присутствовать хотя бы один независимый источник.

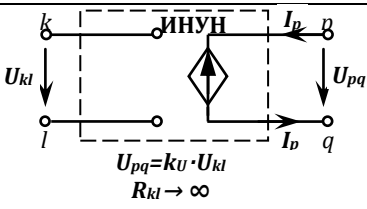
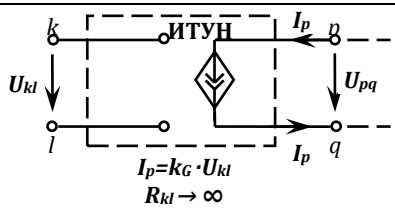
Управляемые источники являются идеализированными элементами схем замещения электронных приборов (электронных ламп, транзисторов, операционных усилителей и других интегральных микросхем). Применяются они также для моделирования многополюсников (или макромоделирования).

Существует четыре типа управляемых источников:

- источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН);
- источник напряжения, управляемый током (ИНУТ);
- источник тока, управляемый напряжением (ИТУН);
- источник тока, управляемый током (ИТУТ).

ИНУН и ИНУТ объединяют понятием *управляемые источники напряжения* (УИН), а ИТУН и ИТУТ — *управляемые источники тока* (УИТ).

Будем рассматривать простейшие источники, характеризуемые прямой пропорциональной зависимостью между управляемой величиной (напряжением или током) и напряжением (током) единственной управляющей ветви. На рис. 3.33 показаны УГО управляемых источников и соответствующие соотношения, связывающие управляющую (kl) и управляемую (pq) ветви.

Управляющая величина	УИН	УИТ
Напряжение U_{kl}	 $U_{pq} = k_U \cdot U_{kl}$ $R_{kl} \rightarrow \infty$	 $I_p = k_G \cdot U_{kl}$ $R_{kl} \rightarrow \infty$

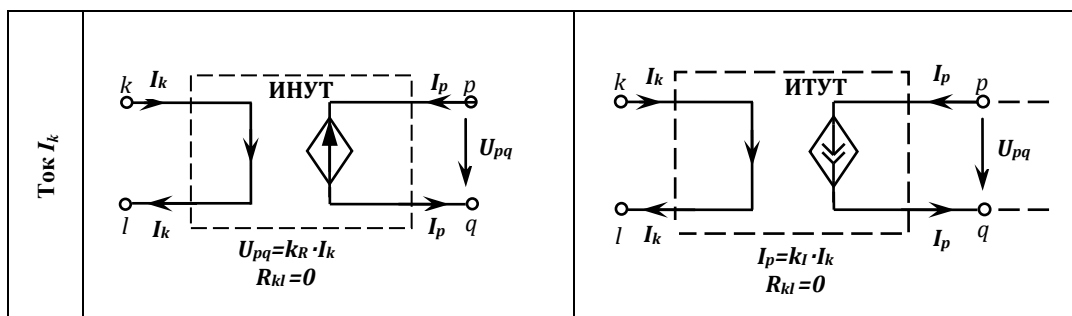


Рис. 3.33. Условные графические обозначения управляемых источников и их уравнения

Управляемые источники обычно обозначают ромбами, чтобы отличать на схемах от независимых источников. Непрерывная стрелка внутри ромба используется для обозначения УИН, а двойная разрывная стрелка — для обозначения УИТ.

Напряжение или ток *управляющей* ветви можно рассматривать как входную величину, а напряжение или ток *управляемой* ветви — как выходную. *Выходная величина равна входной величине, умноженной на константу, называемую коэффициентом управления.* Входы ИНУН и ИТУН характеризуются бесконечно большим сопротивлением. Поэтому они обычно подключаются своими входами параллельно участку электрической цепи (как вольтметр). Напротив, входы ИНУТ и ИТУТ имеют нулевое сопротивление и включаются обычно последовательно в ветвь электрической цепи (как амперметр). Выходное сопротивление УИН и выходная проводимость УИТ равны нулю.

Важно иметь в виду, что положение управляющей ветви в схеме и направление входной величины столь же важны, как положение и направление выходной величины.

Управляемые источники могут отдавать или потреблять мощность. Например, для ИНУН

$$P = U_{pq} I_p = k_U U_{kl} I_p.$$

Знак P зависит от знаков U_{kl} , I_p и k_U , которые в общем случае могут быть различными.

Необходимо отметить, что рассматриваемые источники являются необратимыми (невзаимными) элементами и цепь, содержащая хотя бы один из них, теряет свойство взаимности. Узловая матрица, составленная для схем с управляемыми источниками, уже не будет симметрична относительно главной диагонали, т. е. в общем случае

$$G_{km} \neq G_{mk}$$

Рассмотрим описание управляемых источников в SPICE.

3.3.3.1. ИСТОЧНИК НАПРЯЖЕНИЯ, УПРАВЛЯЕМЫЙ НАПРЯЖЕНИЕМ

Обозначения для ИНУН показаны на рис. 3.34.

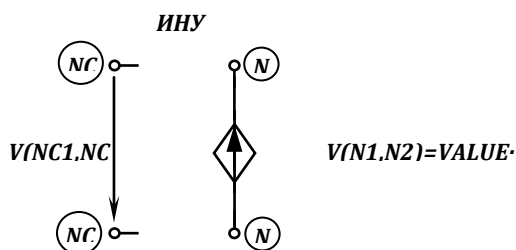


Рис. 3.34. ИНУН в SPICE-обозначениях

Здесь N1, N2 — положительный и отрицательный зажимы управляемой ветви (источника напряжения); NC1, NC2 — положительный и отрицательный зажимы управляющей ветви; VALUE — безразмерный коэффициент управления (в данном случае он имеет смысл коэффициента передачи напряжения).

ИНУН описывается SPICE-предложением

EXXXXXXX N1 N2 NC1 NC2 VALUE

Например, если напряжение управляющей ветви $V(NC1,NC2)=20$ В и $VALUE=5$, то напряжение управляемой ветви $V(N1,N2)=5 \cdot 20=100$ В.

Приведем примеры описания ИНУН.

1. Предложение

EPRAV 17 8 42 18 24

описывает ИНУН с именем EPRAV и коэффициентом передачи 24, подключенный «плюсом» к узлу 17, а «минусом» к узлу 8. Управляющая ветвь подключена «плюсом» к узлу 42, а «минусом» к узлу 18.

То же самое задают описания:

EPRAV 8 17 42 18 -24

EPRAV 17 8 18 42 -24

EPRAV 8 17 18 42 24

2. Предложение

EV12 PINA PINB 4 0 25.6K

описывает ИНУН с именем EV12 и коэффициентом передачи 25600, подключенный «плюсом» к узлу PINA, а «минусом» к узлу PINB. Управляющая ветвь подключена «плюсом» к узлу 4, а «минусом» к узлу 0 («земле»).

3.3.3.2. ИСТОЧНИК ТОКА, УПРАВЛЯЕМЫЙ НАПРЯЖЕНИЕМ

Обозначения для ИТУН показаны на рис. 3.35.

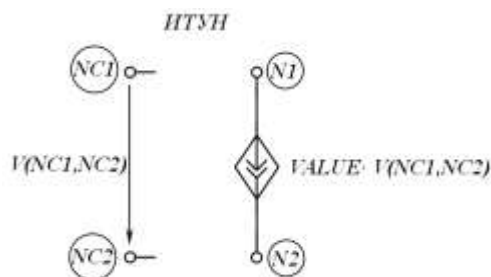


Рис. 3.35. ИТУН в SPICE-обозначениях

Здесь N1, N2 — положительный и отрицательный зажимы управляемой ветви (источника тока). Положительный ток протекает от узла N1 через источник к узлу N2.

NC1, NC2 — положительный и отрицательный зажимы управляющей ветви; VALUE — коэффициент управления, измеряемый в сименсах (в данном случае он имеет смысл передаточной проводимости).

ИТУН описывается SPICE-предложением

GXXXXXXX N1 N2 NC1 NC2 VALUE

Например, если напряжение управляющей ветви $V(NC1,NC2)=6$ В и $VALUE=0,25$ См, то ток управляемой ветви равен $6 \cdot 0,25=1,5$ А.

Приведем примеры описания ИТУН.

1. Предложение

GRAD 19 40 6 99 0.65

описывает ИТУН с именем GRAD и передаточной проводимостью 0,65 См, ток которого протекает внутри источника в направлении от узла 19 к узлу 40. Управляющая ветвь подключена «плюсом» к узлу 6, а «минусом» к узлу 99.

Т.П.А. самое задают описания:

GRAD 19 40 99 6 -0.65

GRAD 40 19 6 99 -0.65

GRAD 40 19 99 6 0.65

2. Предложение

GJ6 OUT 0 POINT1 POINT2 45.3M

описывает ИТУН с именем GJ6 и передаточной проводимостью 0,0453 См, ток которого протекает внутри источника в направлении от узла OUT к узлу 0. Управляющая ветвь подключена «плюсом» к узлу POINT1, а «минусом» к узлу POINT2.

3.3.3.3. ИСТОЧНИК НАПРЯЖЕНИЯ, УПРАВЛЯЕМЫЙ ТОКОМ

Обозначения для ИНУТ показаны на рис. 3.36.

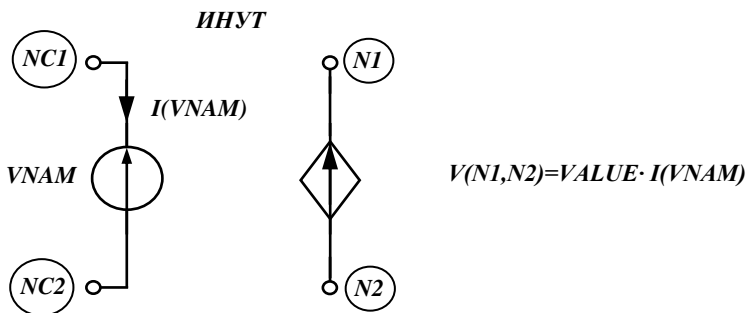


Рис. 3.36. ИНУТ в SPICE-обозначениях

Здесь N1, N2 — положительный и отрицательный зажимы управляемой ветви (источника напряжения); NC1, NC2 — положительный и отрицательный зажимы управляющей ветви; V_NAM — имя идеального источника напряжения, ток которого является управляющей величиной. Ток считается положительным, если он протекает в направлении от NC1 к NC2. Если по схеме в управляющей ветви источник V_NAM отсутствует, то его необходимо добавить, задав ему нулевую ЭДС; VALUE — коэффициент управления, измеряемый в омах (в данном случае он имеет смысл передаточного сопротивления).

ИНУТ описывается SPICE-предложением

HXXXXXXX N1 N2 V_NAM VALUE.

При этом предполагается, что источник V_{NAM} задан описанием
 $V_{NAM} \text{ NC1 NC2 DC } 0$.

Например, если ток управляющей ветви $I(V_{NAM})=2$ А и $VALUE=5$ Ом, то напряжение управляемой ветви $V(N1,N2)=5 \cdot 2=10$ В.

Приведем пример описания ИНУТ. Предложение

$HX \text{ 5 J17 VZ } 0.5K$

описывает ИНУТ с именем HX и передаточным сопротивлением $0,5 \text{ кОм}=500$ Ом, подключенный «плюсом» к узлу 5, а «минусом» к узлу J17. Управляющая ветвь содержит источник напряжения VZ . («амперметр»), подключенный «плюсом» к узлу ONE, а «минусом» к узлу TWO.

$VZ \text{ ONE TWO DC } 0$

То же самое задает описание:

$HX \text{ J17 5 VZ } -0.5K$

3.3.3.4. ИСТОЧНИК ТОКА, УПРАВЛЯЕМЫЙ ТОКОМ

Обозначения для ИТУТ показаны на рис. 3.37.

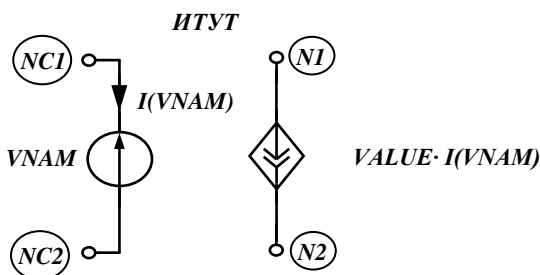


Рис. 3.37. ИТУТ в SPICE-обозначениях

Здесь $N1, N2$ — положительный и отрицательный зажимы управляемой ветви (источника тока). Положительный ток протекает от узла $N1$ через источник к узлу $N2$. $NC1, NC2$ — положительный и отрицательный зажимы управляющей ветви; V_{NAM} — имя идеального источника напряжения, ток которого является управляющей величиной. Ток считается положительным, если он протекает в направлении от $NC1$ к $NC2$. Если по схеме в управляющей ветви источник V_{NAM} отсутствует, то его необходимо добавить, задав ему нулевую ЭДС; $VALUE$ — безразмерный коэффициент управления (в данном случае он имеет смысл коэффициента передачи тока).

ИТУТ описывается SPICE-предложением

$FXXXXXXX \text{ N1 N2 V_{NAM} VALUE}$.

При этом предполагается, что источник V_{NAM} задан описанием

$V_{NAM} \text{ NC1 NC2 DC } 0$.

Например, если ток управляющей ветви $I(V_{NAM})=1$ А и $VALUE=3$, то ток управляемой ветви равен $1 \cdot 3=3$ А.

Приведем пример описания ИТУТ. Предложение

$FJ11 \text{ 3PIN 26 VCONTR } 158$

описывает ИТУТ с именем $FJ11$ и коэффициентом передачи тока 158, ток которого протекает внутри источника в направлении от узла 3PIN к узлу 26. Управляющая

ветвь содержит источник напряжения VCONTR («амперметр»), подключенный «плюсом» к узлу 15, а «минусом» к узлу 6E:

VCONTR 15 6E DC 0.

То же самое задает описание:

FJ11 26 3PIN VCONTR —158

Отметим, что в описаниях ИНУТ и ИТУТ не участвуют зажимы управляющей ветви NC1 и NC2, поскольку с их помощью нельзя однозначно задать управляющий ток. Действительно, в общем случае между двумя узлами может быть подключено несколько ветвей с *разными* токами. Поэтому управляющий ток задается посредством элемента, включенного в управляющую ветвь, в качестве которого выступает источник напряжения. Если этот источник по схеме отсутствует, то его добавляют в виде «амперметра», задавая источник нулевой ЭДС.

Рассмотрим несколько примеров расчета цепей с управляемыми источниками, в которых используются уже знакомые нам директивы **.OP**, **.DC**, **.TF**, **.SENS**.

ПРИМЕР 3.22. На рис. 3.38 показана схема замещения, содержащая ИНУН E_2 и ИТУТ J_2 . Необходимо найти ток I_x и напряжение U_x , указанные на схеме.

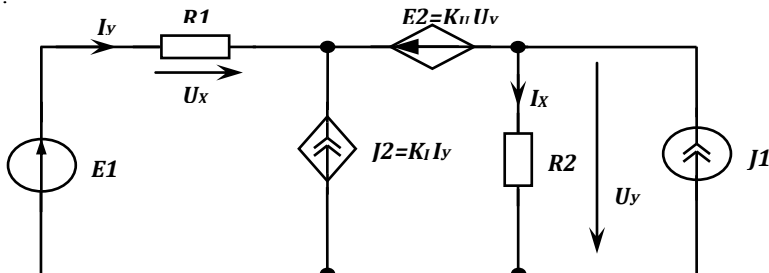


Рис. 3.38. Цепь постоянного тока с управляемыми источниками ИНУН и ИТУТ: $R_1=1\text{ кОм}$; $R_2=500\text{ Ом}$; $E_1=10\text{ мВ}$; $J_1=2\text{ мА}$; $K_U=3$; $K_I=2$

На схеме заданы управляющие величины: напряжение U_y на R_2 для ИНУН и ток I_y через R_1 для ИТУТ. Таким образом, уравнения для управляемых источников имеют вид

$$E_2 = K_U U_y = 3U_y; \quad J_2 = K_I I_y = 2I_y.$$

Схема в SPICE-обозначениях показана на рис. 3.39

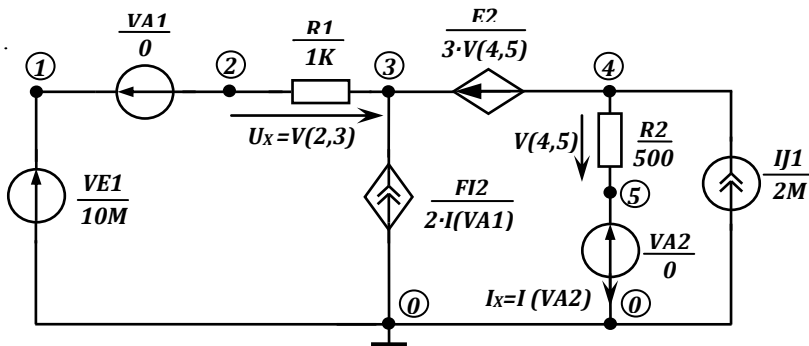


Рис. 3.39. Схема рис. 3.38 в SPICE-обозначениях

Тестовое описание (файл PRIMER3_22.cir) имеет вид

```

PRIMER 3.22 (STYLE SPICE2)
* RESISTORS
R1  2 3 1K
R2  4 5 500
* NEZAVISIMYE ISTOCHNIKI
VE1 1 0 DC 10M
IJ1 0 4 DC 2M
* AMPERMETRY
VA1 1 2 DC 0
VA2 5 0 DC 0
* ZAVISIMYE ISTOCHNIKI
E2  3 4 4 5 3
FJ2 0 3 VA1  2
*
.OP
.END

```

```

Результаты расчета имеют вид
Circuit: PRIMER 3.22 (STYLE SPICE2)
TEMP=27 deg C
DC Operating Point ... 100%
v(1) = 1.000000e-02
v(2) = 1.000000e-02
v(3) = 5.800000e-01
v(4) = 1.450000e-01
v(5) = 0.000000e+00
e2#branch = -1.71000e-03
va1#branch = -5.70000e-04
va2#branch = 2.900000e-04
ve1#branch = 5.700000e-04

```

Искомый ток I_x , протекающий через «амперметр» VA2, обозначен как va2#branch и равен $2,9 \cdot 10^{-4} \text{ A} = 0,29 \text{ мА}$. Напряжение U_x определяется разностью потенциалов узлов 2 и 3: $U_x = v(2) - v(3) = -0,57 \text{ В}$. Его можно найти также в интерактивном режиме командой

```
print v(2,3).
```

ПРИМЕР 3.23. На рис. 3.40 показана схема замещения, содержащая ИНУТ E2 и ИТУН J1. Определить зависимость напряжения U на R3 от E_1 , если последнее изменяется в диапазоне $-10 \dots 30 \text{ В}$.

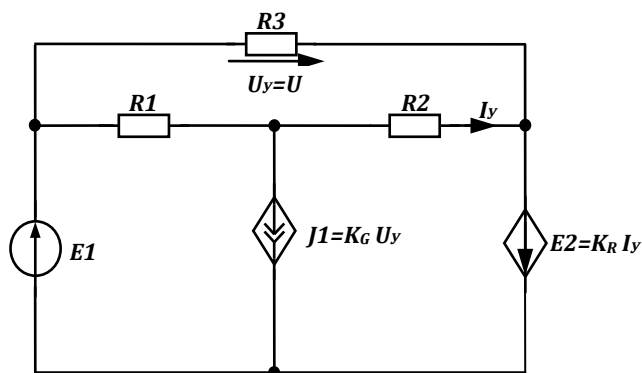


Рис. 3.40. Цепь постоянного тока с управляемыми источниками ИНУТ и ИТУН: $R_1=500$ Ом; $R_2=500$ Ом; $R_3=1$ кОм; $E_1=-10...30$ В; $K_G=10^{-3}$ См; $K_R=700$ Ом

На схеме заданы управляющие величины: напряжение $U_y = U$ на R_3 для ИТУН и ток I_y через R_2 для ИНУТ. Таким образом, уравнения для управляемых источников имеют вид $E_2 = K_R I_y = 700 I_y$; $J_1 = K_G U_y = 10^{-3} U_y$.

Схема в SPICE-обозначениях показана на рис. 3.41

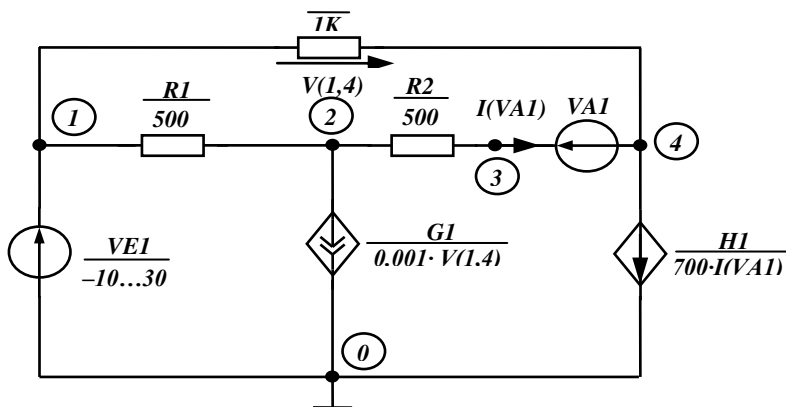


Рис. 3.41. Схема рис. 3.40 в SPICE-обозначениях

Вариацию напряжения источника E_1 можно реализовать с помощью директивы **.DC** (см. пп.3.2.4). Текстовое описание (файл PRIMER3_23.cir) имеет вид PRIMER 3.23 (style SPICE2)

* RESISTORS

R1 1 2 500

R2 2 3 500

R3 1 4 1K

* NEZAVISIMYI ISTOCHNIK

VE1 1 0 DC

* AMPERMETR

VA1 3 4 DC 0

* ZAVISIMYE ISTOCHNIKI

G1 2 0 1 4 1M

```

H1 0 4 VA1 700
* IZMENENIE ISTOCHNIKA
.DC VE1 -10 30 1
.PRINT DC V(1,4)
.PLOT DC V(1,4)
.END

```

Директива **.DC** изменяет напряжение источника VE1 в заданном диапазоне с шагом 1 В. Результаты расчета:
Circuit: PRIMER 3.23 (style SPICE2)

```

TEMP=27 deg C
DC analysis ... 100%
PRIMER 3.23 (style SPICE2)
DC transfer characteristic

```

Index	sweep	(v(1)-v(4))
0	-1.000000e+01	-1.538462e+01
1	-9.000000e+00	-1.384615e+01
2	-8.000000e+00	-1.230769e+01
3	-7.000000e+00	-1.076923e+01
4	-6.000000e+00	-9.230769e+00
5	-5.000000e+00	-7.692308e+00
.....		
40	3.000000e+01	4.615385e+01

График искомой зависимости (передаточной функции) показан на рис. 3.42

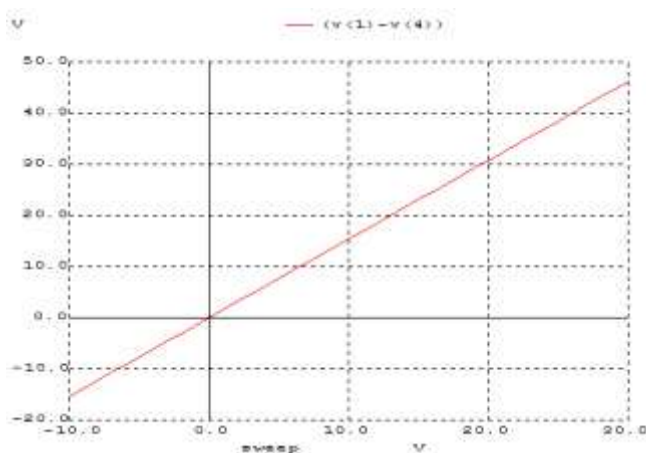


Рис. 3.42. Зависимость $U = f(E_1)$ в схеме рис 3.40

ПРИМЕР 3.24. На рис. 3.43 показана схема активного двухполюсника с зажимами *a* и *b*, содержащая ИНУН *E2* и ИТУН *J1*. Определить внутреннее сопротивление двухполюсника.

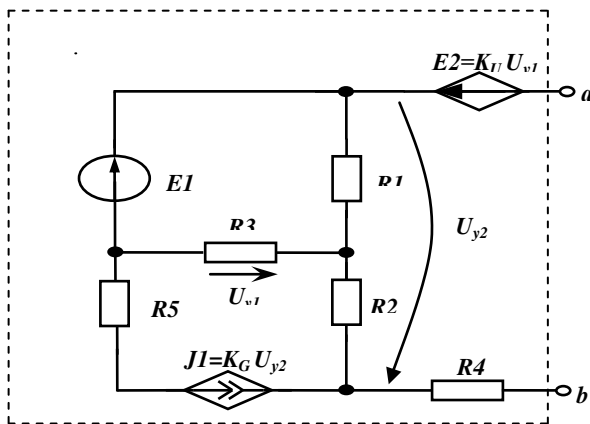


Рис. 3.43. Цепь постоянного тока с управляемыми источниками ИНУН и ИТУН: $R_1=5$ Ом; $R_2=5$ Ом; $R_3=4$ Ом; $R_4=4,8$ Ом; $R_5=1$ Ом; $E_1=100$ В; $K_U=5$; $K_G=1$ См

На схеме заданы управляющие величины: напряжения U_{y1} на R_3 для ИНУН и U_{y2} для ИТУН. Таким образом, уравнения для управляемых источников имеют вид

$$E_2 = K_U U_{y1} = 5U_{y1}; \quad J_1 = K_G U_{y2} = 1U_{y2}.$$

Схема в SPICE-обозначениях показана на рис. 3.44. В качестве базисного узла выбран зажим b двухполюсника.

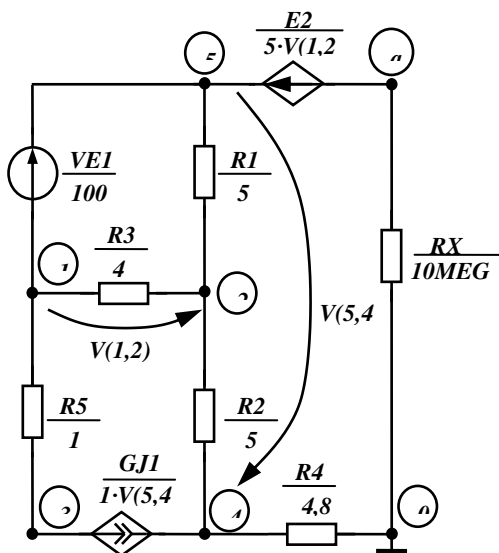


Рис. 3.44. Схема рис. 3.43 в SPICE-обозначениях

Следует отметить, что в SPICE-схеме добавлен резистор RXX с сопротивлением 10 МОм для имитации разрыва между зажимами двухполюсника. В противном случае цепь оказывается незамкнутой, что, вообще говоря, противоречит требованиям SPICE. В WinSpice3 можно было бы не добавлять этот резистор, поскольку по умолчанию все разрывы шунтируются большим сопротивлением (10^{12} Ом). Таким образом, RXX здесь добавлен для совместимости с другими SPICE-программами.

В пп.3.2.5 показано, что внутреннее сопротивление может быть найдено по выражению (3.16), либо с помощью директивы **.TF**. Последний вариант является более

рациональным, т.к. не требуется определять напряжение холостого хода и ток короткого замыкания двухполюсника. Текстовое описание (файл PRIMER3_24.cir) имеет вид

```
PRIMER 3.24 (STYLE SPICE2)
* RESISTORS
R1 5 2 5
R2 2 4 5
R3 1 2 4
R4 4 0 4.8
R5 1 3 1
RXX A 0 10MEG
* NEZAVISIMYI ISTOCHNIK
VE1 5 1 DC 100
* ZAVISIMYE ISTOCHNIKI
E2 5 A 1 2 5
GJ1 3 4 5 4 1
* VNUTRENNEE SOPROTIVLENIE
.TF V(A,0) VE1
.END
```

В директиве .TF в качестве выходной величины задано напряжение на зажимах двухполюсника, поскольку искомое внутреннее сопротивление определяется относительно именно этих зажимов.

Результаты расчета:

Circuit: PRIMER 3.24 (STYLE SPICE2)

```
TEMP=27 deg C
Transfer function analysis ...
transfer_function = 3.040539e+00
output_impedance_at_v(a,0) = 4.327025e+00
ve1#input_impedance = 1.233329e+01
```

Единственной интересующей нас величиной является $\text{output_impedance_at_v(a,0)}$ = 4.327025e+00. Таким образом, внутреннее сопротивление двухполюсника равно 4,3270 Ом.

Обратим внимание на две особенности результатов, полученных в данном примере, которые могут быть свойственны только цепям с управляемыми источниками. Во-первых, коэффициент передачи напряжения $\text{transfer_function} = 3.040539e+00$ получился больше единицы, т.е. имеет место *усиление* по напряжению. Во-вторых, найденное внутреннее сопротивление двухполюсника 4,3270 Ом *меньше* сопротивления $R_4 = 4,8$ Ом, включенного последовательно с участком цепи *a-5-4*. Как известно, эквивалентное сопротивление последовательно соединенных резисторов больше любого из них. Но это справедливо только по отношению к цепям без управляемых источников. В нашем случае сопротивление участка *a-5-4 отрицательно*, что и объясняет полученный результат.

ПРИМЕР 3.25. Для схемы рис. 3.38 (пример 3.22) определить чувствительности тока, протекающего через R_1 , к параметрам схемы.

Искомый ток «измеряется» амперметром VA1 (см. рис 3.39), поэтому в директиве .SENS указываем его обозначение I(VA1). Текстовое описание имеет вид (файл primer3_25.cir):

```
PRIMER 3.25 (STYLE SPICE2)
```



```

* RESISTORS
R1 2 3 1K
R2 4 5 500
* NEZAVISIMYE ISTOCHNIKI
VE1 1 0 DC 10M
IJ1 0 4 DC 2M
* AMPERMETRY
VA1 1 2 DC 0
VA2 5 0 DC 0
* ZAVISIMYE ISTOCHNIKI
E2 3 4 4 5 3
FJ2 0 3 VA1 2
*
.SENS I(VA1)
.END

```

После загрузки файла в WinSpice3 следует выполнить команду **print all**, выдающую следующие результаты:

```

WinSpice 6 -> print all
e2_gain = -2.07143e-05
fj2_gain = 1.628571e-04
ij1 = -2.85714e-01
ij1_c = -2.85714e-01
r1 = 8.142849e-08
r2 = -1.65714e-07
va1 = -1.42857e-04
va2 = -1.42857e-04
ve1 = 1.428571e-04

```

Здесь, кроме известных нам чувствительностей к изменению параметров резисторов и независимых источников, присутствуют также чувствительности к коэффициентам управления ИНУН *E2* ($e2_gain = -2.07143e-05$) и ИТУТ *J2* ($fj2_gain = 1.628571e-04$). Это дает возможность определять приращения токов и напряжений, вызванных изменением коэффициентов управления в электронных цепях.

Выводы

1. Для расчета сложных цепей постоянного тока необходимо правильно описать пассивные элементы, источники, а затем для определения искомых величин применить директивы **.OP**, **.DC**, **TF**, **SENS**. Нет никаких ограничений на число источников и пассивных элементов, кроме объема оперативной памяти компьютера. Должны соблюдаться лишь два условия, вытекающие из законов Кирхгофа: в цепи не должно быть контуров, состоящих только из идеальных источников напряжения, и узлов (сечений), образованных исключительно идеальными источниками тока.

2. МУП является наиболее простым в реализации и универсальным, что обусловило его применение в программах моделирования электрических цепей. В SPICE используется модифицированная формулировка МУП, основанная на расширенных узловых уравнениях, неизвестными в которых являются не только потенциалы узлов, но и токи источников напряжения.

3. Программа WinSpice3 воспринимает текстовые описания, составленные в различных стилях:

— стиль SPICE2 является наиболее простым и распространенным, благодаря программе PSPICE, но наименее гибким. Он не позволяет организовать обработку результатов и реализацию сценариев;

— стиль SPICE3 лишен вышеуказанных недостатков, но более сложен, поскольку включает в себя возможности программирования сценариев;

— гибридный стиль SPICE2/SPICE3 позволяет создавать универсальные текстовые описания, что удобно для пользователей программ, базирующихся на различных версиях SPICE.

При составлении текстового описания необходимо учитывать возможности различных стилей. Так в случае простой задачи, где надо найти только потенциалы, напряжения и некоторые токи целесообразно использовать стиль SPICE2. При большем разнообразии выходных данных лучше подойдет стиль SPICE3. Если же требуется реализовать изменение параметров элементов схемы или произвести нестандартную обработку данных, то стиль SPICE3 становится единственно возможным. При необходимости обеспечения обратной совместимости следует перейти к гибриднему стилю.

4. Зависимыми или управляемыми называют источники, напряжение или ток которых однозначно определяется напряжением или током *другой* ветви, называемой *управляющей ветвью*. Основное отличие от независимых источников состоит в том, что напряжение или ток источника, находящегося в *управляемой* ветви, заранее неизвестен, так как определяется напряжением (током) *управляющей* ветви. Напряжение или ток *управляющей* ветви можно рассматривать как входную величину, а напряжение или ток *управляемой* ветви — как выходную. *Выходная величина равна входной величине, умноженной на константу, называемую коэффициентом управления.* Сами по себе управляемые источники не могут отдавать энергию в цепь и возбуждать в ней токи и напряжения. Для этого в цепи должен присутствовать хотя бы один независимый источник. Существует четыре типа управляемых источников:

— источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН);

— источник напряжения, управляемый током (ИНУТ);

— источник тока, управляемый напряжением (ИТУН);

— источник тока, управляемый током (ИТУТ).

Они описываются следующими SPICE-предложениями:

ИНУН: EXXXXXXX N1 N2 NC1 NC2 VALUE

ИТУН: GXXXXXXX N1 N2 NC1 NC2 VALUE

ИНУТ: HXXXXXXX N1 N2 VNAME VALUE

ИТУТ: FXXXXXXX N1 N2 VNAME VALUE

Для расчета цепей постоянного тока с управляемыми источниками используют те же директивы **.OP**, **.DC**, **TF**, **SENS**. Характерными особенностями цепей с управляемыми источниками является *возможность усиления*, т. е. получения коэффициентов передачи по напряжению и току больших единицы, а также реализация *отрицательного сопротивления*.

Глава 4. ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Рассмотренные ранее цепи постоянного тока являются чисто резистивными, так как входящие в них реактивные элементы не влияют на работу цепи. Ситуация коренным образом изменяется, если хотя бы один из источников зависит от времени. Под его влиянием запасы энергии в реактивных элементах возрастают или убывают, что приводит к появлению индуцированных напряжений на L -элементах и возникновению токов смещения через C -элементы (см. пп. 1.1.2, 1.1.3). Таким образом, процессы в цепи переменного тока значительно сложнее, чем на постоянном токе, так как необходимо учитывать влияние реактивных элементов.

В общем случае под переменными токами и напряжениями понимают величины, изменяющиеся во времени. На практике довольно часто параметры источников и возбуждаемые ими в цепи токи и напряжения изменяются во времени по закону, близкому к гармоническому колебанию. В электротехнике их чаще описывают синусоидальными функциями, а в радиотехнике — косинусоидальными. Разумеется, сущность электромагнитных процессов не зависит от названия функции — важен характер ее изменения. Поэтому в теоретических исследованиях используется обобщённое понятие «цепь гармонического тока» или «цепь синусоидального тока». В практической электротехнике часто говорят о «цепи переменного тока», имея в виду идеально синусоидальный характер изменения токов и напряжений. В реальности напряжения и токи отличаются от идеальных синусоид, и в этом случае возникает представление о цепи несинусоидального тока. Следует отметить, что рассмотренные выше понятия применяются к установившемуся процессу, который достигается по истечении некоторого интервала времени от момента включения источников.

Необходимость изучения цепей синусоидального тока обусловлена следующими обстоятельствами:

- основная часть электромагнитной энергии производится, распределяется и потребляется в виде энергии переменного тока;
- в радиоэлектронике гармонические сигналы используются в качестве несущих частот радиоволн;
- в промышленной и информационной электронике, измерительной технике гармонические токи и напряжения служат основой для формирования несинусоидальных периодических сигналов, возбуждения различных датчиков и преобразователей, а также имеют самостоятельное значение;
- в теоретических исследованиях гармонические сигналы играют особую роль, поскольку их форма не искажается при прохождении через линейные цепи. Это дает возможность ввести в рассмотрение *частотные характеристики*¹⁶ цепи, которые используются при изучении реакций на другие виды воздействий.

4.1. Основные параметры синусоидальных величин

В качестве примера рассмотрим некоторое гармоническое напряжение

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (4.1)$$

где u — мгновенное значение напряжения; U_m — амплитудное (максимальное) значение напряжения; $(\omega t + \psi_u)$ — фаза, рад; ω — угловая частота, с^{-1} ; t — текущее время, с; ψ_u — начальная фаза напряжения, рад.

Начальная фаза может быть как положительной, так и отрицательной величиной в зависимости от знака мгновенного значения при $t=0$.

¹⁶ Рассматриваются ниже в п.4.5

Угловая частота определяется известными соотношениями:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T},$$

где f — частота, Гц; T — период, с.

Другие величины (ток, ЭДС) записываются аналогично:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad e = E_m \sin(\omega t + \psi_e).$$

При совместном рассмотрении двух синусоидальных величин *одной частоты* разность их фаз, равную разности начальных фаз, называют *углом сдвига фаз*. Так, например, угол сдвига фаз φ между ЭДС и током, записанными выше, определяется как

$$\varphi = \psi_e - \psi_i.$$

Важное практическое значение имеет действующее (эффективное) значение, устанавливающее эквивалентность переменного и постоянного токов по выделению тепла. Действующие значения связаны с амплитудами соотношениями:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

4.2. Изображение гармонических величин

комплексными числами.

Символический метод

Для облегчения математических действий с синусоидальными величинами используют их представление в виде мнимых частей комплексных вращающихся векторов. Справедливость такого подхода следует из тригонометрической записи комплексного числа (формулы Эйлера)

$$\tilde{U}_m = U_m e^{j(\omega t + \psi_u)} = U_m \cos(\omega t + \psi_u) + j U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (4.2)$$

где \tilde{U}_m — вращающийся комплексный вектор амплитудного значения напряжения (или комплексное мгновенное значение); e — основание натуральных логарифмов; $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица.

Из данной записи следует, что синусоидальная величина (4.1) есть мнимая часть вращающегося вектора (4.2), то есть

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) = IM(\tilde{U}_m), \quad (4.3)$$

где IM — символ выделения мнимой части комплексного числа.

Заметим, что \tilde{U}_m можно представить в виде произведения двух комплексных сомножителей: $\tilde{U}_m = U_m e^{j(\omega t + \psi_u)} = \dot{U}_m e^{j\omega t}$, (4.4)

где $\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u}$ — комплекс амплитудного значения; $e^{j\omega t}$ — оператор вращения.

Величина \dot{U}_m характеризует начальное положение вращающегося вектора \tilde{U}_m на комплексной плоскости, то есть положение при $t=0$ (рис. 4.1).

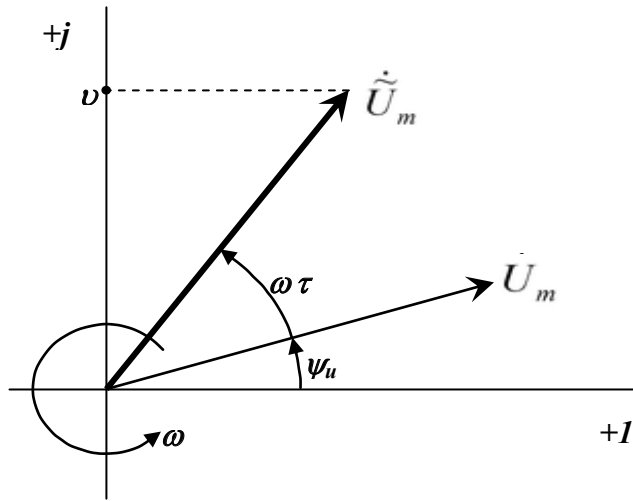


Рис. 4.1. Вращающийся вектор в комплексной плоскости

В электротехнике чаще пользуются комплексными действующими значениями, которые в $\sqrt{2}$ раз меньше по модулю \dot{U}_m , то есть $\dot{U} = \frac{\dot{U}_m}{\sqrt{2}} = Ue^{j\psi_u}$.

Сомножитель $e^{j\omega t}$ задает вращение вектора в положительном направлении (против часовой стрелки) с угловой скоростью ω . Синусоидальная величина в данном случае — это проекция вектора $\dot{\tilde{U}}_m$ на мнимую ось. Все токи и напряжения в цепи, возбуждаемой источниками одной частоты, имеют *ту же самую частоту*. Следовательно, изображающие их векторы вращаются с *одной* скоростью и неподвижны относительно друг друга. Поскольку обычно угловая частота известна, то и оператор вращения $e^{j\omega t}$ в (4.4) определен при любом фиксированном t . Следовательно, вращающийся вектор однозначно может быть задан комплексом амплитудного значения $\dot{\tilde{U}}_m$. Таким образом, последний может рассматриваться как символ или изображение мгновенного значения синусоидальной величины. Поэтому метод, использующий комплексные амплитуды (или комплексные действующие значения) называют комплексным или символическим методом.

Можно показать, что для комплексных амплитуд токов и напряжений в цепи, возбуждаемой источниками *одной частоты*, выполняются законы Кирхгофа и Ома в комплексной форме:

$$\sum_k \dot{I}_{m_k} = 0; \quad \sum_k \dot{U}_{m_k} = 0; \quad (4.5)$$

$$\dot{U}_m = \underline{Z} \dot{I}_m; \quad \dot{I}_m = \underline{Y} \dot{U}_m, \quad (4.6)$$

где \underline{Z} — комплексное сопротивление; $\underline{Y} = \underline{Z}^{-1}$ — комплексная проводимость.

Аналогично для комплексных действующих значений:

$$\sum_k \dot{I}_k = 0; \quad \sum_k \dot{U}_k = 0; \quad (4.7)$$

$$\dot{U} = \underline{Z} \dot{I}; \quad \dot{I} = \underline{Y} \dot{U}. \quad (4.8)$$

В формулировках закона Ома (4.6), (4.8), как и ранее, предполагаются самосогласованные направления токов и напряжений. Следует отметить, что оператор вращения не входит в выражения (4.5) — (4.8), то есть зависимость от времени в символическом методе устраняется, что значительно облегчает анализ гармонических процессов.

Рассмотрим подробнее понятие комплексного сопротивления. Его можно записать, как и любое комплексное число, в алгебраической и показательной формах:

$$\underline{Z} = R + jX = Ze^{j\varphi},$$

где R — активное сопротивление; X — реактивное сопротивление; $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ — полное сопротивление; $\varphi = \arctg(X/R)$ — аргумент комплексного сопротивления.

Подставляя вращающиеся векторы в уравнения (1.3), (1.6), (1.12), можно показать, что для R -, L - и C -элементов комплексные сопротивления имеют вид

$$\underline{Z}_R = R; \quad \underline{Z}_L = jX_L = j\omega L; \quad \underline{Z}_C = -jX_C = -j\frac{1}{\omega C}, \quad (4.9)$$

где X_L и X_C — индуктивное и емкостное сопротивления соответственно.

Комплексную проводимость также можно представить в алгебраической и показательной форме:

$$\underline{Y} = G - jB = Ye^{-j\varphi},$$

где G — активная проводимость; B — реактивная проводимость; $Y = \sqrt{G^2 + B^2}$ — полная проводимость; $-\varphi = -\arctg(B/G)$ — аргумент комплексной проводимости

Подставляя вращающиеся векторы в уравнения (1.3), (1.6), (1.12), можно показать, что для R -, L - и C -элементов комплексные проводимости имеют вид

$$\underline{Y}_R = R^{-1}; \quad \underline{Y}_L = -jB_L = -j\frac{1}{\omega L}; \quad \underline{Y}_C = jB_C = j\omega C, \quad (4.10)$$

При использовании символического метода вводится понятие комплексной мощности элемента (участка цепи):

$$\underline{S} = \dot{\underline{U}}^* \underline{I} = Se^{j\varphi}, \quad (4.11)$$

где $\dot{\underline{U}}$ — комплекс действующего значения напряжения на элементе; \underline{I}^* — сопряженный комплекс тока через элемент; S — полная мощность элемента.

Действительная и мнимая части комплексной мощности представляют собой активную (P) и реактивную (Q) мощности элемента (участка цепи):

$$\underline{S} = P + jQ. \quad (4.12)$$

Следует отметить, что выражения (4.7), (4.8) по форме повторяют законы цепей постоянного тока. Поэтому для анализа цепей синусоидального тока можно применять все методы, разработанные для цепей постоянного тока, но в комплексной форме. Сюда относятся: метод эквивалентных преобразований, метод законов Кирхгофа, метод контурных токов, метод узловых потенциалов, метод эквивалентного генератора и т. д. Как уже упоминалось ранее, в SPICE используется метод узловых потенциалов. Рассмотрим, каким образом описывается в SPICE расчет установившегося гармонического режима.

4.3. SPICE-описание схем в установившемся гармоническом режиме

Общие принципы описания рассматриваемых схем те же, что и цепей постоянного тока:

1) необходимо задать типы элементов, величины их параметров и полярность подключения. При этом особенно важно следить за правильностью указания полярностей независимых и управляемых источников. Напомним, что полярности источников *не произвольны*, в отличие от пассивных элементов;

2) задать директиву, реализующую расчет гармонического режима в определенном диапазоне частот;

3) указать директивы вывода результатов в числовой и графической формах с учетом используемого SPICE-стиля.

Рассмотрим данные принципы по порядку.

4.3.1. Описание элементов

Описания пассивных двухполюсных элементов соответствуют пп.1.1.1-1.1.3. Единственное отличие состоит в том, что для реактивных элементов параметр IC, характеризующий начальные условия, задавать не нужно. Таким образом, R -, L - и C -элементы описываются следующими предложениями:

RXXXXXXX N1 N2 VALUE

LXXXXXXX N1 N2 VALUE

CXXXXXXX N1 N2 VALUE

Описания активных элементов отличаются от приведенных в пп. 1.2.1, 1.2.2. Независимые идеализированные комплексные источники напряжения и тока описываются соответственно предложениями:

VXXXXXXX N1 N2 <AC ACMAG <ACPHASE>>

IXXXXXXX N1 N2 <AC ACMAG <ACPHASE>>

где N1, N2 — имена положительного и отрицательного зажимов источника соответственно¹⁷; AC — идентификатор, обозначающий комплексный источник¹⁸;

ACMAG — амплитуда или действующее значение источника (ненулевая положительная величина);

ACPHASE — начальная фаза источника в градусах. При отсутствии этого параметра начальная фаза полагается равной нулю.

Управляемые источники описываются согласно пп. 3.3.3. Рассмотрим несколько примеров описания независимых гармонических источников.

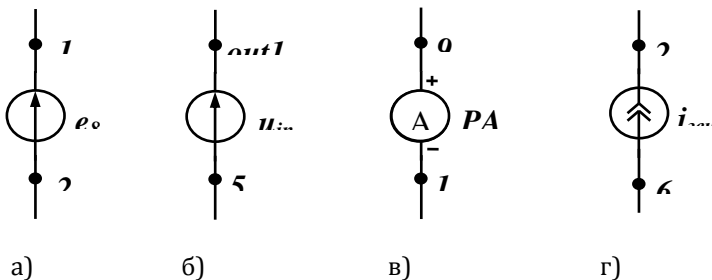


Рис. 4.2. Примеры независимых синусоидальных источников

¹⁷ Для положительных полупериодов.

¹⁸ Аббревиатура AC происходит от английского Alternating Current — переменный ток.

1. Пусть источник ЭДС $e_g = 115 \sin(314t - 25^\circ)$ В подключен к узлам 2 и 15, как показано на рис. 4.2, а. В символической форме комплекс амплитудного значения записывается, как $\dot{E}_{gm} = 115 e^{-j25^\circ}$ В. Соответствующее SPICE-предложение имеет вид:

VE8 15 2 AC 115 -25

Если предполагается расчет по действующим значениям, то вместо амплитуды 115 надо задать действующее значение $81.317 = \frac{115}{\sqrt{2}}$.

2. Источник напряжения $u_{inp} = 750 \sin 2000t$ мВ включен между узлами 5 и out12 (рис. 4.2, б). Комплекс амплитудного значения: $\dot{U}_{inpm} = 750 e^{j0^\circ} = 750$ мВ. Соответствующее SPICE-предложение имеет вид:

VUinp OUT12 5 AC 750M

Если предполагается расчет по действующим значениям, то вместо амплитуды 750 надо задать действующее значение $530.33 = \frac{750}{\sqrt{2}}$.

3. Идеальный «амперметр» PA7 (закоротка), включенный между узлами 16 и 9 (рис. 4.2, в):

VPA7 9 16

Амплитуда по умолчанию равна нулю.

4. Источник гармонического тока $j_{ген} = 7,8 \sin(958t + 48,6^\circ)$ мА (рис. 4.2, г). Комплекс амплитудного значения: $\dot{J}_{генm} = 7,8 e^{j48,6^\circ}$ мА. Соответствующее SPICE-предложение имеет вид:

IJgen 6 21 AC 7.8M 48.6

Если предполагается расчет по действующим значениям, то вместо амплитуды 7.8 надо задать действующее значение $5.5154 = \frac{7,8}{\sqrt{2}}$.

4.3.2. Директивы в стиле SPICE2

Поскольку частота в описаниях источников не указывается, существует директива **.AC**, задающая диапазон изменения частот (или одну частоту) для всех независимых источников. Директива имеет следующий формат:

- 1) **.AC LIN NP FSTART FSTOP**
- 2) **.AC DEC ND FSTART FSTOP**
- 3) **.AC OCT NO FSTART FSTOP**

Эти варианты задают диапазон частот от FSTART до FSTOP, в котором расчет токов и напряжений осуществляется для фиксированных значений частоты. Заметим, что нулевое значение FSTART не допускается.

В первом случае расчет производится для NP значений, включая начальную и конечную точки диапазона, а также (NP-2) промежуточных точек, отстоящих на равные интервалы друг от друга, то есть шаг по частоте равен $\Delta f = (FSTOP - FSTART) / (NP - 1)$. Если NP=2, то расчет производится только для двух частот: FSTART и FSTOP.

Во втором случае вычисления производятся для ND точек на каждую декаду (то есть на десятикратное увеличение частоты).

В третьем случае вычисления производятся в NO точках на каждой октаве (то есть на двукратном увеличении частоты).

Второй и третий случаи используются при расчете *частотных характеристик*¹⁹, когда частота изменяется в широком диапазоне (например, от 10 Гц до 100 кГц в электронных схемах звукового диапазона), и результаты представляются в *логарифмическом масштабе*.

Во всех случаях, если FSTART = FSTOP=F, то значения NP, ND и NO игнорируются программой и вычисления производятся для *одной частоты* F. При этом обычно задают NP= ND = NO=1 и параметр LIN.

Приведем примеры записи директив **.AC**:

1) **.AC DEC 10 10 10K**

— рассчитываются частотные характеристики в диапазоне 10 ...10000 Гц, причем вычисляется по 10 точек на декаду;

2) **.AC OCT 5 10 10K**

— то же самое, что и в предыдущем случае, но вычисляется по 5 точек на октаву;

3) **.AC LIN 50 100 800**

— рассчитываются частотные характеристики в диапазоне 100...800 Гц с интервалом

$(800-100)/(50-1) = 14,2857$ Гц

4) **.AC LIN 1 50 50**

— рассчитывается установившийся синусоидальный режим при частоте 50 Гц.

Вывод частотных характеристик в виде таблиц и графиков производится директивами **.PRINT** и **.PLOT** соответственно:

.PRINT AC OV1 <OV2...OV8>

.PLOT AC OV1 <OV2...OV8>

В результате применения данных директив на печать выводятся таблица и графики от одной до восьми величин OV1...OV8, для частот, указанных в директиве **.AC**. Обозначения этих величин задаются в соответствии с их физическим смыслом (см. табл. 4.1)

Таблица 4.1

Параметры величин	Электрическая величина	
	Комплексное напряжение между узлами N1 и N2	Комплексный ток источника напряжения с именем VXXXXXXX
Модуль	V(N1,N2) или VM(N1,N2) Если N2=0 (земля), то узловой потенциал V(N1) или VM(N1)	I(VXXXXXXX) или IM(VXXXXXXX)
Модуль в децибелах	VDB(N1,N2)	IDB(VXXXXXXX)
Начальная фаза. Единицы измерения устанавливаются переменной units. По умолчанию используются радианы.	VP(N1,N2)	IP(VXXXXXXX)
Действительная часть	VR(N1,N2)	IR(VXXXXXXX)
Мнимая часть	VI(N1,N2)	II(VXXXXXXX)

¹⁹ Частотные характеристики рассматриваются ниже в п.4.5

Количество директив **.PRINT** и **.PLOT**, задаваемых в текстовом описании, не ограничено.

```
Рассмотрим в качестве примера директиву  
.PRINT AC VM(6,8) VP(6,8) VR(10) IM(VGEN)  
+ IR(VGEN) II(VGEN) VDB(OUT).
```

На печать будет выведена таблица (7 столбцов), содержащая следующие величины (#branch, как и ранее, обозначает ток ветви с источником напряжения или с L-элементом):

1-й столбец — модуль комплексного напряжения между узлами 6 и 8 в виде $\text{mag}(v(6)-v(8))$;

2-й столбец — начальная фаза комплексного напряжения между узлами 6 и 8 в виде $\text{ph}(v(6)-v(8))$;

3-й столбец — действительная часть комплексного потенциала узла 10 в виде $\text{real}(v(10))$;

4-й столбец — модуль комплексного тока, проходящего через источник VGEN в виде $\text{mag}(vgen\#branch)$;

5-й столбец — действительная часть комплексного тока, проходящего через источник VGEN в виде $\text{real}(vgen\#branch)$;

6-й столбец — мнимая часть комплексного тока, проходящего через источник VGEN в виде $\text{imag}(vgen\#branch)$;

7-й столбец — модуль комплексного потенциала узла OUT в децибелах в виде $\text{db}(\text{mag}(v(out)))$.

Следует обратить внимание на факт несовпадения обозначений, выводимых директивами **.PRINT** и **.PLOT** результатов, с обозначениями табл. 4.1 (например, вместо VM(6,8) выводится $\text{mag}(v(6)-v(8))$ и т. д.). Это объясняется тем, что обозначения табл. 4.1 введены в WinSpice3 для обеспечения обратной совместимости программы со стилем SPICE2. Собственные же обозначения WinSpice3 являются, по существу, обозначениями соответствующих функций (см. табл. 4.2) и отвечают стилю SPICE3, обсуждаемому в следующем подразделе.

При обнаружении в цепном файле директив **.PRINT** и (или) **.PLOT** WinSpice3 автоматически генерирует директиву **.SAVE**, сохраняющую векторы *только* тех величин, которые указаны в данных директивах. Если далее возникнет необходимость работы в интерактивном режиме с другими векторами, то будет выдано сообщение об их отсутствии. Поэтому при желании сохранить все векторы по умолчанию необходимо перед директивой **.AC** поместить директиву **.SAVE ALL**. Напомним, что к величинам умолчания относятся узловые потенциалы и токи источников напряжения. В рассматриваемых цепях к ним еще добавляются токи индуктивных элементов и частота. Список активных векторов всегда можно просмотреть с помощью команд **DISPLAY** или **LET**.

В директиве **.PRINT** существует также довольно удобная (но недокументированная!) возможность указания ключа ALL вместо списка выводимых переменных, то есть

```
.PRINT AC ALL.
```

При этом в окно WinSpice3 выводятся все комплексные величины по умолчанию в алгебраической форме, т.к. директива **.SAVE ALL** добавляется автоматически.

Все значения, рассчитываемые программой WinSpice3, являются в общем случае векторами (или массивами). В частном случае, когда длина вектора равна 1, он может рассматриваться как простая переменная (скаляр).

4.3.3. Особенности стиля SPICE3

Директивы **.AC**, **.PRINT** и **.PLOT**, описанные выше, соответствуют стилю SPICE2 (с точкой перед кодом директивы). При использовании стиля SPICE3 они записываются без точки в блоке сценария, ограниченном директивами **.CONTROL** и **.ENDC** (см. пп.3.2.4) или применяются в интерактивном режиме. Гибридный стиль (SPICE2/SPICE3) также не требует точки перед директивами (см. пп.3.3.2). Следует отметить, что в SPICE3-директивах **PRINT** и **PLOT** идентификатор типа анализа AC не указывается:

```
PRINT OV1 <OV2...OV8>
```

```
PLOT OV1 <OV2...OV8>
```

Если в одной задаче используется несколько типов анализа (например, AC и DC), то для каждой выводимой величины указывается имя анализа (см. ниже пример 4.1).

Комплексные векторы и их функции (см. табл. 4.2)²⁰ можно использовать в математических выражениях, которые позволяют организовать обработку результатов решения. При этом используются общепринятые знаки арифметических операций + — * / ^ . Существуют также логические операции, которые в данной книге не рассматриваются.

В WinSpice3 встроено 12 констант²¹, которые можно подразделить на физические, математические и логические. Для нас в данном разделе представляют интерес математические константы: мнимая единица (i) и число π (pi).

В качестве примера рассмотрим запись комплексной, активной, реактивной и полной мощностей некоторого элемента, включенного между узлами 2 и 5, через который в направлении от узла 2 к узлу 5 протекает ток VA6#branch. Согласно (4.11) комплексная мощность это произведение напряжения на элементе V(2,5) на сопряженный комплекс тока. Согласно (4.12) активная и реактивная мощности представляют собой действительную и мнимую части комплексной мощности соответственно. Полная мощность есть модуль комплексной мощности. Соответствующий код имеет вид

```
LET SC=V(2,5)*(REAL(VA6#branch)-j(IMAG(VA6#branch)))
LET P=REAL(SC)
LET Q=IMAG(SC)
LET S=MAG(SC)
LET FI=PH(SC)
PRINT SC P Q S FI
```

Здесь второй сомножитель в выражении SC представляет собой сопряженный комплекс тока VA6#branch.

В стиле SPICE3, кроме комплексных токов и напряжений, вычисляемых программой, можно задавать произвольные комплексные переменные таким же образом, каким ранее создавались действительные переменные: с помощью команды **LET**. При этом допускается использование мнимой единицы (i) или функции **j(vector)** из табл. 4.2. Таким образом, WinSpice3 можно использовать в качестве калькулятора комплексных выражений (см. приложение 3).

²⁰ В данной таблице приведены только функции, связанные с использованием комплексных чисел. Всего же в WinSpice3 встроено 30 функций для работы с векторами.

²¹ Полный список констант можно просмотреть, выполнив команду LET без параметров сразу после запуска WinSpice3. Видно, что константы реализованы как векторы единичной длины (скаляры) без типа.

Ниже в качестве примеров приведены варианты записи комплексного числа $\underline{Z} = 1 - j = \sqrt{2}e^{-j45^\circ}$ в алгебраической (примеры 1, 2, 3, 4) и показательной (примеры 5 и 6) формах:

- 1) let z=(1,-1)
- 2) let z=1-i*1
- 3) let z=1-j(1)
- 4) let z=1+j(-1)
- 5) let z=sqrt(2)*exp(-j(rad(45)))
- 6) let z=sqrt(2)*exp(-i*rad(45))

Другие примеры с выводом значений командой PRINT приведены в табл. 4.2. Обратите внимание, что комплексные числа выводятся в алгебраической форме: действительная и мнимая части отделены запятой, причем скобки отсутствуют. При задании комплексных величин в таком формате скобки необходимы (см. выше пример 1).

Таблица 4.2

Функция	Описание	Примеры для векторов единичной длины (скаляров)
j(vector)	Результатом является вектор комплексного типа (COMPLEX), каждый элемент которого содержит соответствующий элемент вектора vector типа COMPLEX или REAL, умноженный на $j = i = \sqrt{-1}$.	$\underline{Z} = 1 + j$. WinSpice 1 -> let z=1+j(1) WinSpice 2 -> print z z = 1.000000e+00,1.000000e+00
rad(vector)	Результатом является вектор вещественного типа (REAL), каждый элемент которого содержит фазовый угол в радианах соответствующий элементу вектора vector типа REAL в градусах	WinSpice 3 -> print rad(180) rad(180) = 3.141593e+00
deg(vector)	Результатом является вектор вещественного типа (REAL), каждый элемент которого содержит фазовый угол в градусах соответствующий элементу вектора vector типа REAL в радианах.	WinSpice 4 -> print deg(Pi) deg(pi) = 1.800000e+02
sqrt(vector)	Результатом является вектор комплексного типа COMPLEX или REAL, каждый элемент которого содержит квадратный корень соответствующего элемента вектора vector типа COMPLEX или REAL,	$\sqrt{1+j}$ WinSpice 5 -> print sqrt(1+i) sqrt(1+i) = 1.098684e+00, 4.550899e-01
exp(vector)	Результатом является вектор комплексного типа COMPLEX или REAL, каждый элемент которого содержит экспоненту соответствующего элемента вектора vector типа COMPLEX или REAL,	$\underline{Z}_1 = e^{j30^\circ}$ WinSpice 6 -> let z1=exp(j(rad(30))) WinSpice 7 -> print z1 z1 = 8.660254e-01,5.000000e-01

Функция	Описание	Примеры для векторов единичной длины (скаляров)
mag(vector) magnitude(vector) или abs(vector)	Результатом является вектор вещественного типа (REAL), каждый элемент которого содержит модуль соответствующего элемента вектора vector комплексного типа (COMPLEX)	WinSpice 8 -> print mag(z1) mag(z1) = 1.000000e+00 WinSpice 9 -> print abs(z1) abs(z1) = 1.000000e+00
ph(vector) phase(vector)	Результатом является вектор вещественного типа (REAL), каждый элемент которого содержит аргумент (фазовый угол) соответствующего элемента вектора vector комплексного типа (COMPLEX) Если переменная units не задана явно (по умолчанию), то углы измеряется в радианах. Если она принимает значение degrees, то углы измеряется в градусах. Для этого необходимо дать команду SET UNITS=DEGREES	WinSpice 10 -> print ph(z1) ph(z1) = 5.235988e-01 (радианы) WinSpice 11 -> print deg(ph(z1)) deg(ph(z1)) = 3.000000e+01 (градусы) WinSpice 12-> set units=degrees WinSpice 13 -> print ph(z1) ph(z1) = 3.000000e+01 (градусы)
real(vector) re(vector)	Результатом является вектор вещественного типа (REAL), каждый элемент которого содержит действительную часть соответствующего элемента вектора vector комплексного типа (COMPLEX)	WinSpice 14 -> print re(z1) re(z1) = 8.660254e-01
imag(vector) im(vector)	Результатом является вектор типа (REAL), каждый элемент которого содержит мнимую часть соответствующего элемента вектора vector комплексного типа (COMPLEX) Примечание: в интерактивном режиме следует использовать полную форму (imag), поскольку сокращенная форма (im) воспринимается как модуль комплексного тока (см. табл. 4.1)	WinSpice 15 -> print imag(z1) imag(z1) = 5.000000e-01
db(vector)	Результатом является вектор типа (REAL), каждый элемент которого содержит модуль соответствующего элемента вектора vector типа COMPLEX или REAL в децибелах, то есть $20 \times \log_{10}(\text{mag}(\text{vector}))$	WinSpice 16 -> let z2=100*exp(j(rad(45))) WinSpice 17 -> print db(z2) db(z2) = 4.000000e+01

Ранее (см. Введение) при расчете цепей постоянного тока использовалась возможность изменения сопротивления резистора (resistance) командой **ALTER** как в интерактивном режиме, так и в тексте сценария (см. пп. 3.2.4). Для этого использовался формат

alter @RXXXXXXX[*resistance*]=<value> ,

где RXXXXXXX — имя *R*-элемента; <value> — значение сопротивления.

Аналогично можно изменять индуктивность (inductance) и емкость (capacitance):

alter @LXXXXXXX[inductance]=<value>
alter @CXXXXXXX[capacitance]=<value>.

Оператор @ применялся также при выводе результатов расчета цепей постоянного тока. Однако при решении задач с комплексными токами и напряжениями этот способ, к сожалению, в полной мере не работает: выводится только действительная часть числа.

В следующем подразделе рассматривается решение типовых задач расчета цепей синусоидального тока с применением различных стилей.

4.4. Примеры расчетов установившихся синусоидальных процессов на фиксированной частоте

В задачах данного типа интерес представляет анализ цепи на одной фиксированной частоте F . Для этого, как было описано выше, в директиве **.АС** задаются параметры

$FSTART = FSTOP = F$ и $NP = ND = NO = 1$. Результаты расчетов комплексных токов, напряжений, мощностей, сопротивлений, проводимостей и передаточных функций выводятся в алгебраической и (или) показательной форме.

4.4.1. Цепи с одним источником электрической энергии

По аналогии с цепями постоянного тока (п.3.1) в задачах с одним источником интерес могут представлять не только напряжения, токи и мощности (пример 4.1), но и системные функции, которые будут в данном случае комплексными величинами (пример 4.2).

ПРИМЕР 4.1. В схеме электрической цепи рис. 4.3, возбуждаемой источником синусоидального напряжения с действующим значением 380 В и частотой 1600 Гц, найти:

- комплексы действующих значений потенциалов узлов и токов ветвей;
- мгновенные значения токов ветвей;
- комплексную, активную, реактивную и полную мощности цепи;
- эквивалентное комплексное сопротивление цепи относительно зажимов источника.

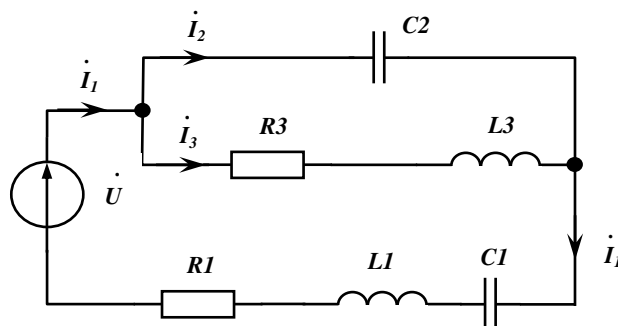


Рис. 4.3. Схема цепи переменного тока с одним источником: $R_1=6$ Ом; $R_3=10$ Ом; $L_1=1,194$ мГн; $L_3=795,8$ мГн; $C_1=24,87$ мкФ; $C_2=16,58$ мкФ; $U=380$ В

Перед составлением схемы в SPICE-обозначениях учесть следующие обстоятельства:

- начальная фаза источника напряжения в условии не указана, но для задания начала отсчета фазы можно положить ее равной любому значению, например, нулю;
- необходимо выбрать условно-положительные направления токов в ветвях (см. стрелки на рис. 4.3);
- для получения значений токов надо включить в ветви идеальные источники напряжения с нулевой ЭДС («амперметры») навстречу выбранным направлениям токов.

Соответствующая схема в SPICE-обозначениях показана на рис. 4.4

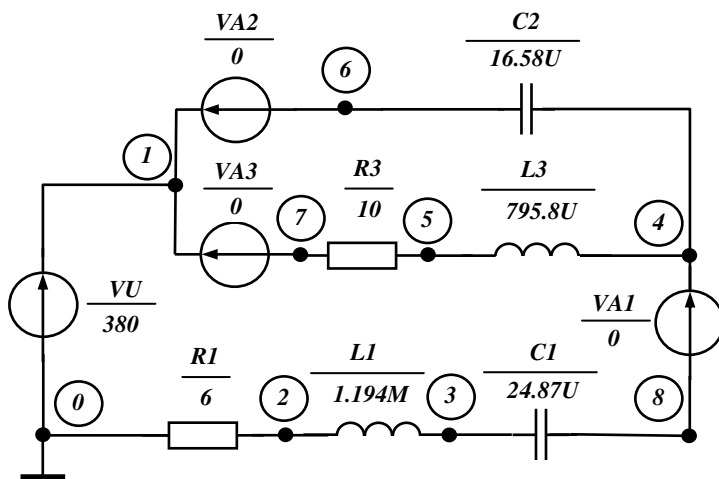


Рис. 4.4. Схема рис. 4.3 в SPICE-обозначениях

Текстовое описание в стиле SPICE2 (файл primer4_1.cir) приведено ниже.
PRIMER 4.1 (SPICE2 STYLE)

```
*
* ELEMENTY
VU 1 0 AC 380
R1 0 2 6
R3 5 7 10
L1 2 3 1.194M
L3 5 4 795.8U
C1 3 8 24.87U
C2 6 4 16.58U
*
* AMPERMETRY
VA1 4 8
VA2 1 6
VA3 1 7
*
* RASCHET PRI 1600 Hz
.AC LIN 1 1600 1600
*
*VYVOD
.PRINT AC ALL
```

```

*
* UZLOVYE POTENCIALY
.PRINT AC VM(1) VM(2) VM(3) VM(4) VM(5) VM(8)
.PRINT AC VP(1) VP(2) VP(3) VP(4) VP(5) VP(8)
*
* TOKI VETVEY
.PRINT AC IM(VA1) IP(VA1)
.PRINT AC IM(VA2) IP(VA2)
.PRINT AC IM(VA3) IP(VA3)
.END

```

После открытия файла `primer4_1.cir` командой меню **Open** текстовое описание загружается в программу и запускается процесс интерпретации. Как всегда, в случае исходного стиля SPICE2 программа WinSpice3 автоматически добавляет SPICE3-команды в виде управляющего блока, ограниченного директивами **.control** и **.endc** (см. пп.3.3.2). Одна из добавленных команд

```
set units=degrees
```

устанавливает *градусы* в качестве единицы измерения фазового угла. При расчетах цепей постоянного тока наличие этой команды не влияет на результаты. Однако для цепей синусоидального тока важно, в каких единицах будут выводиться фазовые углы. Если бы данной команды не было, то по умолчанию использовались бы радианы.

Результаты, выводимые директивой **.PRINT AC ALL**, имеют вид:²²

```

v(1) = 3.800000e+02,0.000000e+00
v(2) = 2.364469e+02,-3.27842e+01
v(3) = 3.020340e+02,4.402435e+02
v(4) = 2.801796e+02,2.826252e+02
v(5) = 4.570023e+02,2.210213e+02
v(6) = 3.800000e+02,0.000000e+00
v(7) = 3.800000e+02,0.000000e+00
v(8) = 2.801796e+02,2.826252e+02
frequency = 1.600000e+03,0.000000e+00
l1#branch = -3.94078e+01,5.464041e+00
l3#branch = -7.70023e+00,-2.21021e+01
va1#branch = 3.940782e+01,-5.46404e+00
va2#branch = 4.710806e+01,1.663809e+01
va3#branch = -7.70023e+00,-2.21021e+01
vu#branch = -3.94078e+01,5.464041e+00

```

Как видно, комплексы действующих значений искомых величин выводятся в алгебраической форме: действительная и мнимая части отделяются запятой. Будем округлять результаты до 4-х значащих цифр. Таким образом, комплекс действующего значения потенциала, например, 2-го узла $V(2)$ можно записать в общепринятом виде как $\dot{\varphi}_2 = (236,4 - j32,78)$ В. Потенциалы узлов 1, 6 и 7 одинаковы, поскольку «амперметры» представляют собой коротки. По той же причине $V(4)=V(8)$.

Токи ветвей `va1#branch`, `va2#branch`, `va3#branch`, протекающие через «амперметры», запишутся в виде:

²² Предупреждения (Warning) в данном случае не имеют существенного значения и опущены.

$$\dot{I}_1 = (39,41 - j5,464) \text{ A}; \quad \dot{I}_2 = (47,11 + j16,64) \text{ A}; \quad \dot{I}_3 = (-7,700 - j22,10) \text{ A}.$$

Токи индуктивных элементов L_1 и L_3 обозначены как l1#branch и l3#branch. Можно заметить, что va1#branch противоположно по знаку vu#branch и l1#branch. Это объясняется противоположными направлениями источника VU и амперметра VA1, а также противоположными направлениями тока 1-й ветви и направления индуктивного элемента L_1 .

Директивы

.PRINT AC VM(1) VM(2) VM(3) VM(4) VM(5) VM(8)

.PRINT AC VP(1) VP(2) VP(3) VP(4) VP(5) VP(8)

выводят те же комплексные узловые потенциалы, но в показательной форме: первая директива — модули (mag), вторая — начальные фазы (ph) в градусах. Результаты имеют следующий вид:

$$\text{mag}(v(1)) = 3.800000\text{e}+02$$

$$\text{ph}(v(1)) = 0.000000\text{e}+00$$

$$\text{mag}(v(2)) = 2.387090\text{e}+02$$

$$\text{ph}(v(2)) = -7.89394\text{e}+00$$

$$\text{mag}(v(3)) = 5.338903\text{e}+02$$

$$\text{ph}(v(3)) = 5.554749\text{e}+01$$

$$\text{mag}(v(4)) = 3.979668\text{e}+02$$

$$\text{ph}(v(4)) = 4.524896\text{e}+01$$

$$\text{mag}(v(5)) = 5.076431\text{e}+02$$

$$\text{ph}(v(5)) = 2.580994\text{e}+01$$

$$\text{mag}(v(8)) = 3.979668\text{e}+02$$

$$\text{ph}(v(8)) = 4.524896\text{e}+01$$

Директивы

.PRINT AC IM(VA1) IP(VA1)

.PRINT AC IM(VA2) IP(VA2)

.PRINT AC IM(VA3) IP(VA3)

выводят те же комплексные токи $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$, но в показательной форме. Результаты имеют вид:

$$\text{mag}(va1\#branch) = 3.978483\text{e}+01$$

$$\text{ph}(va1\#branch) = -7.89394\text{e}+00$$

.....

$$\text{mag}(va2\#branch) = 4.995994\text{e}+01$$

$$\text{ph}(va2\#branch) = 1.945271\text{e}+01$$

.....

$$\text{mag}(va3\#branch) = 2.340508\text{e}+01$$

$$\text{ph}(va3\#branch) = -1.09208\text{e}+02$$

В общепринятом виде:

$$\dot{I}_1 = 39,78e^{-j7,894^\circ} \text{ A}; \quad \dot{I}_2 = 49,96e^{j19,45^\circ} \text{ A}; \quad \dot{I}_3 = 23,40e^{-j109,2^\circ} \text{ A}.$$

Запишем мгновенные значения токов ветвей на основе полученных комплексных величин. От показательной формы просто перейти к мгновенному значению, то есть к синусоидальной функции времени. Для этого надо помножить комплекс на $\sqrt{2}$, затем помножить на оператор вращения $e^{j\omega t}$ (4.4) и взять мнимую часть (4.3). Наличие $\sqrt{2}$ объясняется необходимостью перехода от комплекса действующего значения к комплексу амплитудного значения. Так, для первого тока имеем

$$i_1(t) = 39,78\sqrt{2} \sin(2\pi \cdot 1600 t - 7,894^\circ) = 56,26 \sin(10053t - 7,894^\circ) \text{ A}.$$

Аналогично для токов второй и третьей ветвей получаем:

$$i_2(t) = 70,65 \sin(10053t + 19,45^\circ) \text{ A}; \quad i_3(t) = 33,09 \sin(10053t - 109,2^\circ) \text{ A}.$$

При вычислении мгновенных значений не следует забывать, что слагаемые аргумента синуса должны быть выражены в одинаковых единицах.

Определим мощности цепи (см. пп.4.3.3). В интерактивном режиме вводим команды:

```
WinSpice 4 -> LET SC=V(1)*(REAL(VA1#branch)-j(IMAG(VA1#branch)))
WinSpice 5 -> LET P=REAL(SC)
WinSpice 6 -> LET Q=IMAG(SC)
WinSpice 7 -> LET S=MAG(SC)
WinSpice 8 -> LET FI=PH(SC)
WinSpice 9 -> PRINT SC P Q S FI
sc = 1.497497e+04,2.076336e+03
p = 1.497497e+04
q = 2.076336e+03
s = 1.511823e+04
fi = 7.893943e+00
```

После округления получаем

$$\underline{S} = (14970 + j 2076) = 15120 e^{j7,894^\circ} \text{ В} \cdot \text{А}; \quad P = 14970 \text{ Вт}; \\ Q = 2076 \text{ вар}; \quad S = 15120 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Теперь найдем эквивалентное комплексное сопротивление двухполюсной цепи относительно зажимов источника. Согласно закону Ома оно определяется отношением напряжения источника к его току:

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}_1}. \quad (4.13)$$

Вместо ручного вычисления используем интерактивный режим WinSpice3. Заметим, что $\dot{U} = \dot{\varphi}_1$. Тогда (4.13) можно закодировать в виде $z=V(1)/va1\#branch$. Последовательность команд, вводимых в командных строках и завершающихся нажатием клавиши Enter, приведена ниже:

```
WinSpice 10 -> let z=V(1)/va1#branch
WinSpice 11 -> print z
z = 9.460871e+00,1.311785e+00
WinSpice 12 -> print mag(z) ph(z)
mag(z) = 9.551380e+00
ph(z) = 7.893943e+00
WinSpice 13 ->
```

В третьей строке искомое комплексное сопротивление представлено в алгебраической форме записи, то есть $\underline{Z} = (9,461 + j1,312) \text{ Ом}$. В четвертой строке задается вывод этой же величины в показательной форме: $\text{mag}(z)$ — модуль комплексного сопротивления (или полное сопротивление), $\text{ph}(z)$ — аргумент комплексного сопротивления. Таким образом, эквивалентное комплексное сопротивление относительно зажимов источника $\underline{Z} = 9,551 e^{j7,894^\circ} \text{ Ом}$.

Интересно выяснить, какие векторы генерируются программой. Для этого, как и ранее (см. пп. 3.2.4.1), используем команды **display** или **let**. Программа выводит список

```
WinSpice 7 -> display
```

Here are the vectors currently active:

Title: PRIMER 4.1 (SPICE2 STYLE)

Name: ac1 (AC Analysis)

Date: Mon Jul 31 23:37:26 2019

```
V(1)      : voltage, complex, 1 long
.....
V(8)      : voltage, complex, 1 long
frequency  : frequency, complex, 1 long [default scale]
l1#branch  : current, complex, 1 long
l3#branch  : current, complex, 1 long
va1#branch : current, complex, 1 long
va2#branch : current, complex, 1 long
va3#branch : current, complex, 1 long
vu#branch  : current, complex, 1 long
```

Из листинга следует, что все векторы являются активными в текущем сеансе (currently active), то есть их можно использовать в дальнейших интерактивных вычислениях. Проведен анализ по переменному току (AC Analysis), имя анализа ac1, дата и время его проведения (Date:...). Далее перечислены все векторы, которые имеют комплексный тип (complex) и единичную длину (long), так как в данном примере все расчеты производятся на одной частоте. Эта частота (frequency) также имеет комплексный тип, хотя сама по себе является действительной величиной. Векторы имеют размерности напряжения (voltage), частоты (frequency) и тока (current).

Строго говоря, при кодировании выражений *нужно указывать имя анализа*, отделяя его точкой от имени переменной. Например, эквивалентное комплексное сопротивление следовало бы закодировать в следующем виде:

```
z=ac1.V(1)/ac1.va1#branch
```

Такая запись позволяет однозначно указать вектор в том случае, если одноименные векторы формируются разными видами анализа или другой задачей в текущем сеансе работы WinSpice3. Если же в программу загружен единственный цепной файл, в котором применяется один тип анализа (как в примере 4.1), то необходимость указания имени анализа отпадает.

ПРИМЕР 4.2. Пусть в схеме рис. 4.3 необходимо найти системные функции цепи (п.3.1), полагая ветвь 1 (с источником) в качестве входной, а ветвь 3 — в качестве выходной ветви. Направления ветвей указаны на рисунке. В п. 3.1 рассматривалась аналогичная задача по отношению к цепи постоянного тока. Применялись два способа: SPICE-модель физического эксперимента и использование директивы **.TF**. К сожалению, эта директива не предназначена для расчета цепей переменного тока. Поэтому остается лишь первый способ. В отличие от постоянного тока все величины, входящие в выражения (3.1) — (3.4) будут комплексными числами. Запишем формулы для искоемых величин в схеме рис. 4.3:

$$\underline{Z}_{\text{эkv } 1} = \underline{Z}_{11} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}_1}; \quad \underline{Y}_{\text{эkv } 1} = \underline{Y}_{11} = \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}} = \underline{Z}_{\text{эkv } 1}^{-1};$$
$$\underline{K}_{U31} = \frac{\dot{U}_3}{\dot{U}}; \quad \underline{Z}_{31} = \frac{\dot{U}_3}{\dot{I}_1};$$

$$\underline{K}_{I31} = \frac{\dot{I}_3}{\dot{I}_1}; \quad \underline{Y}_{31} = \frac{\dot{I}_3}{\dot{U}},$$

где $\underline{Z}_{\text{экв}1}$ — эквивалентное комплексное сопротивление двухполюсника, к которому подключен источник с напряжением \dot{U} ;

\underline{Z}_{11} — комплексное входное сопротивление первой ветви;

$\underline{Y}_{\text{экв}1}$ — эквивалентная комплексная проводимость двухполюсника, к которому подключен источник с напряжением \dot{U} ;

\underline{Y}_{11} — комплексная входная проводимость первой ветви;

\underline{K}_{U31} — комплексный коэффициент передачи напряжения источника на третью ветвь;

$\dot{U}_3 = \dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_4$ — комплексное напряжение на третьей ветви, совпадающее по направлению с током \dot{I}_3 ;

\underline{Z}_{31} — комплексное передаточное (взаимное) сопротивление третьей и первой ветвей;

\underline{K}_{I31} — комплексный коэффициент передачи тока из первой ветви в третью;

\underline{Y}_{31} — комплексная передаточная (взаимная) проводимость третьей и первой ветвей.

Поскольку в данном примере необходимы вычисления по вышеприведенным формулам, то лучше использовать стиль SPICE3. Текстовое описание (цепной файл primer4_2.cir):

```
PRIMER 4.2 (SPICE3 STYLE)
*
* ELEMENTY
VU 1 0 AC 380
R1 0 2 6
R3 5 7 10
L1 2 3 1.194M
L3 5 4 795.8U
C1 3 8 24.87U
C2 6 4 16.58U
*
* AMPERMETRY
VA1 4 8
VA2 1 6
VA3 1 7
*
.CONTROL
SET UNITS=DEGREES
* RASCHET PRI 1600 Hz
AC LIN 1 1600 1600
ECHO ==== SYSTEM FUNCTION =====
LET Z11=V(1)/VA1#BRANCH
PRINT mag(Z11) ph(Z11)
```

```

*
LET Y11=1/Z11
PRINT mag(Y11) ph(Y11)
*
LET Ku31=V(1,4)/V(1)
PRINT mag(Ku31) ph(Ku31)
*
LET Z31=V(1,4)/VA1#BRANCH
PRINT mag(Z31) ph(Z31)
*
LET Ki31=VA3#BRANCH/VA1#BRANCH
PRINT mag(Ki31) ph(Ki31)
*
LET Y31=VA3#BRANCH/V(1)
PRINT mag(Y31) ph(Y31)
*
.ENDC
.END

```

После открытия цепного файла в WinSpice3 получим следующие результаты в показательной форме:

```

==== SYSTEM FUNCTION ====
mag(z11) = 9.551380e+00
ph(z11) = 7.893943e+00
mag(y11) = 1.046969e-01
ph(y11) = -7.89394e+00
mag(ku31) = 7.887764e-01
ph(ku31) = -7.05473e+01
mag(z31) = 7.533903e+00
ph(z31) = -6.26533e+01
mag(ki31) = 5.882917e-01
ph(ki31) = -1.01314e+02
mag(y31) = 6.159232e-02
ph(y31) = -1.09208e+02

```

В общепринятой форме записи:

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_{\text{экв}1} = 9,551e^{j7,894^\circ} \text{ Ом}; \quad Y_{11} = \underline{Y}_{\text{экв}1} = 0,1047e^{-j7,894^\circ} \text{ См};$$

$$\underline{K}_{U31} = 0,7888e^{-j70,55^\circ}; \quad \underline{Z}_{31} = 7,534e^{-j62,65^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{K}_{I31} = 0,5883e^{-j101,3^\circ}; \quad Y_{31} = 0,06159e^{-j109,2^\circ} \text{ См}.$$

Необходимо помнить, что при исходном стиле SPICE3 управляющий блок автоматически не добавляется и поэтому команда set units=degrees была включена в управляющий блок разработчиком текстового описания задачи.

ПРИМЕР 4.3. Часто в задачах на переменный ток частота не указывается, а вместо индуктивностей и емкостей задаются индуктивные и емкостные сопротивления X_L и X_C соответственно. Однако в SPICE-описаниях элементов требуется указание именно емкостей и индуктивностей. В данном случае можно формально положить угловую

частоту равной единице ($\omega = 1\text{с}^{-1}$), что соответствует $f = \omega/(2\pi) = 0,159155$ Гц. Тогда из (4.9) следует, что индуктивность в генри численно равна индуктивному сопротивлению в омах, а емкость в фарадах численно равна емкостной проводимости $1/X_C$ в сименсах.

Пусть в схеме рис. 4.5, а с источником синусоидального тока с действующим значением 6,5 А необходимо найти ток I_x в закоротке ab .

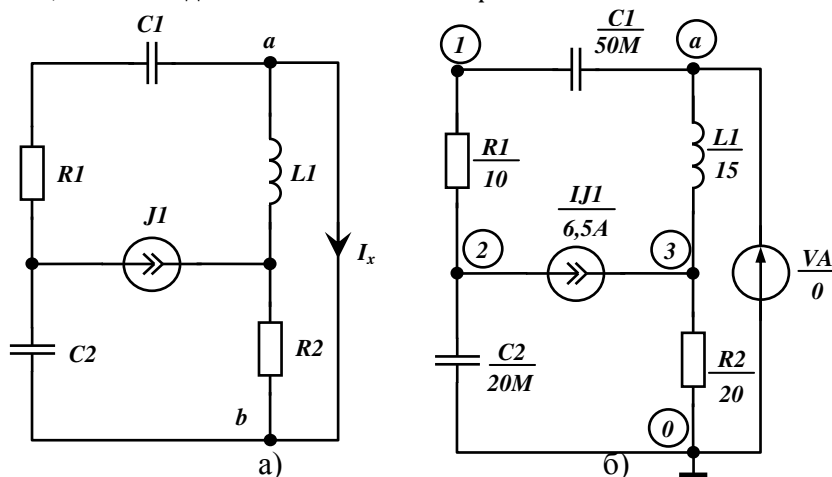


Рис. 4.5. Схема цепи переменного тока с источником тока (а), в SPICE-обозначениях (б): $R_1=10$ Ом; $R_2=20$ Ом; $X_{L1}=15$ Ом; $X_{C1}=20$ Ом; $X_{C2}=50$ Ом; $J=6,5$ А

Итак, полагаем частоту равной 0,159155 Гц и в качестве параметров реактивных элементов задаем $L_1=15$ Гн, $C_1=1/X_{C1}=0,05$ Ф =50 мФ, $C_2=1/X_{C2}=0,02$ Ф =20 мФ.

Схема в SPICE-обозначениях приведена на рис. 4.5,б. Здесь в ветвь с искомым током включен «амперметр» VA. Узел b на рис 4.5, а выбран в качестве базисного и поэтому обозначен нулем на рис. 4.5, б. Цепной файл primer4_3.cir, написанный в стиле SPICE2, имеет вид

```
PRIMER 4.3 (STYLE SPICE2)
* RESISTORY
R1 1 2 10
R2 3 0 20
* REAKTIVNYE ELEMENTY
L1 A 3 15
C1 1 A 50M
C2 2 0 20M
* ISTOCHNIK TOKA
IJ 2 3 AC 6.5
* AMPERMETR
VA A 0
* DIREKTIVA AC
.AC LIN 1 0.159155 0.159155
* PECHAT
.PRINT AC IM(VA) IP(VA)
.END
```

После этого откроем файл primer4_3.cir командой меню **Open**, которая загружает текстовое описание из цепного файла и запускает программу на счет. Приведем здесь полный выходной листинг, поскольку данная задача имеет некоторые особенности.

```
WinSpice 1 -> cd
Current directory: C:\cirfiles
WinSpice 2 -> source "primer4_3.cir"
Reading .\primer4_3.cir
NOTE: This is a Spice2 circuit file
Spice3 commands added:-
.control
destroy all
set units=degrees
save VA#branch VA#branch
ac lin 1 0.159155 0.159155
print mag(VA#branch) ph(VA#branch)
plot mag(VA#branch) ph(VA#branch)
.endc
```

Circuit: PRIMER 4.3 (STYLE SPICE2)

Executing commands ...

```
TEMP=27 deg C
WARNING: Source IJ has no value, DC 0 assumed
WARNING: VA: has no value, DC 0 assumed
ERROR: singular matrix: check nodes 2 and 2
```

doAnalyses: Matrix is singular

```
ac simulation(s) aborted
Command execution done.
```

Проанализируем весь листинг. После автоматически сгенерированного программой управляющего блока, заключенного между директивами **.CONTROL** и **.ENDC**, выдаются несколько строк предупреждений (WARNING:) и сообщение об ошибке

```
ERROR: singular matrix: check nodes 2 and 2
(ОШИБКА: сингулярная матрица: проверьте узлы 2 и 2)
Далее следуют сообщения:
doAnalyses: Matrix is singular (Матрица сингулярная)
ac simulation(s) aborted (АС-моделирование прервано)
Command execution done. (Выполнение команд закончено)
```

Итак, решение не получено. Попробуем разобраться в причине ошибки и найти способы ее устранения. Предупреждения WARNING напоминают о том, что для источников *IJ* и *VA* не указаны значения постоянных составляющих. Поскольку в данной задаче эти значения не нужны, то можно либо проигнорировать эти сообщения, либо явно указать нулевую постоянную составляющую. Таким образом, если «подправить» строки-описания источников к виду

```
IJ 2 3 AC 6.5 DC 0
VA A 0 DC 0
```

то эти предупреждения исчезнут.

Строка ERROR: говорит о том, что узловaя матрица сингулярная (singular matrix), то есть решения системы уравнений узловых потенциалов не существует. Предлагается проверить узел 2 (check nodes 2 and 2). Подобные предупреждения могут возникать, если при составлении текстового описания допущены ошибки, в результате чего оно не соответствует схеме. Однако в результате сверки текстового описания со схемой ошибки не обнаруживаются. На первый взгляд узел 2 ничем не отличается от любого другого узла схемы. Но если в 1-й ветви поменять местами $R1$ и $C1$, то окажется, что в узле 2 соединены $C1$, $C2$ и источник тока IJ . При рассмотрении законов Кирхгофа (п. 2.4) отмечалось, что такие узлы (и сечения) в SPICE запрещены²³. Дело в том, что в SPICE предусмотрен анализ цепи по постоянному току, даже если он явно не указан в задании. При этом предполагается, что цепь является связной, то есть *любой* узел должен иметь связь с базисным узлом (землей). В рассматриваемом же случае связность нарушается, т.к. *узел 2 по постоянному току оказывается изолированным от остальной части схемы*, что и проявляется в свойстве сингулярности узловaя матрицы. Действительно, идеальные элементы $C1$ и $C2$ не проводят постоянный ток и, следовательно, имеют бесконечное сопротивление. Идеальный источник тока IJ , как известно, тоже обладает бесконечным сопротивлением. Таким образом, возникшая ситуация является «расплатой» за идеальность используемых элементов. К сожалению, SPICE не распознает запрещенные конфигурации на этапе ввода исходных данных, и соответствующие предупреждения возникают лишь в процессе решения системы уравнений методом итераций (последовательных приближений). Для несвязной цепи матрица оказывается сингулярной и сходимость итерационного процесса (convergence) не достигается.

Ликвидировать сингулярность в рассматриваемом примере очень просто: достаточно соединить узел 2 с «землей» через высокоомный резистор. Другой вариант состоит в подключении высокоомного резистора параллельно любому из элементов $C1$, $C2$ или IJ . Таким образом, идеальный элемент превращается в реальный, и запрещенный узел 2 становится обычным. Например, подсоединим параллельно $C1$ резистор $RC1$ с сопротивлением 10^{12} Ом:

```
RC1 1 A 1e12
```

При этом узел 2 оказывается соединенным с «землей» через элементы $R1$, $RC1$, $L1$, $R2$ (см. рис. 4.5,б). Тогда текст рассматриваемого примера принимает следующий вид (primer4_3_1.cir):

```
PRIMER 4.3.1 (STYLE SPICE2)
```

```
* RESISTORY
```

```
R1 1 2 10
```

```
R2 3 0 20
```

```
RC1 1 A 1e12
```

```
* REAKTIVNYE ELEMENTY
```

```
L1 A 3 15
```

```
C1 1 A 50M
```

```
C2 2 0 20M
```

```
* ISTOCHNIK TOKA
```

```
IJ 2 3 AC 6.5 DC 0
```

```
* AMPERMETR
```

```
VA A 0 DC 0
```

²³ Там же отмечено, что в SPICE запрещаются контуры, состоящие из идеальных источников напряжения и (или) L -элементов.


```
* DIREKTIVA AC
.AC LIN 1 0.159155 0.159155
* ПЕЧАТ
.PRINT AC IM(VA) IP(VA)
.END
```

После открытия файла primer4_3_1.cir получаем решение

$\text{mag}(\text{va\#branch}) = 2.500600\text{e}+00$

$\text{ph}(\text{va\#branch}) = -9.89726\text{e}+01$

или в показательной форме $\dot{I}_x = 2,501e^{-j98,97^\circ} \text{ A}$.

Отметим, что после выполнения данного задания предупреждения WARNING об отсутствии постоянных составляющих исчезли, поскольку в описания источников были добавлены нулевые постоянные составляющие DC 0. Однако появились предупреждения о невозможности построения графиков.

WARNING: can't plot scalar vector 'mag(va#branch)' - ignored

WARNING: can't plot scalar vector 'ph(va#branch)' - ignored

WARNING: nothing to plot - command ignored

Дело в том, что после получения решения программа пытается построить графики зависимостей найденных величин от частоты, хотя в текстовом описании директива **.PLOT** отсутствует! Вспомним, что WinSpice3 автоматически добавляет эту директиву в блок управления (см. выше), т.к. очень часто АС-анализ проводится в диапазоне частот. Графики в этом случае представляют значительный интерес²⁴. В рассматриваемой же задаче расчет проводился на *одной* частоте и никакие графики, естественно, построены быть не могут. Об этом и говорят предупреждения can't plot scalar vector, которые следует проигнорировать.

При использовании гибридного стиля (primer4_3_2.cir) или к стиля SPICE3 (primer4_3_3.cir) никаких предупреждений не возникает, поскольку управляющий блок автоматически не добавляется. Директивы SET UNITS=DEGREES и DESTROY ALL следует добавлять самостоятельно.

```
PRIMER 4.3.2
*(HYBRID STYLE SPICE2/SPICE3)
* RESISTORY
R1 1 2 10
R2 3 0 20
RC1 1 A 1e12
* REAKTIVNYE ELEMENTY
L1 A 3 15
C1 1 A 50M
C2 2 0 20M
* ISTOCHNIK TOKA
IJ 2 3 AC 6.5 DC 0
* AMPERMETR
VA A 0 DC 0
* DIREKTIVA AC
.AC LIN 1 0.159155 0.159155
* ПЕЧАТ
```

```
PRIMER 4.3.3 (STYLE SPICE3)
* RESISTORY
.OPTIONS RSHUNT=1e12
R1 1 2 10
R2 3 0 20
* REAKTIVNYE ELEMENTY
L1 A 3 15
C1 1 A 50M
C2 2 0 20M
* ISTOCHNIK TOKA
IJ 2 3 AC 6.5 DC 0
* AMPERMETR
VA A 0 DC 0
* SCRIPT BLOCK
.CONTROL
DESTROY ALL
SET UNITS=DEGREES
```

²⁴ Их называют частотными характеристиками (см. далее п. 4.5),

```
.PRINT AC IM(VA) IP(VA)
*#DESTROY ALL
*#SET UNITS=DEGREES
*#RUN
*#PRINT mag(VA#BRANCH)
*#PRINT ph(VA#BRANCH)
.END
```

```
AC LIN 1 0.159155 0.159155
PRINT mag(VA#BRANCH)
PRINT ph(VA#BRANCH)
.ENDC
.END
```

Обратите внимание, что в цепном файле primer4_3_3.cir шунтирующий резистор *RC1* отсутствует. Вместо него указана директива

.OPTIONS RSHUNT=1e12,

которая *неявно* подключает резисторы с сопротивлением RSHUNT между *каждым* узлом схемы и «землей». Рекомендуется всегда использовать опцию RSHUNT при моделировании сложных цепей с емкостными элементами и источниками тока, когда визуальное определение запрещенных сечений затруднено. Вообще директива .OPTIONS позволяет устанавливать несколько десятков параметров программы WinSpice3, влияющих на точность, сходимость, время счета и др. Мы будем обращаться к ней по мере необходимости. Итак, на данном примере мы познакомились с некоторыми особенностями SPICE-анализа цепей переменного тока.

4.4.2. Цепи несколькими источниками электрической энергии

Пусть в цепи присутствуют несколько независимых гармонических источников одной частоты. В примере 4.4 рассматривается типовая задача на переменный ток для схемы с независимыми источниками напряжения. Электронное устройство с управляемыми источниками анализируется в примере 4.5. Многовариантные расчеты при изменении емкости на фиксированной частоте приведены в примере 4.6.

ПРИМЕР 4.4. Найти токи ветвей, напряжение u_{ab} и показание ваттметра на частоте $f=400$ Гц в электрической цепи, схема которой приведена на рис. 4.6. Мгновенные значения ЭДС источников напряжения:

$$e_1 = 141,4 \sin(2\pi ft + 60^\circ), \text{ В}; \quad e_{2a} = 62 \cos(2\pi ft - 124^\circ), \text{ В}; \quad e_{2b} = 96,41 \sin(2\pi ft - 159^\circ), \text{ В}.$$

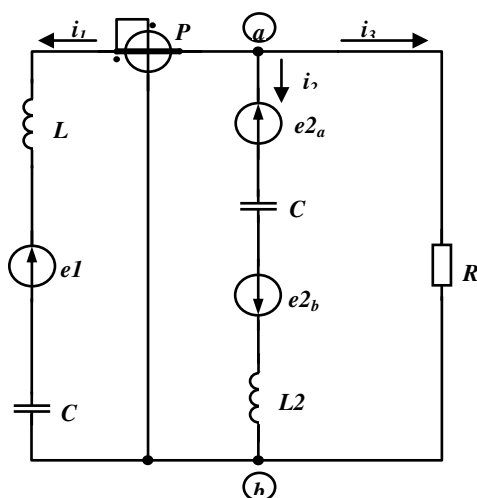


Рис. 4.6. Схема цепи переменного тока с тремя источниками гармонического напряжения:

$$L_1=32 \text{ мГн}; L_2=36 \text{ мГн}; C_1=4 \text{ мкФ}; C_2=2 \text{ мкФ} R_3=70 \text{ Ом}$$

Ваттметр PW состоит из токовой обмотки (толстая линия), включаемой в ветвь последовательно, и обмотки напряжения (тонкая линия), подключаемой параллельно. Токовая обмотка имеет малое сопротивление (в идеале нулевое), а обмотка напряжения, наоборот, обладает большим сопротивлением (в идеале бесконечным). Таким образом, идеальный ваттметр не влияет на работу электрической цепи и на схеме замещения не учитывается.

Заметим, что ЭДС e_{2a} задана в виде косинуса. Поскольку, как было отмечено выше, в электротехнике традиционно используются синусоидальные функции, используем формулу приведения: $e_{2a} = 62 \cos(2\pi ft - 124^\circ) = 62 \sin(2\pi ft - 124^\circ + 90^\circ) = 62 \sin(2\pi ft - 34^\circ)$, В.

Будем проводить расчет в комплексах действующего значения. Для этого заменим мгновенные значения ЭДС соответствующими комплексами:

$$e_1 = 141,4 \sin(2\pi ft + 60^\circ) \leftrightarrow \dot{E}_1 = \frac{141,4}{\sqrt{2}} e^{j60^\circ} = 100 e^{j60^\circ} \text{ В};$$

$$e_{2a} = 62 \sin(2\pi ft - 34^\circ) \leftrightarrow \dot{E}_{2a} = \frac{62}{\sqrt{2}} e^{-j34^\circ} = 43,84 e^{-j34^\circ} \text{ В};$$

$$e_{2b} = 96,41 \sin(2\pi ft - 159^\circ) \leftrightarrow \dot{E}_{2b} = \frac{96,41}{\sqrt{2}} e^{-j159^\circ} = 68,17 e^{-j159^\circ} \text{ В}.$$

Схема в SPICE-обозначениях приведена на рис. 4.7. В ветвь с резистором включен «амперметр», поскольку в ней источники напряжения отсутствуют. В остальных ветвях источники есть по условию, и их можно использовать в качестве амперметров. Запрещенных законами Кирхгофа узлов (сечений) и контуров в схеме нет.

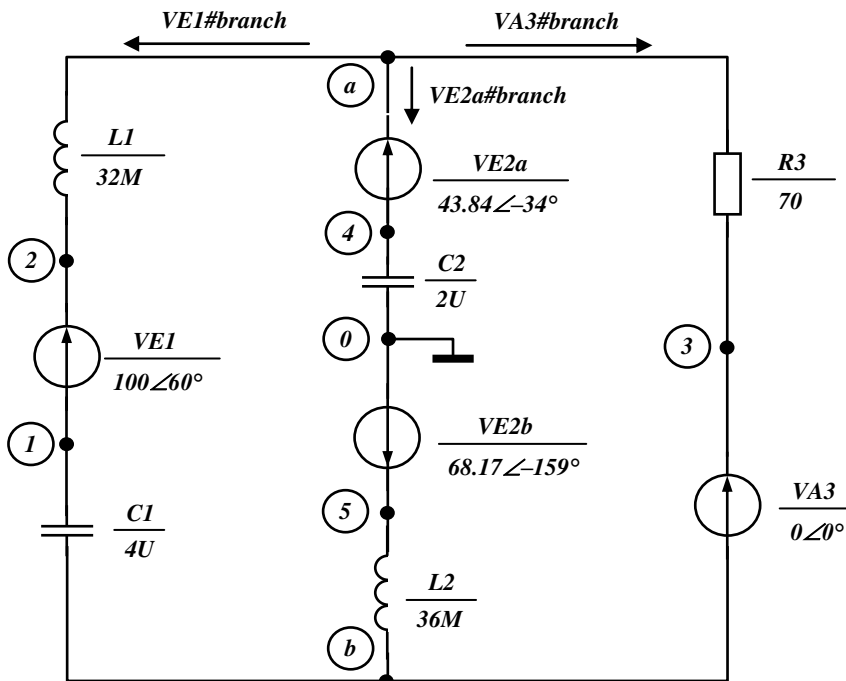


Рис. 4.7. Схема рис. 4.6 в SPICE-обозначениях

Текстовое описание схемы в стиле SPICE2 (primer4_4.cir) приведено ниже:

PRIMER 4.4 (STYLE SPICE2)

```
VE1 2 1 AC 100 60
VE2a A 4 AC 43.84 -34
VE2b 5 0 AC 68.17 -159
VA3 3 B DC 0
```

*

* L-elementy

*

```
L1 A 2 32m
L2 5 B 36m
```

*

* C-elementy

*

```
C1 1 B 4u
C2 4 0 2u
```

*

* RESISTORS

*

```
R3 A 3 70
```

*

* DIRECTIVES

```
.AC LIN 1 400 400
```

```
*.PRINT AC ALL
```

```
.PRINT AC IM(VE1) IP(VE1)
```

```
+ IM(VE2a) IP(VE2a)
```

```
+ IM(VA3) IP(VA3)
```

```
+ VM(A,B) VP(A,B)
```

```
.END
```

Загрузка файла primer4_4.cir в WinSpice3 дает следующие результаты:

AC analysis ... 100%

mag(ve1#branch) = 6.471909e-01

ph(ve1#branch) = -7.07246e+01

mag(ve2a#branch) = 9.502440e-01

ph(ve2a#branch) = -1.43282e+02

mag(va3#branch) = 1.300199e+00

ph(va3#branch) = 6.506959e+01

mag(v(a)-v(b)) = 9.101390e+01

ph(v(a)-v(b)) = 6.506959e+01

Комплексы действующих значений в показательной форме:

$$\dot{I}_1 = 0,6472e^{-j70,72^\circ} \text{ A}; \quad \dot{I}_2 = 0,9502e^{-j143,3^\circ} \text{ A}; \quad \dot{I}_3 = 1,300e^{j65,07^\circ} \text{ A}; \quad \dot{U}_{ab} = 91,01e^{j65,07^\circ} \text{ B}.$$

Переходим к мгновенным значениям:

$$i_1(t) = 0,6472\sqrt{2} \sin(2\pi \cdot 400 t - 70,72^\circ) = 0,9153 \sin(2513,3t - 70,72^\circ) \text{ A}.$$

Аналогично для токов второй и третьей ветвей получаем:

$$i_2(t) = 1,344 \sin(2513,3t - 143,3^\circ) \text{ A}; \quad i_3(t) = 1,838 \sin(2513,3t + 65,07^\circ) \text{ A};$$

Напряжение между узлами a и b : $u_{ab}(t) = 128,7 \sin(2513,3t + 65,07^\circ) \text{ B}$.

Показания ваттметра можно найти по формуле $P = \operatorname{Re}[\dot{U}_{ab}^*(-I_1)]$. Здесь знак «минус» перед комплексно-сопряженным током первой ветви обусловлен тем, что он вытекает из генераторного зажима токовой обмотки ваттметра (помечен точкой на рис. 4.6). Генераторный зажим обмотки напряжения (тоже помечен точкой) подключен к узлу a , и поэтому в расчете используется U_{ab} , а не U_{ba} . Обозначим комплексно-сопряженный ток первой ветви I_1 . Тогда можно ввести следующую команду:

WinSpice 5 ->let I1s=real(ve1#branch)-i*imag(ve1#branch)

После этого вычисляем показания ваттметра P по вышеприведенной формуле и выводим его на печать:

WinSpice 6 ->let P=real(V(a,b)*(-I1s))

WinSpice 7 ->print P

$p = 4.222431e+01$

Итак, показания ваттметра оказались положительными и равными 42,22 Вт. Физически это означает, что эта мощность передается от первой ветви в остальную часть схемы, то есть первая ветвь является генератором активной мощности.

ПРИМЕР 4.5. В схеме замещения электронного усилительного устройства рис. 4.8 найти комплексные амплитуды входного и выходного токов i_1 , i_5 , а также выходное напряжение u_{cd} . Независимые гармонические источники $e1$ и $j1$ имеют одинаковую частоту 1 МГц и заданы комплексными амплитудами: $\dot{E}_{1m} = 0,1 \text{ В}$; $\dot{J}_{1m} = 0,5 e^{-j30^\circ} \text{ мА}$.

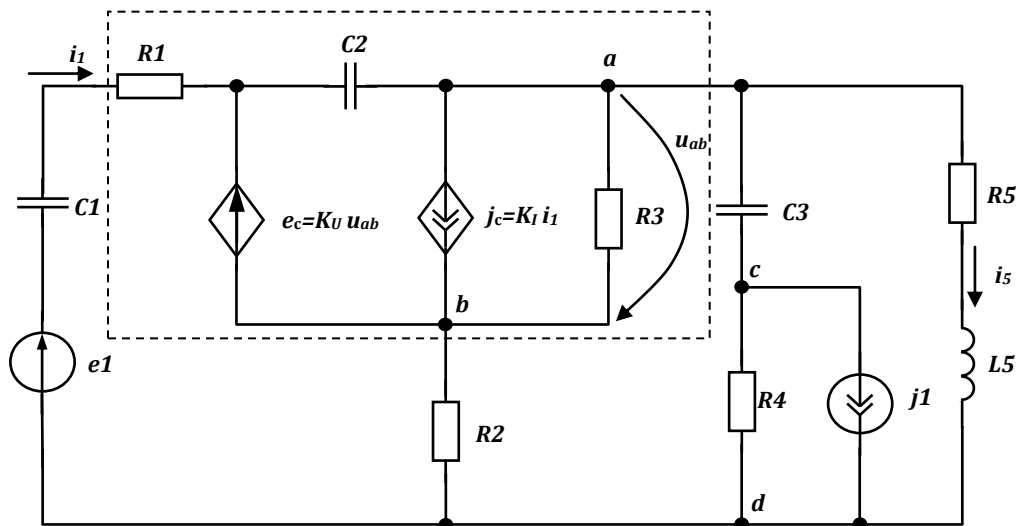


Рис. 4.8. Схема замещения электронного усилительного устройства: $R_1=2 \text{ кОм}$; $R_2=1 \text{ кОм}$; $R_3=50 \text{ кОм}$; $R_4=10 \text{ кОм}$; $R_5=4,7 \text{ кОм}$; $L_5=160 \text{ мкГн}$; $C_1=100 \text{ пФ}$; $C_2=2 \text{ пФ}$; $C_3=10 \text{ пФ}$; $K_U=0,01$; $K_I=30$.

Пунктиром выделена подсхема, замещающая биполярный транзистор и содержащая два управляемых источника: $e_c = K_U \cdot u_{ab}$ (ИНУН) и $j_c = K_I \cdot i_1$ (ИТУТ). Направления управляющих величин (u_{ab} для ИНУН и i_1 для ИТУТ) указаны на рис. 4.8.

Схема в SPICE-обозначениях приведена на рис. 4.9.

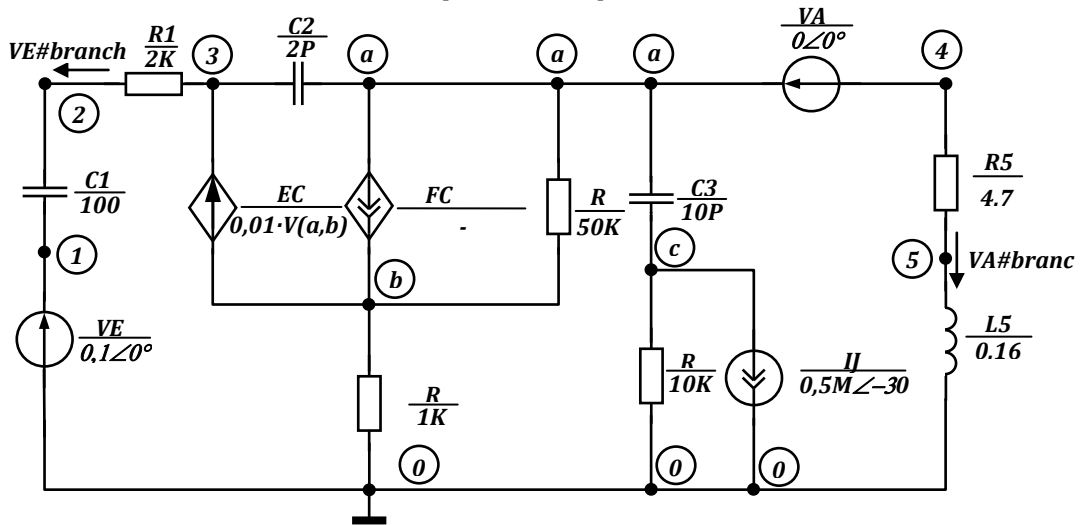


Рис. 4.9. Схема рис. 4.8 в SPICE-обозначениях

Узел d выбран базисным и обозначен как 0. В 5-ю ветвь включен «амперметр», для измерения выходного тока i_5 (VA#branch). Направление тока источника напряжения VE (VE#branch) показано на рис. 4.9. Оно соответствует правилам SPICE, но оказывается противоположным направлению управляющего тока i_1 , заданного по условию задачи для ИТУТ. Для устранения этого противоречия будем полагать коэффициент передачи тока ИТУТ отрицательным (-30). Расчет проводится в комплексах амплитудного значения, поэтому *деление амплитуд на $\sqrt{2}$ не производится*. Текстовое описание схемы в стиле SPICE2 (primer4_5.cir) приведено ниже:

PRIMER 4.5 (STYLE SPICE2)

VE 1 0 AC 0.1 0

VA A 4 AC 0 0

IJ C 0 AC 0.5M -30

EC 3 B A B 0.01

FC A B VE -30

*

* L-elementy

*

L5 5 0 0.16m

*

* C-elementy

*

C1 2 1 100P

C2 3 A 2P

C3 A C 10P

*

* RESISTORS

R1 3 2 2K

```

R2 B 0 1K
R3 A B 50K
R4 C 0 10K
R5 4 5 4.7K
*
* DIRECTIVES
.AC LIN 1 1MEG 1MEG
.PRINT AC IM(VA) IP(VA)
+ IM(VE) IP(VE)
+ VM(C) VP(C)
.END

```

В результате загрузки файла primer4_5.cir в WinSpice3 получены следующие результаты:

```

AC analysis ... 100 %
mag(va#branch) = 3.244683e-04
ph(va#branch) = -1.70906e+02
mag(ve#branch) = 4.369749e-06
ph(ve#branch) = -1.62559e+02
mag(v(c)) = 3.624885e+00
ph(v(c)) = 1.261097e+02

```

Искомые комплексы амплитудных значений в показательной форме:

$$\dot{I}_{1m} = -4,370e^{-j162,56^\circ} = 4,370e^{j17,44^\circ} \text{ мкА}; \quad \dot{I}_{5m} = 324,4e^{-j170,9^\circ} \text{ мкА}; \quad \dot{U}_{cdm} = 3,6251e^{j126,1^\circ} \text{ В}.$$

Знак «минус» перед числовым значением искомого тока \dot{I}_{1m} добавлен для приведения в соответствие его направления с рассчитанным током ve#branch.

ПРИМЕР 4.6. В схеме рис. 4.10 независимые гармонические источники заданы соотношениями: $e = 100\sqrt{2} \cos 10^5 t$, В; $j = 2,45 \sin(10^5 t - 35,26^\circ)$, А. Емкость C изменяется от нуля до бесконечности. Найти зависимости действующего значения и начальной фазы тока i от емкости. Построить круговую диаграмму.

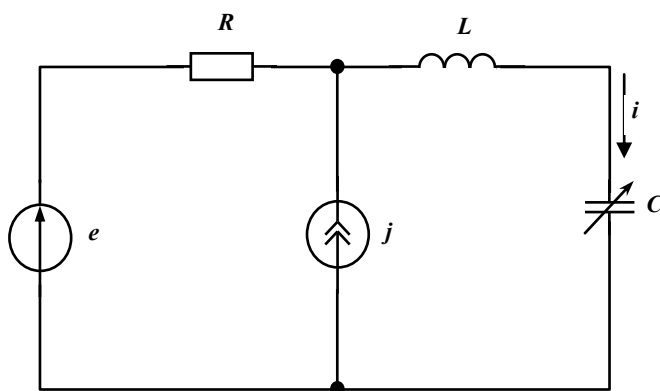


Рис. 4.10. Схема электрической цепи синусоидального тока: $R=100$ Ом; $L=1$ мГн; $C_2=0 \dots \infty$

Будем проводить расчет в комплексах действующего значения. Для этого заменим мгновенные значения ЭДС соответствующими комплексами:

$$e = 100\sqrt{2} \cos 10^5 t = 100\sqrt{2} \sin(10^5 t + 90^\circ) \leftrightarrow \dot{E} = 100e^{j90^\circ} \text{ В};$$

$$j = 2,45 \sin(10^5 t - 35,26^\circ) \leftrightarrow \dot{J} = \frac{2,45}{\sqrt{2}} e^{-j35,26^\circ} = 1,732 e^{-j35,26^\circ} \text{ А}.$$

По условию примера емкость C изменяется от нуля до бесконечности. Однако нуль и бесконечность в SPICE недопустимы. Поэтому необходимо выбрать конечные значения емкости, обеспечивающие достаточную близость к условию. Например, при $C=1$ пФ емкостное сопротивление на заданной угловой частоте $\omega=10^5 \text{ с}^{-1}$ составляет

$$X_C = (\omega C)^{-1} = (10^5 \cdot 10^{-12})^{-1} = 10^7 \text{ Ом}.$$

Это значение во много раз больше индуктивного сопротивления $X_L = \omega L = 10^5 \cdot 10^{-3} = 100 \text{ Ом}$., включенного последовательно с емкостным сопротивлением. Следовательно, в данной задаче емкость 1 пФ можно считать близкой к нулю. При $C=1$ мкФ $X_C = 10 \text{ Ом}$, что на порядок меньше $X_L = 100 \text{ Ом}$. Поэтому емкость $C=1$ мкФ будем полагать близкой к бесконечности. Расчеты проведем для 50 точек, то есть шаг по емкости будет равен 0,02 мкФ.

Схема в SPICE-обозначениях показана на рис. 4.11.

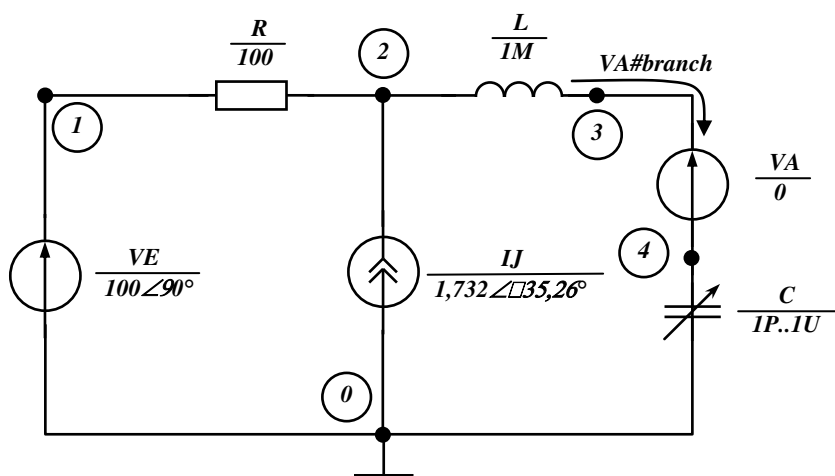


Рис. 4.11. Схема рис. 4.10 в SPICE-обозначениях

Последовательно с емкостью включен «амперметр» VA для определения искомого тока i (VA#branch). При составлении текстового описания используем стиль сценариев SPICE3, поскольку потребуются организация цикла по емкости аналогично примерам 3.12, 3.13, где в цикле изменялось сопротивление. Текстовое описание (цепной файл primer4_6.cir) приведено ниже (строки пронумерованы для удобства ссылок).

```

1      PRIMER 4.6 (STYLE SPICE3)
2      VE 1 0 AC 100 90 DC 0
3      VA 3 4 DC 0
4      IJ 0 2 AC 1.732 -35.26 DC 0
5      R 1 2 100
6      L 2 3 1M
7      C 4 0 0.1U

```



```

8      .CONTROL
9      echo *****
10     echo *** IZMENENIE C ***
11     echo *****
12     DESTROY ALL
13     SAVE VA#branch
14     SET UNITS=DEGREES
15     LET REI=VECTOR(50)
16     LET IMI=VECTOR(50)
17     LET MAGI=VECTOR(50)
18     LET PHASEI=VECTOR(50)
19     LET CVAR=VECTOR(50)
20     SETTYPE CURRENT MAGI
21     LET CAP =1P
22     LET K=0
23     WHILE K <= 49
24         ALTER @C[capacitance] = CAP+ 0.02U*K
25         AC LIN 1 15923.6 15923.6
26         LET CVAR[K]=@C[capacitance]
27         LET REI[K]=real(VA#branch)
28         LET IMI[K]=imag(VA#branch)
29         LET MAGI[K]=mag(VA#branch)
30         LET PHASEI[K]=phase(VA#branch)
31         LET K=K+1
32     END
33     ****TABLICA ****
34     PRINT CVAR REI IMI MAGI PHASEI
35     WRITE "C:\cirfiles\circle.csv" CVAR REI IMI
36     ****ГРАФИКИ I=f(C) phi=f(C) ****
37     PLOT MAGI vs CVAR TITLE "CURRENT vs CAPACITANCE"
38     + XUNITS Farads XLABEL CAPACITANCE YLABEL CURRENT
39     *
40     PLOT PHASEI vs CVAR TITLE "PHASE vs CAPACITANCE"
41     + XUNITS Farads YUNITS Degrees XLABEL CAPACITANCE
42     + YLABEL PHASE
43     .ENDC
44     .END

```

Опишем содержание этого текста:

- строки 1–7 содержат описание схемы рис. 4.11;
- строка 8 — начало управляющего блока, содержащего сценарий;
- строки 9–11 предназначены для вывода пояснительного текста командой ECHO (эхо) в окно WinSpice3;
- строка 12 содержит команду DESTROY ALL (стереть все), освобождающую память от результатов предыдущих построений графиков;
- строка 13 содержит команду SAVE VA#branch, сохраняющую для экономии памяти только вектор искомого тока;
- строка 14 устанавливает градусы в качестве единицы измерения фазы;
- строки 15–19 предназначены для создания пяти пустых векторов длиной по 50 элементов каждый.

— в строке 20 команда SETTYPE устанавливает ток в качестве единицы измерения вектора MAGI. Это необходимо для правильного отображения единиц измерения на графике;

— в строке 21 емкости CAP присваивается минимальное значение 1 пФ;

— в строке 22 переменной-счетчику повторений цикла K присваивается нулевое начальное значение;

— строка 23 содержит заголовок цикла типа «выполнять до тех пор, пока». В данном случае тело цикла (строки 24–31) будет выполняться до тех пор, пока K не превосходит 49. Поскольку начальное значение $K = 0$, то тело цикла выполнится 50 раз;

— в строке 24 емкость C (@c[capacitance]) наращивается с шагом 0,02 мкФ;

— строка 25 задает режим расчета цепи по переменному току известной нам директивой .AC, но **без точки**. Частота равна $10^5 / (2\pi) = 15923,6$ Гц.

— в строках 26–30 производится занесение искоемых величин в соответствующие векторы: вектор CVAR-емкость, вектор REI-действительная часть тока, вектор IMI-мнимая часть тока, MAGI-модуль вектора тока, PHASEI-начальная фаза тока;

— в строке 31 значение счетчика цикла K наращивается на 1;

— строка 32 обозначает конец тела цикла;

— строка 34 задает печать таблицы значений векторов;

— строка 35 записывает таблицу результатов для векторов CVAR, REI и IMI во внешний файл C:\cirfiles\circle.csv, в котором значения разделены запятыми. Этот файл используется ниже для построения круговой диаграммы;

— строки 37, 38 содержат директиву PLOT, предназначенную для вывода искомой зависимости модуля действующего значения тока от емкости. Здесь использованы аргументы команды, применявшиеся ранее (см. выводы по разделу 3.2). Дополнительный аргумент XUNITS позволяет задать основные единицы измерений для величины, откладываемой по оси абсцисс. Аргумент применяется в том случае, если единица измерения не может быть задана директивой SETTYPE;

— строки 40–42 содержат директиву PLOT, предназначенную для вывода искомой зависимости начальной фазы тока от емкости. Дополнительный аргумент YUNITS позволяет задать основные единицы измерений для величины, откладываемой по оси ординат. Аргумент применяется в том случае, если единица измерения не может быть задана директивой SETTYPE;

— строка 43 обозначает конец сценария;

— строка 44 обозначает конец текстового описания.

После загрузки файла primer4_6.cir в WinSpice3 получим таблицу результатов и графики искоемых зависимостей рис. 4.12 а, б.

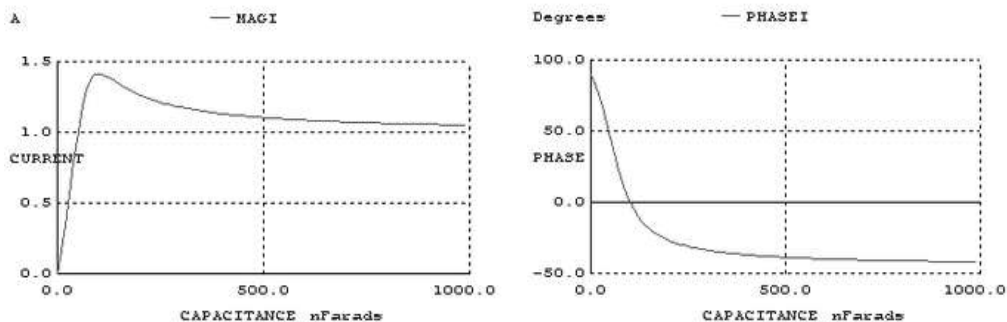


Рис. 4.12. Зависимости модуля действующего значения тока (а) и начальной фазы (б) от емкости

Зависимость рис. 4.12, *a* имеет максимум, что свидетельствует о резонансе напряжений. Увеличение области максимума после ее выделения прямоугольником с помощью мыши позволяет определить величину резонансной емкости: $C = 100 \text{ нФ}$ (рис. 4.13).

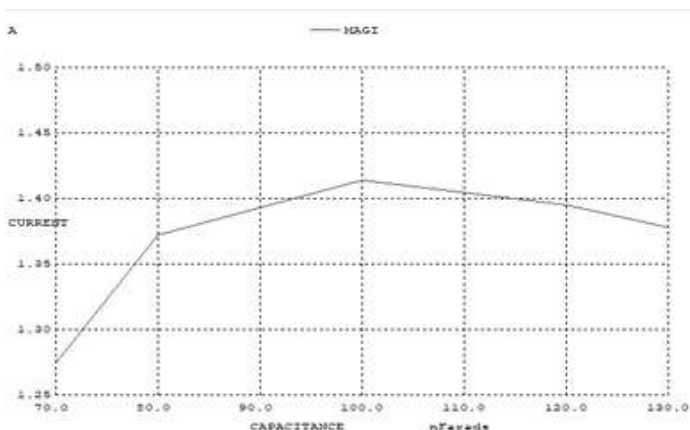


Рис. 4.13. Зависимость модуля действующего значения тока от емкости вблизи максимума

Теперь перейдем к построению круговой диаграммы тока i , то есть годографа вектора тока на комплексной плоскости. Из рис. 4.12 *a, б* видно, что при изменении емкости изменяется модуль и аргумент вектора тока, то есть его конец описывает некоторый годограф. Из теории цепей известно, что он представляет собой часть окружности: отсюда и название. Формально круговую диаграмму можно построить как зависимость мнимой части вектора от его действительной части. Однако такая зависимость будет в общем случае двузначной функцией, что вызывает сложности при построении диаграммы в WinSpice3. Поэтому в данном случае следует использовать более совершенную программу построения графиков, например, Excel. Для этого в строке 35 текстового описания необходимые данные были записаны во внешний текстовый файл circle.csv для последующей его загрузки в Excel (или импорта). В результате текст превращается в числа.

Текстовый формат csv является фактическим стандартом при обмене данными между различными программами. Он содержит столбцы данных, причем в строках они отделены запятыми, а разделителем целой и дробной части является точка.

Опишем процедуру импорта csv-файла в Excel 2003:

- выполнить команду меню программы Excel **Данные/Импорт внешних данных/Импортировать данные**;

- в окне «Выбор источника данных» выбрать папку, содержащую импортируемый файл (в нашем случае C:\cirfiles\), и указать тип файлов «Текстовые файлы». Затем щелкнуть на файле circle.csv и нажать кнопку **Открыть**;

- в открывшемся окне «Мастер текстов (импорт) — шаг 1 из 3» щелкнуть по кнопке **Далее** и в следующем окне выбрать в качестве символа-разделителя запятую. Образец разбора данных в нижней части окна отобразит разделение данных по столбцам вертикальными линиями;

- снова щелкнуть по кнопке **Далее**, нажать кнопку **Подробнее** и выбрать точку в качестве разделителя целой и дробной части. Нажать кнопку **ОК**;

— нажать кнопки **Готово** и **ОК**, после чего на листе электронной таблицы появятся столбцы импортированных данных, а именно, значения CVAR, REI и IMI. Первый столбец «yes», добавленный автоматически программой WinSpice3, в данном случае не нужен, и его можно удалить.

Построение выполняется с помощью средства «Мастер диаграмм». Тип диаграммы — точечная диаграмма со значениями, соединенными сглаживающими линиями. Полученный результат приведен на рис. 4.14. На рис. 4.15 дорисованы вектор тока короткого замыкания $\dot{I}_{кз}$ при $C \rightarrow \infty$ и вектор тока при $C=70$ нФ. По аналогии можно нанести векторы токов при других емкостях.

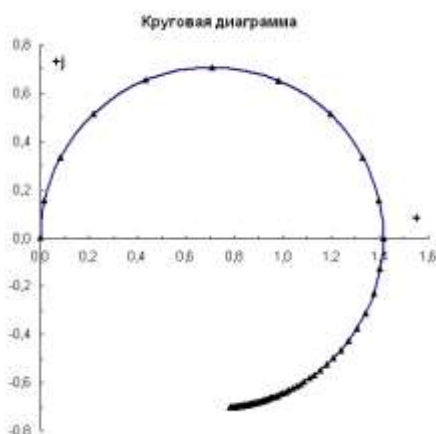


Рис. 4.14. Круговая диаграмма тока



Рис. 4.15. Определение $I_{кз}$ и тока при $C = 70$ нФ по круговой диаграмме

4.4.3. Цепи с взаимной индукцией

Пусть два контура (например, катушки) с токами i_1, i_2 расположены достаточно близко друг к другу. При этом создается общее магнитное поле, зависящее от величин и направлений токов контуров, их взаимного расположения и магнитных свойств

окружающей среды. Поэтому полные магнитные потоки (потокосцепления) контуров (ψ_1, ψ_2) состоят из двух слагаемых: потокосцепления самоиндукции (ψ_{11}, ψ_{22}) и потокосцепления взаимной индукции (ψ_{12}, ψ_{21}) . В этом случае говорят о наличии индуктивной (или магнитной) связи между контурами. Потокосцепление самоиндукции характеризует часть потокосцепления контура, создаваемую протекающим *по нему* током. Потокосцепление взаимной индукции характеризуют часть потокосцепления контура, обусловленную влиянием тока *другого* контура. Это влияние проявляется в увеличении или уменьшении потокосцепления контура по сравнению со случаем отсутствия индуктивной связи. Таким образом, алгебраически суммируя потокосцепления для каждого контура, получаем

$$\begin{aligned}\psi_1 &= \psi_{11} \pm \psi_{12}; \\ \psi_2 &= \psi_{22} \pm \psi_{21}.\end{aligned}\tag{4.14}$$

Для выбора знака необходимо, чтобы были известны *одноименные зажимы* контуров, помечаемые на условных графических обозначениях точками или звездочками (рис. 4.16). Индуктивная связь изображается двунаправленной стрелкой с буквой *M*.

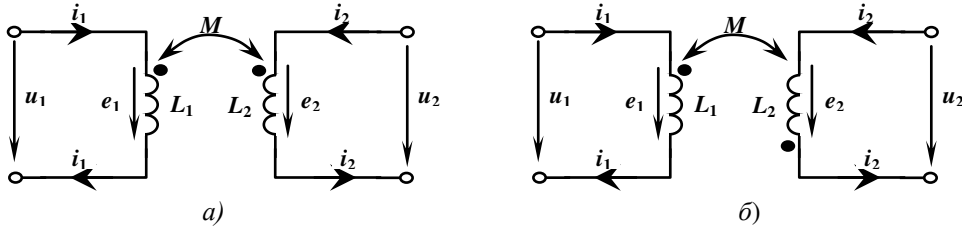


Рис. 4.16. Согласное (а) и встречное (б) включение индуктивно связанных контуров

Одноименными называют зажимы двух индуктивно связанных контуров, если при одинаковом направлении токов относительно этих зажимов полные потокосцепления увеличиваются. Такое включение контуров (рис. 4.16, а) называют *согласным* (знак «плюс» в (4.14)). Наоборот, при разном направлении токов потокосцепление уменьшается (знак «минус» в (4.14)) и включение называют *встречным* (рис. 4.16, б).

Пусть токи изменяются во времени. Тогда, согласно закону электромагнитной индукции, в контурах наводится ЭДС e_1, e_2 :

$$\begin{aligned}e_1 &= -\frac{d\psi_1}{dt} = -\frac{d\psi_{11}}{dt} \mp \frac{d\psi_{12}}{dt} = e_{1L} \pm e_{1M}; \\ e_2 &= -\frac{d\psi_2}{dt} = -\frac{d\psi_{22}}{dt} \mp \frac{d\psi_{21}}{dt} = e_{2L} \pm e_{2M},\end{aligned}\tag{4.15}$$

где e_{1L} — ЭДС самоиндукции первого контура; e_{1M} — ЭДС взаимной индукции, наводимая током второго контура в первом; e_{2L} — ЭДС самоиндукции второго контура; e_{2M} — ЭДС взаимной индукции, наводимая током первого контура во втором.

Если среда неферромагнитная (линейная), то потокосцепления связаны с токами прямо пропорциональными зависимостями:²⁵

$$\begin{aligned}\psi_{11} &= L_1 i_1; & \psi_{12} &= M_{12} i_2; \\ \psi_{22} &= L_2 i_2; & \psi_{21} &= M_{21} i_1,\end{aligned}\tag{4.16}$$

где L_1, L_2 — коэффициенты самоиндукции (индуктивности) первого и второго контуров соответственно, Гн; M_{12} — коэффициент взаимной индукции первого и второго контуров, Гн; M_{21} — коэффициент взаимной индукции второго и первого контуров, Гн.

В теоретической электротехнике доказывается, что $M_{12} = M_{21} = M$ (свойство взаимности). Подстановка (4.16) в (4.15) с учетом связей между напряжениями и ЭДС $u_1 = -e_1$ и $u_2 = -e_2$ приводит к уравнениям

$$\begin{cases} u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt}; \\ u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt}. \end{cases}\tag{4.17}$$

Индуктивно связанные контуры часто называют M -элементом. Как видно из рис. 4.16, схема замещения M -элемента содержит два обычных L -элемента и обозначение индуктивной связи. Отметим, что в отличие от ранее рассмотренных двухполюсных R -, L -, C -элементов, M -элемент является четырехполюсным, и описывается не одним уравнением, а системой двух уравнений (4.17).

Для установившегося синусоидального процесса целесообразно выразить (4.17) в символической форме (символ дифференцирования заменяется на $j\omega$):

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \underline{Z}_{L1} \dot{I}_1 - \underline{Z}_M \dot{I}_2; \\ \dot{U}_2 = \underline{Z}_{L2} \dot{I}_2 - \underline{Z}_M \dot{I}_1, \end{cases}\tag{4.18}$$

где $\underline{Z}_{L1} = j\omega L_1$; $\underline{Z}_{L2} = j\omega L_2$; $\underline{Z}_M = j\omega M$.

Общепринятой характеристикой явления взаимной индукции является коэффициент индуктивной связи

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}},\tag{4.19}$$

значения которого удовлетворяют неравенству $0 \leq K \leq 1$. В случае индуктивной связи более, чем двух контуров коэффициент индуктивной связи и характер включения (согласное или встречное) должны быть известны для каждой пары контуров.

Рассмотрим SPICE-описание M -элемента (рис. 4.17).

²⁵ Соотношения (4.16) приближенно выполняются и в случае ферромагнитной среды без насыщения.

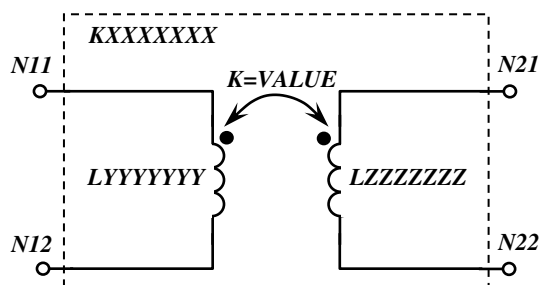


Рис. 4.17. *M*-элемент в SPICE-обозначениях

Предложения, описывающие *M*-элемент с одноименными зажимами N11 и N21, показанный на рис. 4.17, имеет вид

```
LYYYYYYY N11 N12 VALY
LZZZZZZZ N21 N22 VALZ
KXXXXXXX LYYYYYYY LZZZZZZZ VALUE
```

Здесь LYYYYYYY, LZZZZZZZ — имена индуктивно связанных элементов с индуктивностями VALY и VALZ соответственно; KXXXXXXX — имя *M*-элемента; VALUE — это величина коэффициента индуктивной связи (4.19). Здесь, как и ранее, XXXXXXXX, YYYYYYYY, ZZZZZZZZ произвольные алфавитно-цифровые последовательности.

Отметим, что VALUE представляет собой именно значение коэффициента индуктивной связи (4.19), а не коэффициента взаимной индукции *M*. Игнорирование этого факта является источником частых ошибок. Важно также иметь в виду, что одноименные зажимы N11, N21 указаны как плюсовые в описаниях *L*-элементов. Следует всегда руководствоваться этим правилом для получения корректных результатов²⁶.

ПРИМЕР 4.7. Рассмотрим последовательное включение индуктивно связанных *L*-элементов. На рис. 4.18 приведены схемы согласного (а) и встречного (б) включения. Пусть надо найти ток *i*, протекающий в цепи, если действующее значение напряжения источника равно 1 В.

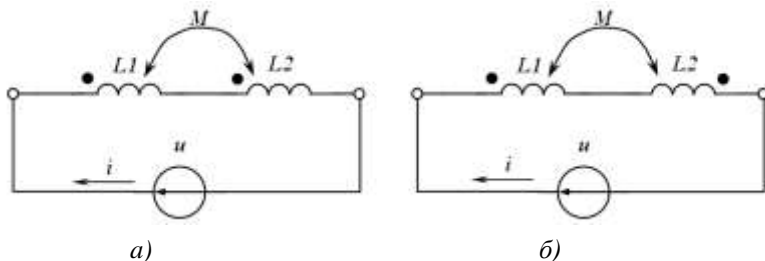


Рис. 4.18. Согласное (а) и встречное (б) последовательное включение индуктивно связанных *L*-элементов: $L_1=L_2=2$ мГн; $M=0,5$ мГн; $U=1$ В; $f=1000$ Гц.

На рис 4.19 приведены эти схемы в SPICE-обозначениях. Начальная фаза источника напряжения принята за ноль. Коэффициент индуктивной связи определен согласно (4.19)

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{0,5}{\sqrt{2 \cdot 2}} = 0,25.$$

²⁶ Можно указывать одноименные зажимы как минусовые, однако, во избежание путаницы, рекомендуется вышеприведенное правило.

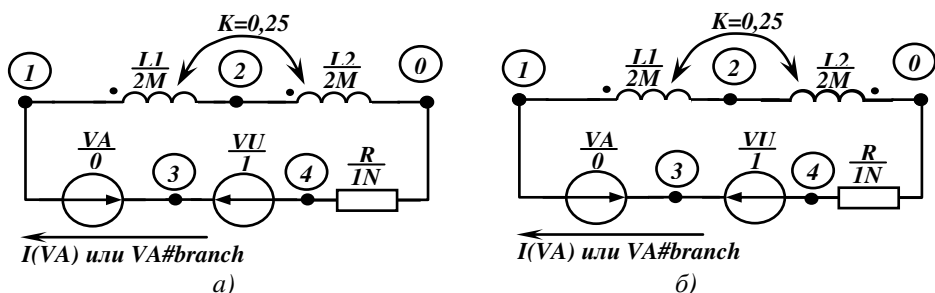


Рис. 4.19. Согласно (а) и встречное (б) последовательное включение индуктивно связанных L -элементов в SPICE-обозначениях

На этих схемах появился R -элемент с малым сопротивлением (1 нОм), что объясняется запретом SPICE на контуры, состоящие *только* из идеальных источников напряжения и (или) L -элементов. Без этого сопротивления мы получим, как и в примере 4.3, сообщение о сингулярности матрицы. Введение в контур малого сопротивления позволяет обойти вышеупомянутый запрет и получить решение. Источник VA с нулевым напряжением, как и ранее, используется в качестве «амперметра». Его полярность согласована с направлением искомого тока.

Текстовое описание схемы для случая согласного включения (рис. 4.19, а) приведено ниже (файл primer4_7.cir):

PRIMER 4.7 (STYLE SPICE2)

*SOGLASNOYE VKLUCHENIE

VU 3 4 AC 1 DC 0

VA 3 1 AC 0 DC 0

R 4 0 1N

L1 1 2 2M

L2 2 0 2M

K L1 L2 0.25

.AC LIN 1 1000 1000

.PRINT AC IM(VA) IP(VA)

.END

Обратите внимание, что в описаниях L -элементов одноименные зажимы 1 и 2 указаны как плюсовые для $L1$ и $L2$ соответственно. Результаты имеют следующий вид:

AC analysis ... 100%

mag(va#branch) = 3.183099e-02

ph(va#branch) = -9.00000e+01

Искомый комплекс действующего значения тока при согласном включении $\dot{I} = 0,03183e^{-j90^\circ}$ А.

Мгновенное

значение

тока

$i = 0,03183\sqrt{2} \sin(2000\pi t - 90^\circ)$ А.

Для встречного включения (рис. 4.19, б) следует изменить описание индуктивного элемента $L2$, поскольку теперь одноименный зажим этого элемента (с точкой) подключен к узлу «0», а не «2»:

L2 0 2 2M

После этой замены и сохранения файла получаем результат для встречного включения:

AC analysis ... 100%

mag(va#branch) = 5.305165e-02

ph(va#branch) = -9.00000e+01

Итак, искомый комплекс действующего значения тока при встречном включении $\dot{I} = 0,05305e^{-j90^\circ}$ А. Мгновенное значение тока $i = 0,05305\sqrt{2} \sin(2000\pi t - 90^\circ)$ А.

Сравнивая результаты можно сделать вывод, что при последовательном соединении индуктивно связанных контуров в случае согласного включения полное сопротивление цепи больше, чем при встречном включении. Для проверки числовых значений, которую читателю предлагается сделать самостоятельно, можно использовать известную формулу, вытекающую из (4.18) при $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}$ и $\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{j\omega(L_1 + L_2 \pm 2M)},$$

где «плюс» соответствует согласному включению, а «минус» — встречному.

ПРИМЕР 4.8. Определить комплексы действующих значений напряжения и тока разветвленной цепи с индуктивной связью, схема которой приведена на рис. 4.20.

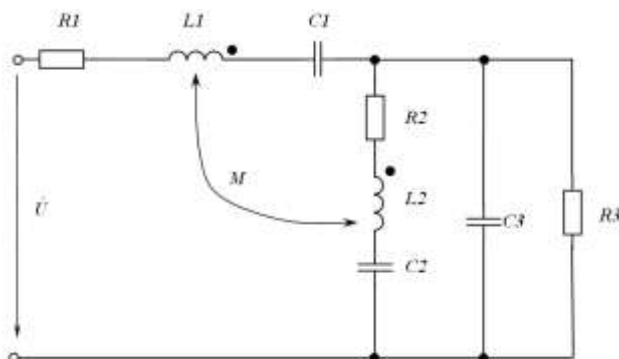


Рис. 4.20. Разветвленная цепь с индуктивной связью: $R_1=8$ Ом; $R_2=R_3=7$ Ом; $L_1=25$ мГн; $L_2=20$ мГн; $M=15$ мГн; $C_1=400$ мкФ; $C_2=600$ мкФ; $C_3=450$ мкФ; $U=220$ В (действующее значение); $f=50$ Гц

Схема в SPICE-обозначениях показана на рис. 4.21.

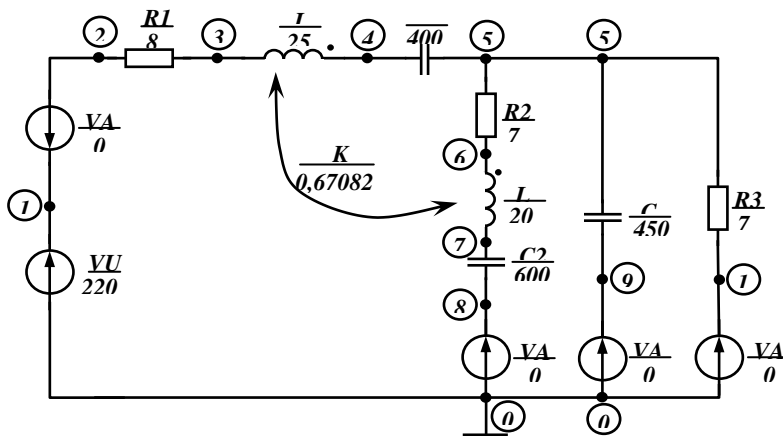


Рис. 4.21. Цепь рис. 4.20 в SPICE-обозначениях

В ветви с искомыми токами включены четыре «амперметра» $VA1$ — $VA4$. По правилам SPICE условно положительные направления этих токов противоположны направлениям ЭДС «амперметров». На схеме указано числовое значение коэффициента индуктивной связи $K=0,67082$, рассчитанное по формуле (4.19). Начальная фаза источника напряжения принята за ноль. Соответствующее текстовое описание имеет вид (файл primer4_8.cir):

```
PRIMER 4.8 (STYLE SPICE2)
R1 3 2 8
R2 5 6 7
R3 5 10 7
L1 4 3 25m
L2 6 7 20m
K1 L1 L2 0.67082
C1 4 5 400u
C2 8 7 600u
C3 5 9 450u
* ISTOCHNIK
VU 1 0 AC 220 0 DC 0
* AMPERMETRY
VA1 1 2 AC 0 DC 0
VA2 8 0 AC 0 DC 0
VA3 9 0 AC 0 DC 0
VA4 10 0 AC 0 DC 0
.AC LIN 1 50 50
*====NAPR. NA ELEMENTAH=====
*---NAPR. R1---
.print AC VM(2,3) VP(2,3)
*---NAPR. L1---
.print AC VM(3,4) VP(3,4)
*---NAPR. C1---
.print AC VM(4,5) VP(4,5)
*---NAPR. R2---
.print AC VM(5,6) VP(5,6)
*---NAPR. L2---
.print AC VM(6,7) VP(6,7)
*---NAPR. C2---
.print AC VM(7,8) VP(7,8)
*---NAPR. C3---
.print AC VM(5,9) VP(5,9)
*---NAPR. R3---
.print AC VM(5,10) VP(5,10)
*====TOKI VETVEY=====
.print AC IM(VA1) IP(VA1)
.print AC IM(VA2) IP(VA2)
.print AC IM(VA3) IP(VA3)
.print AC IM(VA4) IP(VA4)
.END
```

Обратите внимание, что в описаниях L -элементов одноименные зажимы 4 и 6 указаны как плюсовые для $L1$ и $L2$ соответственно. Ниже для краткости приведены

только результаты расчета комплексного падения напряжения $V(2,3)$ на $R1$ и тока первой ветви $I(VA1)$:

$$\begin{aligned} \text{mag}(v(2)-v(3)) &= 1.507014\text{e}+02 \\ \text{ph}(v(2)-v(3)) &= 2.325261\text{e}+01 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{mag}(va1\#branch) &= 1.883767\text{e}+01 \\ \text{ph}(va1\#branch) &= 2.325261\text{e}+01 \end{aligned}$$

В показательной форме комплексы действующего значения:

$$\dot{U}_{23} = 150,7e^{j23,25^\circ} \text{ В}; \quad \dot{I}_1 = 18,84e^{j23,25^\circ} \text{ А.}$$

Мгновенные значения:

$$u_{23}(t) = 150,7\sqrt{2} \sin(2\pi \cdot 50 t + 23,25^\circ) = 213,1 \sin(314,16t + 23,25^\circ) \text{ В};$$

$$i_1(t) = 18,84\sqrt{2} \sin(2\pi \cdot 50 t + 23,25^\circ) = 26,64 \sin(314,16t + 23,25^\circ) \text{ А.}$$

ПРИМЕР 4.9. Индуктивное устройство состоит из четырех катушек, намотанных на кольцевой ферромагнитный сердечник в одном направлении (рис. 4.22, а). Коэффициент индуктивной связи любой пары катушек равен 0,98. Определить комплексы действующих значений токов в цепи с индуктивным устройством, схема которой приведена на рис. 4.22, б. Магнитным насыщением сердечника пренебречь.

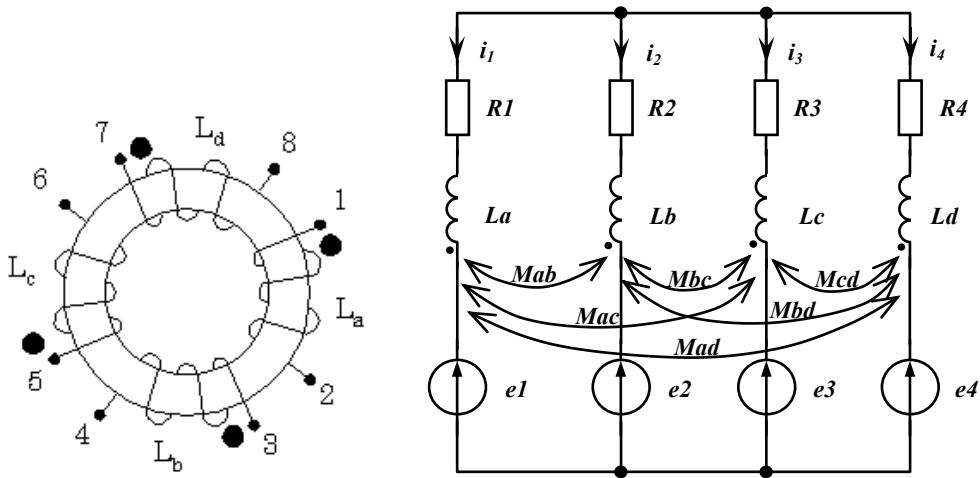


Рис. 4.22. а — индуктивное устройство: $L_a=25$ мкГн; $L_b=50$ мкГн; $L_c=100$ мкГн; $L_d=200$ мкГн; $K=0.98$; б — разветвленная цепь с индуктивным устройством: $R_1=10$ Ом; $R_2=20$ Ом; $R_3=30$ Ом; $R_4=40$ Ом; $E_1=200$ В; $E_2=100$ В; $E_3=300$ В; $E_4=500$ В; (действующие значения); $f=32$ кГц

Схема в SPICE-обозначениях показана на рис. 4.23.

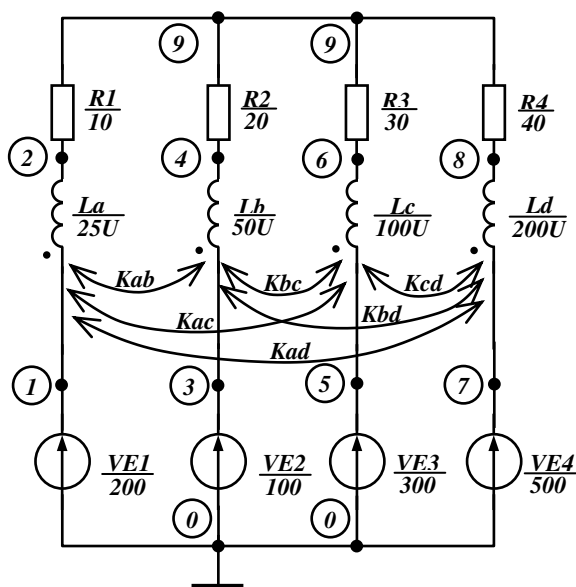


Рис. 4.23. Цепь рис. 4.22, б в SPICE-обозначениях

Текстовое описание имеет вид (файл primer4_9.cir):

PRIMER 4.9 (STYLE SPICE2)

VE1 1 0 AC 200 0 DC 0

VE2 3 0 AC 100 0 DC 0

VE3 5 0 AC 300 0 DC 0

VE4 7 0 AC 500 0 DC 0

R1 2 9 10

R2 4 9 20

R3 6 9 30

R4 8 9 40

La 1 2 25U

Lb 3 4 50U

Lc 5 6 100U

Ld 7 8 200U

Kab La Lb 0.98

Kbc Lb Lc 0.98

Kcd Lc Ld 0.98

Kac La Lc 0.98

Kad La Ld 0.98

Kbd Lb Ld 0.98

.AC LIN 1 32K 32K

.PRINT AC IR(VE1) I(VE1)

.PRINT AC IR(VE2) I(VE2)

.PRINT AC IR(VE3) I(VE3)

.PRINT AC IR(VE4) I(VE4)

.END

Как было отмечено ранее, коэффициент индуктивной связи задается для каждой пары катушек. В данном примере таких пар шесть. В описаниях L -элементов одноименные зажимы 1,3,5,7 указаны как плюсовые. В общем случае N катушек существует

$N(N-1)/2$ пар, причем для каждой из них коэффициент индуктивной связи может иметь свое значение.

В качестве «амперметров» используются источники напряжения VE1...VE4. На печать выводятся искомые токи (то есть токи источников напряжения) в алгебраической форме, то есть действительная и мнимая часть для каждого тока. Например, для тока первой ветви

$$\text{real}(\text{ve1\#branch}) = 1.770711\text{e}+00$$

$$\text{imag}(\text{ve1\#branch}) = -2.52709\text{e}+00$$

или в алгебраической форме $\dot{I}_1 = (1,771 - j2,527) \text{ A}$

ПРИМЕР 4.10. Определить комплексы токов первичной и вторичной обмоток линейного трансформатора рис. 4.24, а также напряжение на нагрузке R_H . Первичная обмотка подключена к источнику синусоидального напряжения с действующим значением 220 В и частотой 50 Гц.

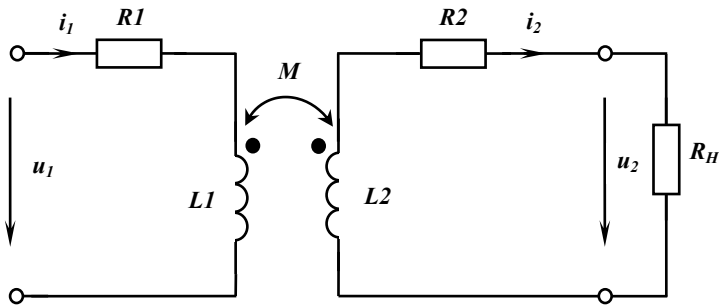


Рис. 4.24. Линейный трансформатор:
 $R_1=5 \text{ Ом}$; $R_2=3 \text{ Ом}$; $R_H=10 \text{ Ом}$; $L_1=10 \text{ мГн}$; $L_2=5 \text{ мГн}$; $M=3 \text{ мГн}$

Как известно, трансформатор представляет собой две обмотки, расположенные на ферромагнитном сердечнике. К первичной обмотке подключается источник переменного напряжения, а к вторичной — нагрузка. Электрическое соединение между обмотками отсутствует. Энергия передается от источника к нагрузке посредством взаимной индукции. Если сердечник не насыщен, то трансформатор приближенно можно рассматривать как линейный элемент. В трансформаторах, применяемых в радиоэлектронных схемах, работающих на высоких частотах, сердечник может вообще отсутствовать. В этом случае обмотки размещают на диэлектрическом каркасе, а трансформатор называют «воздушным». Итак, понятие «линейный трансформатор» объединяет оба рассмотренных случая.

В данном примере R_1 , L_1 и R_2 , L_2 представляют собой активные сопротивления и индуктивности первичной и вторичной обмоток соответственно. Коэффициент индуктивной связи, определенный по формуле (4.19), равен 0,4243. Схема в SPICE-обозначениях приведена на рис. 4.25.

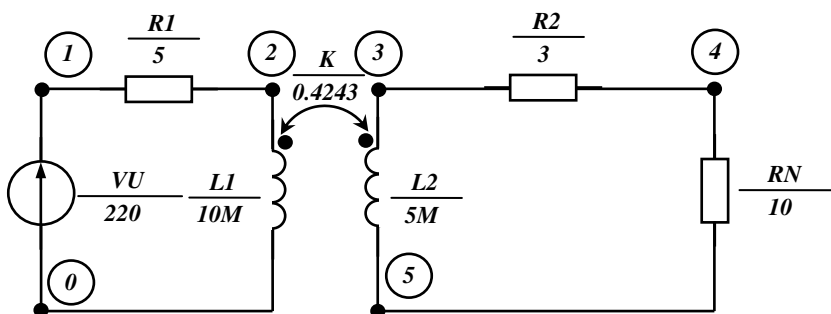


Рис. 4.25. Линейный трансформатор в SPICE-обозначениях

Текстовое описание имеет вид (файл primer4_10.cir):

PRIMER 4.10 (STYLE SPICE2)

.OPTIONS RSHUNT=10MEG

VU 1 0 AC 220 0 DC 0

R1 1 2 5

R2 3 4 3

RN 4 5 10

L1 2 0 10M

L2 3 5 5M

K L1 L2 0.4243

.AC LIN 1 50 50

.PRINT AC IM(L1) IP(L1)

.PRINT AC IM(L2) IP(L2)

.PRINT AC VM(4,5) VP(4,5)

.END

Как было отмечено при рассмотрении примера 4.3, по правилам SPICE каждый узел должен иметь связь с землей. Однако в трансформаторе электрическая связь между обмотками отсутствует и узлы 3, 4, 5 изолированы от земли. Связность схемы нарушается. Для устранения этого противоречия добавлена опция

.OPTIONS RSHUNT=10MEG.

В результате ее действия между каждым узлом и землей подключается резистор 10 МОм, что обеспечивает связность схемы (см. также пример 4.3.3).

В качестве «амперметров» используются L -элементы, что избавляет от необходимости включения дополнительных источников нулевого напряжения. На печать выводятся модули и начальные фазы искомых комплексных токов и напряжения на нагрузке $V(4,5)$. Загрузим в WinSpice3 файл primer4_10.cir и получим решение задачи:

mag(l1#branch) = 3.692573e+01

ph(l1#branch) = -3.17310e+01

mag(l2#branch) = 2.657948e+00

ph(l2#branch) = -1.28621e+02

mag(v(4)-v(5)) = 2.657946e+01

ph(v(4)-v(5)) = 5.137929e+01

В показательной форме комплексы действующего значения имеют вид:

$$\dot{I}_1 = 36,92e^{-j31,73^\circ} \text{ A}; \quad \dot{I}_2 = 2,658e^{j(-128,62^\circ+180^\circ)} = 2,658e^{j51,38^\circ} \text{ A}; \quad \dot{U}_u = \dot{U}_{4,5} = 26,58e^{j51,38^\circ} \text{ B}.$$

В аргумент тока \dot{I}_2 добавлено 180° для приведения в соответствие заданного направления на рис. 4.24 и расчетного направления от узла 3 к узлу 5, указанного в описании L2.

Можно не указывать опцию RSHUNT, но тогда нужно электрически связать первичную и вторичную обмотки через резистор R_{12} (рис. 4.26). Его сопротивление несущественно, так как ток через него не протекает, но более реалистичной будет высокоомная величина (10 МОм).

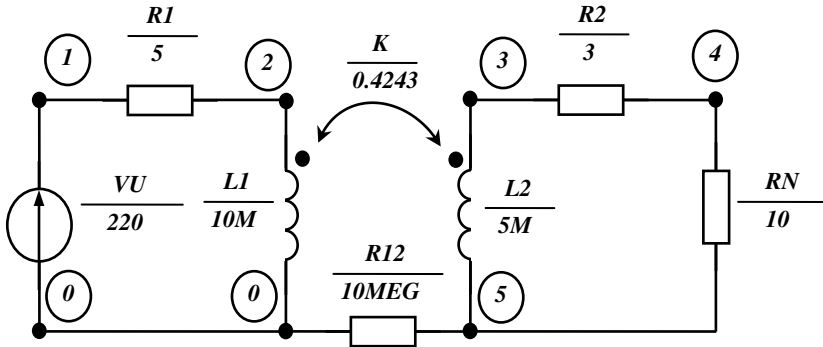


Рис. 4.26. Линейный трансформатор в SPICE-обозначениях и искусственной электрической связи первичной и вторичной обмоток через резистор R_{12}

Текстовое описание имеет вид (файл primer4_10_1.cir):

```
PRIMER 4.10.1 (STYLE SPICE2)
VU 1 0 AC 220 0 DC 0
R1 1 2 5
R2 3 4 3
RN 4 5 10
R12 0 5 10MEG
L1 2 0 10M
L2 3 5 5M
K L1 L2 0.4243
.AC LIN 1 50 50
.PRINT AC IM(L1) IP(L1)
.PRINT AC IM(L2) IP(L2)
.PRINT AC VM(4,5) VP(4,5)
.END
```

По этому описанию получаем результаты, совпадающие с приведенными выше.

ПРИМЕР 4.11. Определить комплексы токов первичной и вторичной обмоток идеального трансформатора рис. 4.27, а также напряжение на нагрузке $R_H=10$ Ом. Первичная обмотка подключена к источнику синусоидального напряжения с действующим значением 220 В и частотой 50 Гц и внутренним сопротивлением $R_{BH}=1$ Ом. Коэффициент трансформации $K_{TP}=10$.

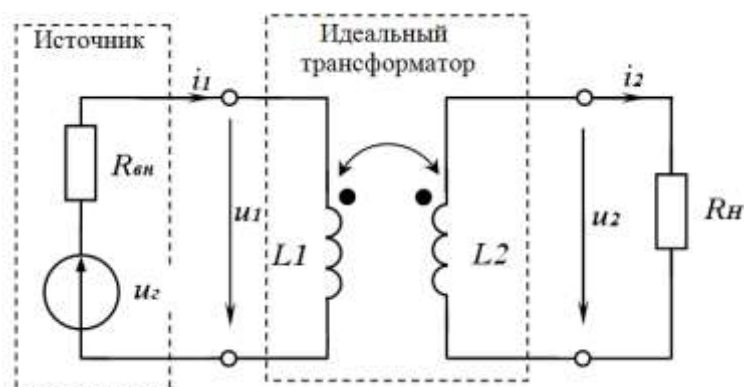


Рис. 4.27. Идеальный трансформатор

Как известно, в идеальном трансформаторе отсутствуют потери ($R_1 = R_2 = 0$) и потоки рассеяния ($K=1$). Кроме этого, индуктивности первичной и вторичной обмоток L_1 , L_2 стремятся к бесконечности. Последнее условие невыполнимо в SPICE, поэтому *приблизительно* его можно реализовать, задав индуктивностям достаточно большие значения. Это будет иметь место при следующих условиях:

$$\omega L_1 \gg R_{БН}; \quad \omega L_2 \gg R_H. \quad (4.20)$$

Таким образом, идеальный трансформатор приближенно заменяется совершенным трансформатором, для которого справедливо выражение

$$K_{TP} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (4.21)$$

Исходя из (4.20), (4.21), принимаем $L_1=300$ Гн, $L_2=3$ Гн. При этом выполняются неравенства (4.20) на заданной частоте 50 Гц ($\omega = 314 \text{ с}^{-1}$), и $K_{TP}=10$.

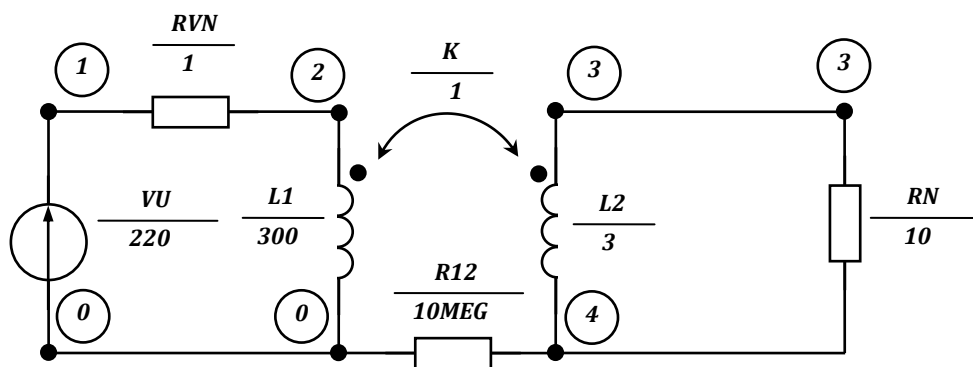


Рис. 4.28. Идеальный трансформатор в SPICE-обозначениях и искусственной электрической связью первичной и вторичной обмоток через резистор R_{12}

Текстовое описание имеет вид (файл primer4_11.cir):

PRIMER 4.11 (STYLE SPICE2)

VU 1 0 AC 220 0 DC 0

RVN 1 2 1

RN 3 4 10


```

R12 0 4 10MEG
L1 2 0 300
L2 3 4 3
K L1 L2 1
.AC LIN 1 50 50
.PRINT AC IM(L1) IP(L1)
.PRINT AC IM(L2) IP(L2)
.PRINT AC VM(3,4) VP(3,4)
.END

```

После загрузки в WinSpice3 файла primer4_11.cir получим решение задачи:

```

mag(l1#branch) = 2.197926e-01
ph(l1#branch) = -6.07297e-01

```

```

mag(l2#branch) = 2.197802e+00
ph(l2#branch) = -1.79999e+02

```

```

mag(v(3)-v(4)) = 2.197802e+01
ph(v(3)-v(4)) = 6.073198e-04

```

В показательной форме комплексы действующего значения:

$$\dot{I}_1 = 0,2198e^{-j0,61^\circ} \text{ A}; \quad \dot{I}_2 = 2,198e^{-j180^\circ} = 2,198 \text{ A}; \quad \dot{U}_2 = \dot{U}_{3,4} = 21,98 \text{ В}.$$

Знак «минус» перед I_2 добавлен для соответствия заданному на рис. 4.27 направлению. Заметим, что достаточно точно выполняются известные соотношения идеального трансформатора

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = K_{TP} = 10,009; \quad \underline{Z}_1 = K_{TP}^2 R_H = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = 1000,9 \text{ Ом}.$$

4.5. Частотные характеристики

Выше были рассмотрены примеры анализа цепей переменного тока на фиксированной частоте. Такая постановка задачи в большей степени свойственна электротехнике. Однако в радиоэлектронике, аудиотехнике, автоматике и связи очень часто возникает необходимость определения искомых величин в некотором диапазоне частот или, как говорят, в частотной области. Дело в том, что сигналы могут быть представлены совокупностью гармонических величин *различных частот*. Эти составляющие (гармоники) будут по-разному передаваться цепью от входа к выходу, так как реактивные сопротивления цепи зависят от частоты (4.9).

В результате сигнал на выходе будет отличаться по форме от сигнала на входе. Данный эффект получил название «линейные искажения» и играет существенную роль при прохождении сигналов через линейные цепи с реактивными элементами.

При изменении частоты источника и постоянстве его амплитуды будут изменяться все токи и напряжения в цепи, а также все системные функции: коэффициенты передачи токов и напряжений, входные и передаточные сопротивления и проводимости. Поскольку все вышеперечисленные величины комплексные, то можно записать для искомой величины

$$\underline{H}(j\omega) = A(\omega) + jB(\omega) = H(\omega)e^{j\varphi(\omega)},$$

где $\underline{H}(j\omega)$ – комплексная частотная характеристика (или амплитудно-фазовая характеристика);

$A(\omega)$ – вещественная часть частотной характеристики;

$B(\omega)$ – мнимая часть частотной характеристики;

$H(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ);

$\varphi(\omega)$ – фазочастотная характеристика (ФЧХ).

Итак, с изменением частоты выходной сигнал изменяется по амплитуде (АЧХ) и сдвигается по фазе относительно входного сигнала (ФЧХ). Реже рассматриваются зависимости действительной и мнимой частей искомой величины от частоты.

Существует специфический класс устройств — частотные фильтры, для которых АЧХ и ФЧХ являются основными техническими характеристиками. Эти устройства предназначены для пропускания сигналов в определенном частном диапазоне (полосе пропускания) и ослабления этих сигналов в другом диапазоне (полосе задерживания). Фильтры весьма широко распространены в электротехнике, радиоэлектронике, автоматике и вычислительной технике.

Частотные характеристики имеют большое теоретическое значение, так как они связаны с характеристиками цепи во временной области. Проще говоря, по АЧХ и ФЧХ можно предсказать поведение искомой величины во времени при произвольной форме входного сигнала.

Из сказанного следует, что частотные характеристики — одни из важнейших в области линейных электрических и электронных цепей. Подтверждением этому является включение в язык SPICE специальной директивы **.AC**, которая уже рассматривалась выше (см. 4.3.2). Она записывается в трех формах, которые приведем еще раз:

1) **.AC LIN NP FSTART FSTOP**

2) **.AC DEC ND FSTART FSTOP**

3) **.AC OCT NO FSTART FSTOP**

В предыдущем подразделе (п.4.4) расчеты проводились на одной частоте F и задавалось соотношение $FSTART=FSTOP=F$. Теперь же будем задавать различные значения $FSTART$ и $FSTOP$ и, разумеется, $FSTART < FSTOP$. Следует помнить, что $FSTART=0$ (постоянный ток) не допускается. Вместо него можно использовать достаточно малое, близкое к нулю значение.

Задача анализа частотных характеристик обычно рассматривается в следующей постановке:

1) имеется линейная цепь, с одним независимым источником гармонического напряжения или тока, рассматриваемым как источник входного сигнала;

2) цепь состоит из R, L, C, M — элементов и, возможно, управляемых источников;

3) амплитуда независимого источника полагается постоянной (обычно единичной), начальная фаза — нулевой, а частота — изменяющейся в заданном диапазоне (максимально от нуля до бесконечности);

4) в качестве искоемых величин (или выходных сигналов) могут выступать любые комплексные токи и напряжения, а также системные функции цепи (см. пример 4.2).

Ниже приводится ряд примеров на расчет частотных характеристик. Рассмотрены наиболее типичные случаи применения программы WinSpice3. Используются ранее изученные конструкции для описания подсхем, M -элементов и т. п. Показано, каким образом можно построить семейство АЧХ при вариации параметра одного из пассивных элементов.

4.5.1. Частотные характеристики простейших цепей

К простейшим цепям переменного тока относятся последовательные и параллельные цепи, содержащие два (RL , RC) или три (RLC) элемента. Рассмотрим сначала двухэлементные цепи RL и RC , подключенные последовательно к идеальному источнику переменного напряжения.

ПРИМЕР 4.12. Рассчитать и построить АЧХ и ФЧХ напряжений на элементах в цепях RL и RC (рис. 4.29 а, б) при изменении частоты в диапазоне 1 кГц...10 МГц

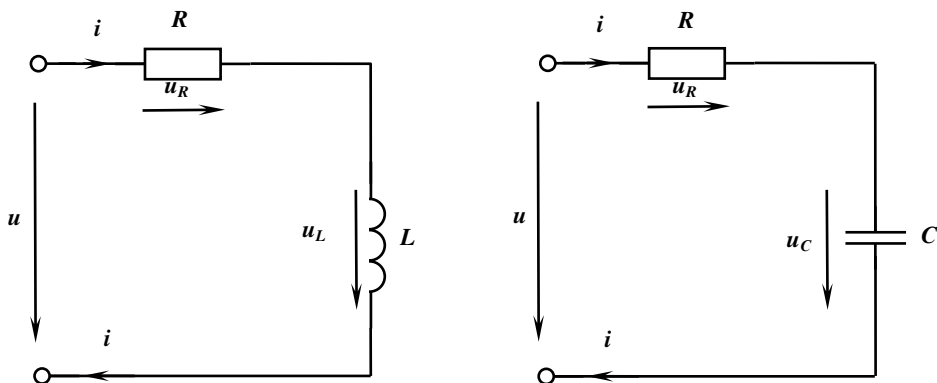


Рис. 4.29. Простейшие последовательные RL (а) и RC (б) цепи: $R=100$ Ом; $L=0,15$ мГн; $C=0,02$ мкФ

Примем действующее значение напряжения источника равным 1 В с нулевой начальной фазой. Схемы в SPICE-обозначениях имеют вид

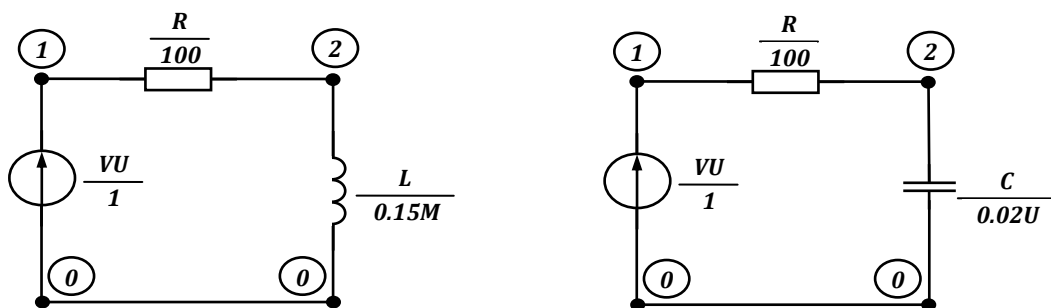


Рис. 4.30. Схемы цепей рис. 4.29 в SPICE-обозначениях

Соответствующие текстовые описания (цепные файлы primer4_12a.cir, primer4_12b.cir):

```
PRIMER 4.12a (STYLE SPICE2)
VU 1 0 AC 1 0 DC 0
R 1 2 100
L 2 0 0.15M
.AC DEC 50 1K 10MEG
.PRINT AC VM(2) VM(1,2)
```

```
PRIMER 4.12b (STYLE SPICE2)
VU 1 0 AC 1 0 DC 0
R 1 2 100
C 2 0 0.02U
.AC DEC 50 1K 10MEG
.PRINT AC VM(2) VM(1,2)
```

```
.PRINT AC VP(2) VP(1,2)
.PLOT AC VM(2) VM(1,2)
.PLOT AC VP(2) VP(1,2)
.END
```

```
.PRINT AC VP(2) VP(1,2)
.PLOT AC VM(2) VM(1,2)
.PLOT AC VP(2) VP(1,2)
.END
```

По условию диапазон частот довольно широк (1 кГц...10 МГц) и состоит из четырех декад: 1...10 кГц, 10...100 кГц, 100...1000 кГц, 1000...10000 кГц. Поэтому в директиве .AC задается ключ DEC (логарифмический масштаб частоты), и вычисления производятся для 50 точек каждой декады. Результаты выводятся в виде таблиц и графиков (рис. 4.31, рис. 4.32).

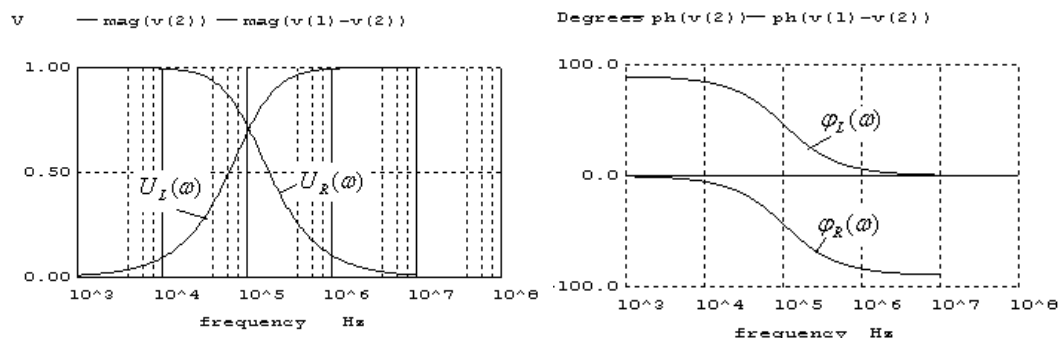


Рис. 4.31. Частотные характеристики напряжений на элементах RL -цепи:
а — АЧХ; б — ФЧХ

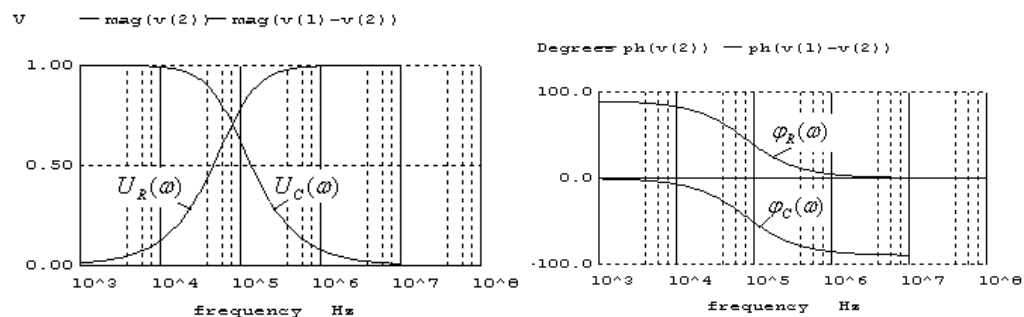


Рис. 4.32. Частотные характеристики напряжений на элементах RC -цепи:
а — АЧХ; б — ФЧХ

Из анализа полученных зависимостей следует, что они имеют монотонный характер. Это справедливо для любых двухэлементных цепей. На одном элементе напряжение с ростом частоты уменьшается от 1 В до 0, а на другом возрастает от 0 до 1 В. На некоторой частоте напряжения становятся равными. Напряжения на активном и реактивном элементах сдвинуты по фазе на 90° при любой частоте (рис. 4.31, б, рис. 4.32, б). Следует отметить, что полученные зависимости можно рассматривать как частотные характеристики коэффициентов передачи входного напряжения на соответствующие элементы, поскольку на входе действует источник единичного напряжения.

Перейдем теперь к рассмотрению простейших цепей, состоящих из R, L, C -элементов. Основной их особенностью является возникновение собственных колебаний, поэтому они получили название колебательных контуров. На определенной частоте в этих цепях возникает резонанс, и сопротивление по отношению к зажимам источника становится чисто активным. Поэтому признаком резонанса является равенство нулю сдвига фаз между током и напряжением. АЧХ колебательных контуров с малыми потерями имеют ярко выраженный экстремальный характер. Ниже рассмотрены последовательный и параллельный колебательные контуры.

ПРИМЕР 4.13. Рассчитать и построить АЧХ и ФЧХ входных токов i колебательных контуров (рис. 4.33 а, б) при изменении частоты в диапазоне 20...50 кГц.

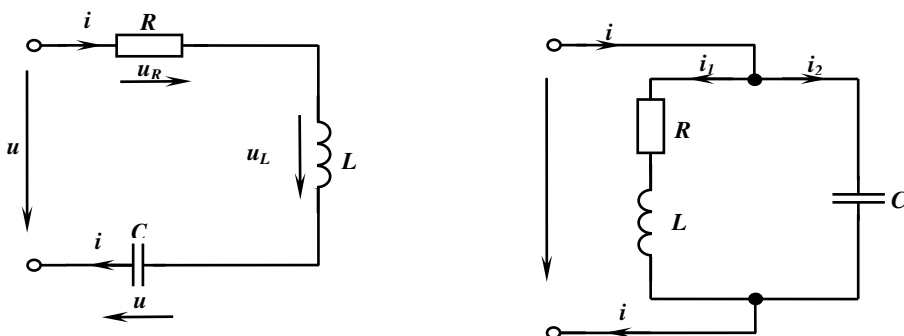


Рис. 4.33. Простейшие последовательный (а) и параллельный (б) колебательные контуры:
 $R=1 \text{ Ом}$; $L=0,15 \text{ мГн}$; $C=0,15 \text{ мкФ}$

Примем действующее значение напряжения источника VU равным 1 В с нулевой начальной фазой ($\psi_u=0$). Добавим в схемы «амперметры» VA для измерения входных токов и $VA1$ для определения тока через конденсатор на рис. 4.33 б. Схемы в SPICE-обозначениях имеют вид

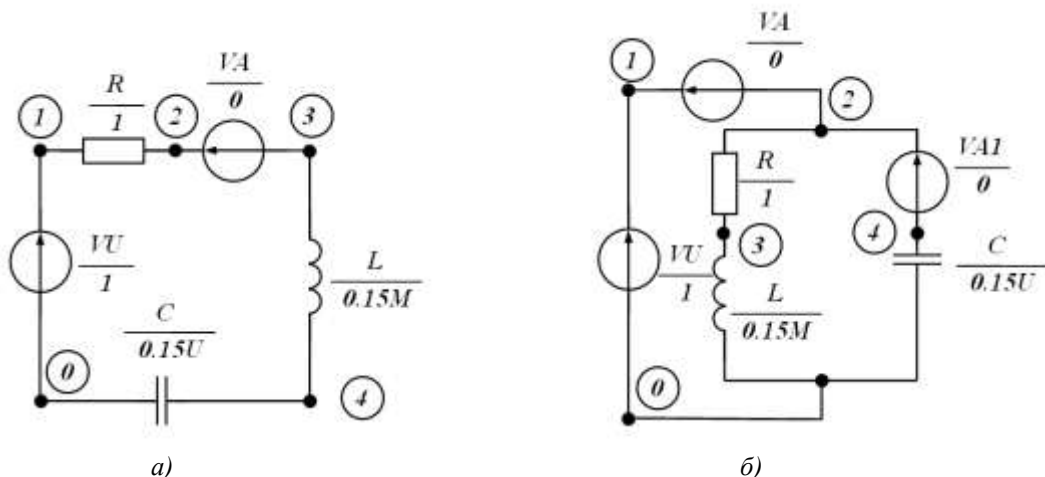


Рис. 4.34. Схемы цепей рис. 4.33 в SPICE-обозначениях

Соответствующие текстовые описания (цепные файлы primer4_13a.cir, primer4_13b.cir):

```
PRIMER 4.13a (STYLE SPICE2)
VU 1 0 AC 1 0 DC 0
VA 2 3 DC 0
R 1 2 1
L 3 4 0.15M
C 4 0 0.15U
.AC LIN 301 20K 50K
.PLOT AC IM(VA)
.PLOT AC IP(VA)
.END
```

```
PRIMER 4.13b (STYLE SPICE2)
VU 1 0 AC 1 0 DC 0
VA 1 2 DC 0
VA1 2 4 DC 0
R 2 3 1
L 3 0 0.15M
C 4 0 0.15U
.AC LIN 301 20K 50K
.PLOT AC IM(VA)
.PLOT AC IP(VA)
.END
```

По условию диапазон частот 20...50 кГц меньше декады (20...200 кГц). Поэтому в директиве **.AC** задается ключ LIN (линейный масштаб частоты) и вычисления производятся для 301 равноотстоящей точки. В этом случае шаг по частоте равен $(FSTOP-FSTART)/(NP-1) = (50\,000 - 20\,000)/(301 - 1) = 300$ Гц. Результаты выводятся в виде графиков (рис. 4.35, рис. 4.36).

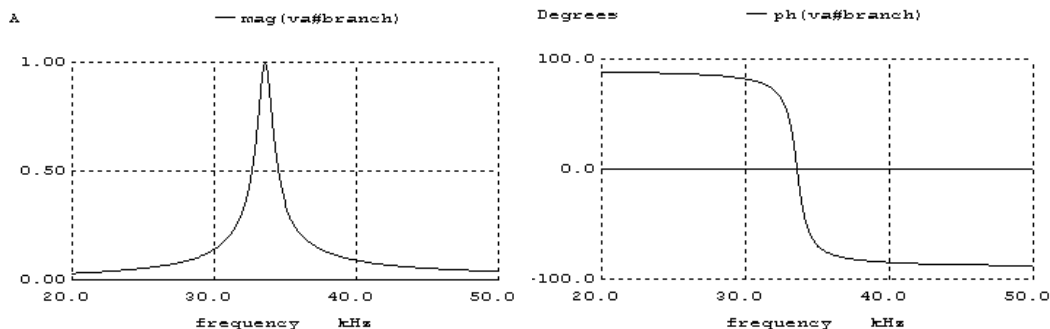


Рис. 4.35. Частотные характеристики тока последовательной RLC-цепи:
а — АЧХ; б — ФЧХ

АЧХ тока последовательной цепи рис. 4.35, а имеет максимум на резонансной частоте $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC}) = 1/(2\pi\sqrt{0,15 \cdot 10^{-3} \cdot 0,15 \cdot 10^{-6}}) = 33553$ Гц. На резонансной частоте ФЧХ тока рис. 4.35, б пересекает ось абсцисс, то есть начальная фаза тока $\psi_i = 0$. Тогда сдвиг фаз между напряжением источника и током равен нулю ($\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$ — векторы тока и напряжения совпадают). С увеличением частоты в заданном диапазоне от 20 Гц до 50 кГц характер цепи изменяется от активно-емкостного ($\psi_i > 0, \varphi < 0$ — ток опережает напряжение) до активно-индуктивного ($\psi_i < 0, \varphi > 0$ — ток отстает от напряжения).

АЧХ тока параллельной цепи рис. 4.36, а имеет минимум на резонансной частоте

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - R^2 C / L} = 33536 \text{ Гц}.$$

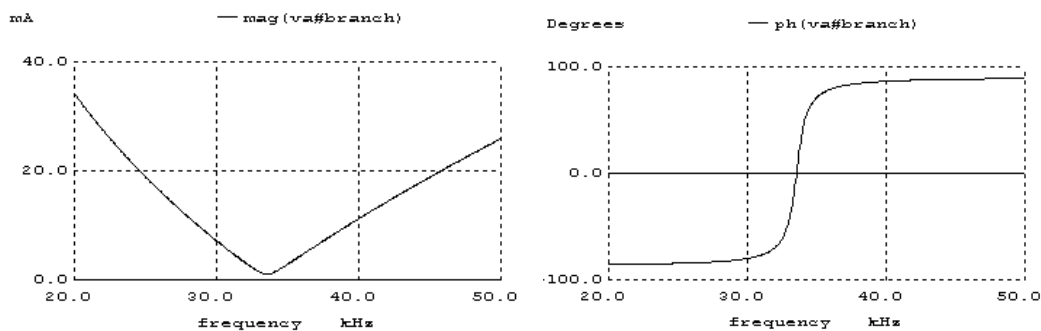


Рис. 4.36. Частотные характеристики тока параллельной RLC -цепи:
 a — АЧХ; b — ФЧХ

На резонансной частоте ФЧХ рис. 4.36, b пересекает ось абсцисс, то есть начальная фаза тока $\psi_i = 0$. Тогда сдвиг фаз между напряжением источника и током равен нулю ($\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$ — векторы тока и напряжения совпадают). С увеличением частоты в заданном диапазоне от 20 Гц до 50 кГц характер цепи изменяется от активно-индуктивного ($\psi_i < 0$, $\varphi > 0$ — ток отстает от напряжения) до активно-емкостного ($\psi_i > 0$, $\varphi < 0$ — ток опережает напряжение).

Полученные зависимости для токов можно рассматривать как частотные характеристики комплексной входной проводимости, поскольку по условию на входе действует источник единичного напряжения. Действительно, по закону Ома в комплексной форме

$$\dot{I}(\omega) = \underline{Y}(\omega) \dot{U} \cdot \underline{Y}(\omega) \text{ (1 В)},$$

то есть комплексные значения тока и проводимости в данном случае численно равны.

4.5.2. Частотные характеристики фильтров

При передаче информационных сигналов в радиоэлектронике, автоматике, телемеханике и связи, как правило, возникает необходимость их обработки. Одной из наиболее распространенных процедур обработки является фильтрация — целенаправленное изменение частотного состава сигнала, имеющее своей целью ослабление нежелательных компонентов (шумов, помех) и сохранение (или усиление) нужных частот.

Фильтрация сигналов реализуется с помощью специальных частотно-зависимых четырехполюсников — электрических фильтров (рис. 4.37). В одну из ветвей включается источник фильтруемого сигнала U_1 (вход) а в другую — нагрузка \underline{Z}_H (выход). Выходное напряжение U_2 на нагрузке имеет измененный частотный состав по отношению к U_1 . Основной характеристикой фильтра является комплексная передаточная функция по напряжению

$$\underline{F}(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = F(\omega)e^{j\varphi(\omega)},$$

где $F(\omega)$ — АЧХ фильтра; $\varphi(\omega)$ — ФЧХ фильтра.

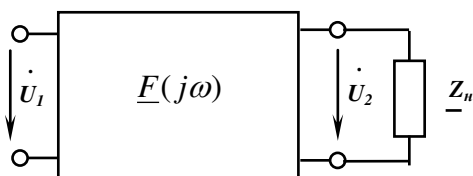


Рис. 4.37. Частотный фильтр:

U_1 — входное напряжение; U_2 — выходное напряжение; Z_n — нагрузка

По типу используемых элементов фильтры делятся на активные и пассивные. С точки зрения электротехники пассивные фильтры представляют собой обычные *RLCM*-цепи. Активные фильтры состоят обычно из *RC*-элементов, а также транзисторов или операционных усилителей, которые при расчетах замещаются подсхемами с управляемыми источниками.

По виду частотной характеристики различают фильтры следующих типов: фильтры нижних частот (ФНЧ); фильтры верхних частот (ФВЧ); фильтры полосно-пропускающие или полосовые (ФПП); фильтры полосно-задерживающие или заграждающие (ФПЗ).

На рис. 4.38 изображены идеальные (пунктир) и реальные АЧХ фильтров различного типа. Заштрихованный участок на оси частот соответствует *полосе пропускания фильтра*. Не заштрихованная область называется *полосой задерживания*. Граница между этими полосами получила название *частоты среза* фильтра. Для реальных фильтров частота среза является условной величиной, так как резкой границы между полосами пропускания и задерживания нет, т.е. существует некоторая *переходная полоса*.

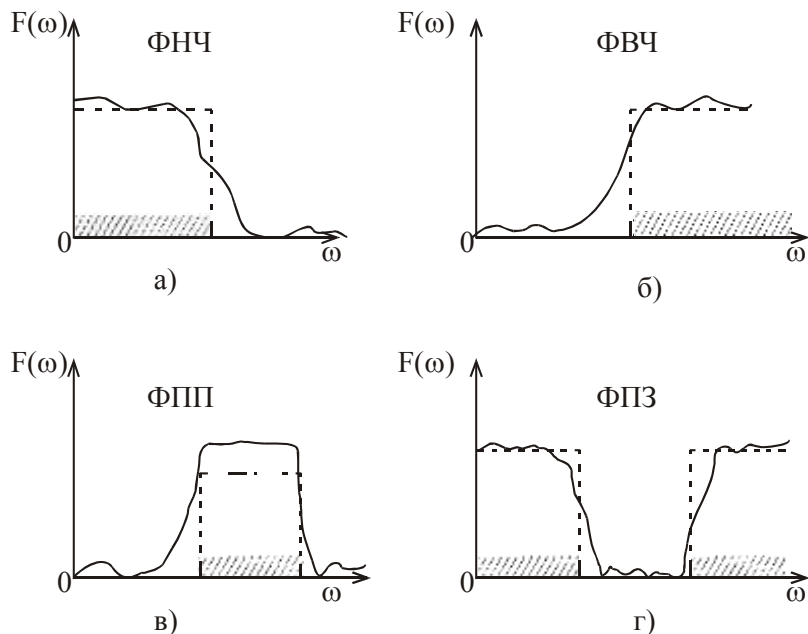


Рис. 4.38. АЧХ фильтров различных типов:

а — ФНЧ; б — ФВЧ; в — ФПП; г — ФПЗ

Качество фильтра тем лучше, чем ближе реальные и идеальные АЧХ. В этом смысле существенное значение имеет *порядок* фильтра, определяемый в простых случаях количеством реактивных элементов. Однотипные фильтры более высокого порядка обеспечивают бóльшую близость к идеальным АЧХ и, как правило, лучшую фильтрацию.

В качестве примеров простейших фильтров первого порядка проанализируем цепи рис. 4.29, *а, б* на основе результатов примера 4.12. Так, например, *RL*-цепь рис. 4.29, *а* можно рассматривать в качестве ФНЧ, если в качестве выхода принять напряжение на резисторе. В этом случае зависимость $U_R(\omega)$ на рис. 4.31, *а* является АЧХ ФНЧ, т.к. соответствует рис. 4.38, *а*: нижние частоты пропускаются, а верхние — ослабляются.

Аналогично *RC*-цепь рис. 4.29, *б* также является ФНЧ относительно выходного напряжения на конденсаторе $U_C(\omega)$ (рис. 4.32, *а*).

Если в цепи 4.29, *а* за выход принять напряжение на *L*-элементе, то мы получим ФВЧ с АЧХ, совпадающей с $U_L(\omega)$, рис. 4.31, *а* и соответствующей рис. 4.38, *б*: нижние частоты ослабляются, а верхние — пропускаются. Цепь *RC*, рис. 4.29, *б*, тоже является ФВЧ относительно выходного напряжения на резисторе $U_R(\omega)$ (рис. 4.32, *а*).

Цепи *RLC*, приведенные на рис. 4.33 *а, б*, могут рассматриваться как фильтры второго порядка ФПП и ФПЗ соответственно.

Более сложные пассивные фильтры могут состоять из комбинаций последовательных и параллельных резонансных контуров. Характерным примером является лестничная схема рис. 2.6, состоящая из однотипных звеньев, которые целесообразно рассматривать в качестве подсхем.

ПРИМЕР 4.14. Рассчитать и построить АЧХ и ФЧХ передаточной функции по напряжению фильтра (рис. 2.6) при $R=75$ Ом, $L_1=L_2=100$ мГн, $C_1=C_2=500$ нФ в диапазоне 200...2000 Гц. Данная лестничная схема состоит из пяти одинаковых звеньев-подсхем, одно из которых выделено пунктиром на рис. 2.6. В SPICE-обозначениях звено имеет вид рис. 4.39, *а*. Подсхеме присвоено имя ZVENO, а в качестве внешних точек подключения указаны узлы *а, с, d* (рис. 4.39, *б*).

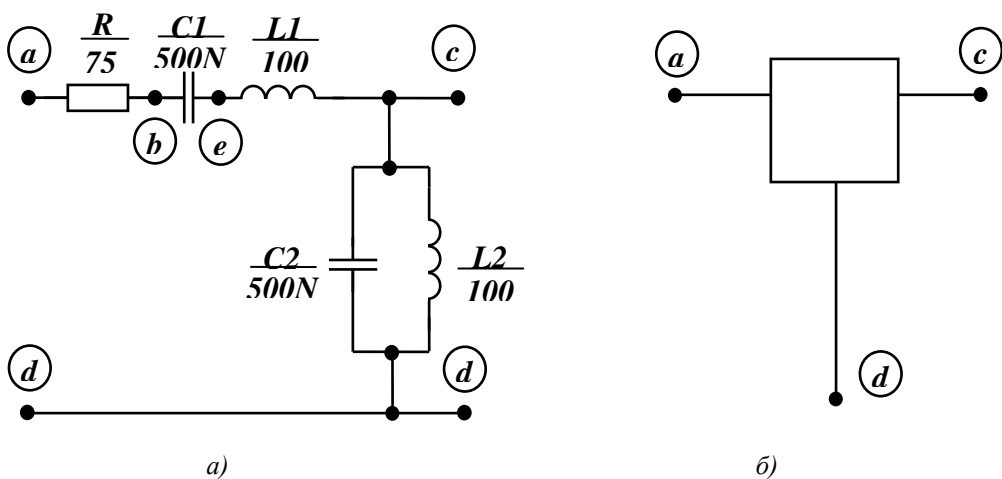


Рис. 4.39. Звено фильтра, подготовленное к SPICE-описанию в качестве подсхемы

Теперь исходную схему рис. 2.6, состоящую из пяти звеньев, можно представить в виде рис. 4.40.

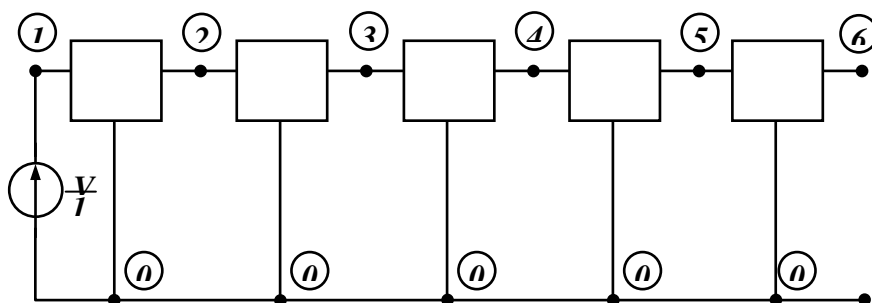


Рис. 4.40. Исходная схема, представленная в виде соединения пяти подсхем, в SPICE-обозначениях

Здесь имена экземпляров подсхемы ZVENO, согласно синтаксису SPICE (см. подраздел 2.3), начинаются с латинской буквы «X» (XZV1... XZV5). Окончательно, текстовое описание имеет следующий вид (primer4_14.cir):

PRIMER 4.14 (STYLE SPICE2)

.SUBCKT ZVENO A C D

R A B 75

L1 E C 100M

L2 C D 100M

C1 B E 500N

C2 C D 500N

.ENDS

**** CIRCUIT****

VU 1 0 AC 1 0 DC 0

XZV1 1 2 0 ZVENO

XZV2 2 3 0 ZVENO

XZV3 3 4 0 ZVENO

XZV4 4 5 0 ZVENO

XZV5 5 6 0 ZVENO

.AC LIN 361 200 2K

.PLOT AC VDB(6)

.PLOT AC VP(6)

.END

По условию диапазон частот 200...2000 Гц составляет одну декаду. Поэтому в директиве **.AC** задается ключ LIN и вычисления производятся для 361 равноотстоящих точек. В этом случае шаг по частоте равен $(F_{STOP} - F_{START}) / (NP - 1) = (2000 - 200) / (361 - 1) = 5$ Гц. Построение диаграммы АЧХ осуществляется в децибелах (VDB(6)), а ФЧХ — в градусах. Результаты приведены на рис. 4.41, рис. 4.42.

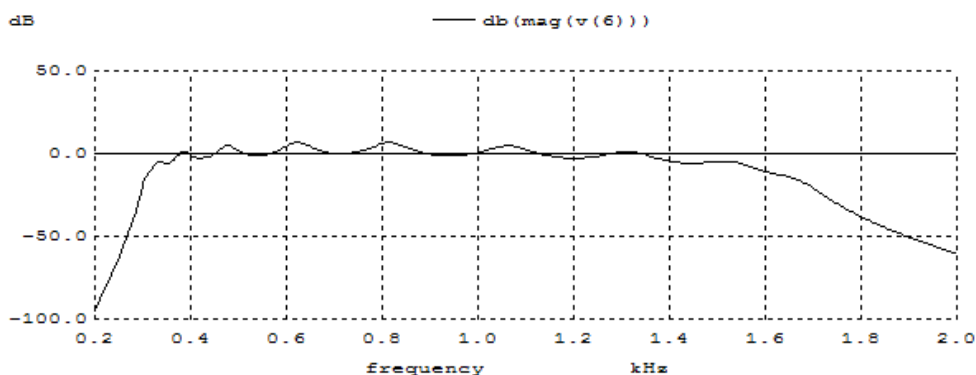


Рис. 4.41. Амплитудно-частотная характеристика лестничного фильтра

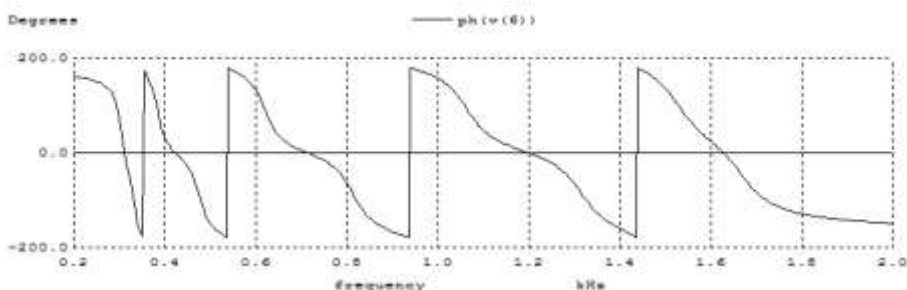


Рис. 4.42. Фазочастотная характеристика лестничного фильтра

ПРИМЕР 4.15. Резонансный фильтр (рис. 4.43), состоит из двух одинаковых индуктивно-связанных контуров. Для заданных значений коэффициента индуктивной связи K построить семейства АЧХ тока вторичного контура I_2 и выходного напряжения U_2 в диапазоне частот $0,9f_0 \leq f \leq 1,1f_0$, где f_0 — резонансная частота, определяемая соотношением

$$f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC}).$$

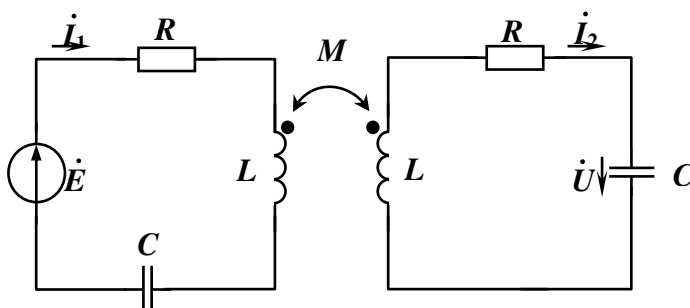


Рис. 4.43. Резонансный фильтр с индуктивной связью: $R_1=R_2=30$ Ом; $L=L_1=L_2=0,8$ мГн; $C=C_1=C_2=750$ пФ; $U=1$ В; $K=\{0,01; 0,03; 0,06; 0,08\}$

Как видно из схемы, в первичном и вторичном контурах возможен резонанс напряжений. Определим резонансную частоту одиночного контура:

$$f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC}) = 1/(2\pi\sqrt{0,8 \cdot 10^{-3} 750 \cdot 10^{-12}}) = 205468 \text{ Гц.} \quad (4.22)$$

Тогда диапазон частот, заданный по условию определится как $184921 \leq f \leq 226015$.

Схема, подготовленная для составления текстового описания, представлена на рис. 4.44. Высокоомный резистор $R12$ осуществляет электрическую связь между контурами, согласно требованиям SPICE (см. пример 4.10). Во второй контур включен источник нулевого напряжения $VA2$, используемый, как и ранее, в качестве амперметра для измерения искомого тока I_2 .

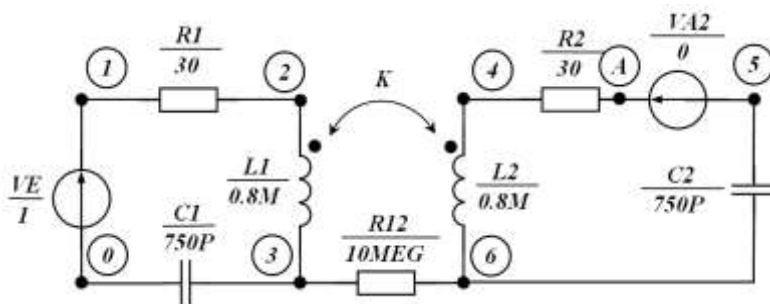


Рис. 4.44. Схема резонансного фильтра в SPICE-обозначениях

Поскольку в задаче требуется построение двух семейств АЧХ (тока и напряжения), возникает необходимость проведения многовариантных расчетов. Каждое семейство АЧХ должно располагаться на отдельной диаграмме. В результате будут построены две диаграммы, каждая из которых содержит по четыре кривых. В этом случае лучше использовать стиль SPICE3. Будем изменять значение K командой **alter** и задавать директиву расчета частотных характеристик **AC**. После каждой директивы сформируем векторы частотных характеристик напряжения (uv1...uvv4) и тока (iv1...iv4). В конце программы выведем эти векторы командами **PLOT** в виде двух диаграмм. Соответствующее текстовое описание имеет следующий вид (primer4_15.cir):

```
PRIMER 4.15 (STYLE SPICE3)
VE 1 0 AC 1 DC 0
VA2 A 5
R1 1 2 30
R2 4 A 30
L1 2 3 0.8M
L2 4 6 0.8M
K L1 L2 0.01
C1 3 0 750P
C2 5 6 750P
R12 3 6 10MEG
.CONTROL
echo *****
echo IZMENENIE K
echo *****
DESTROY ALL
```

```

SAVE V(5) V(6) VA2#BRANCH
*-----K=0.01-----
AC LIN 500 185K 226K
let uv1=mag(ac1.v(5)-ac1.v(6))
let iv1=mag(ac1.VA2#branch)
*-----K=0.03-----
alter @K[coefficient]=0.03
AC LIN 500 185K 226K
let uv2=mag(ac2.v(5)-ac2.v(6))
let iv2=mag(ac2.VA2#branch)
*-----K=0.06-----
alter @K[coefficient]=0.06
AC LIN 500 185K 226K
let uv3=mag(ac3.v(5)-ac3.v(6))
let iv3=mag(ac3.VA2#branch)
*-----K=0.08-----
alter @K[coefficient]=0.08
AC LIN 500 185K 226K
let uv4=mag(ac4.v(5)-ac4.v(6))
let iv4=mag(ac4.VA2#branch)
*-----VYVOD-----
PLOT uv1 uv2 uv3 uv4
*PLOT db(uv1) db(uv2) db(uv3) db(uv4)
PLOT iv1 iv2 iv3 iv4
.ENDC
.END

```

Команда DESTROY ALL очищает память и начинает нумерацию видов анализа с единицы. Команда SAVE V(5) V(6) VA2#BRANCH сохраняет только те векторы, которые понадобятся для решения задачи. Это позволяет сэкономить оперативную память компьютера.

Первая директива AC LIN 500 185K 226K осуществляет вычисления при коэффициенте связи $K=0,01$, заданном в описании элемента K . Границы диапазона изменения частоты округлены до килогерц. Вычисляются векторы, заданные командой SAVE, в 500-х точках. Этому анализу программа автоматически присваивает имя «ac1». Далее создается вектор uv1, которому присваивается значение модуля комплексного выходного напряжения между узлами 5 и 6:

```
let uv1=mag(ac1.v(5)-ac1.v(6)).
```

Здесь используется ранее рассмотренный синтаксис (пример 4.1), при котором имя анализа отделяется точкой от имени вектора.

По аналогии создается вектор iv1, содержащий модуль комплексного тока I_2

```
let iv1=mag(ac1.VA2#branch).
```

После этого изменяется значение коэффициента связи на 0,03

```
alter @K[coefficient]=0.03
```

и снова задается директива

```
AC LIN 500 185K 226K.
```

Этому анализу программа автоматически присваивает имя «ac2», после чего формируются векторы *uv2*, *iv2* по аналогии с *uv1*, *iv1*. Описанная процедура повторяется при значениях $K = 0,06$ и $0,08$. После загрузки схемного файла (primer4_15.cir) в окне WinSpice3 появляется информация о 100% выполнении четырех АС-анализов

IZMENENIE K

TEMP=27 deg C

AC analysis ... 100%

TEMP=27 deg C

AC analysis ... 100%

TEMP=27 deg C

AC analysis ... 100%

TEMP=27 deg C

AC analysis ... 100%

Command execution done.

WinSpice 3 ->

Далее появляются два графических окна с искомыми семействами АЧХ (рис. 4.45).

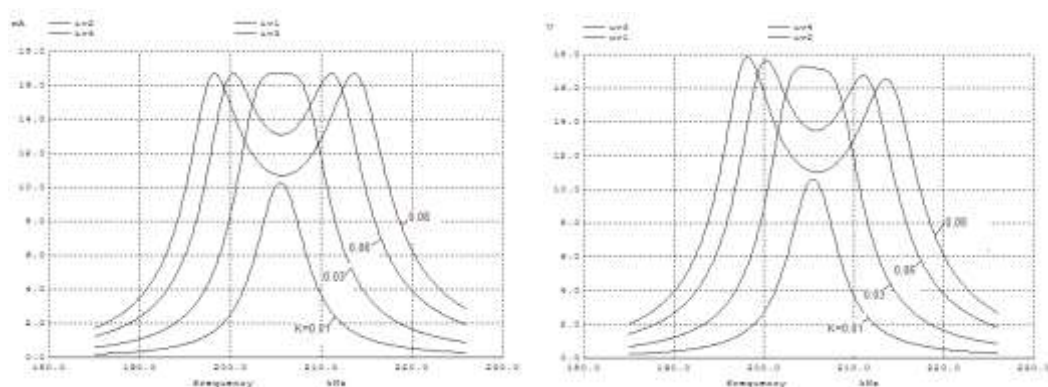


Рис. 4.45. Семейства АЧХ тока (а) и напряжения (б)

Если перед загрузкой схемного файла убрать знак комментария (*) перед командой PLOT, то семейство АЧХ напряжения будет дополнительно выведено в отдельном окне в децибелах (db).

Из рассмотрения зависимостей рис. 4.45 следует, что с ростом K резонансный пик увеличивается, а затем раздваивается (при сильной связи — $K > 0,03$).

Отметим, что список имен всех выполненных видов анализа, всегда можно вывести на экран командой **setplot**:

WinSpice 3 -> setplot

Type the name of the desired plot:

```

new    New plot
Current ac4  PRIMER 4.15 (STYLE SPICE3) (AC Analysis)
ac3    PRIMER 4.15 (STYLE SPICE3) (AC Analysis)
ac2    PRIMER 4.15 (STYLE SPICE3) (AC Analysis)
ac1    PRIMER 4.15 (STYLE SPICE3) (AC Analysis)
const    Constant values (constants)

```

Н

Напомним, что просмотреть информацию о созданных активных векторах можно с помощью команды **display**:

```
WinSpice 4 -> display
```

Here are the vectors currently active:

Title: PRIMER 4.15 (STYLE SPICE3)

Name: ac4 (AC Analysis)

Date: Sat Jul 11 21:08:33 2009

```

V(5)      : voltage, complex, 500 long
V(6)      : voltage, complex, 500 long
VA2#branch : current, complex, 500 long
frequency  : frequency, complex, 500 long [default scale]
iv4       : current, real, 500 long
uv4       : voltage, real, 500 long

```

В конце примера 4.1 подробно рассматривался смысл этой информации. В данном случае видно, что при проведении анализа по переменному току с именем «ac4» использовались четыре вектора комплексного типа (complex) и два вектора вещественного типа (real). Каждый вектор содержит 500 элементов. Векторы напряжений V(5), V(6) и тока VA2#branch созданы командой SAVE. Вектор frequency, созданный директивой AC, устанавливается по умолчанию в качестве величины, откладываемой по оси абсцисс (default scale). Векторы тока и напряжения iv4 и uv4 созданы при исполнении команд `let iv4=...` и `let uv4=...` в управляющем блоке.

В данном случае была выведена информация по анализу «ac4», поскольку он был выполнен последним. Если требуется получить подобные сведения по предыдущим анализам, то надо вставить в цепной файл команду `display` после выполнения соответствующего анализа. Например, для просмотра информации об активных векторах в анализе «ac2» надо вставить команду `display` после строки

```
let iv2=mag(ac2.VA2#branch).
```

Любой элемент любого вектора или выражения с векторами можно вывести на печать командой **print**. Например, выведем элементы с номером 100 векторов V(6), uv2, frequency, вычисленные при проведении анализа «ac2», соответствующего $K=0,03$:

```

WinSpice 5 -> print ac2.V(6)[100] ac2.uv2[100] ac2.frequency[100]
ac2.v(6)[100] = 8.516519e+00,-2.22137e+00
ac2.uv2[100] = 1.964082e+00
ac2.frequency[100] = 1.932164e+05,0.000000e+00.

```

Отсюда следует, что при $K=0,03$ на частоте 193216,4 Гц величина АЧХ напряжения равна 1,964, а потенциал шестого узла составляет $(8,516519 - j \cdot 2,22137)$ В. Отметим, что для вектора uv2 имя анализа ac2 можно было не указывать, поскольку данный вектор используется только в этом анализе, то есть это локальный вектор. Для

вектора frequency имя as2 тоже можно было не указывать, так как этот вектор генерируется одинаковыми директивами AC во всех анализах.

В качестве примера векторного выражения найдем разность АЧХ тока при $K=0,01$ и $K=0,08$ на частоте $f=210$ кГц. Данной частоте соответствует номер элемента, вычисляемый по формуле

$$n = \left\lceil \frac{f - FSTART}{\Delta f} \right\rceil, \quad (4.23)$$

где $\Delta f = (FSTOP - FSTART) / (NP - 1)$, (см. пп.4.3.2).

Квадратные скобки показывают необходимость округления до целого. В рассматриваемом примере $FSTART=185000$ Гц, $FSTOP=226000$ Гц, $NP=500$. После подстановки в (4.23) получаем $n=304$. Вводим следующие команды:

WinSpice 6 -> print frequency[304] (iv4[304]-iv1[304])

frequency[304] = 2.099780e+05,0.000000e+00

(iv4[304]-iv1[304]) = 9.131996e-03

Таким образом, разность АЧХ тока при $K=0,01$ и $K=0,08$ на частоте $f=209978$ Гц ≈ 210 кГц составляет 9,131996 мА, что также видно на диаграмме рис. 4.45, а.

ПРИМЕР 4.16. Построить АЧХ и ФЧХ передаточной функции по напряжению активного фильтра верхних частот (рис. 4.46). Построить АЧХ и ФЧХ входной проводимости. Диапазон изменения частоты 1 Гц...1 МГц. Фильтр реализован на базе ИНУН с очень большим коэффициентом передачи по напряжению k_U (см. пп. 3.3.3).

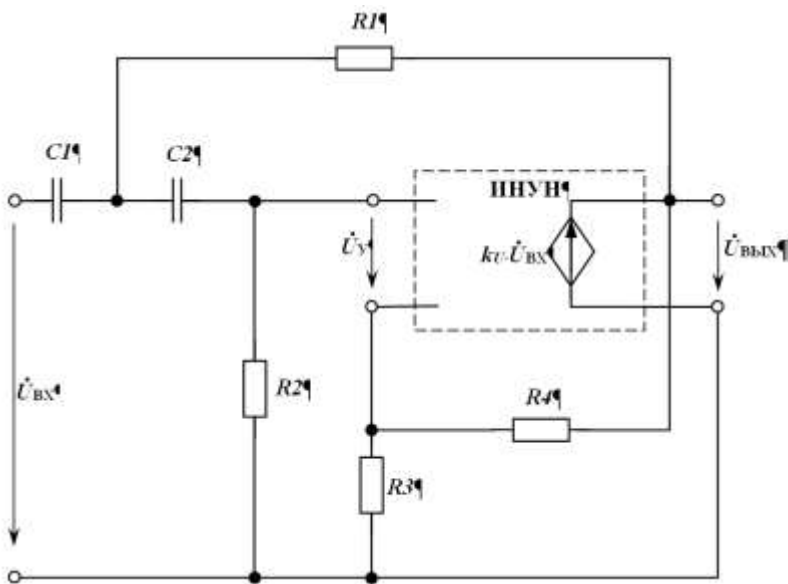


Рис. 4.46. Схема фильтра верхних частот на операционном усилителе: $R_1=10$ кОм; $R_2=1$ кОм; $R_3=100$ Ом; $R_4=1,8$ кОм; $C_1=C_2=0,1$ мкФ. Диапазон изменения частоты 1 Гц...1 МГц

Следует отметить, что в реальных современных активных фильтрах в качестве ИНУН используются так называемые *операционные усилители* в микроэлектронном исполнении. Коэффициент передачи по напряжению ИНУН, называемый в данном случае коэффициентом усиления операционного усилителя, может достигать 10^6 . Поэтому будем полагать $k_U=10^6$.

При составлении SPICE-схемы (рис. 4.47) последовательно с источником входного напряжения включен «амперметр» VA. Он необходим для определения АЧХ и ФЧХ входной проводимости, что требуется по условию задачи. Дело в том, что VA измеряет ток $I(VA)$, численно равный проводимости при $U_{ВХ}=1$ В. Начальную фазу входного напряжения положим равной нулю.

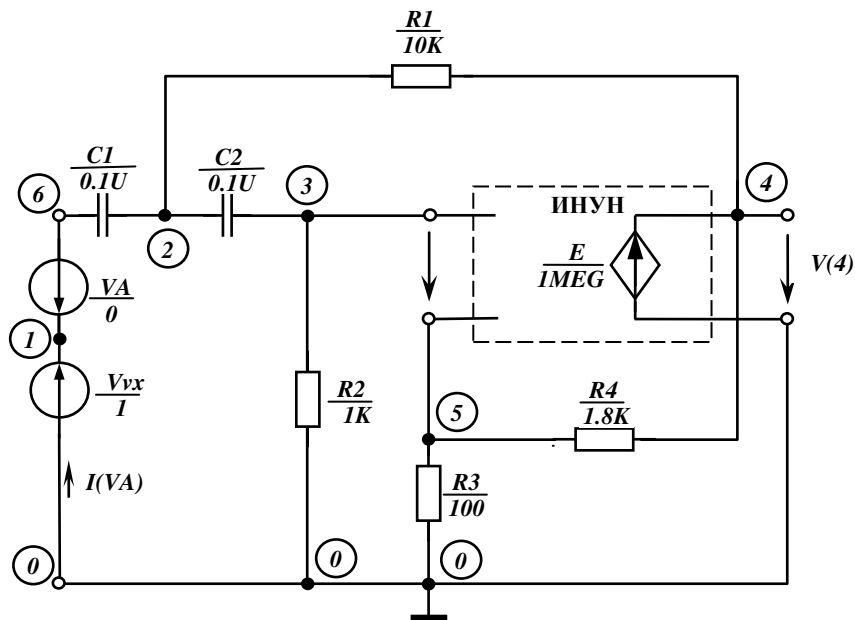


Рис. 4.47. Схема активного фильтра в SPICE-обозначениях

Текстовое описание схемы (схемный файл primer4_16.cir) выполнено в стиле SPICE2 потому, что в рассматриваемом примере не требуются какие-либо дополнительные или многовариантные расчеты. Величина коэффициента управления ИНУН задана 1MEG (то есть 10^6) по указанной выше причине.

PRIMER 4.16 (STYLE SPICE2)

```
Vvx 1 0 AC 1
VA 1 6
R1 2 4 10K
R2 3 0 1K
R3 5 0 100
R4 4 5 1.8K
C1 6 2 0.1U
C2 2 3 0.1U
E 4 0 3 5 1MEG
.AC DEC 100 1 1MEG
.PLOT AC VDB(4)
.PLOT AC VP(4)
.PLOT AC IM(VA)
.PLOT AC IP(VA)
.END
```

В директиве **.AC** указан параметр DEC (логарифмический масштаб) и диапазон изменения частоты, заданный по условию. Логарифмический масштаб по оси частот выбран, поскольку диапазон частот достаточно широк (шесть декад). На каждой декаде будет вычисляться 100 значений АЧХ и ФЧХ.

АЧХ передаточной функции по напряжению (то есть модуль $V(4)$) выведем на график в децибелах, что общепринято при анализе фильтров. Для этого используем код **VDB(4)** (см. табл. 4.1):

```
.PLOT AC VDB(4)
```

ФЧХ передаточной функции по напряжению имеет вид

```
.PLOT AC VP(4)
```

АЧХ и ФЧХ входной проводимости отображаются директивами

```
.PLOT AC IM(VA)
```

```
.PLOT AC IP(VA)
```

После загрузки файла текстового описания **primer4_16.cir** в WinSpice3, получим искомые характеристики (рис. 4.48, рис. 4.49)

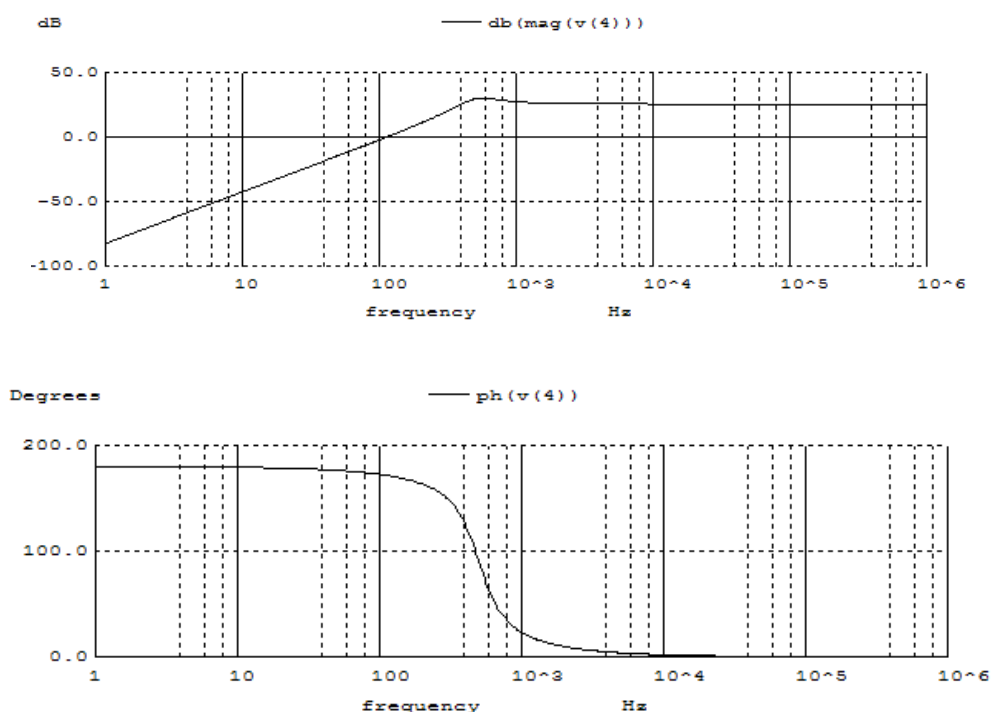


Рис. 4.48. Логарифмические АЧХ (а) и ФЧХ (б) передаточной функции по напряжению активного фильтра

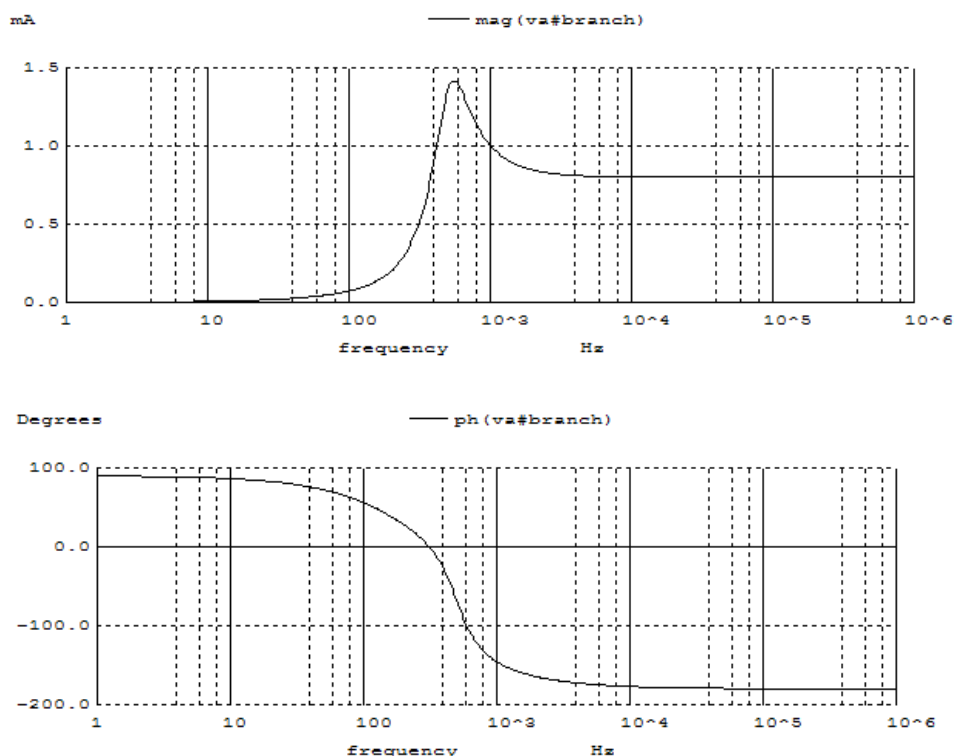
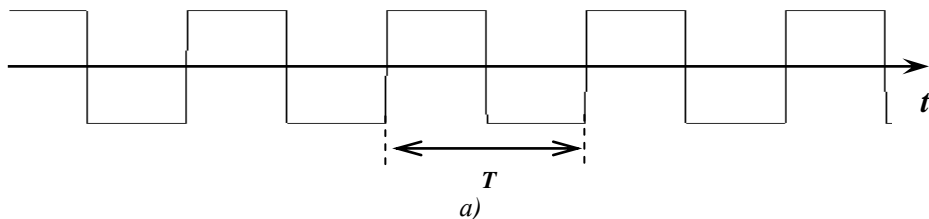


Рис. 4.49. Логарифмические АЧХ (а) и ФЧХ (б) входной проводимости (входного тока при $U_{\text{вх}}=1$ В) активного фильтра

Единицы измерения АЧХ входной проводимости не миллиамперы, как указано на рис. 4.49 а, а миллисименсы. Это следует из упомянутого выше численного равенства входного тока и входной проводимости при напряжении 1 В.

4.6. Периодические несинусоидальные токи и напряжения в линейных электрических цепях

Как было отмечено выше в п. 4.2, все токи и напряжения в линейной цепи с постоянными во времени параметрами, возбуждаемой синусоидальными источниками одной частоты, также синусоидальны и имеют ту же самую частоту. Откуда же в такой цепи могут появиться периодические, но *несинусоидальные* токи и напряжения? Причина, очевидно, в источниках. Именно они могут задавать негармонический характер изменения токов и напряжений. Часто встречающиеся функции периодических несинусоидальных источников показаны на рис. 4.50, где T - период.



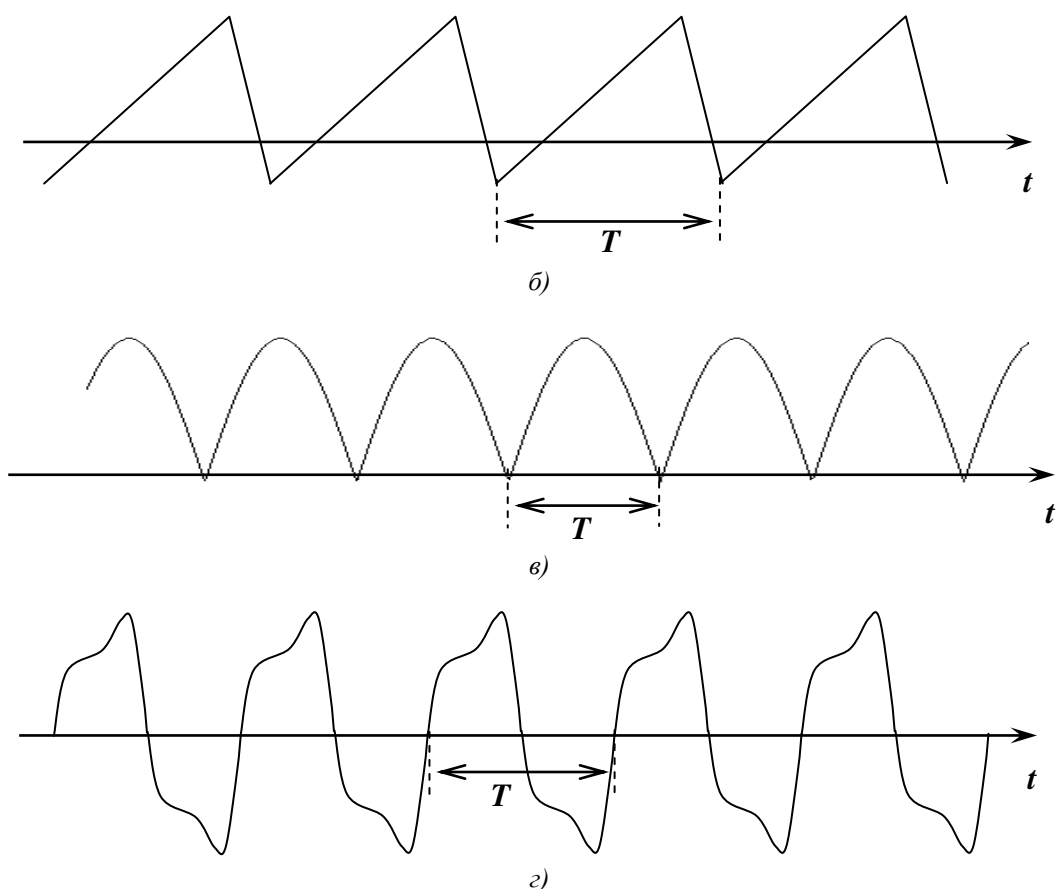


Рис. 4.50. Характерные формы величин периодических несинусоидальных источников: а — прямоугольная («меандр»); б — треугольная («пила»); в — выпрямленная синусоида; г — напряжение неисправного генератора синусоидального тока

В электронных цепях часто принципиально необходимы источники, генерирующие несинусоидальные токи и напряжения (рис. 4.50 а, б, в). В электротехнике отклонение от синусоиды является, как правило, нежелательным фактором и рассматривается как искажение (см., например, рис. 4.50 г), которое желательно уменьшить.

Из курса математического анализа известно, что любую периодическую функцию $u(t)$, удовлетворяющую условиям Дирихле, можно разложить в ряд Фурье на гармонические составляющие (гармоники)

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_m^{(k)} \sin(k \omega_1 t + \psi_u^{(k)}), \quad (4.24)$$

где U_0 — постоянная составляющая (или «нулевая» гармоника, т. е. гармоника с нулевой частотой); $U_m^{(k)}$ — амплитуда k -й гармоники; k — номер гармоники; $\omega_1 = 2\pi T^{-1}$ — угловая частота основной (как правило, первой) гармоники; t — время; $\psi_u^{(k)}$ — начальная фаза k -й гармоники.

Все функции, описывающие реальные токи и напряжения, удовлетворяют условиям Дирихле. Верхнюю границу суммирования при практических расчетах ограничивают. Обычно учитывают не более десяти гармоник, поскольку с ростом номера k их амплитуда убывает. В результате получается *приближенное* мгновенное значение несинусоидальной величины.

Совокупность величин $U_0, U_m^{(k)}$ называют *амплитудным спектром*, а совокупность $\psi_u^{(k)}$ – *фазовым спектром*.

В зависимости от способа задания функции источника существует несколько вариантов определения параметров разложения $U_0, U_m^{(k)}, \psi_u^{(k)}$:

1) если функция задана аналитически, то применяются известные формулы из теории рядов Фурье;

2) если график функции имеет простую форму, то можно воспользоваться таблицами готовых разложений, имеющимися в любом справочнике по электротехнике или высшей математике;

3) если функция задана графически и не является табличной, то сначала она оцифровывается, а затем используются формулы приближенного вычисления параметров;

4) если возможно проведение измерений на реальном источнике, то используется специальный прибор — анализатор спектра.

В данном разделе будем полагать, что в линейной цепи имеется один несинусоидальный источник с известным амплитудным и фазовым спектром. Искомые величины являются несинусоидальными токами и напряжениями, возбуждаемые этим источником. Согласно методу наложения, *расчет линейных цепей при несинусоидальных воздействиях сводится к анализу по каждой гармонике в отдельности символическим методом с последующим суммированием мгновенных значений найденных гармоник*.

Следует отметить, что в *нелинейных* цепях, которые в данной книге не рассматриваются, несинусоидальные периодические величины возникают даже при идеально синусоидальных источниках. В этом случае говорят о «нелинейных искажениях», имея в виду, что их причина обусловлена исключительно нелинейными элементами.

ПРИМЕР 4.17. На вход активного фильтра рис. 4.46 (пример 4.16) подается периодическое прямоугольное напряжение с амплитудой $U_m=5$ В и периодом $T=0,01$ с (рис. 4.51). Найти мгновенное значение установившегося выходного напряжения. Учесть гармоники до девятой включительно.

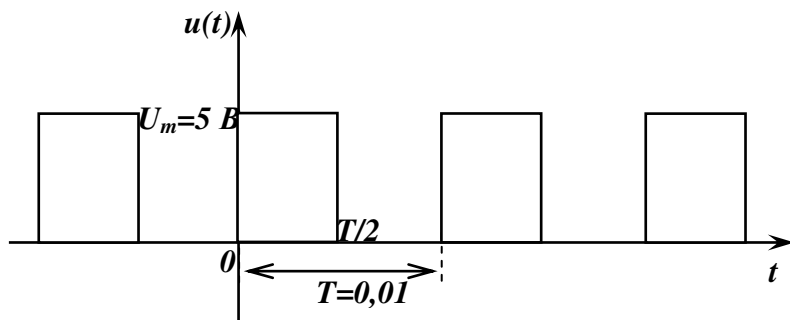


Рис. 4.51. Временная диаграмма напряжения периодического несинусоидального источника

Разложение в ряд Фурье для функции рис. 4.51, являющееся табличным, содержит постоянную составляющую и нечетные гармоники с нулевой начальной фазой. Таким образом, для данной задачи, усеченный до девятой гармоники ряд Фурье, имеет вид

$$u(t) \approx U_0 + u^{(1)}(t) + u^{(3)}(t) + u^{(5)}(t) + u^{(7)}(t) + u^{(9)}(t), \quad (4.25)$$

где $U_0 = \frac{U_m}{2}$ — постоянная составляющая; $u^{(1)}(t) = \frac{2U_m}{\pi} \sin(\omega_1 t)$ — первая гармоника;

$u^{(3)}(t) = \frac{2U_m}{3\pi} \sin(3\omega_1 t)$ — третья гармоника; $u^{(5)}(t) = \frac{2U_m}{5\pi} \sin(5\omega_1 t)$ — пятая гармоника;

$u^{(7)}(t) = \frac{2U_m}{7\pi} \sin(7\omega_1 t)$ — седьмая гармоника; $u^{(9)}(t) = \frac{2U_m}{9\pi} \sin(9\omega_1 t)$ — девятая гармоника.

Подставляя исходные данные, получаем следующие значения:

- 1) постоянная составляющая $U_0 = 2,5$ В;
- 2) частота основной (первой) гармоники $f_1 = T^{-1} = 100$ Гц;
- 3) угловая частота основной (первой) гармоники $\omega_1 = 2\pi f_1 = 628,32$ с⁻¹;
- 4) первая гармоника (100 Гц) — $u^{(1)}(t) = 3,1831 \sin(628,32 t)$;
- 5) третья гармоника (300 Гц) — $u^{(3)}(t) = 1,0610 \sin(1884,96 t)$;
- 6) пятая гармоника (500 Гц) — $u^{(5)}(t) = 0,63662 \sin(3141,59 t)$;
- 7) седьмая гармоника (700 Гц) — $u^{(7)}(t) = 0,45473 \sin(4398,23 t)$;
- 8) девятая гармоника (900 Гц) — $u^{(9)}(t) = 0,35368 \sin(5654,87 t)$.

Подставляя полученные значения в выражение входного напряжения (4.25), получим его приближенное мгновенное значение, временная диаграмма которого приведена на рис. 4.52.

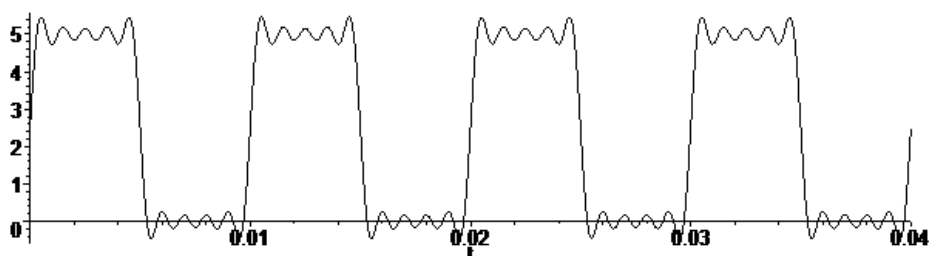


Рис. 4.52. Приближенное представление входного напряжения рядом Фурье, усеченным до девятой гармоники

Расчет будем проводить в амплитудных значениях. Составляем текстовое описание на основе примера 4.16. Зададим в одном файле описания постоянной составляющей и всех гармоник, но активным должно быть только одно из них. Дело в том, что АС анализ не допускает наличие в цепи нескольких источников с разными частотами.

Каждой гармонике должна соответствовать своя директива, содержащая частоту этой гармонике. Активной должна быть только одна директива, соответствующая активной гармонике. Чтобы сделать любое SPICE-предложение *неактивным*, достаточно поставить перед ним знак комментария — звездочку (или, как говорят, «закомментировать»). Для определения постоянной составляющей используем директиву **.OP**. Ниже приведено полученное в результате текстовое описание (схемный файл primer4_17.cir). Активна первая гармоника.

```
PRIMER 4.17 (STYLE SPICE2)
*-----POST. SOSTAVL-----
*Vvx 1 0 DC 2.5
*----- 1 GARMONIKA-----
Vvx 1 0 AC 3.1831 DC 0
*----- 3 GARMONIKA-----
*Vvx 1 0 AC 1.0610 DC 0
*----- 5 GARMONIKA-----
*Vvx 1 0 AC 0.63662 DC 0
*----- 7 GARMONIKA-----
*Vvx 1 0 AC 0.45473 DC 0
*----- 9 GARMONIKA-----
*Vvx 1 0 AC 0.35368 DC 0
*-----
VA 1 6
R1 2 4 10K
R2 3 0 1K
R3 5 0 100
R4 4 5 1.8K
C1 6 2 0.1U
C2 2 3 0.1U
E 4 0 3 5 1MEG
*-----POST. SOSTAVL-----
*.OP
*----- 1 GARMONIKA-----
.AC LIN 1 100 100
*----- 3 GARMONIKA-----
*.AC LIN 1 300 300
*----- 5 GARMONIKA-----
*.AC LIN 1 500 500
*----- 7 GARMONIKA-----
*.AC LIN 1 700 700
*----- 9 GARMONIKA-----
*.AC LIN 1 900 900
*-----
.PRINT AC VM(4)
.PRINT AC VP(4)
.END
```

На печать выводятся значения амплитуды и фазы выходного напряжения для активной гармонике. После изменения активной гармонике и сохранения схемного файла выводятся результаты для новой гармонике и т. д. Полученные значения сведены в таблицу 4.3

Таблица 4.3

№ гарм.	Амплитуда, В	Начальная фаза, град.	Комплексная амплитуда, В	Мгновенное значение гармоники выходного напряжения, В
0	0	—	0	$U_{\text{вых}0} = 0$
1	2,465	172,54	$\dot{U}_m^{(1)} = 2,465 e^{j172,54^\circ}$	$u_{\text{вых}}^{(1)} = 2,465 \sin(628,32 t + 172,54^\circ)$
3	9,590	149,68	$\dot{U}_m^{(3)} = 9,590 e^{j149,68^\circ}$	$u_{\text{вых}}^{(3)} = 9,590 \sin(1884,96 t + 149,68^\circ)$
5	18,99	91,19	$\dot{U}_m^{(5)} = 18,99 e^{j91,19^\circ}$	$u_{\text{вых}}^{(5)} = 18,99 \sin(3141,59 t + 91,19^\circ)$
7	13,02	43,27	$\dot{U}_m^{(7)} = 13,02 e^{j43,27^\circ}$	$u_{\text{вых}}^{(7)} = 13,02 \sin(4398,23 t + 43,27^\circ)$
9	8,693	27,23	$\dot{U}_m^{(9)} = 8,693 e^{j27,23^\circ}$	$u_{\text{вых}}^{(9)} = 8,693 \sin(5654,87 t + 27,23^\circ)$

Постоянная составляющая выходного напряжения оказалась равной нулю. Действительно, на входе схемы рис. 4.46 включен конденсатор $C1$, который не пропускает постоянный ток. Суммируя гармоники, получаем ряд Фурье для выходного напряжения

$$u_{\text{вых}} = U_{\text{вых}0} + u_{\text{вых}}^{(1)} + u_{\text{вых}}^{(3)} + u_{\text{вых}}^{(5)} + u_{\text{вых}}^{(7)} + u_{\text{вых}}^{(9)}$$

Результирующая временная диаграмма выходного напряжения, построенная по данному выражению, приведена на рис. 4.53.

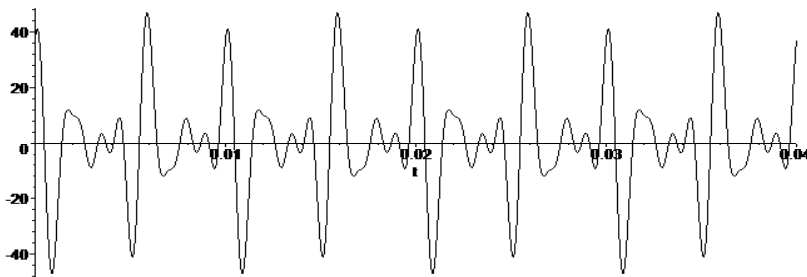


Рис. 4.53. Выходное напряжение фильтра рис. 4.46 при несинусоидальном воздействии

Выводы

1. Установившиеся процессы в цепи синусоидального тока значительно сложнее, чем при постоянном токе, так как необходимо учитывать влияние L и C -элементов. Соответственно усложняется представление всех электрических величин: они выражаются комплексными числами. Каждая комплексная величина тока или напряжения является символом реально существующего мгновенного значения. Поэтому метод, использующий комплексные амплитуды (или комплексные действующие значения) называют комплексным или символическим. В рамках данного метода выполняются законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме. Из этого следует, что все методы анализа цепей постоянного тока могут быть распространены на цепи синусоидального тока в комплексной формулировке.

2. SPICE-описание идеализированных пассивных элементов выполняется согласно пп. 1.1.1-1.1.3. Единственное отличие состоит в том, что для реактивных элементов параметр IC, характеризующий начальные условия, задавать не нужно. Таким образом, *R*-, *L*- и *C*-элементы описываются следующими предложениями:

```
RXXXXXXX N1 N2 VALUE  
LXXXXXXX N1 N2 VALUE  
CXXXXXXX N1 N2 VALUE
```

При наличии индуктивной связи необходимо использовать элемент взаимной индуктивности (см. пп. 4.3.3), описываемый предложениями

```
LYYYYYYY N11 N12 VALY  
LZZZZZZZ N21 N22 VALZ  
KXXXXXXX LYYYYYYY LZZZZZZZ VALUE
```

Здесь LYYYYYYY, LZZZZZZZ — имена индуктивно связанных элементов с индуктивностями VALY и VALZ соответственно; KXXXXXXX — имя *M*-элемента; VALUE — это величина коэффициента индуктивной связи.

3. В SPICE-описаниях комплексных идеализированных независимых источников указываются идентификатор AC (переменный ток), ACMAG (амплитуда или действующее значение) и ACPHASE (начальная фаза в градусах):

```
VXXXXXXX N1 N2 <AC ACMAG <ACPHASE>>  
IXXXXXXXX N1 N2 <AC ACMAG <ACPHASE>>.
```

4. При использовании стиля SPICE2 расчет частотных характеристик задается директивой .AC, которая может быть записана в следующих формах:

- 1) .AC LIN NP FSTART FSTOP
- 2) .AC DEC ND FSTART FSTOP
- 3) .AC OCT NO FSTART FSTOP

Данные директивы задают диапазон частот от FSTART до FSTOP, в котором расчет токов и напряжений осуществляется для фиксированных значений частоты. Эти значения распределены равномерно (LIN) или по логарифмическому закону (DEC, OCT). При необходимости расчета на одной частоте F необходимо задать FSTART=FSTOP=F и NP=1.

Вывод частотных характеристик в виде таблиц и графиков производится директивами .PRINT и .PLOT соответственно:

```
.PRINT AC OV1 <OV2...OV8>  
.PLOT AC OV1 <OV2...OV8>
```

В результате применения данных директив на печать выводятся таблица и графики от одной до восьми величин OV1...OV8, для частот, указанных в директиве .AC. Обозначения этих величин задаются в соответствии с их физическим смыслом (см. табл. 4.1)

5. При использовании стиля SPICE3 допускаются выражения с комплексными числами как в пакетном, так и в интерактивном режиме. Выражение записывается после команды LET согласно правилам записи комплексных чисел и математических функций (см. табл. 4.2). Изменение параметров элементов осуществляется с помощью команды ALTER. Можно выполнять трудоемкие многовариантные расчеты, например, вычисление и построение круговых диаграмм.

6. Если в идеальной схеме нарушены требования SPICE (запрет на контуры, состоящие из идеальных источников напряжения и (или) *L*-элементов, а также на узлы и

сечения, состоящие из идеальных источников тока и (или) C -элементов), то WinSpice3 выдает сообщение

ERROR: singular matrix: check nodes...

Во избежание этой ситуации можно приблизить цепь к реальности: проблемные узлы соединить с «землей» через очень большие сопротивления, а в проблемные контуры добавить очень малые сопротивления. То же самое для узлов достигается директивой

.OPTIONS RSHUNT=1e12.

6. При расчете цепей с взаимной индукцией необходимо внимательно следить за тем, чтобы одноименные зажимы были указаны как плюсовые в описаниях связанных L -элементов. Следует также помнить, что в описании элемента взаимной индуктивности указывается значение коэффициента индуктивной связи (4.19), а не коэффициента взаимной индукции M .

Трансформатор, близкий к идеальному, можно смоделировать при условии $R_1=R_2=0$, $K=1$ и выполнении соотношений (4.20), (4.21). При моделировании трансформаторов следует соединить первичную и вторичную обмотки через высокоомный резистор для обеспечения связности схемы (требование SPICE). Другой способ обеспечения связности состоит в использовании директивы .OPTIONS RSHUNT=1e12.

7. При расчете частотных характеристик в директиве .AC задается диапазон частот между FSTART и FSTOP. Следует помнить, что FSTART=0 (постоянный ток) не допускается. Вместо него можно использовать достаточно малое, близкое к нулю значение. Входное воздействие (ток или напряжение) полагается равным единице с нулевой начальной фазой.

8. Цепи, состоящие из одинаковых звеньев (например, лестничные схемы), целесообразно описывать как соединение подсхем. Подсхема описывается конструкцией SUBCKT (см. пример 4.14). Для построения семейств частотных характеристик при вариации параметра целесообразно использовать стиль SPICE3.

9. При расчете линейных цепей на базе операционных усилителей (например, активных фильтров), можно в качестве простейшей схемы замещения усилителя использовать ИНУН с очень большим коэффициентом передачи напряжения.

10. Расчет линейных цепей при несинусоидальных воздействиях сводится к анализу по каждой гармонике в отдельности символическим методом. Далее мгновенные значения найденных гармоник суммируются, образуя ряд Фурье (4.24) для искомой величины.

Глава 5. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

В общем случае под многофазной системой понимается совокупность однофазных электрических цепей, называемых фазами, в которых действуют синусоидальные источники *одной частоты*, сдвинутые друг относительно друга по фазе. Чаще всего применяются многофазные системы с симметричными источниками, напряжения которых равны по амплитуде и сдвинуты по фазе на угол $2\pi/m$, где m — число фаз. Сумма мгновенных мощностей отдельных фаз симметричной системы является постоянной величиной в любой момент времени.

Наибольшее распространение в промышленности получили трехфазные системы ($m=3$), где напряжения источников сдвинуты по фазе на угол $2\pi/3 = 120^\circ$. Трехфазный источник соединяется линией с трехфазным приемником, образуя трехфазную цепь. Применение таких цепей дает как экономические, так и практические преимущества перед однофазной системой электроснабжения.

С теоретических позиций данные цепи не обладают какой-то спецификой: это обычные цепи переменного тока с несколькими источниками одной частоты, расчет которых рассмотрен в предыдущем разделе. Почему же тогда в любом учебнике для изучения трехфазных цепей выделяется отдельный раздел? Дело в том, что они занимают центральное место в практической электротехнике и в этой области сложились определенные понятия и термины. Например, под «фазой» здесь понимают часть трехфазной цепи, в которой действует источник с определенной начальной фазой. Поэтому прежде, чем перейти к конкретным примерам, необходимо рассмотреть из чего состоят трехфазные цепи и ознакомиться с некоторыми специфическими понятиями и терминами.

5.1. Трехфазный источник

Трехфазным источником (генератором) называют совокупность трех источников синусоидального напряжения одной частоты, сдвинутых по фазе на угол 120° и соединенных «звездой» или «треугольником» ²⁷ (рис. 5.1).

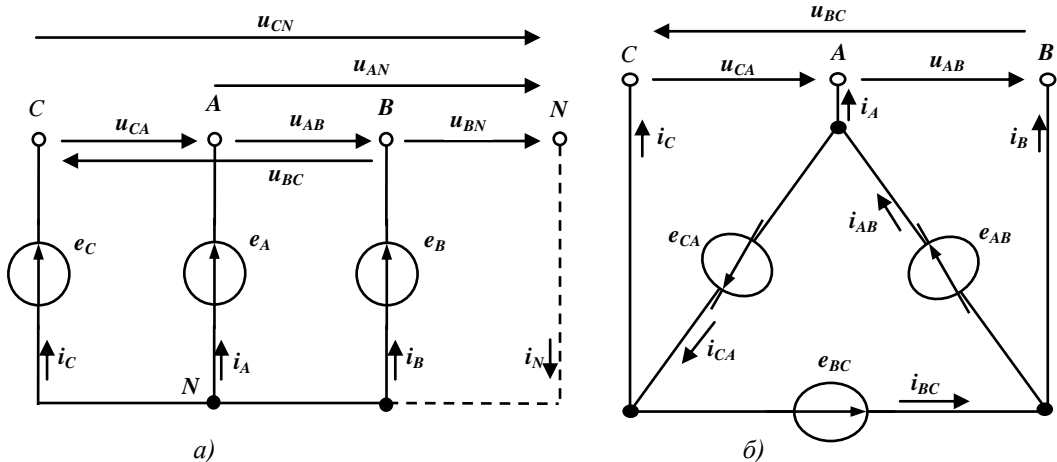


Рис. 5.1. Схемы соединения трехфазного источника звездой (а) и треугольником (б)

²⁷ Ниже в тексте эти термины употребляются без кавычек.

Рассмотрим соединение звездой (рис. 5.1, а). Трехфазный источник состоит из трех однофазных источников ЭДС одной частоты: e_A — источник фазы A , e_B — источник фазы B , e_C — источник фазы C . «Плюсы» источников обозначены буквами A, B, C и к ним через линию подключается приемник (на рисунке линия и приемник не показаны). «Минусы» источников объединены в узел N , называемый «нейтральной точкой» или «нулевой точкой». Нейтральная точка может использоваться при подключении нагрузки (четырёхпроводная система), а может и не использоваться (трехпроводная система). Поэтому вывод от нейтральной точки N обозначен пунктиром.

Реальным первичным трехфазным источником является электромашинный синхронный генератор, состоящий из неподвижной части — статора и вращающейся части — ротора. На статоре размещены три неподвижные обмотки с пространственным сдвигом 120° . Ротор представляет собой электромагнит, питаемый от отдельного источника постоянного тока — возбуждателя. При вращении ротора внешним двигателем (например, гидравлической турбиной) в обмотках статора наводятся ЭДС, равные по амплитуде и сдвинутые по фазе на угол 120° . В данном случае термины «начало» фазы обмотки статора и «конец» фазы обмотки статора соответствуют терминам «плюс» и «минус» источника.

Для симметричного трехфазного источника с прямым чередованием фаз мгновенные значения фазных ЭДС можно записать так:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin(\omega t + \psi_A); \\ e_B &= E_m \sin(\omega t + \psi_A - 120^\circ); \\ e_C &= E_m \sin(\omega t + \psi_A + 120^\circ), \end{aligned} \quad (5.1)$$

где E_m — амплитуда фазных ЭДС; ψ_A — начальная фаза источника ЭДС фазы A .

При обратном чередовании фаз знаки перед 120° в (5.1) изменяются на противоположные. В дальнейшем изложении предполагается общепринятое прямое чередование фаз.

Напряжения между началом фазы и нейтральной точкой называют *фазными* или *фазовыми*. Таким образом, напряжения u_{AN}, u_{BN}, u_{CN} — фазные напряжения генератора. Если пренебречь внутренним сопротивлением источников (идеальный генератор), то фазные напряжения будут всегда равны фазным ЭДС (5.1);

$$u_{AN} = e_A; u_{BN} = e_B; u_{CN} = e_C.$$

Напряжения между началами фаз носят название *междуфазных* или *линейных*. Из закона Кирхгофа для напряжений следует, что между линейными и фазными напряжениями существует следующая связь:

$$u_{AB} = u_{AN} - u_{BN}; u_{BC} = u_{BN} - u_{CN}; u_{CA} = u_{CN} - u_{AN}. \quad (5.2)$$

Перейдем к векторам комплексных действующих значений и изобразим векторную диаграмму рис. 5.2 для случая $\psi_A = 0$. На ней наглядно видны соотношения между фазными и линейными величинами:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{BN}; \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{CN}; \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{AN} \quad (5.3)$$

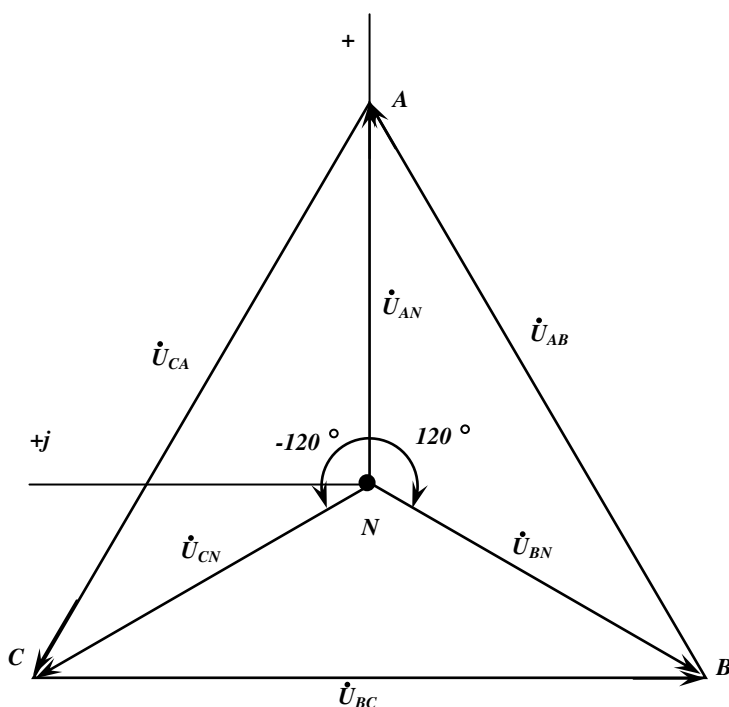


Рис. 5.2. Векторная диаграмма напряжений источника, соединенного звездой ($\psi_A = 0$)

Из векторной диаграммы вытекают основные свойства симметричной трехфазной системы ЭДС:

$$\dot{U}_{AN} + \dot{U}_{BN} + \dot{U}_{CN} = 0; \quad \dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0; \quad U_L = \sqrt{3} U_\phi, \quad (5.4)$$

где U_L — действующее значение любого линейного напряжения; U_ϕ — действующее значение любого фазного напряжения.

Направления токов i_A, i_B, i_C трехфазного источника выберем совпадающими с направлениями фазных ЭДС. Эти токи принято называть *фазными токами источника (генератора)*. Они текут в приемник по линии и называются *линейными токами источника*. Иными словами, при соединении звездой системы фазных и линейных токов совпадают. Направление тока в нейтральном проводе i_N (если он есть) принято выбирать противоположным фазным токам. По закону Кирхгофа для токов в случае четырехпроводной цепи $i_N = i_A + i_B + i_C$, а в случае трехпроводной $i_A + i_B + i_C = 0$.

Опишем реальный трехфазный источник на языке SPICE как подсхему (см. п. 2.3). При этом учтем активно-индуктивный характер внутренних сопротивлений фаз. Схема в SPICE-обозначениях приведена на рис. 5.3.

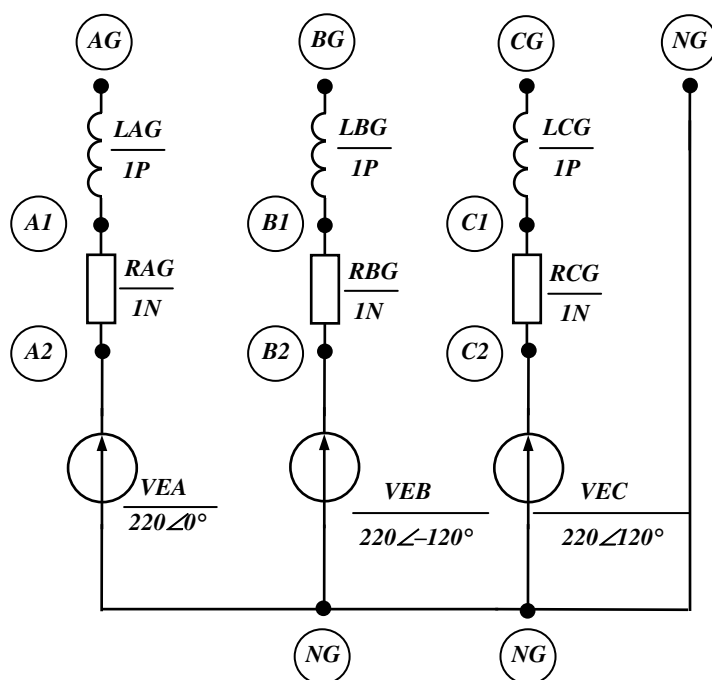


Рис. 5.3. Схема трехфазного источника, соединенного звездой, в SPICE-обозначениях с учетом внутренних сопротивлений фаз

Действующие значения напряжений фазных источников генератора (VEA , VEB , VEC) заданы характерными величинами 220 В. Эти источники одновременно можно использовать в качестве амперметров для определения токов генератора. Начальная фаза источника фазы A (VEA) задана равной нулю. Для фаз B и C начальные фазы составляют -120° и $+120^\circ$ соответственно. Внутренние сопротивления и индуктивности заданы очень малыми значениями, так как в практических расчетах ими часто пренебрегают (идеальный источник). Текстовое описание имеет вид

```
.SUBCKT GEN_STAR AG BG CG NG
VEA A2 NG AC 220 0
VEB B2 NG AC 220 -120
VEC C2 NG AC 220 120
RAG A1 A2 1N
RBG B1 B2 1N
RCG C1 C2 1N
LAG AG A1 1P
LBG BG B1 1P
LCG CG C1 1P
.ENDS
```

Теперь рассмотрим соединение фаз генератора в треугольник (рис. 5.1, б). В отличие от соединения звездой, в треугольнике понятия фазных и линейных напряжений совпадают.

Соединение представляет собой замкнутый контур, состоящий из источников напряжения. Если они идеальные, то на основании II закона Кирхгофа такой контур

недопустим (см. п. 2.4), так как в общем случае $\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} \neq 0$. Однако в идеально симметричных трехфазных цепях эта сумма, как раз, равна нулю (5.4)! Поэтому теоретически для таких цепей можно использовать треугольник из идеальных источников.

В отличие от соединения звездой, в треугольнике понятия фазных токов i_{AB}, i_{BC}, i_{CA} и линейных токов i_A, i_B, i_C не совпадают. Из закона Кирхгофа для токов (рис. 5.1, б) следует связь между линейными и фазными токами генератора:

$$i_A = i_{AB} - i_{CA}; \quad i_B = i_{BC} - i_{AB}; \quad i_C = i_{CA} - i_{BC}.$$

Сумма линейных токов треугольника всегда равна нулю, так как можно провести замкнутую поверхность, охватывающую треугольник и рассекающую три линейных провода. Как было отмечено в п. 2.2, это соответствует сечению схемы на две несвязные части, для каждой из которых выполняется закон Кирхгофа для токов.

Следует помнить, что при моделировании на SPICE *любой* контур из идеальных источников недопустим (см. п. 2.4). Поэтому при описании треугольника принципиально необходимо включить в каждую фазу внутренние сопротивления. Схема в SPICE-обозначениях приведена на рис. 5.4.

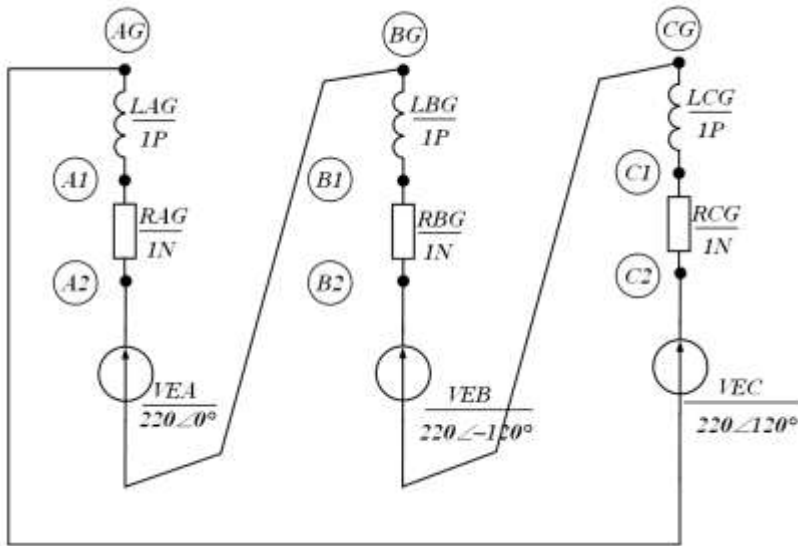


Рис. 5.4. Схема трехфазного генератора, соединенного треугольником, с учетом внутренних сопротивлений фаз в SPICE-обозначениях

```

Текстовое описание имеет вид
.SUBCKT GEN_TRIANGLE AG BG CG
VEA A2 BG AC 220 0
VEB B2 CG AC 220 -120
VEC C2 AG AC 220 120
RAG A1 A2 1N
RBG B1 B2 1N
RCG C1 C2 1N
LAG AG A1 1P

```

LBG BG B1 1P
 LCG CG C1 1P
 .ENDS

Следует отметить, что на практике соединение фаз генератора в треугольник используют довольно редко. Дело в том, что даже при незначительном нарушении симметрии, в контуре возникает ток, ухудшающий работу генератора.

5.2. Трехфазный приемник

По аналогии с источником фазные приемники также могут быть соединены звездой или треугольником (рис. 5.5).

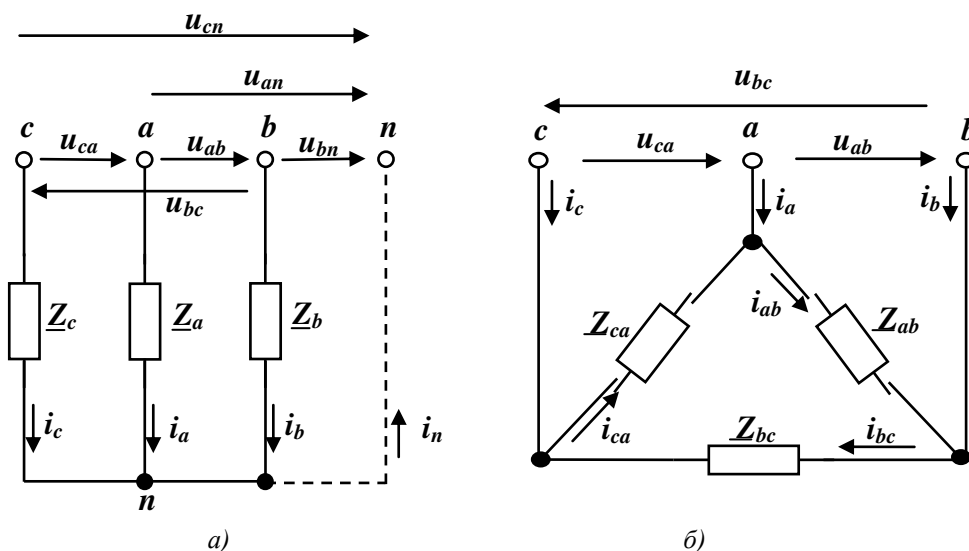


Рис. 5.5. Схемы соединения трехфазного приемника «звездой» (а) и «треугольником» (б)

Начала фаз принято обозначать строчными буквами a , b , c . По аналогии с генератором (5.2, 5.3) вводятся понятия фазных и линейных напряжений нагрузки. Токи, протекающие по фазам нагрузки, называются *фазными токами приемника*: i_a, i_b, i_c для звезды и i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} для треугольника. Ток i_n называется *током нейтрали*. Он равен алгебраической сумме фазных токов, то есть

$$i_n = i_a + i_b + i_c.$$

Токи, подтекающие к нагрузке по линии, называются *линейными*: i_a, i_b, i_c для звезды и треугольника. Обратите внимание, что для звезды понятия линейных и фазных токов совпадают, а для треугольника нет. По закону Кирхгофа для токов линейные и фазные токи в треугольнике связаны следующими соотношениями:

$$i_a = i_{ab} - i_{ca}; \quad i_b = i_{bc} - i_{ab}; \quad i_c = i_{ca} - i_{bc}.$$

Приемник называется *симметричным*, если комплексы сопротивлений фаз равны между собой:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c; \quad \underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}. \quad (5.5)$$

Типичными приемниками, близкими к симметричным, являются трехфазные асинхронные двигатели и трансформаторы. Их симметрия в номинальном режиме работы гарантируется изготовителем

Если же равенства (5.5) не выполняются, то нагрузка является *несимметричной*, например, осветительная нагрузка, бытовые электроприемники и т. п. Часто в трехфазную цепь включаются совместно симметричные трехфазные и однофазные приемники, так что эквивалентная нагрузка получается несимметричной. Наконец, могут возникать аварийные режимы (обрывы проводов, короткие замыкания), что также обуславливает несимметрию нагрузки.

Составим текстовые описания симметричных приемников в виде подсхем, полагая, что они имеют активно-индуктивный характер, без учета влияния взаимной индукции между фазами. Пусть в каждой фазе последовательно с резистором 100 Ом включена индуктивность 0,1 Гн. Для соединения звездой схема в SPICE-обозначениях представлена на рис. 5.6, а.

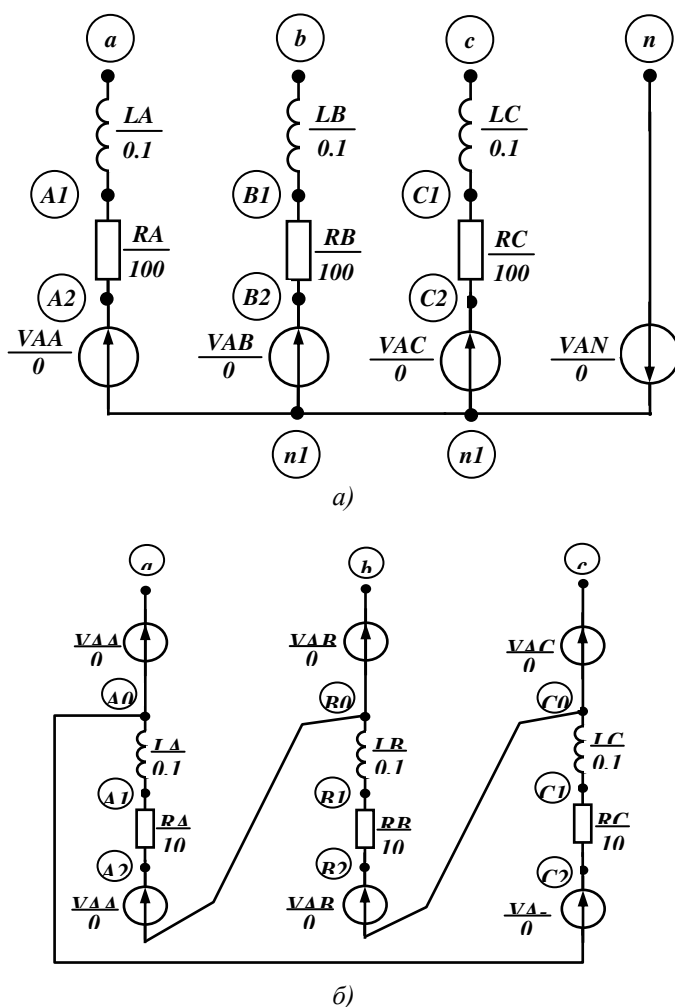


Рис. 5.6. Схемы в SPICE-обозначениях трехфазных приемников, соединенных звездой (а) и треугольником (б), с учетом внутренних сопротивлений фаз

Для определения фазных и линейных токов (рис. 5.6, а, б), а также тока в нейтральном проводе, в схему добавлены источники с нулевым напряжением - амперметры. Текстовые описания приемников, соединенных звездой (LOAD_STAR) и треугольником (LOAD_TRIANGLE) приведены ниже.

```
.SUBCKT LOAD_STAR A B C N
```

```
VAA A2 N1 AC 0
```

```
VAB B2 N1 AC 0
```

```
VAC C2 N1 AC 0
```

```
VAN N1 N AC 0
```

```
RA A1 A2 100
```

```
RB B1 B2 100
```

```
RC C1 C2 100
```

```
LA A A1 0.1
```

```
LB B B1 0.1
```

```
LC C C1 0.1
```

```
.ENDS
```

```
.SUBCKT LOAD_TRIANGLE A B C
```

```
VAA A A0 AC 0
```

```
VAB B B0 AC 0
```

```
VAC C C0 AC 0
```

```
VAAB A2 B0 AC 0
```

```
VABC B2 C0 AC 0
```

```
VACA C2 A0 AC 0
```

```
RAB A1 A2 100
```

```
RBC B1 B2 100
```

```
RCA C1 C2 100
```

```
LAB A0 A1 0.1
```

```
LBC B0 B1 0.1
```

```
LCA C0 C1 0.1
```

```
.ENDS
```

При наличии индуктивной связи между фазами ее следует учесть, как описано в п. 4.4.3

5.3. Трехфазная линия

Трехфазная линия состоит из трех проводов, называемых *линейными*, соединяющих источник и приемник. Четвертый провод, соединяющий нейтральные точки источника и приемника, называют нейтральным или нулевым. В расчетах линию часто полагают идеальной (с нулевым сопротивлением) или учитывают активно-индуктивный характер сопротивления проводов. При необходимости моделирования режима обрыва провода его сопротивление можно положить очень большой величиной. На рис. 5.7 показана схема замещения трехфазной линии с амперметрами, предназначенными для измерения токов линии. Следует иметь в виду, что токи линии равны линейным токам приемника только тогда, когда этот приемник единственный. Если к линии подключено несколько трехфазных приемников, то по ней протекают суммы линейных токов соответствующих фаз всех приемников.

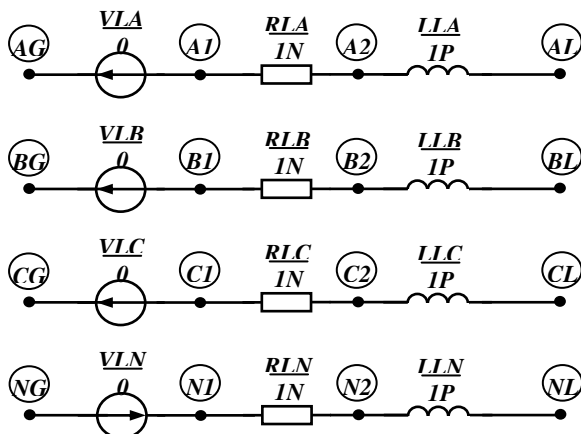


Рис. 5.7. Схема трехфазной линии в SPICE-обозначениях

```
.SUBCKT LINE AG BG CG NG
+      AL BL CL NL
VLA  AG A1 AC 0
VLB  BG B1 AC 0
VLC  CG C1 AC 0
VLN  N1 NG AC 0
RLA  A1 A2 1N
RLB  B1 B2 1N
RLC  C1 C2 1N
RLN  N1 N2 1N
LLA  A2 AL 1P
LLB  B2 BL 1P
LLC  C2 CL 1P
LLN  N2 NL 1P
.ENDS
```

5.4. Обобщенное SPICE-описание трехфазной цепи

Используя полученные ранее подсистемы отдельных частей трехфазной системы, можно составить ее достаточно общее описание в целом. При этом будем полагать, что источники и приемники могут быть соединены в звезду и (или) в треугольник. Соответствующая схема представлена на рис. 5.8, где приняты следующие обозначения для экземпляров подсистем (или, более кратко, псевдо-элементов):

XGEN_STAR — экземпляр подсистемы генератора, соединенного звездой (описание подсистемы содержится в блоке `.SUBCKT GEN_STARENDS`);

XGEN_TRIAN — экземпляр подсистемы генератора, соединенного треугольником (описание подсистемы содержится в блоке `.SUBCKT GEN_TRIANGLEENDS`);

XLINE — экземпляр подсистемы четырехпроводной линии (описание подсистемы содержится в блоке `.SUBCKT LINEENDS`);

XLOAD_STAR — экземпляр подсистемы приемника, соединенного звездой (описание подсистемы в блоке `.SUBCKT LOAD_STARENDS`);

XLOAD_TRIAN — экземпляр подсистемы приемника, соединенного треугольником (описание подсистемы содержится в блоке `.SUBCKT LOAD_TRIANGLEENDS`).

Напомним, что по правилам SPICE имя псевдо-элемента должно начинаться с латинской буквы "X".

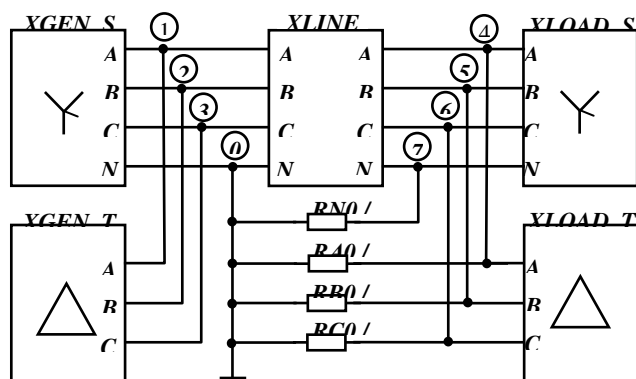


Рис. 5.8. Обобщенная схема трехфазной линии в SPICE-обозначениях

На рис. 5.8 псевдо-элементы обозначены прямоугольниками, внутри которых указаны имена внешних полюсов подсхем, используемые в их описаниях. Эти имена, перечисленные в директивах .SUBCKT, являются локальными внутри описаний и поэтому могут совпадать для разных подсхем. Так, например, имена *AG*, *BG*, *CG* используются в описаниях подсхем *GEN_STAR*, *GEN_TRIANGLE* и *LINE*.

Глобальные узлы рассматриваемой трехфазной цепи обозначены цифрами 0, 1, 2, ...7. В этих узлах псевдо-элементы соединяются своими внешними полюсами, образуя единую цепь. В качестве «земли» (узел 0) выбрана нейтральная точка генератора *NG*.

Высокоомные резисторы *RA0*, *RB0*, *RC0*, *RN0* необходим для исключения «повисания» узлов 4...7 в тех случаях, когда один или несколько зажимов приемника отключены от линии. Сопротивления этих резисторов приняты равными 1 ТОм = 10^{12} Ом. Расчет проводится на частоте 50 Гц. Текстовое описание (схемный файл *primer5_0.cir*) имеет вид

(НАЧАЛО)	(ПРОДОЛЖЕНИЕ)
PHASE-3	.SUBCKT LOAD_STAR A B C N
SPICE2)	VAA A2 N1 AC 0
*	VAB B2 N1 AC 0
.SUBCKT GEN_STAR AG BG CG NG	VAC C2 N1 AC 0
VEA A2 NG AC 220 0	VAN N1 N AC 0
VEB B2 NG AC 220 -120	RA A1 A2 100
VEC C2 NG AC 220 120	RB B1 B2 100
RAG A1 A2 1N	RC C1 C2 100
RBG B1 B2 1N	LA A A1 0.1
RCG C1 C2 1N	LB B B1 0.1
LAG AG A1 1P	LC C C1 0.1
LBG BG B1 1P	.ENDS
LCG CG C1 1P	
.ENDS	.SUBCKT LOAD_TRIANGLE A B C
	VAA A A0 AC 0
.SUBCKT GEN_TRIANGLE AG BG CG	VAB B B0 AC 0
VEA A2 BG AC 220 0	VAC C C0 AC 0
VEB B2 CG AC 220 -120	VAAB A2 B0 AC 0
VEC C2 AG AC 220 120	VABC B2 C0 AC 0
RAG A1 A2 1N	VACA C2 A0 AC 0
RBG B1 B2 1N	RAB A1 A2 100
RCG C1 C2 1N	RBC B1 B2 100
LAG AG A1 1P	RCA C1 C2 100
LBG BG B1 1P	LAB A0 A1 0.1
LCG CG C1 1P	LBC B0 B1 0.1
.ENDS	LCA C0 C1 0.1
	.ENDS
.SUBCKT LINE AG BG CG NG	
+ AL BL CL NL	*===== 3-PHASE SYSTEM =====*
VLA AG A1 AC 0	RA0 4 0 1T
VLB BG B1 AC 0	RB0 5 0 1T
VLC CG C1 AC 0	RC0 6 0 1T
VLN N1 NG AC 0	RN0 7 0 1T
RLA A1 A2 1N	*----- generators -----
RLB B1 B2 1N	XGEN_STAR 1 2 3 0 GEN_STAR

```
RLC C1 C2 1N
RLN N1 N2 1N
LLA A2 AL 1P
LLB B2 BL 1P
LLC C2 CL 1P
LLN N2 NL 1P
.ENDS
```

```
XGEN_TRIAN 1 2 3 GEN_TRIANGLE
*
*----- line -----
XLINE 1 2 3 0 4 5 6 7 LINE
*
*----- loads -----
XLOAD_STAR 4 5 6 7 LOAD_STAR
XLOAD_TRIAN 4 5 6 LOAD_TRIANGLE
*
.AC LIN 1 50 50
.PRINT AC ALL
.END
```

В данном файле объединены описания всех трехфазных подсхем, составленных выше. Описание, собственно, самой схемы рис. 5.8 состоит всего из девяти предложений, следующих за комментарием

```
*===== 3-PHASE SYSTEM =====*
```

В предложениях, описывающих псевдо-элементы, указаны номера глобальных узлов, к которым они подключены. Так, например, предложением

```
XGEN_STAR 1 2 3 0 GEN_STAR
```

задается псевдо-элемент с именем *XGEN_STAR*, являющийся экземпляром подсхемы *GEN_STAR* и подключенный своими внешними полюсами *AG*, *BG*, *CG*, *NG* к глобальным узлам 1, 2, 3, 0 соответственно.

Предложение

```
XGEN_TRIAN 1 2 3 GEN_TRIANGLE
```

описывает псевдо-элемент с именем *XGEN_TRIAN*, являющийся экземпляром подсхемы *GEN_TRIANGLE* и подключенный своими внешними полюсами *AG*, *BG*, *CG* к глобальным узлам 1, 2, 3 соответственно.

Трехфазные источники, соединенные звездой (*XGEN_STAR*) и треугольником (*XGEN_TRIAN*), включены параллельно, что бывает довольно редко. Обычно в цепи действует только один источник. В этом случае описание псевдо-элемента другого источника следует удалить или закомментировать.

Трехфазные приемники, соединенные звездой (*XLOAD_STAR*) и треугольником (*XLOAD_TRIAN*), тоже включены параллельно, что встречается довольно часто. При необходимости учесть только один приемник описание псевдо-элемента другого приемника следует удалить или закомментировать.

Директива *.AC LIN 1 50 50* задает расчетную частоту 50 Гц. Директива *.PRINT AC ALL* выводит на печать все комплексные величины, сохраненные по умолчанию, в алгебраической форме записи.

Рассмотрим наиболее характерные варианты конфигураций трехфазных цепей:

1) четырехпроводная система, образованная соединением фаз источника (звезда) и приемника (звезда), с нейтральным проводом (обозначение Y/Y);

2) трехпроводная система, образованная соединением фаз источника (звезда) и приемника (звезда), без нейтрального провода (обозначение Y/Y);

3) трехпроводная система, образованная источником, соединенным звездой, и приемником, соединенным треугольником (обозначение Y/Δ);

4) трехпроводная система, образованная источником и приемником, каждый из которых соединен треугольником (обозначение Δ/Δ);

5) трехпроводная система, образованная источником, соединенным треугольником и приемником, соединенным звездой (обозначение Δ/Υ).

В каждом из этих варианте при постановке конкретных расчетных задач возможны различные допущения относительно параметров системы:

1) источник может быть идеальным симметричным (с нулевыми внутренними сопротивлениями фаз) или неидеальным симметричным (с активными или активно-индуктивными внутренними сопротивлениями фаз);

2) линейные провода могут быть идеальными с (нулевыми сопротивлениями) или неидеальными. Возможны обрывы линейных проводов и их короткие замыкания;

3) нагрузка может быть симметричной, несимметричной, иметь различный характер в разных фазах. Возможны обрывы фаз приемника, а также их короткие замыкания.

Все перечисленные варианты при указанных допущениях могут быть рассчитаны с помощью вышеприведенного универсального описания (primer5_0.cir) при небольших его модификациях. Далее мы рассмотрим некоторые часто встречающиеся варианты задач анализа трехфазных систем

5.5. Четырехпроводная система

ПРИМЕР 5.1. Определить токи и напряжения приемника в системе Υ/Υ с фазным действующим значением напряжения источника 220 В на частоте 50 Гц. Приемник симметричный, в каждой фазе последовательно включены резистор 100 Ом и индуктивность 0,1 Гн. Рассмотреть два случая:

1) нормальный режим работы (все линейные провода исправны);

2) аварийный режим (произошел обрыв линейного провода фазы В).

Будем полагать источник и линию идеальными, поскольку в условии задачи не оговорено иное. Тогда тексты всех подсхем универсального описания остаются без изменений. Действительно, в блоке .SUBCKT GEN_STAR уже задана симметричная трехфазная система ЭДС, соединенная звездой, с действующими значениями напряжений фаз 220 В. Внутренние параметры заданы настолько малыми значениями, что на заданной частоте $f=50$ Гц внутренним сопротивлением можно пренебречь. То же самое можно сказать о линии (блок .SUBCKT LINE). Описание приемника .SUBCKT LOAD_STAR также соответствует условию.

Единственные изменения, которые нужно сделать, заключаются в исключении из схемы источника и приемника, соединенных треугольником. Для этого добавим символы комментариев (звездочки) перед описаниями псевдо-элементов XGEN_TRIAN и XLOAD_TRIAN. Таким образом, эти элементы исключаются из схемы и остаются только источник и приемник, соединенные звездой с нейтральным проводом:

```
XGEN_STAR 1 2 3 0 GEN_STAR
*XGEN_TRIAN 1 2 3 GEN_TRIANGLE
XLINE 1 2 3 0 4 5 6 7 LINE
XLOAD_STAR 4 5 6 7 LOAD_STAR
*XLOAD_TRIAN 4 5 6 LOAD_TRIANGLE
```

Сохраним сделанные изменения в файле с именем primer5_1_1.cir и затем откроем его в программе WinSpice3. На печать, как всегда, директивой .PRINT AC ALL выведутся значения всех переменных, сохраненных по умолчанию. К ним относятся потенциалы всех узлов, токи источников напряжения и токи индуктивных элементов. Однако обозначения некоторых из них имеют необычный вид и нуждаются в пояснениях.

Дело в том, что, большинство элементов и узлов данной задачи описаны в под-
схемах, то есть являются локальными объектами. Их имена, как уже отмечалось выше,
могут совпадать в разных подсхемах, что вызывает неоднозначность. Поэтому про-
грамма WinSpice3 автоматически добавляет к обозначениям локальных узлов, слева
через двоеточие, имя псевдо-элемента. В результате получается полное (составное)
имя, которое в действительности используется программой. Так, например, узел *A1*
(рис. 5.6, *a*) подсхемы *LOAD_STAR* имеет полное имя `xload_star:a1`. Потенциал этого узла
выводится программой WinSpice3 в виде

```
xload_star:a1 = 2.002374e+02,-6.29064e+01,
```

хотя, строго говоря, должно было быть напечатано

```
V(xload_star:a1) = 2.002374e+02,-6.29064e+01.
```

Аналогично, потенциал узла *A1* (рис. 5.7) подсхемы *LINE* выводится в виде

```
xline:a1 = 2.200000e+02,-1.07056e-14.
```

Несколько сложнее строятся обозначения элементов. Чтобы отличить их от уз-
лов, добавляется не только имя псевдо-элемента, но и буквенный код элемента.
Например, источник-амперметр *VAA* (рис. 5.6, *a*) подсхемы *LOAD_STAR* имеет полное
имя `v:xload_star:vaa`. Здесь *v* —буквенный код источника напряжения. Поэтому ток
фазы *A*, измеряемый этим амперметром, выводится в виде.

```
v:xload_star:vaa#branch = 2.002374e+00,-6.29064e-01.
```

По аналогии, запись

```
l:xgen_star:lbg#branch = 1.545985e+00,1.419595e+00
```

обозначает ток, протекающий через индуктивный элемент *LBG* (рис. 5.3) под-
схемы *GEN_STAR*.

Полный список имен всех сохраненных по умолчанию переменных доступен, как
всегда, по командам **LET** или **DISPLAY**. Рассмотренные полные имена можно использо-
вать в интерактивных вычислениях. Переведем, например, значение тока фазы *A* в
показательную форму. Выполним команду вычисления модуля тока

```
print mag(v:xload_star:vaa#branch).
```

Получаем результат

```
mag(v:xload_star:vaa#branch) = 2.098862e+00.
```

Далее выполняем команду для определения начальной фазы в градусах

```
print ph(v:xload_star:vaa#branch).
```

Получаем результат

```
ph(v:xload_star:vaa#branch) = -1.74406e+01.
```

Окончательно комплекс тока фазы *A* имеет вид $\dot{I}_A = 2,099e^{-j17,44^\circ}$ А.

Разумеется, вводить каждый раз подобные команды затруднительно. Поэтому
их можно включить в текстовое описание, используя стиль SPICE3 (см. пример 4.3.3).
Вполне допустимо использовать также стиль SPICE2 (см. табл. 4.1). Например, полу-
ченный выше комплекс тока фазы *A* в показательной форме, можно напечатать, доба-
вив в схемный файл `primer5_1_1.cir` директиву

```
.PRINT AC IM(v:xload_star:vaa) IP(v:xload_star:vaa).
```

Аналогично комплексы токов остальных фаз и нейтрального провода выводятся следующими директивами:

```
.PRINT AC IM(v:xload_star:vab) IP(v:xload_star:vab)
.PRINT AC IM(v:xload_star:vac) IP(v:xload_star:vac)
.PRINT AC IM(v:xload_star:van) IP(v:xload_star:van).
```

Искомые фазные и линейные напряжения определяются через разности потенциалов глобальных узлов 4...7 (рис. 5.8). Из рисунка видно, что к этим узлам подключен приемник своими внешними полюсами *A*, *B*, *C*, *N*. Таким образом, фазные напряжения приемника:

```
.PRINT AC VM(4,7) VP(4,7)
.PRINT AC VM(5,7) VP(5,7)
.PRINT AC VM(6,7) VP(6,7).
```

Линейные напряжения:

```
.PRINT AC VM(4,5) VP(4,5)
.PRINT AC VM(5,6) VP(5,6)
.PRINT AC VM(6,4) VP(6,4).
```

Напряжение смещения нейтрали (разность потенциалов между нейтральными точками приемника и источника):

```
.PRINT AC VM(7,0) VP(7,0).
```

Все вышеперечисленные директивы **.PRINT** добавлены в схемный файл *primer5_1_1.cir*. Полученные в результате его исполнения величины, сведены в колонку «Симметричная нагрузка», табл. 5.1.

Проанализируем полученные значения. Фазные напряжения приемника и источника равны, что обусловлено идеальностью линии. Видно, что фазные и линейные напряжения приемника образуют симметричные системы векторов, причем для модулей выполняется соотношение

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}. \quad (5.6)$$

Токи также представляют собой симметричную систему векторов, отстающую от системы фазных напряжений на угол $17,44^\circ$. Ток и напряжение нейтрали близки к нулю, из чего следует, что нейтральный провод при симметричной нагрузке не нужен.

Таблица 5.1

Величина	Полное SPICE-имя	Симметричная нагрузка		Обрыв линейного провода фазы <i>B</i>	
		модуль	фаза (град.)	модуль	фаза (град.)
Ток фазы <i>A</i>	v:xload_star:vaa#branch	2,099 А	-17,44	2,099 А	-17,44
Ток фазы <i>B</i>	v:xload_star:vab#branch	2,099 А	-137,44	$2,2 \cdot 10^{-10}$ А ≈ 0	-120,0
Ток фазы <i>C</i>	v:xload_star:vac#branch	2,099 А	102,56	2,099 А	102,56
Ток нейтрали	v:xload_star:van#branch	$7,723 \cdot 10^{-16}$ А ≈ 0	-20,37	2,099 А	42,56
Фазное напряжение <i>A</i>	v(4)-v(7)	220,0 В	$-4,886 \cdot 10^{-15}$ ≈ 0	220,0 В	$-4,96 \cdot 10^{-10}$ ≈ 0

Величина	Полное SPICE-имя	Симметричная нагрузка		Обрыв линейного провода фазы <i>B</i>	
		модуль	фаза (град.)	модуль	фаза (град.)
Фазное напряжение <i>B</i>	v(5)-v(7)	220,0 В	-120,0	$2,306 \cdot 10^{-8}$ В ≈ 0	-102,5
Фазное напряжение <i>C</i>	v(6)-v(7)	220,0 В	120,0	220,0 В	120,0
Линейное напряжение <i>AB</i>	v(4)-v(5)	381,05 В	30,00	220,0 В	$5,366 \cdot 10^{-9}$ ≈ 0
Линейное напряжение <i>BC</i>	v(5)-v(6)	381,05 В	-90,0	220,0 В	-60
Линейное напряжение <i>CA</i>	v(6)-v(4)	381,05 В	150,0	381,05 В	150,0
Напряжение нейтрали	v(7)	$7,595 \cdot 10^{-15}$ В ≈ 0	-178,2	$2,199 \cdot 10^{-9}$ В ≈ 0	60

Теперь перейдем к рассмотрению режима обрыва линейного провода фазы *B*. Для этого в описании подсхемы LINE (схемный файл `primer5_1_1.cir`) зададим активное сопротивление *RLB* линейного провода фазы *B* очень большой величиной (1 ТОМ). Строка описания примет вид

RLB B1 B2 1T

После сохранения файла под именем `primer5_1_2.cir` и его загрузки в WinSpice3 получены результаты, которые сведены в колонку «Обрыв линейного провода фазы *B*», табл. 5.1. Из сравнения с симметричным режимом следует, что обрыв не повлиял на работу фаз *A* и *C*, то есть работа фаз независима. Ток и напряжение фазы *B* упали до нуля. Действующие значения линейных напряжений *AB* и *BC* уменьшились с 381,05 В до 220 В (или в $\sqrt{3}$ раз). Все системы векторов приемника несимметричны. Следствием несимметрии токов является появление тока в нейтральном проводе.

ПРИМЕР 5.2. Определить токи и напряжения приемника в системе Υ/Υ с фазным действующим значением напряжения источника 380 В. Приемник несимметричный, комплексные сопротивления фаз имеют следующие значения:

$$\underline{Z}_a = (150 + j45) \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_b = (80 - j50) \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_c = j100 \text{ Ом}.$$

Сопротивления проводов симметричной линии $\underline{Z}_\pi = (10 + j15) \text{ Ом}$. Сопротивление нейтрального провода $\underline{Z}_n = (15 + j7) \text{ Ом}$.

Рассмотреть два случая:

- 1) нормальный режим работы (все фазы приемника исправны);
- 2) аварийный режим (произошел обрыв фазы *B* приемника).

Будем полагать источник идеальным, поскольку в условии задачи не оговорено иное. Фаза *A* приемника имеет активно-индуктивный характер, фаза *B* — активно-емкостный, фаза *C* — чисто индуктивный характер.

Заметим, что в данном примере заданы комплексные сопротивления на некоторой неизвестной частоте. Аналогичная ситуация была в примере 4.3, где формально угловая частота была задана равной единице $\omega = 1 \text{ с}^{-1}$ или $f = \omega/(2\pi) = 0,159155 \text{ Гц}$. Тогда из (4.9) следует, что вместо индуктивности в генри надо задавать индуктивное сопротивление в омах, а вместо емкости в фарадах — емкостную проводимость $1/X_C$ в сименсах.

Возьмем за основу текстовое описание предыдущего примера (схемный файл primer5_1_2.cir). Изменим описания подсхем источника, линии и приемника в соответствии с первым условием задачи, а также зададим расчетную частоту 0,159155 Гц. Скорректированное текстовое описание (файл primer5_2_1.cir) имеет вид

(НАЧАЛО)	(ПРОДОЛЖЕНИЕ)
PRIMER 5.2.1(STYLE SPICE2)	.SUBCKT LOAD_TRIANGLE A B C
*	VAA A A0 AC 0
.SUBCKT GEN_STAR AG BG CG NG	VAB B B0 AC 0
VEA A2 NG AC 380 0	VAC C C0 AC 0
VEB B2 NG AC 380 -120	VAAB A2 B0 AC 0
VEC C2 NG AC 380 120	VABC B2 C0 AC 0
RAG A1 A2 1N	VACA C2 A0 AC 0
RBG B1 B2 1N	RAB A1 A2 100
RCG C1 C2 1N	RBC B1 B2 100
LAG AG A1 1P	RCA C1 C2 100
LBG BG B1 1P	LAB A0 A1 0.1
LCG CG C1 1P	LBC B0 B1 0.1
.ENDS	LCA C0 C1 0.1
	.ENDS
CG .SUBCKT GEN_TRIANGLE AG BG	*===== 3-PHASE SYSTEM =====*
VEA A2 BG AC 220 0	RA0 4 0 1T
VEB B2 CG AC 220 -120	RB0 5 0 1T
VEC C2 AG AC 220 120	RC0 6 0 1T
RAG A1 A2 1N	RN0 7 0 1T
RBG B1 B2 1N	*----- generators -----
RCG C1 C2 1N	XGEN_STAR 1 2 3 0 GEN_STAR
LAG AG A1 1P	*XGEN_TRIAN 1 2 3 GEN_TRIANGLE
LBG BG B1 1P	*
LCG CG C1 1P	*----- line -----
.ENDS	XLIN 1 2 3 0 4 5 6 7 LINE
	*
.SUBCKT LINE AG BG CG NG	*----- loads -----
+ AL BL CL NL	XLOAD_STAR 4 5 6 7 LOAD_STAR
VLA AG A1 AC 0	*XLOAD_TRIAN 4 5 6 LOAD_TRIANGLE
VLB BG B1 AC 0	*
VLC CG C1 AC 0	.AC LIN 1 0.159155 0.159155
VLN N1 NG AC 0	.PRINT AC ALL
RLA A1 A2 10	* TOKI
RLB B1 B2 10	.PRINT AC IM(v:xload_star:vaa)
RLC C1 C2 10	+ IP(v:xload_star:vaa)
RLN N1 N2 15	.PRINT AC IM(v:xload_star:vab)
LLA A2 AL 15	+ IP(v:xload_star:vab)
LLB B2 BL 15	.PRINT AC IM(v:xload_star:vac)
LLC C2 CL 15	+ IP(v:xload_star:vac)
LLN N2 NL 7	.PRINT AC IM(v:xload_star:van)
.ENDS	+ IP(v:xload_star:van)
	* FAZN. NAPR.
.SUBCKT LOAD_STAR A B C N	.PRINT AC VM(4,7) VP(4,7)
VAA A2 N1 AC 0	.PRINT AC VM(5,7) VP(5,7)
	.PRINT AC VM(6,7) VP(6,7)

VAB B2 N1 AC 0	* LIN. NAPR
VAC C2 N1 AC 0	.PRINT AC VM(4,5) VP(4,5)
VAN N1 N AC 0	.PRINT AC VM(5,6) VP(5,6)
RA A1 A2 150	.PRINT AC VM(6,4) VP(6,4)
RB B1 B2 80	* NAPR. NEITRALI.PRINT AC VM(7,0)
RC C1 C2 1N	VP(7,0)
LA A A1 45	.END
CB B B1 0.02	
LC C C1 100	
.ENDS	

Отметим, что в описании подсхемы приемника *LOAD_STAR* вместо индуктивного элемента *LB* указан емкостный элемент *CB* с емкостью, численно равной проводимости $1/X_c = 1/50 = 0,02$ См, поскольку по условию нагрузка фазы *B* имеет активно-емкостный характер.

Полученные результаты сведены в колонку «Несимметричный приемник», табл. 5.2.

Таблица 5.2

Величина	Полное SPICE-имя	Несимметричный приемник		Обрыв фазы <i>B</i> приемника	
		модуль	фаза (град.)	модуль	фаза (град.)
Ток фазы <i>A</i>	v:xload_star:vaa#branch	1,851	-18,73	1,952	-28,80
Ток фазы <i>B</i>	v:xload_star:vab#branch	4,222	-107,26	$4,468 \cdot 10^{-10} \text{A}$ ≈ 0	-122,48
Ток фазы <i>C</i>	v:xload_star:vac#branch	3,670	41,78	3,203	45,44
Ток нейтрали	v:xload_star:van#branch	3,904	-33,97	4,179	18,73
Фазное напряжение <i>A</i>	v(4)-v(7)	289,9	-2,035	305,6	-12,10
Фазное напряжение <i>B</i>	v(5)-v(7)	398,3	-139,26	446,8	-122,48
Фазное напряжение <i>C</i>	v(6)-v(7)	367,0	131,78	320,3	135,44
Линейное напряжение <i>AB</i>	v(4)-v(5)	642,0	22,88	623,0	30,14
Линейное напряжение <i>BC</i>	v(5)-v(6)	536,6	-96,13	601,8	-91,12
Линейное напряжение <i>CA</i>	v(6)-v(4)	605,0	152,0	601,0	151,28
Напряжение нейтрали	v(7)	64,61	-8,955	69,17	43,75

Как и следовало ожидать, системы векторов тока и напряжений приемника несимметричны, соотношение (5.5) не выполняется. Ток нейтрали не равен нулю. Напряжение смещения нейтрали также отлично от нуля, поскольку нейтральный провод обладает сопротивлением.

Для моделирования режима обрыва фазы *B* достаточно положить активное сопротивление приемника очень большой величиной. Для этого в описании подсхемы *LOAD_STAR* (см. текст файла файл *primer5_2_1.cir*) надо скорректировать строку для *RB* следующим образом:

RB B1 B2 1T.

После сохранения измененного файла под именем *primer5_2_2.cir* и его открытия в WinSpice3 получим решение для рассматриваемого случая (см. колонку «Обрыв фазы *B* приемника» в табл. 5.2).

5.6. Трехпроводная система с источником, соединенным звездой

При использовании источника, соединенного звездой, и отсутствии нейтрального провода образуется трехпроводная система. Здесь в качестве приемника можно использовать как соединение звездой, так и треугольником. Рассмотрим параллельное подключение приемников обоих типов к источнику с ненулевым внутренним сопротивлением.

ПРИМЕР 5.3. Определить токи и напряжения в трехпроводной системе с источником, соединенным звездой, к которому через идеальную линию параллельно подключены два приемника: симметричный, соединенный звездой и несимметричный, соединенный треугольником. Параметры системы следующие:

1) источник: фазное напряжение — 120 В, частота 50 Гц; внутреннее резистивное сопротивление фазы 0,15 Ом, внутренняя индуктивность — 8 мГн;

2) симметричный приемник, соединенный звездой: в каждой фазе последовательно включены резистор 100 Ом и индуктивность 0,1 Гн;

3) несимметричный приемник, соединенный треугольником. В каждой фазе последовательно включены резистивный и реактивный элементы:

- в фазе *ab* сопротивление 5 Ом и емкость 440 мкФ;

- в фазе *bc* сопротивление 4 Ом и индуктивность 13 мГн;

- в фазе *ca* сопротивление 3 Ом и емкость 600 мкФ.

Для решения поставленной задачи изменим универсальное описание (схемный файл *primer5_0.cir*) следующим образом:

1) в подсхеме *GEN_STAR* укажем заданные внутренние параметры;

2) в подсхеме *LINE* зададим очень большое значение активного сопротивления нейтрального провода

RLN N1 N2 1T;

3) в подсхеме *LOAD_TRIANGLE* установим параметры треугольника в соответствии с условием;

4) закомментируем описание псевдо-элемента *XGEN_TRIAN*;

5) используем стиль SPICE3 с целью представления выходных данных в более компактном и читабельном виде.

Сохраним полученный схемный файл под именем *primer5_3.cir*:

(НАЧАЛО)
PRIMER 5.3 (STYLE SPICE3)
*
.SUBCKT GEN_STAR AG BG CG NG
VEA A2 NG AC 120 0

(ПРОДОЛЖЕНИЕ)
===== 3-PHASE SYSTEM =====
*
RA0 4 0 1T
RB0 5 0 1T

```

VEB B2 NG AC 120 -120
VEC C2 NG AC 120 120
RAG A1 A2 0.15
RBG B1 B2 0.15
RCG C1 C2 0.15
LAG AG A1 8M
LBG BG B1 8M
LCG CG C1 8M
.ENDS

```

```

.SUBCKT GEN_TRIANGLE AG BG CG
VEA A2 BG AC 220 0
VEB B2 CG AC 220 -120
VEC C2 AG AC 220 120
RAG A1 A2 1N
RBG B1 B2 1N
RCG C1 C2 1N
LAG AG A1 1P
LBG BG B1 1P
LCG CG C1 1P
.ENDS

```

```

.SUBCKT LINE AG BG CG NG
+ AL BL CL NL
VLA AG A1 AC 0
VLB BG B1 AC 0
VLC CG C1 AC 0
VLN N1 NG AC 0
RLA A1 A2 1N
RLB B1 B2 1N
RLC C1 C2 1N
RLN N1 N2 1T
LLA A2 AL 1P
LLB B2 BL 1P
LLC C2 CL 1P
LLN N2 NL 1P
.ENDS

```

```

.SUBCKT LOAD_STAR A B C N
VAA A2 N1 AC 0
VAB B2 N1 AC 0
VAC C2 N1 AC 0
VAN N1 N AC 0
RA A1 A2 100
RB B1 B2 100
RC C1 C2 100
LA A A1 0.1
LB B B1 0.1
LC C C1 0.1

```

```

RC0 6 0 1T
RN0 7 0 1T
*----- generators -----
XGEN_STAR 1 2 3 0 GEN_STAR
*XGEN_TRIAN 1 2 3 GEN_TRIANGLE
*
*----- line -----
XLINE 1 2 3 0 4 5 6 7 LINE
*
*----- loads -----
XLOAD_STAR 4 5 6 7 LOAD_STAR
XLOAD_TRIAN 4 5 6 LOAD_TRIANGLE
*
.control
destroy all
set units=degrees
ac lin 1 50 50
*
*
***** PRIEMNIK-ZVEZDA *****
echo ===== TOKI ZVEZDY=====
print mag(v:xload_star:vaa#branch)
+ ph(v:xload_star:vaa#branch)
print mag(v:xload_star:vab#branch)
+ ph(v:xload_star:vab#branch)
print mag(v:xload_star:vac#branch)
+ ph(v:xload_star:vac#branch)
echo ===== FAZN. NAPR. ZVEZDY=====
print mag(V(4,7)) ph(V(4,7))
print mag(V(5,7)) ph(V(5,7))
print mag(V(6,7)) ph(V(6,7))
echo ===== LIN. NAPR. ZVEZDY=====
print mag(V(4,5)) ph(V(4,5))
print mag(V(5,6)) ph(V(5,6))
print mag(V(6,4)) ph(V(6,4))
echo ===== NAPR. NEYTRALI=====
print mag(V(7,0)) ph(V(7,0))
*
***** PRIEMNIK-TREUGOLNIK *****
echo ===== FAZNYE TOKI TREUGOLNIKA===
print mag(v:xload_trian:vaab#branch)
+ ph(v:xload_trian:vaab#branch)
print mag(v:xload_trian:vabc#branch)
+ ph(v:xload_trian:vabc#branch)
print mag(v:xload_trian:vaca#branch)
+ ph(v:xload_trian:vaca#branch)
echo ===== LINEYNIE TOKI TREUGOLNIKA=
print mag(v:xload_trian:vaa#branch)
+ ph(v:xload_trian:vaa#branch)
print mag(v:xload_trian:vab#branch)

```

<pre>.ENDS .SUBCKT LOAD_TRIANGLE A B C VAA A A0 AC 0 VAB B B0 AC 0 VAC C C0 AC 0 VAAB A2 B0 AC 0 VABC B2 C0 AC 0 VACA C2 A0 AC 0 RAB A1 A2 5 RBC B1 B2 4 RCA C1 C2 3 CAB A0 A1 440U LBC B0 B1 13M CCA C0 C1 600U .ENDS</pre>	<pre>+ ph(v:xload_trian:vab#branch) print mag(v:xload_trian:vac#branch) + ph(v:xload_trian:vac#branch) * ***** LINIYA ***** echo ===== TOKI LINII ===== print mag(v:xline:vla#branch) + ph(v:xline:vla#branch) print mag(v:xline:vlb#branch) + ph(v:xline:vlb#branch) print mag(v:xline:vlc#branch) + ph(v:xline:vlc#branch) * .endc * .END</pre>
---	---

Применение операторов **echo** позволяет напечатать соответствующие заголовки перед группами результатов:

```
AC analysis ... 100%
===== TOKI ZVEZDY=====
mag(v:xload_star:vaa#branch) = 1.669501e+00
ph(v:xload_star:vaa#branch) = -9.69246e+01
mag(v:xload_star:vab#branch) = 5.679887e-01
ph(v:xload_star:vab#branch) = 1.411183e+02
mag(v:xload_star:vac#branch) = 1.451224e+00
ph(v:xload_star:vac#branch) = 6.368092e+01
===== FAZN. NAPR. ZVEZDY=====
mag((v(4)-v(7))) = 1.749949e+02
ph((v(4)-v(7))) = -7.94841e+01
mag((v(5)-v(7))) = 5.953584e+01
ph((v(5)-v(7))) = 1.585589e+02
mag((v(6)-v(7))) = 1.521154e+02
ph((v(6)-v(7))) = 8.112151e+01
===== LIN. NAPR. ZVEZDY=====
mag((v(4)-v(5))) = 2.125944e+02
ph((v(4)-v(5))) = -6.57390e+01
mag((v(5)-v(6))) = 1.508111e+02
ph((v(5)-v(6))) = -1.21542e+02
mag((v(6)-v(4))) = 3.224595e+02
ph((v(6)-v(4))) = 9.150352e+01
===== NAPR. NEYTRALI=====
mag(v(7)) = 1.541461e-14
ph(v(7)) = -9.56332e+00
===== FAZNYE TOKI TREUGOLNIKA=====
mag(v:xload_trian:vaab#branch) = 2.417480e+01
ph(v:xload_trian:vaab#branch) = -1.03893e+01
mag(v:xload_trian:vabc#branch) = 2.638121e+01
ph(v:xload_trian:vabc#branch) = -1.67138e+02
```

```

mag(v:xload_trian:vaca#branch) = 5.290860e+01
ph(v:xload_trian:vaca#branch) = 1.520159e+02
===== LINEYNIE TOKI TREUGOLNIKA=====
mag(v:xload_trian:vaa#branch) = 7.630320e+01
ph(v:xload_trian:vaa#branch) = -2.24884e+01
mag(v:xload_trian:vab#branch) = 4.952085e+01
ph(v:xload_trian:vab#branch) = -1.78249e+02
mag(v:xload_trian:vac#branch) = 3.719599e+01
ph(v:xload_trian:vac#branch) = 1.243788e+02
===== TOKI LINII =====
mag(v:xline:vla#branch) = 7.676799e+01
ph(v:xline:vla#branch) = -2.36888e+01
mag(v:xline:vlb#branch) = 4.995327e+01
ph(v:xline:vlb#branch) = -1.78673e+02
mag(v:xline:vlc#branch) = 3.792736e+01
ph(v:xline:vlc#branch) = 1.224666e+02
Command execution done.

```

В полученной распечатке использованы полные SPICE-имена токов, протекающих через встроенные амперметры. Часть этих имен и их расшифровка приведены в табл. 5.1 и табл. 5.2. Смысл остальных имен можно установить по аналогии.

Анализ результатов показывает, что в данной схеме фазные и линейные напряжения симметричного приемника, соединенного звездой, несимметричны. Тем не менее, напряжение смещения нейтрали равно нулю. Попробуйте обосновать этот факт теоретически.

ПРИМЕР 5.4. К источнику, соединенному звездой (рис. 5.9), через линию с сопротивлением \underline{Z}_L подключены несимметричный трехфазный приемник, соединенный треугольником ($\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$), и два однофазных приемника ($\underline{Z}_4, \underline{Z}_5$). Определить указанные на схеме токи, падения напряжения на линейных проводах и напряжения приемника. Найти комплексную, полную, активную и реактивную мощности источника.

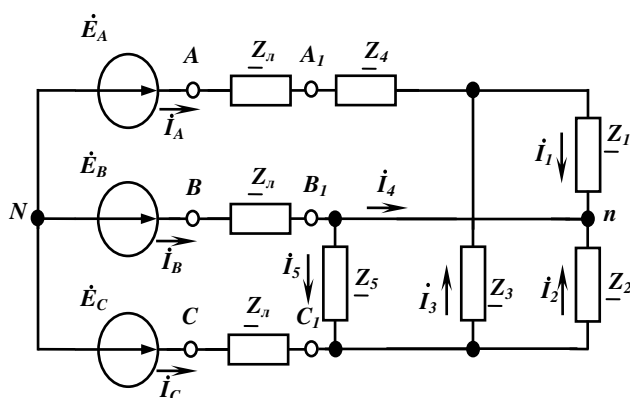


Рис. 5.9. Трехфазная трехпроводная система: $E_\phi = 220$ В; $\underline{Z}_L = (2+j2)$ Ом; $\underline{Z}_1 = (10+j10)$ Ом; $\underline{Z}_2 = (15-j10)$ Ом; $\underline{Z}_3 = (10+j14)$ Ом; $\underline{Z}_4 = (13+j5)$ Ом; $\underline{Z}_5 = (15+j20)$ Ом

Данная схема отличается от универсальной (рис. 5.8) наличием однофазных активно-индуктивных приемников Z_4 , Z_5 . Для их описания необходимо ввести дополнительные узлы 8...11 (см. рис. 5.10). Здесь приемники Z_4 , Z_5 представлены последовательными соединениями элементов R_4 , L_4 и R_5 , L_5 . Для измерения тока I_5 включен амперметр $VA5$.

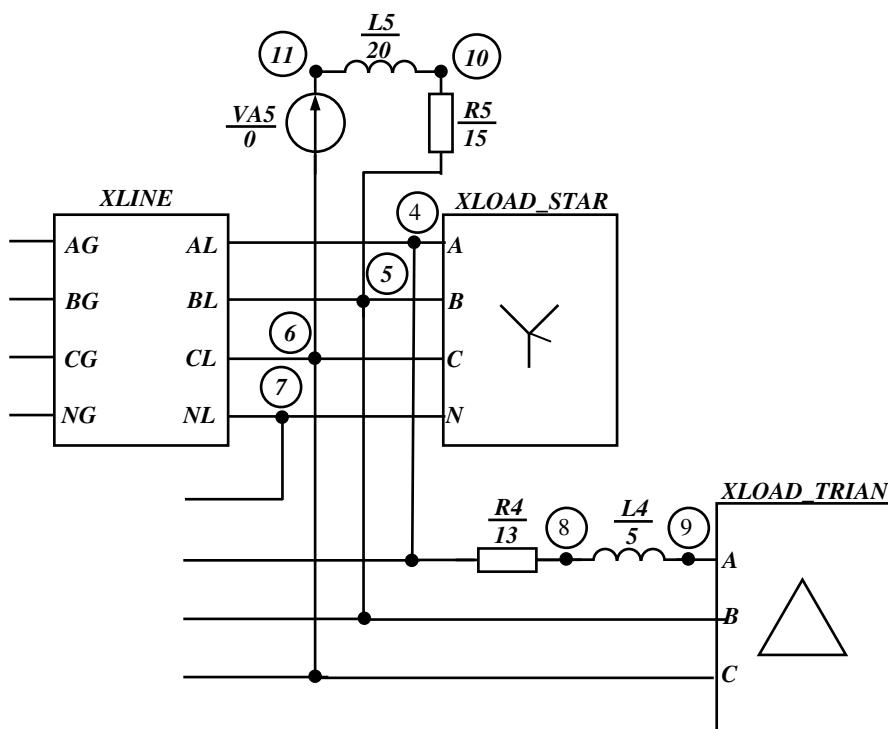


Рис. 5.10. Участок обобщенной схемы трехфазной линии рис. 5.8 с подключенными однофазными приемниками в SPICE-обозначениях

Аналогично примерам 4.3 и 5.2 положим частоту $f = 0,159155$ Гц. Тогда вместо индуктивности в генри надо задавать индуктивное сопротивление в омах, а вместо емкости в фарадах — емкостную проводимость $1/X_C$ в сименсах.

Для решения поставленной задачи изменим универсальное описание (схемный файл `primer5_0.cir`) следующим образом:

1) в подсхеме *LINE* зададим параметры линии в соответствии с условием задачи, а также установим очень большое значение активного сопротивления нейтрального провода;

2) в подсхеме *LOAD_TRIANGLE* установим параметры треугольника в соответствии с условием;

3) в текст основной схемы добавим описания элементов R_4 , L_4 , R_5 , L_5 и $VA5$ (см. рис. 5.10). Закомментируем описания псевдо-элементов *XGEN_TRIAN* и *XLOAD_STAR*;

4) добавим операторы для печати результатов и вычисления мощностей по формулам

$$\underline{S} = \dot{E}_A \hat{I}_A + \dot{E}_B \hat{I}_B + \dot{E}_C \hat{I}_C; P = \operatorname{Re}(\underline{S}); Q = \operatorname{Im}(\underline{S}); S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (5.7)$$

где \underline{S} , P , Q , S — комплексная, активная, реактивная и полная мощности трех-фазного источника соответственно.

Сохраним полученный схемный файл под именем primer5_4.cir:

(НАЧАЛО)

(ПРОДОЛЖЕНИЕ)

```
PRIMER 5.4 (STYLE
SPICE3)
*
.SUBCKT GEN_STAR AG
BG CG NG
VEA A2 NG AC 220 0
VEB B2 NG AC 220 -
120 VEC C2 NG AC 220
120
RAG A1 A2 1N
RBG B1 B2 1N
RCG C1 C2 1N
LAG AG A1 1P
LBG BG B1 1P
LCG CG C1 1P
.ENDS

.SUBCKT GEN_TRIANGLE
AG BG CG
VEA A2 BG AC 220 0
VEB B2 CG AC 220 -
120 VEC C2 AG AC 220
120
RAG A1 A2 1N
RBG B1 B2 1N
RCG C1 C2 1N
LAG AG A1 1P
LBG BG B1 1P
LCG CG C1 1P
.ENDS

.SUBCKT LINE AG BG CG
NG
+ AL BL CL NL
VLA AG A1 AC 0
VLB BG B1 AC 0
VLC CG C1 AC 0
VLN N1 NG AC 0
RLA A1 A2 2
RLB B1 B2 2
RLC C1 C2 2
RLN N1 N2 1T
```

```
***** 3-PHASE SYSTEM *****
RA0 4 0 1T
RB0 5 0 1T
RC0 6 0 1T
RN0 7 0 1T
R4 4 8 13
L4 8 9 5
R5 5 10 15
L5 10 11 20
VA5 11 6 AC 0
*----- generators -----
XGEN_STAR 1 2 3 0 GEN_STAR
*XGEN_TRIAN 1 2 3 GEN_TRIANGLE
*
*----- line -----
XLINE 1 2 3 0 4 5 6 7 LINE
*
*----- loads -----
*XLOAD_STAR 4 5 6 7 LOAD_STAR
XLOAD_TRIAN 9 5 6 LOAD_TRIANGLE
*
.control
destroy all
set units=degrees
ac lin 1 0.159155 0.159155
*
***** PRIEMNIK-TREUGOLNIK *****
echo ===== FAZNYE TOKI TREUGOLNIKA=====
print mag(v:xload_trian:vaab#branch)
+ ph(v:xload_trian:vaab#branch)
print mag(v:xload_trian:vabc#branch)
+ ph(v:xload_trian:vabc#branch)
print mag(v:xload_trian:vaca#branch)
+ ph(v:xload_trian:vaca#branch)
echo ===== LINEYNE TOKI TREUGOLNIKA===
print mag(v:xload_trian:vaa#branch)
+ ph(v:xload_trian:vaa#branch)
print mag(v:xload_trian:vab#branch)
+ ph(v:xload_trian:vab#branch)
print mag(v:xload_trian:vac#branch)
+ ph(v:xload_trian:vac#branch)
echo ===== NAPR. TREUGOLNIKA=====
print mag(v(9,5)) ph(v(9,5))
print mag(v(5,6)) ph(v(5,6))
```

```

LLA A2 AL 2
LLB B2 BL 2
LLC C2 CL 2
LLN N2 NL 1P
.ENDS

.SUBCKT LOAD_STAR A
B C N
VAA A2 N1 AC 0
VAB B2 N1 AC 0
VAC C2 N1 AC 0
VAN N1 N AC 0
RA A1 A2 100
RB B1 B2 100
RC C1 C2 100
LA A A1 0.1
LB B B1 0.1
LC C C1 0.1
.ENDS

.SUBCKT
LOAD_TRIANGLE A B C
VAA A A0 AC 0
VAB B B0 AC 0
VAC C C0 AC 0
VAAB A2 B0 AC 0
VABC B2 C0 AC 0
VACA C2 A0 AC 0
RAB A1 A2 10
RBC B1 B2 15
RCA C1 C2 10
LAB A0 A1 10
CBC B0 B1 0.1
LCA C0 C1 14
.ENDS

```

```

print mag(v(6,9)) ph(v(6,9))
*
***** ODNOfAZNYE PRIEMNIKI *****
echo ===== TOK V NAGRUZKE Z5 =====
print mag(va5#branch) ph(va5#branch)
echo ===== TOK V NAGRUZKE Z4 =====
print mag(v:xload_trian:vaa#branch)
+ ph(v:xload_trian:vaa#branch)
***** LINIYA *****
echo ===== TOKI LINII =====
print mag(v:xline:vla#branch)
+ ph(v:xline:vla#branch)
print mag(v:xline:vlb#branch)
+ ph(v:xline:vlb#branch)
print mag(v:xline:vlc#branch)
+ ph(v:xline:vlc#branch)
echo === PADENIE NAPR. NA LINII ===
print mag(v(1,4)) ph(v(1,4))
print mag(v(2,5)) ph(v(2,5))
print mag(v(3,6)) ph(v(3,6))
*****
echo ===== MOSHNOST =====
let ias=real(v:xgen_star:vea#branch)
+ -j(imag(v:xgen_star:vea#branch))
let ibs=real(v:xgen_star:veb#branch)
+ -j(imag(v:xgen_star:veb#branch))
let ics=real(v:xgen_star:vec#branch)
+ -j(imag(v:xgen_star:vec#branch))
let scomp=-(v(1)*ias+v(2)*ibs+v(3)*ics)
let p=real(scomp)
let q=imag(scomp)
let s=mag(scomp)
print scomp p q s
.endc
.END

```

Знак «минус» при расчете комплексной мощности scomp по формуле (5.7) $\text{let scomp} = -(v(1) \cdot ias + v(2) \cdot ibs + v(3) \cdot ics)$ обусловлен несовпадением условно-положительных направлений токов источника (рис. 5.9) с их SPICE-направлениями (против ЭДС).

Результаты выводятся на печать в форме аналогичной предыдущему примеру, и ввиду их большого объема здесь не приводятся.

Выводы

1. Трехфазные цепи занимают центральное место в практической электротехнике и энергетике и в простейшем случае состоят из источника, линии и приемника.

2. При SPICE-моделировании трехфазной цепи целесообразно использовать представление отдельных ее участков в виде подсхем. Такой подход позволил создать

обобщенное описание (п. 5.4, рис. 5.8, схемный файл **primer5_0.cir**), которое можно модифицировать в соответствии с условием конкретной задачи.

3. Обрывы линейных проводов, нейтрального провода и фаз приемника моделируются заданием очень большого резистивного сопротивления (например, 1 ТОм) в описаниях соответствующих подсхем.

4. Объем выводимых результатов в задачах анализа трехфазных цепей может быть довольно велик. Кроме токов и напряжений, могут потребоваться расчеты дополнительных искомых величин. Поэтому в данном случае целесообразно использовать стиль SPICE3, значительно облегчающий процедуры получения и представления решения.

Глава 6. ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКИ

Одна из основных задач электротехники состоит в передаче энергии или информации от источника к приемнику через промежуточное звено (линию электропередач, делитель напряжения, усилитель, линию связи, трансформатор, фильтр и т. п.). При этом интерес представляют токи и напряжения источника и приемника. Процессы внутри звена в данном случае несущественны, поэтому его целесообразно представить компактной моделью или, как говорят, «черным ящиком». Эти соображения приводят к понятию четырехполюсника, как электрической цепи, имеющий два входных и два выходных зажима (или полюса) (рис. 6.1).

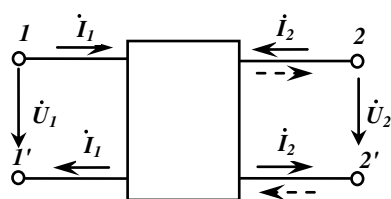


Рис. 6.1. Проходной четырехполюсник

К входным зажимам (1—1') подключается источник, задающий входное напряжение \dot{U}_1 и обуславливающий входной ток \dot{I}_1 , а также остальные токи и напряжения. К выходным зажимам (2—2') подключается приемник, на котором создается выходное напряжение \dot{U}_2 и выходной ток \dot{I}_2 . Пользуясь понятием четырехполюсника, легче реализовать системный подход при анализе цепей и сформулировать требования к отдельным звеньям.

Следует подчеркнуть, что для понятия четырехполюсника существенно разделение зажимов на пары²⁸, то есть каждой паре зажимов соответствует свои напряжение и ток. Поэтому иногда используют термин «проходной четырехполюсник». Схема, показанная на рис. 6.2, также имеет четыре зажима, но здесь каждому из них (а не паре) соответствуют определенные ток и напряжение.

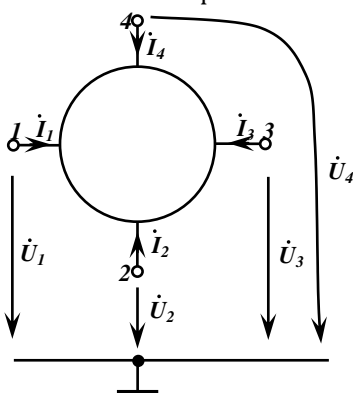


Рис. 6.2. Четырехполюсный элемент

²⁸ Пару зажимов часто называют «портом», поэтому в англоязычной литературе для четырехполюсника используется термин «two-port».

Такая схема не является проходным четырехполюсником и требует несколько иного описания, рассматриваемого обычно в теории многополюсников.

Как и все электрические цепи, четырехполюсники могут быть линейными и нелинейными, активными (автономными и неавтономными) и пассивными, взаимными (обратимыми) и невзаимными (необратимыми). В данной главе рассматриваются проходные линейные четырехполюсники двух типов при гармоническом воздействии:

- 1) пассивные, состоящие из R -, L -, C -, M -элементов, являющиеся всегда взаимными;
- 2) активные неавтономные, содержащие кроме R -, L -, C -, M -элементов, управляемые источники. Эти четырехполюсники в общем случае являются невзаимными.

6.1. Уравнения четырехполюсника

Для каждого из рассмотренных ранее двухполюсных элементов R , L , C , имеющих по одной паре зажимов, уравнение представляет собой закон Ома в комплексной форме. Таким образом, двухполюсник описывается одним уравнением. Четырехполюсник, обладающий двумя парами зажимов должен, соответственно, характеризоваться двумя уравнениями, связывающими величины $\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_2$.

Чтобы получить два уравнения, необходимо выбрать любые две величины из четырех в качестве зависимых переменных (функций). Тогда две оставшиеся величины следует рассматривать в качестве независимых переменных (аргументов). Поэтому уравнения четырехполюсника можно записать в шести формах (число сочетаний из четырех по два). Формы обозначаются буквами Y, Z, H, A, G, B и записываются на основе принципа наложения. Наиболее широко используются первые четыре из них, имеющие следующий вид:

$$\begin{aligned} Y\text{-форма: } \dot{I}_1 &= \underline{Y}_{11}\dot{U}_1 + \underline{Y}_{12}\dot{U}_2; \\ \dot{I}_2 &= \underline{Y}_{21}\dot{U}_1 + \underline{Y}_{22}\dot{U}_2, \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} Z\text{-форма: } \dot{U}_1 &= \underline{Z}_{11}\dot{I}_1 + \underline{Z}_{12}\dot{I}_2; \\ \dot{U}_2 &= \underline{Z}_{21}\dot{I}_1 + \underline{Z}_{22}\dot{I}_2, \end{aligned} \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned} H\text{-форма: } \dot{U}_1 &= \underline{H}_{11}\dot{I}_1 + \underline{H}_{12}\dot{I}_2; \\ \dot{I}_2 &= \underline{H}_{21}\dot{I}_1 + \underline{H}_{22}\dot{I}_2, \end{aligned} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} A\text{-форма: } \dot{U}_1 &= \underline{A}\dot{U}_2 + \underline{B}\dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 &= \underline{C}\dot{U}_2 + \underline{D}\dot{I}_2, \end{aligned} \quad (6.4)$$

где $\underline{Y}_{11}, \underline{Y}_{12}, \underline{Y}_{21}, \underline{Y}_{22}$ — Y -параметры; $\underline{Z}_{11}, \underline{Z}_{12}, \underline{Z}_{21}, \underline{Z}_{22}$ — Z -параметры; $\underline{H}_{11}, \underline{H}_{12}, \underline{H}_{21}, \underline{H}_{22}$ — H -параметры; $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$ — A -параметры.

Для четырехполюсников, содержащих реактивные элементы, все параметры зависят от частоты.

В электронике при описании транзисторов в основном используются Y - и H -формы, характеризующиеся Y - и H -параметрами соответственно.

В электроэнергетике и электросвязи чаще применяется A -форма, в которой независимыми переменными являются выходные величины, а зависимыми — входные. Иногда A -форму называют T -формой²⁹ или «формой передачи». Содержание этого термина раскрывается ниже при анализе физического смысла A -параметров.

Из теории известно, что для взаимных четырехполюсников только три параметра из четырех независимы. Этот факт следует из соотношений:

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1; \quad \underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}; \quad \underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}; \quad \underline{H}_{12} = -\underline{H}_{21}. \quad (6.5)$$

²⁹ От английского «transmission» — передача

Для таких четырехполюсников параметры различных форм записи уравнений связаны между собой формулами перехода, приводимыми в литературе [1, с. 143]. В связи с этим для взаимных четырехполюсников в дальнейшем будем рассматривать A -форму в качестве основной, а при необходимости перехода к другим формам пользоваться следующими соотношениями [1, с. 142]:

$$Y\text{-форма: } \underline{Y}_{11} = \frac{\underline{D}}{\underline{B}}; \quad \underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21} = -\frac{1}{\underline{B}}; \quad \underline{Y}_{22} = \frac{\underline{A}}{\underline{B}}; \quad (6.6)$$

$$Z\text{-форма: } \underline{Z}_{11} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = \frac{1}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_{22} = \frac{\underline{D}}{\underline{C}}; \quad (6.7)$$

$$H\text{-форма: } \underline{H}_{11} = \frac{\underline{B}}{\underline{D}}; \quad \underline{H}_{12} = -\underline{H}_{21} = \frac{1}{\underline{D}}; \quad \underline{H}_{22} = \frac{\underline{C}}{\underline{D}}. \quad (6.8)$$

В выражениях (6.5) — (6.8) знаки соответствуют исторически сложившимся условно-положительным направлениям токов и напряжений. Для Y -, Z - и H -форм направления указаны сплошными стрелками на рис. 6.1. Для A -формы направление выходного тока противоположно и указано пунктирной стрелкой.

Следует помнить, что *свойство взаимности нарушается* при наличии в цепи хотя бы одного управляемого источника и, следовательно, в подобных случаях формулы (6.5) — (6.8) неприменимы. Соотношения для невзаимных четырехполюсников рассматриваются в п. 6.4.

Определение параметров четырехполюсника по его электрической схеме является довольно громоздкой вычислительной задачей. Рассмотрим, каким образом можно применить программу WinSpice3 для ее решения.

6.2. Определение a -параметров по опытам холостого хода и короткого замыкания на выходе

Пусть задана некоторая электрическая цепь, которую необходимо представить четырехполюсником в A -форме. Параметры цепи, частота, а также пары входных и выходных зажимов известны.

Существуют четыре способа определения A -параметров:

- 1) составление системы уравнений одним из методов теории цепей с последующим ее преобразованием к виду (6.4);
- 2) расчет через входные и взаимные проводимости входной и выходной ветвей;
- 3) расчет по входным сопротивлениям в режимах холостого хода, прямого и обратного короткого замыкания;
- 4) расчет через обратные коэффициенты передачи в режимах холостого хода и короткого замыкания на выходе.

Используем последний способ, связанный с разрывом и коротким замыканием только выходной ветви. Следует отметить, что в данном случае выявляется физический смысл A -параметров.

Пусть к входу четырехполюсника подключен идеальный источник напряжения \dot{U}_1 , а на выходе имеет место холостой ход, то есть зажимы 2—2' разомкнуты. Тогда $\dot{I}_2 = 0$ и из уравнений (6.4) имеем («хх» обозначает режим холостого хода):

$$\underline{A} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_{2\text{хх}}}; \quad \underline{C} = \frac{\dot{I}_{1\text{хх}}}{\dot{U}_{2\text{хх}}}. \quad (6.9)$$

Видно, что параметр \underline{A} является безразмерным и может быть истолкован как комплексный коэффициент деления (или ослабления) входного напряжения в режиме холостого хода. Эта величина, обратная коэффициенту передачи напряжения с входа на выход. Параметр \underline{C} имеет размерность проводимости и является величиной, обратной передаточному сопротивлению в режиме холостого хода.

Пусть на выходе четырехполюсника имеет место короткое замыкание, то есть зажимы 2—2' соединены между собой. Тогда $\dot{U}_2 = 0$ и из уравнений (6.4) имеем («кз» обозначает режим короткого замыкания):

$$\underline{B} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_{2\text{кз}}}; \quad \underline{D} = \frac{\dot{I}_{1\text{кз}}}{\dot{I}_{2\text{кз}}}. \quad (6.10)$$

Видно, что параметр \underline{B} имеет размерность сопротивления и является величиной, обратной передаточной проводимости в режиме короткого замыкания. Параметр \underline{D} является безразмерным и может быть истолкован как комплексный коэффициент деления входного тока в режиме короткого замыкания. Эта величина, обратная коэффициенту передачи тока с входа на выход.

Приведенный способ также справедлив и для невзаимных неавтономных четырехполюсников, к которым в общем случае относятся цепи с управляемыми источниками.

ПРИМЕР 6.1. Определить А-параметры четырехполюсника, представленного на рис 6.3, на частоте 4600 Гц.

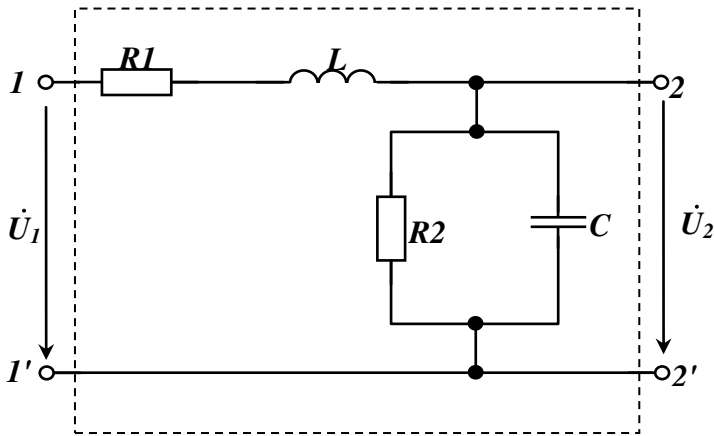


Рис. 6.3. Пассивный линейный RLC-четыреполюсник: $R_1=1$ Ом, $R_2=1$ кОм, $L=1$ мГн, $C=1$ мкФ

Схема четырехполюсника в SPICE-обозначениях приведена на рис. 6.4. К входу подключен идеальный источник напряжения 1 В с нулевой начальной фазой. Последовательно с источником включен амперметр VA1 для измерения входного тока. К выходу подсоединен высокоомный резистор RN, изначально имитирующий разрыв на выходе. Амперметр VA2 измеряет выходной ток. Полярность включения амперметров согласована с условно-положительными направлениями токов для А-формы (то есть слева направо на рис. 6.1)

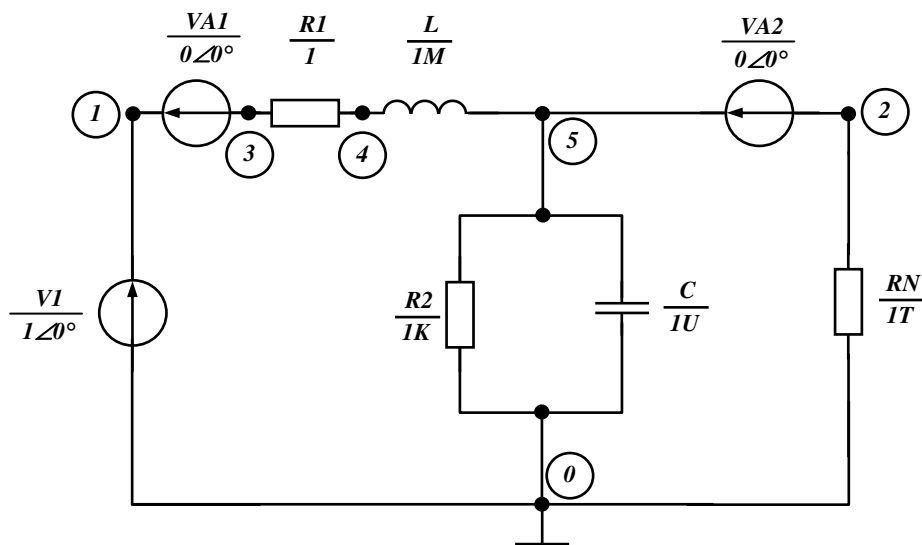


Рис. 6.4. Схема четырехполюсника в SPICE-обозначениях

Так как потребуются вычисления по формулам (5.9), (5.10) и изменение сопротивления RN , то целесообразнее использовать стиль SPICE3. Текстовое описание схемы (файл primer6_1.cir) имеет вид:

(НАЧАЛО)

PRIMER 6.1 (STYLE SPICE3)

V1 1 0 AC 1 DC 0

VA1 1 3 DC 0

VA2 5 2 DC 0

R1 3 4 1

R2 5 0 1K

L 4 5 1M

C 5 0 1U

*HOLOSTOY HOD

RN 2 0 1T

*

.control

destroy all

set units=degrees

echo

echo ***** HOLOSTOY HOD

ac lin 1 4600 4600

*

echo === PARAMETR A ===

let A=v(1)/v(2)

print A mag(A) ph(A)

(ПРОДОЛЖЕНИЕ)

echo === PARAMETR C ===

let CC=va1#branch/v(2)

print CC mag(CC) ph(CC)

*

echo

echo **** KOROTKOYE ZAMYKANIE ****

alter RN=1N

ac lin 1 4600 4600

*

echo === PARAMETR B ===

let B=v(1)/va2#branch

print B mag(B) ph(B)

*

echo === PARAMETR D ===

let D=va1#branch/va2#branch

print D mag(D) ph(D)

*

.endc

.END

Директива ac lin 1 4600 4600 задает выполнение анализа по переменному току на заданной частоте 4600 Гц. По результатам анализа вычисляются параметры A и C

по формулам (6.9) при сопротивлении $R_N=1 \text{ ТОМ}=10^{12} \text{ Ом}$, соответствующем режиму холостого хода. Параметр \underline{C} обозначен в тексте описания как CC . Дело в том, что в WinSpice3 по умолчанию в переменной C вещественного типа хранится скорость света. При попытке присвоить этой переменной комплексное значение возникает ошибка.

Параметры \underline{B} и \underline{D} вычисляются по формулам (6.10) при сопротивлении $R_N=1 \text{ нОМ}=10^{-9} \text{ Ом}$, соответствующем режиму короткого замыкания. Для этого в сценарии использована команда `alter RN=1N`. Сразу после нее повторно задается директива `ac lin 1 4600 4600`, задающая выполнение анализа по переменному току на заданной частоте 4600 Гц. Повторное задание этой директивы принципиально необходимо, так как после изменения R_N следует заново пересчитать все токи и напряжения.

Все параметры выводятся как в алгебраической, так и в показательной форме.

Executing commands ...

**** KOROTKOYE ZAMYKANIE ****

***** HOLOSTOY HOD *****

```
TEMP=27 deg C
AC analysis ... 100%
=== PARAMETR A ===
a = 1.656367e-01,5.780530e-02
mag(a) = 1.754336e-01
ph(a) = 1.923840e+01
=== PARAMETR C ===
cc = 1.000000e-03,2.890265e-02
mag(cc) = 2.891995e-02
ph(cc) = 8.801842e+01
```

```
TEMP=27 deg C
AC analysis ... 100%
=== PARAMETR B ===
b = 1.000000e+00,2.890265e+01
mag(b) = 2.891995e+01
ph(b) = 8.801842e+01
=== PARAMETR D ===
d = 1.000000e+00,2.890110e-11
mag(d) = 1.000000e+00
ph(d) = 1.655911e-09
Command execution done.
```

Для проверки правильности определения A -параметров взаимного четырехполюсника вычислим равенство (6.5). Для этого наберем в командной строке `print a*d-b*cc` и нажмем клавишу `Enter`. Получим следующий результат `a*d-b*cc = 1.000000e+00,-1.66533e-16`, что соответствует теории. Окончательно, в показательной форме решение задачи имеет вид:

$$\underline{A} = 0,1754 e^{j19,24^\circ}, \quad \underline{B} = 28,92 e^{j88,02^\circ} \text{ Ом}, \quad \underline{C} = 0,02892 e^{j88,02^\circ} \text{ См}, \quad \underline{D} = 1.$$

ПРИМЕР 6.2. Определить частотные характеристики параметров четырехполюсника рис. 6.3 в диапазоне частот 100 Гц...10 кГц.

Для решения поставленной задачи достаточно в текстовом описании предыдущего примера изменить директивы анализа по переменному току в соответствии с условием:

`ac dec 100 100 10K`

Данной директивой устанавливается логарифмический масштаб по оси частот, причем на каждой декаде вычисляется по 100 точек (см. текстовое описание в файле `primer6_2.cir`). Для построения графиков в текст добавлены команды **plot**. Таким образом, для каждого A -параметра выводятся таблицы и графики частотных характеристик. На рис. 6.5, *а, б* приведены АЧХ и ФЧХ для параметра \underline{A} .

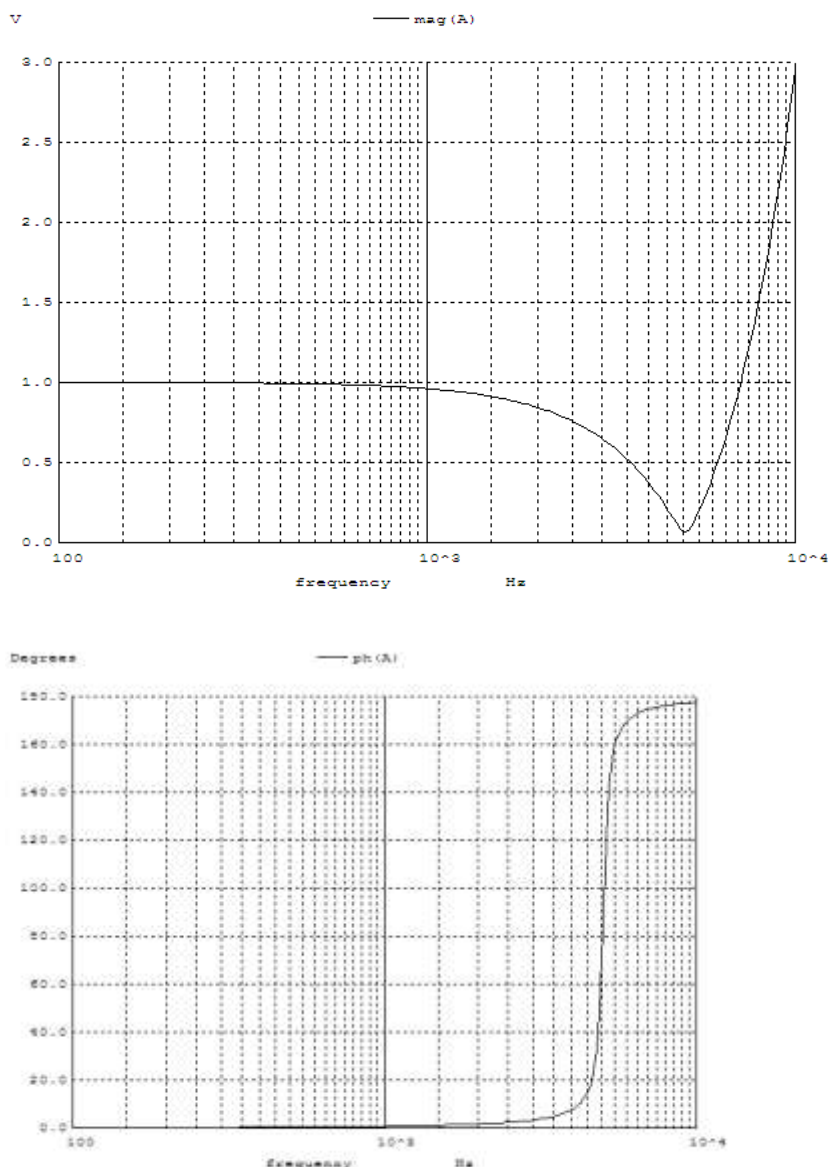


Рис. 6.5. Амплитудно-частотная (а) и фазочастотная (б) характеристики параметра A

Отметим, что масштаб оси ординат на графике АЧХ параметра A указан в вольтах. Однако выше упоминалось, что A является безразмерной величиной. Дело в том, что вычисление производится через напряжения по формуле

$$\text{let } A = v(1)/v(2,5)$$

и размерность вектора левой части определяется размерностями операндов правой части. По аналогии с языками программирования такой подход можно назвать неявным определением размерности. В данном случае это привело к неверной единице измерения, но если бы правая часть была бы суммой или разностью, то размерность левой части была бы корректной.

Аналогичная ситуация имеет место с размерностью параметра \underline{D} , которая на графике указана в амперах, когда в действительности этот параметр безразмерный. Интересно, что для параметров \underline{C} и \underline{B} , вычисляемых через разнородные величины (токи и напряжения) размерности оказываются корректными (\underline{C} — размерность проводимости, \underline{B} — размерность сопротивления).

Таким образом, можно сделать вывод, что при вычислениях с размерными величинами в WinSpice3, размерность результата может оказаться не соответствующей действительности. Следовательно, это надо учитывать при интерпретации полученного решения. Напомним, что типы и векторов можно просмотреть, выполнив команды **let** или **display**.

При необходимости строгого соответствия размерности величины ее физическому смыслу надо использовать команду **settype** (установить тип физической величины), применявшуюся ранее в примерах 3.12, 3.13, 3.15. Эта команда устанавливает физический тип вектора. Например, перед выводом графика АЧХ безразмерного параметра \underline{A} следует выполнить команду

```
settype notype A ,
которая задает безразмерную величину.
```

6.3. Обобщенное описание для определения частотных характеристик параметров взаимных четырехполюсников

После того, как мы научились определять A -параметры, перейдем к определению Y -, Z - и H -параметров произвольного взаимного четырехполюсника по формулам (6.5)—(6.8) в диапазоне частот. Целесообразно выполнить описание четырехполюсников в виде подсхемы, поскольку для разных схем будет изменяться только содержимое блока SUBCKT...ENDS. Источник $V1$, нагрузку RN и амперметры ($VA1$, $VA2$) вынесем наружу, так что подсхема четырехполюсника не будет содержать дополнительных элементов. Собственно четырехполюсник описан в виде подсхемы с именем TWOPORT, а экземпляру этой подсхемы присвоено имя X4POL (рис. 6.6).

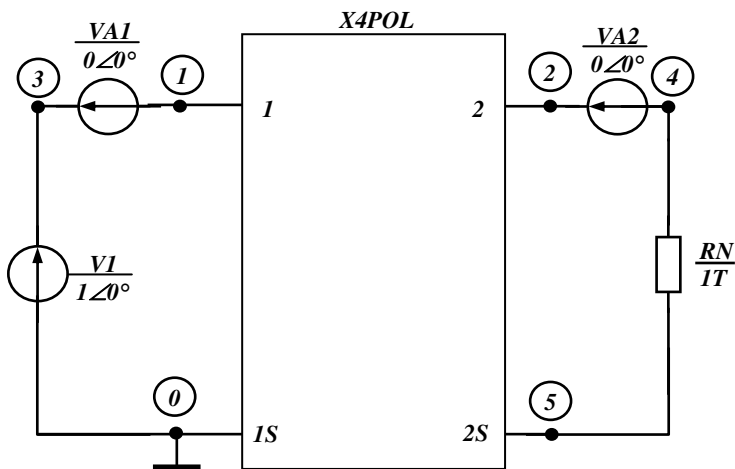


Рис. 6.6. Схема с четырехполюсником в SPICE-обозначениях

По схеме рис. 6.6 составим следующее обобщенное текстовое описание.

(НАЧАЛО)

OBSCHEE OPISANIE (STYLE SPICE3)

* RASCHET CHASTOTNYH HARAKTERIS-
TIK * PARAMETROV VZAIMNOGO 4-POLUSNIKA

* V DIAPAZONE FSTART...FSTOP

V1 3 0 AC 1 DC 0

VA1 3 1 DC 0

VA2 2 4 DC 0

*HOLOSTOY HOD

RN 4 5 1T

X4POL 1 0 2 5 TWOPORT

*

* PODSHEMA 4-POLUSNIKA

.SUBCKT TWOPORT 1 1S 2 2S

* 1, 1S - vxodnye polusa

* 2, 2S - vyhodnye polusa

.....

ОПИСАНИЕ СХЕМЫ ЧЕТЫРЕХПО- ЛЮСНИКА

.....

.ENDS

*

.control

destroy all

set units=degrees

echo

echo +++ A-PARAMETRY +++

echo ***** HOLOSTOY HOD *****

ac FSTART FSTOP

*

echo === PARAMETR A ===

let A=v(1)/v(2,5)

print A mag(A) ph(A)

*plot mag(A)

*plot ph(A)

*

echo === PARAMETR C ===

let CC=va1#branch/v(2,5)

print CC mag(CC) ph(CC)

*plot mag(CC)

*plot ph(CC)

*

echo

echo *** KOROTKOYE ZAMYKANIE ***

alter RN=1N

ac FSTART FSTOP

*

echo === PARAMETR B ===

let B=v(1)/va2#branch

(ПРОДОЛЖЕНИЕ)

*

echo

echo ++++ Y-PARAMETRY ++++

let Y11=D/B

let Y12=-(1/B)

let Y21=Y12

let Y22=A/B

echo === PARAMETR Y11 ===

print Y11 mag(Y11) ph(Y11)

*plot mag(Y11)

*plot ph(Y11)

echo === PARAMETR Y12 ===

print Y12 mag(Y12) ph(Y12)

*plot mag(Y12)

*plot ph(Y12)

echo === PARAMETR Y21 ===

print Y21 mag(Y21) ph(Y21)

*plot mag(Y21)

*plot ph(Y21)

echo === PARAMETR Y22 ===

print Y22 mag(Y22) ph(Y22)

*plot mag(Y22)

*plot ph(Y22)

*

echo

echo ++++ Z-PARAMETRY ++++

let Z11=A/CC

let Z12=1/CC

let Z21=Z12

let Z22=D/CC

echo === PARAMETR Z11 ===

print Z11 mag(Z11) ph(Z11)

echo === PARAMETR Z12 ===

print Z12 mag(Z12) ph(Z12)

echo === PARAMETR Z21 ===

print Z21 mag(Z21) ph(Z21)

echo === PARAMETR Z22 ===

print Z22 mag(Z22) ph(Z22)

*

echo

echo ++++ H-PARAMETRY ++++

let H11=A/CC

let H12=1/CC

let H21=Z12

let H22=D/CC

echo === PARAMETR H11 ===

print H11 mag(H11) ph(H11)

echo === PARAMETR H12 ===

```

print B mag(B) ph(B)
*plot mag(B)
*plot ph(B)
*
echo === PARAMETR D ===
let D=va1#branch/va2#branch
print D mag(D) ph(D)
*plot mag(D)
*plot ph(D)

```

```

print H12 mag(H12) ph(H12)
echo === PARAMETR H21 ===
print H21 mag(H21) ph(H21)
echo === PARAMETR H22 ===
print H22 mag(H22) ph(H22)
.endc
.END

```

Содержимое блока SUBCKT TWOPORT...ENDS и директива AC пока не заданы, поскольку они определяются условием конкретной задачи. В описании эти элементы выделены жирным шрифтом. Отметим, что в отличие от примеров 6.1, 6.2, здесь в расчетах вместо потенциала выходного зажима (V(2)) используется выходное напряжение (V(2,5)). Причина состоит в том, что не всегда у четырехполюсника вход и выход имеют общую точку «0», как это было на схеме рис. 6.4.

Если выполняется расчет частотных характеристик, то предпочтительной является графическая форма их представления. Например, для получения диаграмм частотных характеристик параметра A надо удалить символы комментария перед командами **plot**. В этом случае табличный вывод можно опустить, закомментировав команды **print**.

ПРИМЕР 6.3. Решить пример 6.1 с использованием приведенного выше обобщенного текстового описания и найти Y -, Z - и H -параметры четырехполюсника.

Представим заданный четырехполюсник рис. 6.3 в виде подсхемы с именем TWOPORT (см. рис. 6.7)

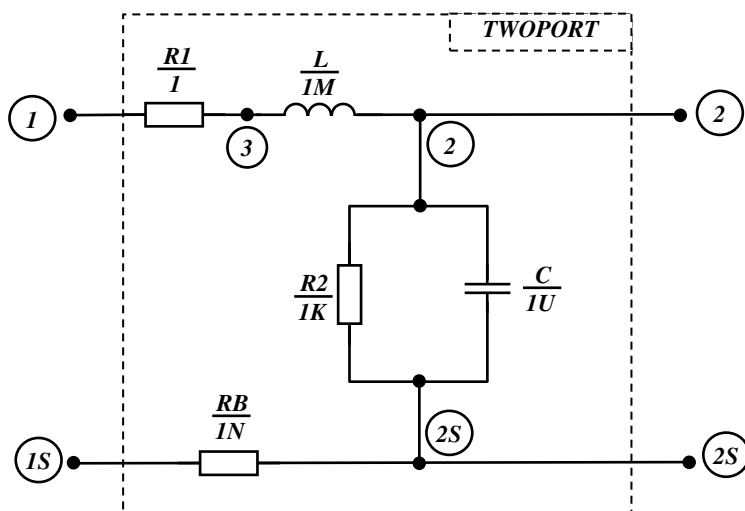


Рис. 6.7. Четырехполюсник в виде подсхемы TWOPORT

Единственный добавочный элемент $RB=1$ нОм введен для формального разделения узлов 1S и 2S, так как в противном случае вместо четырехполюсника получится трехполюсник. Описание подсхемы TWOPORT имеет вид:

```

.SUBCKT TWOPORT 1 1S 2 2S
* 1, 1S - входные полуса

```

* 2, 2S - выходные полуса

R1 1 3 1

R2 2 2S 1K

RB 1S 2S 1N

L 3 2 1M

C 2 2S 1U

.ENDS

Внесем следующие изменения в обобщенное описание:

- 1) заменим блок SUBCKT TWOPORT...ENDS на вышеприведенный;
- 2) зададим директиву AC в соответствии с условием: ac lin 1 4600 4600.

Сохраним полученный текст в файле primer6_3.cir. После его загрузки в программу WinSpice3 получим те же значения A -параметров, что и в примере 6.1, а также Y -, Z - и H -параметры для заданной частоты 4600 Гц.

ПРИМЕР 6.4. Определить A -, Y -, Z - и H -параметры резистивного четырехполюсника, схема которого показана на рис. 6.8.

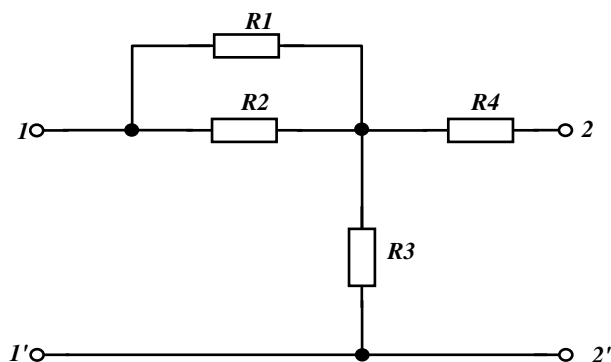


Рис. 6.8. Резистивный четырехполюсник: $R_1=30$ Ом, $R_2=20$ Ом, $R_3=24$ Ом, $R_4=12$ Ом

Представим заданный четырехполюсник рис. 6.3 в виде подсхемы с именем TWOPORT (см. рис. 6.9).

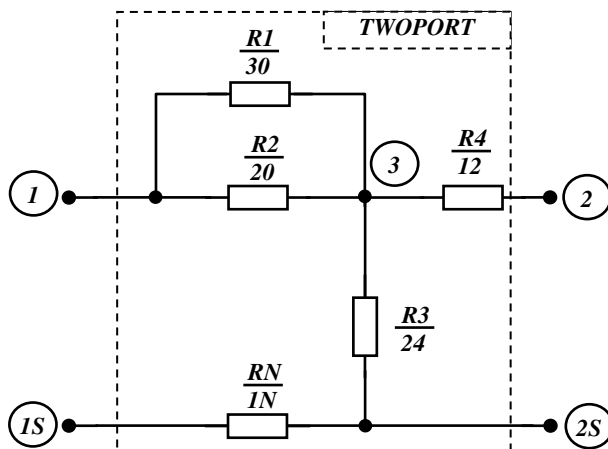


Рис. 6.9. Четырехполюсник в виде подсхемы TWOPORT

Как и в предыдущем примере, добавочный элемент $RB=1$ нОм введен для формального разделения узлов $1S$ и $2S$, так как в противном случае вместо четырехполюсника получится трехполюсник. Описание подсхемы TWOPORT имеет вид:

```
.SUBCKT TWOPORT 1 1S 2 2S
* 1, 1S - входные полуса
* 2, 2S - выходные полуса
R1 1 3 30
R2 1 3 20
R3 3 2S 24
R4 3 2 12
RB 1S 2S 1N
.ENDS
```

Заметим, что рассматриваемый четырехполюсник не содержит реактивных элементов. Следовательно, искомые параметры не зависят от частоты, и при расчете можно задать любое ненулевое ее значение, например, 1 Гц.

Внесем следующие изменения в обобщенное описание:

- 1) заменим блок SUBCKT TWOPORT...ENDS на вышеприведенный;
- 2) зададим в директиве AC частоту 1 Гц: ac lin 1 1 1.

Сохраним полученный текст в файле primer6_4.cir. После его загрузки в программу WinSpice3 получим значения A -, Y -, Z - и H -параметры резистивного четырехполюсника. Они выражаются вещественными числами, и поэтому их мнимая часть имеет нулевое значение:

(НАЧАЛО)

```
+++ A-PARAMETRY +++
***** HOLOSTOY NOD *****

TEMP=27 deg C
AC analysis ... 100%
=== PARAMETR A ===
a = 1.500000e+00,0.000000e+00
mag(a) = 1.500000e+00
ph(a) = 0.000000e+00
=== PARAMETR C ===
cc = 4.166667e-02,0.000000e+00
mag(cc) = 4.166667e-02
ph(cc) = 0.000000e+00

*** KOROTKOYE ZAMYKANIE ***

TEMP=27 deg C
AC analysis ... 100%
=== PARAMETR B ===
b = 3.000000e+01,0.000000e+00
mag(b) = 3.000000e+01
ph(b) = 0.000000e+00
=== PARAMETR D ===
d = 1.500000e+00,0.000000e+00
mag(d) = 1.500000e+00
ph(d) = 0.000000e+00
```

(ПРОДОЛЖЕНИЕ)

```
=== PARAMETR Y22 ===
y22 = 5.000000e-02,0.000000e+00
mag(y22) = 5.000000e-02
ph(y22) = 0.000000e+00

++++ Z-PARAMETRY +++
=== PARAMETR Z11 ===
z11 = 3.600000e+01,0.000000e+00
mag(z11) = 3.600000e+01
ph(z11) = 0.000000e+00
=== PARAMETR Z12 ===
z12 = 2.400000e+01,0.000000e+00
mag(z12) = 2.400000e+01
ph(z12) = 0.000000e+00
=== PARAMETR Z21 ===
z21 = 2.400000e+01,0.000000e+00
mag(z21) = 2.400000e+01
ph(z21) = 0.000000e+00
=== PARAMETR Z22 ===
z22 = 3.600000e+01,0.000000e+00
mag(z22) = 3.600000e+01
ph(z22) = 0.000000e+00

++++ H-PARAMETRY +++
=== PARAMETR H11 ===
h11 = 2.000000e+01,0.000000e+00
```

```

++++ Y-PARAMETRY ++++
=== PARAMETR Y11 ===
y11 = 5.000000e-02,0.000000e+00
mag(y11) = 5.000000e-02
ph(y11) = 0.000000e+00
=== PARAMETR Y12 ===
y12 = -3.33333e-02,-0.000000e+00
mag(y12) = 3.33333e-02
ph(y12) = -1.80000e+02
=== PARAMETR Y21 ===
y21 = -3.33333e-02,-0.000000e+00
mag(y21) = 3.33333e-02
ph(y21) = -1.80000e+02

```

```

mag(h11) = 2.000000e+01
ph(h11) = 0.000000e+00
=== PARAMETR H12 ===
h12 = 6.666667e-01,0.000000e+00
mag(h12) = 6.666667e-01
ph(h12) = 0.000000e+00
=== PARAMETR H21 ===
h21 = -6.66667e-01,-0.000000e+00
mag(h21) = 6.666667e-01
ph(h21) = -1.80000e+02
=== PARAMETR H22 ===
h22 = 2.777778e-02,0.000000e+00
mag(h22) = 2.777778e-02
ph(h22) = 0.000000e+00

```

ПРИМЕР 6.5. Определить на частоте 50 Гц A -, Y -, Z - и H -параметры линейного трансформатора, схема которого показана на рис. 6.10.

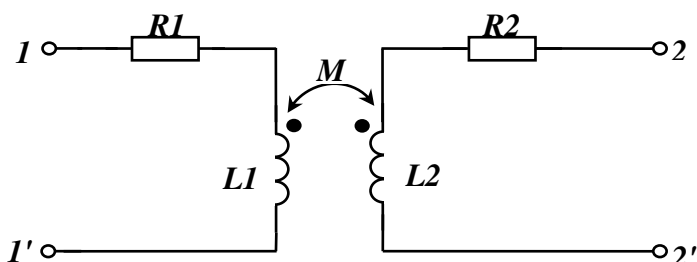


Рис. 6.10. Линейный трансформатор как четырехполюсник: $R_1=5$ Ом; $R_2=3$ Ом; $L_1=10$ мГн; $L_2=5$ мГн; $M=3$ мГн

Представим заданный четырехполюсник рис. 6.10 в виде подсхемы с именем TWOPORT (см. рис. 6.11).

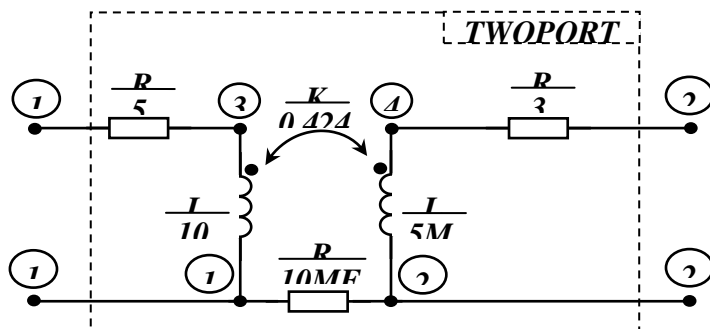


Рис. 6.11. Четырехполюсник в виде подсхемы TWOPORT

По аналогии с примером 4.10 (рис. 4.26) для связности схемы введем высокоомный резистор $R_{12}=10\text{ МОм}$, связывающий первичную и вторичную обмотки. Описание подсхемы TWOPORT имеет вид:

```
.SUBCKT TWOPORT 1 1S 2 2S
* 1, 1S - входные полуса
* 2, 2S - выходные полуса
R1 1 3 5
R2 2 4 3
R12 1S 2S 10MEG
L1 3 1S 10M
L2 4 2S 5M
K L1 L2 0.4243
.ENDS
```

Внесем следующие изменения в обобщенное описание:

- 1) заменим блок SUBCKT TWOPORT...ENDS на вышеприведенный;
- 2) зададим директиву AC в соответствии с условием: ac lin 1 50 50.

Сохраним полученный текст в файле primer6_5.cir. После его загрузки в программу WinSpice3 получим значения A -, Y -, Z - и H -параметры трансформатора:

(НАЧАЛО)

```
+++ A-PARAMETRY +++
***** HOLOSTOY HOD *****
```

```
TEMP=27 deg C
AC analysis ... 100%
=== PARAMETR A ===
a = 3.333051e+00,-5.30472e+00
mag(a) = 6.264921e+00
ph(a) = -5.78581e+01
=== PARAMETR C ===
cc = 1.666489e-12,-1.06094e+00
mag(cc) = 1.060943e+00
ph(cc) = -9.00000e+01
```

```
***** KOROTKOYE ZAMYKANIE
```

```
TEMP=27 deg C
AC analysis ... 100%
=== PARAMETR B ===
b = 1.833178e+01,-1.16212e+01
mag(b) = 2.170497e+01
ph(b) = -3.23720e+01
=== PARAMETR D ===
d = 1.666526e+00,-3.18283e+00
mag(d) = 3.592730e+00
ph(d) = -6.23635e+01
```

```
++++ Y-PARAMETRY ++++
=== PARAMETR Y11 ===
```

(ПРОДОЛЖЕНИЕ)

```
=== PARAMETR Y22 ===
y22 = 2.605525e-01,-1.24199e-01
mag(y22) = 2.886400e-01
ph(y22) = -2.54860e+01
```

```
++++ Z-PARAMETRY ++++
=== PARAMETR Z11 ===
z11 = 5.000000e+00,3.141593e+00
mag(z11) = 5.905049e+00
ph(z11) = 3.214191e+01
=== PARAMETR Z12 ===
z12 = 1.480533e-12,9.425576e-01
mag(z12) = 9.425576e-01
ph(z12) = 9.000000e+01
=== PARAMETR Z21 ===
z21 = 1.480533e-12,9.425576e-01
mag(z21) = 9.425576e-01
ph(z21) = 9.000000e+01
=== PARAMETR Z22 ===
z22 = 3.000000e+00,1.570796e+00
mag(z22) = 3.386355e+00
ph(z22) = 2.763650e+01
```

```
++++ H-PARAMETRY ++++
=== PARAMETR H11 ===
h11 = 5.232419e+00,3.019898e+00
mag(h11) = 6.041357e+00
ph(h11) = 2.999145e+01
=== PARAMETR H12 ===
h12 = 1.291109e-01,2.465836e-01
```

```

y11 = 1.433618e-01,-8.27415e-02
mag(y11) = 1.655257e-01
ph(y11) = -2.99915e+01
=== PARAMETR Y12 ===
y12 = -3.89123e-02,-2.46678e-02
mag(y12) = 4.607241e-02
ph(y12) = -1.47628e+02
=== PARAMETR Y21 ===
y21 = -3.89123e-02,-2.46678e-02
mag(y21) = 4.607241e-02
ph(y21) = -1.47628e+02

```

```

mag(h12) = 2.783399e-01
ph(h12) = 6.236350e+01
=== PARAMETR H21 ===
h21 = -1.29111e-01,-2.46584e-01
mag(h21) = 2.783399e-01
ph(h21) = -1.17636e+02
=== PARAMETR H22 ===
h22 = 2.616112e-01,-1.36979e-01
mag(h22) = 2.953028e-01
ph(h22) = -2.76365e+01

```

6.4. Обобщенное описание для определения частотных характеристик параметров невзаимных четырехполюсников

Как уже отмечалось, невзаимными (или необратимыми) являются линейные активные неавтономные четырехполюсники, содержащие кроме R -, L -, C -, M -элементов, управляемые источники. В этом случае соотношения (6.5) — (6.8) *не выполняются*, и переход от A -параметров к Y -, Z - и H -параметрам выполняется по формулам [1, с. 143]:

$$Y\text{-форма: } \underline{Y}_{11} = \frac{\underline{D}}{\underline{B}}; \quad \underline{Y}_{12} = -\frac{|A|}{\underline{B}}; \quad \underline{Y}_{21} = -\frac{1}{\underline{B}}; \quad \underline{Y}_{22} = \frac{\underline{A}}{\underline{B}}; \quad (6.11)$$

$$Z\text{-форма: } \underline{Z}_{11} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_{12} = \frac{|A|}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_{21} = \frac{1}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_{22} = \frac{\underline{D}}{\underline{C}}; \quad (6.12)$$

$$H\text{-форма: } \underline{H}_{11} = \frac{\underline{B}}{\underline{D}}; \quad \underline{H}_{12} = \frac{|A|}{\underline{D}}; \quad \underline{H}_{21} = -\frac{1}{\underline{D}}; \quad \underline{H}_{22} = \frac{\underline{C}}{\underline{D}}, \quad (6.13)$$

где $|A| = AD - BC$.

Соответственно изменятся операторы вычисления Y -, Z - и H -параметров в обобщенном текстовом описании:

```

let detA=A*D-B*CC
echo
echo +++++ Y-PARAMETRY +++++
let Y11=D/B
let Y12=-(detA/B)
let Y21=-(1/B)
let Y22=A/B

```

```

.....
echo +++++ Z-PARAMETRY +++++
let Z11=A/CC
let Z12=detA/CC
let Z21=1/CC
let Z22=D/CC

```

```

.....
echo +++++ H-PARAMETRY +++++
let H11=B/D
let H12=detA/D

```

let H21=-(1/D)
let H22=CC/D

Рассмотрим примеры использования полученного обобщенного описания невзаимного четырехполюсника.

ПРИМЕР 6.6. Определить H -параметры активного неавтономного четырехполюсника, схема которого показана на рис. 6.12.

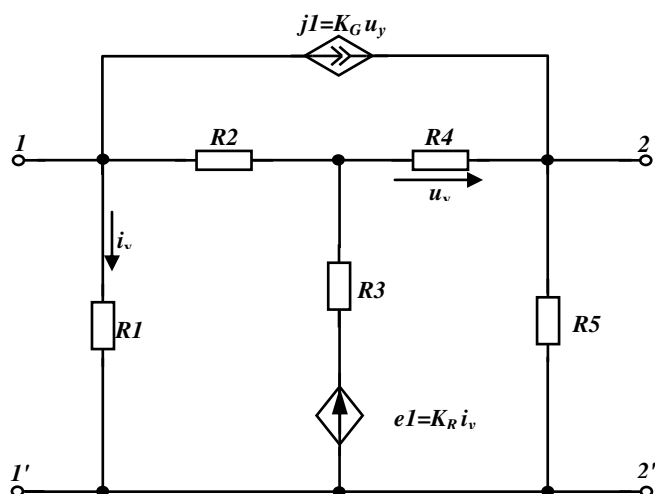


Рис. 6.12. Активный неавтономный четырехполюсник: $R_1=500$ Ом; $R_2=3$ кОм; $R_3=1$ кОм; $R_4=2$ кОм; $R_5=700$ Ом; $K_R=2$ кОм; $K_G=3$ мСм

Представим заданный четырехполюсник рис. 6.12 в виде подсхемы с именем TWOPORT (см. рис. 6.13).

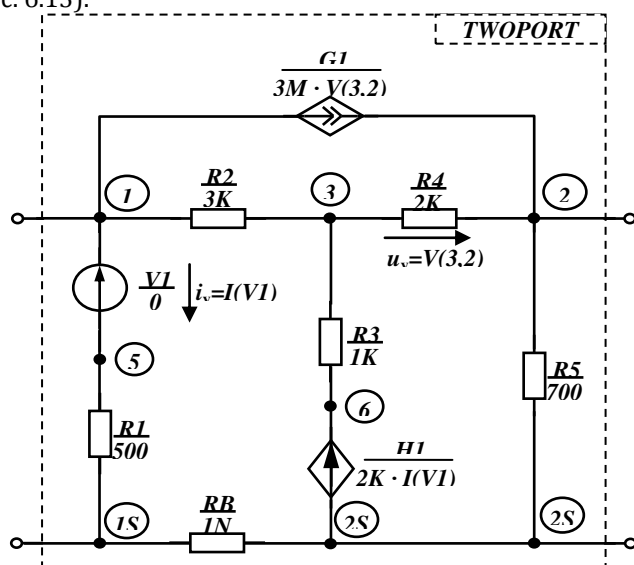


Рис. 6.13. Активный неавтономный четырехполюсник в виде подсхемы TWOPORT

Как и в примерах 6.3, 6.4, добавочный элемент $RB=1$ нОм введен для формального разделения узлов 1S и 2S, так как в противном случае вместо четырехполюсника получится трехполюсник. Для измерения управляющего тока i_y включен амперметр V1. Описание подсхемы TWOPORT имеет вид:

```
.SUBCKT TWOPORT 1 1S 2 2S
* 1, 1S - входные полуса
* 2, 2S - выходные полуса
R1 5 1S 500
V1 1 5 DC 0
R2 1 3 3K
R3 3 6 1K
R4 3 2 2K
R5 2 2S 700
RB 1S 2S 1N
H1 6 2S V1 2K
G1 1 2 3 2 3M
.ENDS
```

Заметим, что рассматриваемый четырехполюсник не содержит реактивных элементов. Следовательно, искомые параметры не зависят от частоты, и при расчете можно задать любое ненулевое ее значение, например, 1 Гц.

Внесем следующие изменения в обобщенное описание невзаимного четырехполюсника:

- 1) заменим блок SUBCKT TWOPORT...ENDS на вышеприведенный;
- 2) зададим в директиве AC частоту 1 Гц: ac lin 1 1 1.

Сохраним полученный текст в файле primer6_6.cir. После его загрузки в программу WinSpice3 получим значения A -, Y -, Z - и H -параметры четырехполюсника. Они выражаются вещественными числами, и поэтому их мнимая часть имеет нулевое значение. Искомые H -параметры:

(НАЧАЛО)

```
++++ H-PARAMETRY ++++
=== PARAMETR H11 ===
h11 = 1.157895e+02,0.000000e+00
mag(h11) = 1.157895e+02
ph(h11) = 0.000000e+00
=== PARAMETR H12 ===
h12 = 2.631579e-01,0.000000e+00
mag(h12) = 2.631579e-01
ph(h12) = 0.000000e+00
```

(ПРОДОЛЖЕНИЕ)

```
=== PARAMETR H21 ===
h21 = -9.57895e-01,-0.000000e+00
mag(h21) = 9.578947e-01
ph(h21) = -1.80000e+02
=== PARAMETR H22 ===
h22 = 1.796992e-03,0.000000e+00
mag(h22) = 1.796992e-03
ph(h22) = 0.000000e+00
```

В общепринятом виде H -параметры имеют вид:

$$H_{11} = 115,8 \text{ Ом}; H_{12} = 0,2632; H_{21} = -0,9579; H_{22} = 1,797 \cdot 10^{-3} \text{ См.}$$

Так как четырехполюсник невзаимный, то $H_{12} \neq H_{21}$. Физический смысл параметров:

- 1) H_{11} — входное сопротивление при коротком замыкании на выходе;

- 2) H_{12} — коэффициент передачи напряжения с выхода на вход при разомкнутом входе (или коэффициент внутренней обратной связи);
 3) H_{21} — коэффициент передачи тока при коротком замыкании на выходе;
 4) H_{22} — выходная проводимость при разомкнутом входе.

ПРИМЕР 6.7. Определить частотные характеристики параметров \underline{A} , \underline{D} , \underline{Z}_{11} , \underline{Y}_{22} активного неавтономного четырехполюсника, схема которого показана на рис. 6.14, в диапазоне частот 1 кГц...1 ГГц.

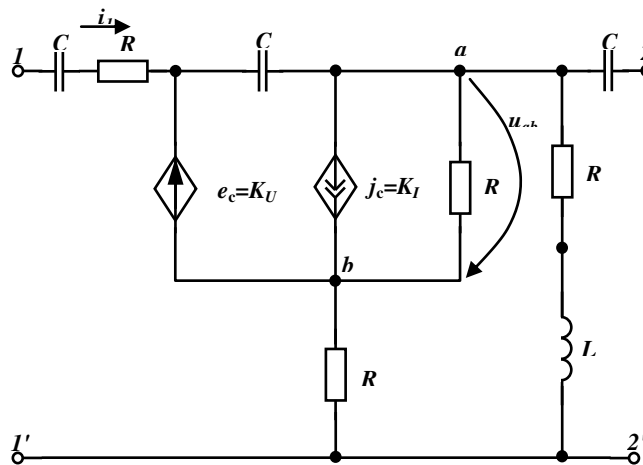


Рис. 6.14. Активный неавтономный четырехполюсник: $R_1=2$ кОм; $R_2=1$ кОм; $R_3=50$ кОм; $R_5=4,7$ кОм; $L_5=160$ мкГн; $C_1=100$ пФ; $C_2=2$ пФ; $C_3=10$ пФ; $K_U=0,01$; $K_I=30$.

Представим заданный четырехполюсник рис. 6.14 в виде подсхемы с именем TWOPORT (см. рис. 6.15).

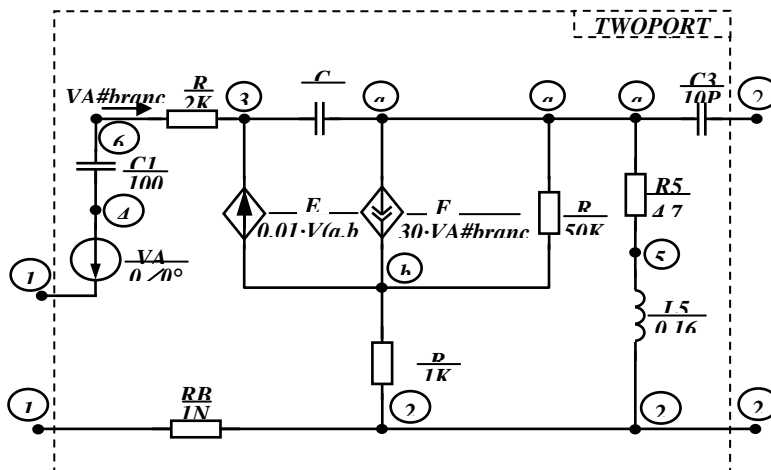


Рис. 6.15. Активный неавтономный четырехполюсник в виде подсхемы TWOPORT
 Описание подсхемы TWOPORT имеет вид:

```
.SUBCKT TWOPORT 1 1S 2 2S
* 1, 1S - входные полуса
* 2, 2S - выходные полуса
VA 1 4 DC 0
EC 3 B A B 0.01
FC A B VA 30
* L-elementy
L5 5 2S 0.16M
* C-elementy
C1 4 6 100P
C2 3 A 2P
C3 A 2 10P
* R-elementy
R1 6 3 2K
R2 B 2S 1K
R3 A B 50K
R5 A 5 4.7K
RB 1S 2S 1N
.ENDS
```

Внесем следующие изменения в обобщенное описание невзаимного четырехполюсника:

- 1) заменим блок SUBCKT TWOPORT...ENDS на вышеприведенный;
- 2) зададим в директиве AC логарифмический масштаб и вычисление 100 точек на декаду в диапазоне частот 1 кГц...1 ГГц:
ac dec 100 1K 1G;
- 3) закоментируем команды print и добавим команды plot для вывода искомых частотных характеристик;
- 4) добавим команды **settype** непосредственно перед **plot** для корректного отображения единиц измерения на графиках АЧХ.

Сохраним полученный текст в файле primer6_7.cir. Для ясности ниже этот текст приведен полностью:

```
(НАЧАЛО)
PRIMER 6.7 (STYLE SPICE3)
*
V1 3 0 AC 1 DC 0
VA1 3 1 DC 0
VA2 2 4 DC 0
*HOLOSTOY HOD
RN 4 5 1T
X4POL 1 0 2 5 TWOPORT
*
.SUBCKT TWOPORT 1 1S 2 2S
* 1, 1S - входные полуса
* 2, 2S - выходные полуса
VA 1 4 DC 0
EC 3 B A B 0.01
FC A B VA 30
* L-elementy
L5 5 2S 0.16M
```

```
(ПРОДОЛЖЕНИЕ)
echo ++++ Y-PARAMETRY ++++
let Y11=D/B
let Y12=-(detA/B)
let Y21=-(1/B)
let Y22=A/B
settype admittance Y11 Y12 Y21 Y22
echo === PARAMETR Y11 ====
*print Y11 mag(Y11) ph(Y11)
*plot mag(Y11)
*plot ph(Y11)
echo === PARAMETR Y12 ====
*print Y12 mag(Y12) ph(Y12)
*plot mag(Y12)
*plot ph(Y12)
echo === PARAMETR Y21 ====
*print Y21 mag(Y21) ph(Y21)
*plot mag(Y21)
```

```

* C-elementy
C1 4 6 100P
C2 3 A 2P
C3 A 2 10P
* R-elementy
R1 6 3 2K
R2 B 2S 1K
R3 A B 50K
R5 A 5 4.7K
RB 1S 2S 1N
.ENDS
*
.control
destroy all
set units=degrees
settype notype A
echo
echo +++ A-PARAMETRY +++
echo ***** HOLOSTOY HOD
*****
ac dec 100 1K 1G
*
echo === PARAMETR A ===
let A=v(1)/v(2,5)
settype notype A
*print A mag(A) ph(A)
plot mag(A)
plot ph(A)
*
echo === PARAMETR C ===
let CC=va1#branch/v(2,5)
*print CC mag(CC) ph(CC)
*plot mag(CC)
*plot ph(CC)
*
Echo
echo ** KOROTKOYE ZAMYKANIE **
alter RN=1N
ac dec 100 1K 1G
*
echo === PARAMETR B ===
let B=v(1)/va2#branch
*print B mag(B) ph(B)
*plot mag(B)
*plot ph(B)
*
echo === PARAMETR D ===
let D=va1#branch/va2#branch
settype notype D
*print D mag(D) ph(D)

```

```

*plot ph(Y21)
echo === PARAMETR Y22 ===
*print Y22 mag(Y22) ph(Y22)
plot mag(Y22)
plot ph(Y22)
*
echo
echo ++++ Z-PARAMETRY ++++
let Z11=A/CC
let Z12=detA/CC
let Z21=1/CC
let Z22=D/CC
settype impedance Z11 Z12 Z21 Z22
echo === PARAMETR Z11 ===
*print Z11 mag(Z11) ph(Z11)
plot mag(Z11)
plot ph(Z11)
echo === PARAMETR Z12 ===
*print Z12 mag(Z12) ph(Z12)
*plot mag(Z12)
*plot ph(Z12)
echo === PARAMETR Z21 ===
*print Z21 mag(Z21) ph(Z21)
*plot mag(Z21)
*plot ph(Z21)
echo === PARAMETR Z22 ===
*print Z22 mag(Z22) ph(Z22)
*plot mag(Z22)
*plot ph(Z22)
*
echo
echo ++++ H-PARAMETRY ++++
let H11=B/D
let H12=detA/D
let H21=-(1/D)
let H22=CC/D
settype impedance H11
settype admittance H22
settype notype H12 H21
echo === PARAMETR H11 ===
*print H11 mag(H11) ph(H11)
*plot mag(H11)
*plot ph(H11)
echo === PARAMETR H12 ===
*print H12 mag(H12) ph(H12)
*plot mag(H12)
*plot ph(H12)
echo === PARAMETR H21 ===
*print H21 mag(H21) ph(H21)
*plot mag(H21)

```

```

plot mag(D)
plot ph(D)
*
let detA=A*D-B*CC
*
echo

```

```

*plot ph(H121)
echo === PARAMETR H22 ===
*print H22 mag(H22) ph(H22)
*plot mag(H22)
*plot ph(H22)
.endc
.END

```

После загрузки схемного файла `primer6_7.cir` в программу WinSpice3 на экран выводятся частотные характеристики параметров \underline{A} , \underline{D} , \underline{Z}_{11} , \underline{Y}_{22} . На рис. 6.16, а, б показаны АЧХ и ФЧХ параметра \underline{A} , характеризующего ослабление напряжения на выходе при холостом ходе.

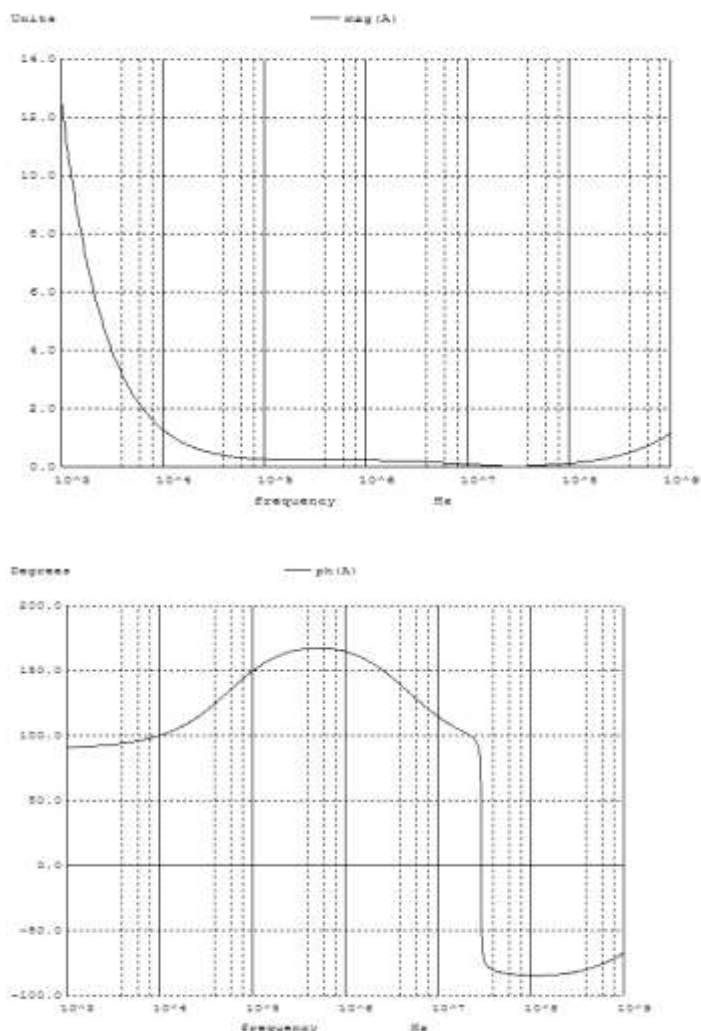


Рис. 6.16. Амплитудно-частотная (а) и фазочастотная (б) характеристики параметра \underline{A} активно-го неавтономного четырехполюсника

По АЧХ рис. 6.16, а видно, что с ростом частоты модуль ослабления уменьшается и становится меньше единицы при частоте 12,5 кГц, что свидетельствует об усилении

напряжения. Далее, с ростом частоты более 860 МГц ослабление становится большим единицы. ФЧХ претерпевает резкий спад и смену знака в окрестности частоты 30 МГц. Более рельефно выглядит логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) рис. 6.17, где по оси ординат откладывается ослабление в децибелах, то есть $20\log_{10}|A|$. Для построения этой зависимости использована команда `plot db(mag(A))` в интерактивном режиме.

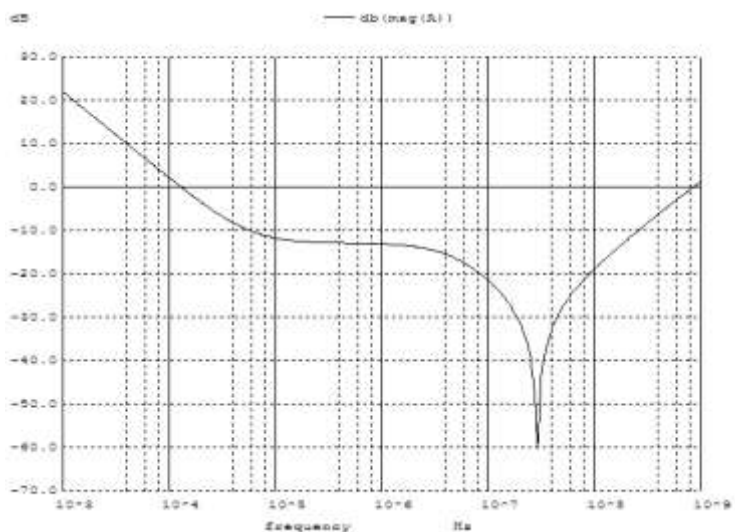


Рис. 6.17. логарифмическая амплитудно-частотная характеристика параметра \underline{A}

Здесь диапазону частот усиления соответствует область частот, для которой $20\log_{10}|A| < 0$. Видно, что на частоте, примерно, 30 МГц ослабление достигает минимума (–60 дБ), то есть рассматриваемый четырехполюсник является, по существу, резонансным усилителем.

Частотные характеристики остальных параметров (\underline{D} , \underline{Z}_{11} , \underline{Y}_{22} , — 6 диаграмм) здесь не приводятся из соображений экономии места.

6.5. SPICE-описание четырехполюсников, заданных параметрами

Выше рассматривалось определение параметров линейных проходных четырехполюсников по заданной схеме. Однако возможна и обратная задача: в электрическую цепь включен четырехполюсник с известными параметрами на некоторой частоте, но схема его неизвестна. К сожалению, в SPICE отсутствуют встроенные модели рассмотренных четырехполюсников и поэтому непосредственное составление текстового описания по схеме невозможно. Проблема решается заменой четырехполюсника некоторой эквивалентной схемой (схемой замещения).

В случае взаимного четырехполюсника можно использовать одну из известных трехэлементных схем: T -образную или Π -образную, приведенные на рис. 6.18.

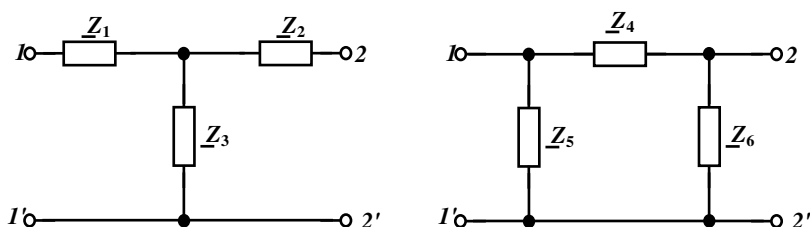


Рис. 6.18. Т-образная (а) и П-образная (б) схемы замещения взаимного четырехполюсника

Комплексные сопротивления определяются через А-параметры по формулам [1, стр.140]:

$$\text{Т-образная схема } \underline{Z}_1 = \frac{\underline{A}-1}{\underline{C}}; \underline{Z}_2 = \frac{\underline{D}-1}{\underline{C}}; \underline{Z}_3 = \frac{1}{\underline{C}}; \quad (6.14)$$

$$\text{П-образная схема } \underline{Z}_4 = \underline{B}; \underline{Z}_5 = \frac{\underline{B}}{\underline{D}-1}; \underline{Z}_6 = \frac{\underline{B}}{\underline{A}-1}. \quad (6.15)$$

После замены четырехполюсника схемой замещения получаем известную задачу расчета цепи переменного тока с комплексными сопротивлениями (см. пример 4.3). Следует иметь в виду, что комплексные сопротивления ветвей цепи, находящихся вне четырехполюсника, должны быть известны для той же частоты, на которой были заданы его параметры.

В случае невзаимного четырехполюсника возникают затруднения, связанные с появлением в схемах замещения четвертого элемента — управляемого источника напряжения или тока с комплексным коэффициентом управления. К сожалению, в SPICE отсутствует встроенная модель такого элемента. В рассмотренных ранее описаниях управляемых источников допустимы лишь действительные значения коэффициентов управления. Существуют некоторые пути обхода этого ограничения, однако, их рассмотрение выходит за рамки данной работы.

Выводы

1. Четырехполюсник является удобной моделью, связывающей между собой напряжения и токи входной и выходной ветвей. Пользуясь понятием четырехполюсника, легче реализовать системный подход при анализе цепей и сформулировать требования к отдельным звеньям.
2. Существование нескольких форм записи уравнений четырехполюсника предоставляет возможность выбора наиболее подходящей из них для решаемой задачи.
3. Определение А-параметров по заданной схеме упрощается при использовании обратных коэффициентов передачи для режимов холостого хода и короткого замыкания на выходе.
4. При использовании WinSpice3 целесообразно выполнить описание четырехполюсников в виде подсхемы, поскольку для разных схем будет изменяться только содержимое блока SUBCKT...ENDS. Это позволяет выполнить обобщенное описание определения частотных характеристик параметров взаимных и невзаимных четырехполюсников.
5. Если в электрическую цепь включен четырехполюсник с известными параметрами, то ее расчет с помощью SPICE возможен путем замены четырехполюсника одной из типовых схем замещения.

Глава 7. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

В предыдущих разделах рассматривались установившиеся процессы в цепях постоянного, синусоидального и несинусоидального тока. Характер изменения токов и напряжений во времени в установившемся процессе обусловлен соответствующими независимыми источниками (постоянными или переменными). Предполагалось, что источники были включены в цепь бесконечно давно по отношению к рассматриваемому моменту времени, и процесс установился.

Если в некоторый момент $t=0$ топология цепи изменяется в результате, например, отключения или подключения какой-нибудь ветви, то по прошествии некоторого интервала времени установится новый режим. Изменения токов и напряжений на этом интервале, называемые переходными процессами (ПП), имеют специфический характер и не представляют интереса при изучении установившихся процессов. Однако в данном разделе исследуются именно ПП, а установившиеся режимы рассматриваются как предельное значение ПП при $t \rightarrow \infty$. ПП возникают также при изменениях токов и напряжений независимых источников. Таким образом, ПП имеют место на интервале времени между двумя установившимися состояниями.

В пассивных цепях с потерями ПП всегда затухает и переходит в установившийся режим, причем характер ПП может быть как периодическим (колебательным), так и аperiodическим (без колебаний). Если в цепи присутствуют управляемые источники, то для затухания ПП цепь должна обладать свойством устойчивости. В противном случае токи и напряжения с течением времени нарастают, и установившийся режим не достигается.

Отмеченные выше изменения топологии или источников, называемые в общем случае *коммутацией*, являются необходимыми, но не достаточными условиями возникновения ПП. Цепь должна содержать хотя бы один энергозапасующий (реактивный) элемент (индуктивный или емкостный), перезарядка которого обуславливает ПП. Если запасы энергии реактивных элементов в установившихся режимах *до* и *после* коммутации отличаются, то имеет место ПП.

Из сказанного следует, что в чисто резистивных цепях ПП не возникают, то есть токи и напряжения после коммутации устанавливаются мгновенно. Однако следует иметь в виду, что такие цепи — результат идеализации, и реальные резисторы обладают паразитными реактивностями.

При ПП могут возникать большие перенапряжения, сверхтоки, электромагнитные колебания, которые могут нарушить работу устройства вплоть до выхода его из строя. С другой стороны, ПП находят широкое полезное практическое применение в информационной и силовой электронике. Все это обуславливает необходимость изучения методов анализа ПП в электрических цепях.

7.1. Обзор методов анализа переходных процессов

С математической точки зрения ПП описываются дифференциальными уравнениями относительно токов и напряжений, вытекающими из законов Кирхгофа (2.1), (2.2) и уравнений элементов. Пассивные элементы R, L, C, M определяются уравнениями (1.3), (1.6), (1.7), (1.12), (1.13), (4.17), активные независимые источники — (1.16), (1.17), активные управляемые источники — рис. 3.33. Дифференциальные уравнения для линейных цепей также будут линейными. Их однозначное решение может быть получено методами известными из теории дифференциальных уравнений с использованием начальных условий, которые определяются из *законов коммутации* [1, с.235]:

– ток через индуктивный элемент L непосредственно до коммутации $i_L(0_-)$ равен току через этот же индуктивный элемент непосредственно после коммутации $i_L(0_+)$ (первый закон коммутации):

$$i_L(0_-) = i_L(0_+) \quad (7.1);$$

– напряжение на емкостном элементе C непосредственно до коммутации $u_C(0_-)$ равно напряжению на этом же емкостном элементе непосредственно после коммутации $u_C(0_+)$ (второй закон коммутации):

$$u_C(0_-) = u_C(0_+) \quad (7.2),$$

где 0_- и 0_+ моменты времени непосредственно до и после коммутации.

Для решения дифференциальных уравнений используются как аналитические, так и численные методы. Аналитические методы, изучаемые в дисциплине «Теоретические основы электротехники», дают точное решение в виде функции времени. Сюда относятся классический метод [1, с.251], операторный метод [1, с.276], спектральный метод [1, с.319] и др. В данной книге они не рассматриваются, однако результаты, полученные аналитическими методами, используются ниже для проверки Spice-решений.

Численные методы интегрирования дифференциальных уравнений, изучаемые в вычислительной математике, дают приближенные результаты для дискретных моментов времени в виде таблицы значений. Временной интервал между соседними точками называется шагом интегрирования, причем он может автоматически изменяться в процессе вычислений. К наиболее часто используемым для моделирования цепей численным процедурам относятся неявный метод Эйлера (первого порядка точности), неявный метод трапеций (второго порядка точности) и метод Гира (переменного порядка точности). В Spice3 применяются все три метода (в зависимости от выбранных опций METHOD и MAXORD) [19, с.71]. По умолчанию установлен неявный метод трапеций с автоматическим выбором шага интегрирования, гарантирующий заданную точность приближенного решения. Метод Гира рекомендуется для расчета схем силовой электроники, характеризующихся т.н. жесткими системами дифференциальных уравнений. Для быстро изменяющихся функций число шагов может оказаться очень большим (десятки и сотни тысяч), поэтому объем полученных результатов будет весьма значительным. Естественно, что и время расчета ПП при этом увеличивается. Поэтому в случае даже не очень сложных задач может потребоваться производительный процессор и существенный объем оперативной памяти.

Рассмотрение теории численных методов решения дифференциальных уравнений выходит за пределы тематики данной книги. Предполагается, что читатель имеет представление об этой теории из дисциплин «Информатика» и «Численные методы».

7.2. Спецификация режима анализа переходных процессов в WinSpice3

В режиме анализа ПП WinSpice3 вычисляет искомые функции времени в дискретных точках интервала, задаваемого пользователем. Начальные условия определяются автоматически в результате анализа цепи по постоянному току или указываются явно. Все источники постоянного тока в начальный момент времени принимают свои значения и сохраняют их на протяжении всего расчетного интервала, который описывается директивой .TRAN, имеющей следующий вид:

.TRAN TSTEP TSTOP <TSTART <TMAX>> <UIC>

или

.TRAN TSTEP TSTOP <TSTART <TMAX>> <SKIPBP>,

где

TSTEP — шаг печати таблиц результатов или построения графиков ПП. Желательно, чтобы

$TSTEP < (TSTOP - TSTART)/50$;

TSTOP — конец временного интервала, в пределах которого рассчитывается ПП;

TSTART — начальный момент вывода результатов. Если параметр TSTART отсутствует, то его значение полагается равным нулю. *Расчеты всегда начинаются с нулевого момента времени.* На интервале 0...TSTART проводится расчет ПП, но результаты не сохраняются. На интервале TSTART...TSTOP расчеты продолжаются и результаты запоминаются. Например, если интерес представляет установившийся режим, то целесообразно задать параметр TSTART равным времени установления ПП. Если в схеме происходит коммутация в момент TSTART, то запоминание и вывод результатов расчета докоммутационного режима можно запретить, задав данный параметр;

TMAX — максимальная величина шага, используемая при расчете. По умолчанию WinSpice3 выбирает для TMAX минимальное значение из TSTEP и $(TSTOP - TSTART)/50$. Параметр TMAX целесообразно задавать в тех случаях, когда в процессе вычислений необходимо гарантировать величину шага меньшую, чем предусмотрено по умолчанию;

UIC (use initial conditions) — ключевое слово, запрещающее расчет по постоянному току в момент 0. Если это слово присутствует, то WinSpice3 использует в качестве независимых начальных условий значения, задаваемые параметром IC=INCOND в описаниях L- и C-элементов, (см. пп. 1.1.2, 1.1.3). В случае задания директивы **.IC** (не путать с параметром IC=) в качестве исходных данных для расчета начальных условий используются значения узловых напряжений, указанные в этой директиве. Ее общая форма имеет вид

.IC V(NODNUM)=VAL V(NODNUM)=VAL ...

Поскольку при задании UIC начальный расчет по постоянному току не проводится, необходимо указать все постоянные источники в директиве **.IC**, если они необходимы для определения начальных условий.

Если ключевое слово UIC опущено, то начальный режим по постоянному току рассчитывается до старта процедуры анализа ПП. В этом случае значения узловых напряжений, указанные в директиве **.IC**, используются для расчета начальных условий. Далее, по ходу вычислительного процесса эти значения заменяются найденными результатами.

Следует иметь в виду, что параметры IC= имеют приоритет над значениями директивы **.IC**.

SKIPBP (skip bias point) — ключевое слово, являющееся синонимом UIC и используемое для совместимости с программой Pspice.

Как и другие директивы, **.TRAN** можно использовать в сценариях, но без точки. Ниже приведены примеры записи директивы для характерных случаев:

1).TRAN 1ns 100ns UIC

ПП рассчитывается и запоминается с начального момента времени 0 до конечного значения 100 нс, т. е. на интервале 0...100 нс. Максимальная величина шага, используемая при расчете, не превысит 1 нс. Выходные величины доступны для вывода с шагом 1 нс. Расчет по постоянному току в момент 0 не выполняется. Независимые начальные условия задаются значениями параметра IC= в описаниях L- и C-элементов (т.к. указано ключевое слово UIC);

2).TRAN 15n 1u 500n UIC

ПП рассчитывается на интервале 0...500 нс без запоминания результатов. Запоминание с начинается с момента времени 500 нс и продолжается до конечного значе-

ния 1 мкс, причем максимальная величина шага, используемая при расчете, не превысит $(1000 - 500)/50 = 10$ нс. Выходные величины доступны для вывода с шагом 10 нс на интервале 500...1000 нс. Расчет по постоянному току в момент 0 не выполняется. В качестве независимых начальных условий используются значения, задаваемые параметром IC= в описаниях L- и C-элементов;

3) .IC V(11)=5 V(4)=-5 V(2)=2.2

.TRAN .0001 .01 .005 .00001

ПП рассчитывается на интервале 0...0,005 с без запоминания результатов. Запоминание с начинается с момента времени 0,005 с и продолжается до конечного значения 0,01 с, причем максимальная величина шага, используемая при расчете, не превысит 0,00001 с. Выходные величины доступны для вывода с шагом 0,0001 с на интервале 0,005...0,01 с. Начальный режим по постоянному току рассчитывается до старта процедуры анализа ПП. Значения узловых напряжений, указанные в директиве .IC, используются для расчета начальных условий. Далее, по ходу вычислительного процесса эти значения заменяются вычисленными результатами;

4) .IC V(11)=5 V(4)=-5 V(2)=2.2

.TRAN .0001 .01 0 .00001 UIC

ПП рассчитывается и запоминается на интервале 0...0,01 с, причем максимальная величина шага, используемая при расчете, не превысит 0,00001 с. Выходные величины доступны для вывода с шагом 0,0001 с на всем интервале. Расчет по постоянному току в момент 0 не выполняется. В качестве начальных условий используются значения, задаваемые в списке директивы .IC и параметром IC= в описаниях L- и C-элементов.

7.3. Переходные процессы в цепях с источниками постоянного тока

В данном случае ПП возникают только в результате коммутации. Сами же параметры независимых источников являются величинами постоянными во времени. Начнем с простейших цепей при нулевых начальных условиях. Ключ будем полагать идеальным.

ПРИМЕР 7.1. Рассмотрим схему, показанную на рис. 7.1. Последовательная RC-цепь подключается к источнику постоянного напряжения в результате замыкания ключа S в момент времени $t=0$.

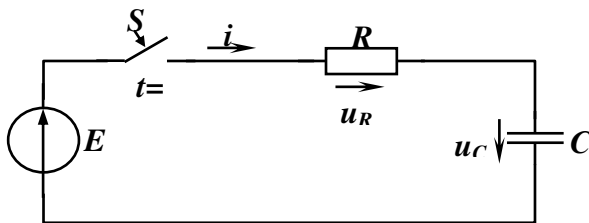


Рис. 7.1. RC-цепь, подключаемая к источнику постоянного напряжения: $R=1$ кОм; $C=1$ мкФ; $E=1$ В

Пусть до момента коммутации, соответствующего замыканию ключа S, токи и напряжения в цепи были нулевыми, т. е.

$$i(0_-) = 0; u_R(0_-) = u_C(0_-) = 0. \quad (7.3)$$

В первый момент *после* коммутации ($t = 0_+$) напряжение на C-элементе остается нулевым, согласно второму закону коммутации (7.2):

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0. \quad (7.4)$$

Ток же, наоборот, претерпевает резкий скачок от 0 до величины E/R , что следует из второго закона Кирхгофа для момента $t = 0_+$. Затем в цепи начинается ПП, обусловленный зарядкой C -элемента — напряжение на нем нарастает, а ток постепенно снижается. По истечении времени установления $t_{уст}$ напряжение на C -элементе будет близко к величине E , а ток — к нулю. Эти выводы следуют из анализа дифференциального уравнения, описывающего данный ПП в *послекоммутационной* схеме при начальных условиях (7.4):

$$\tau \frac{du_C}{dt} + u_C = E, \quad (7.5)$$

где $\tau = RC$ — постоянная времени цепи.

Принято полагать, что переходный процесс заканчивается за время $t_{уст} \approx (4...5)\tau$. В рассматриваемом примере $\tau = RC = 10^3 \cdot 10^{-6} = 10^{-3} \text{ с} = 1 \text{ мс}$. Примем время установления $t_{уст} = 5 \text{ мс}$.

Решение уравнения (7.5) для $t \geq 0$ имеет вид

$$u_C = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (7.6)$$

где e — основание натуральных логарифмов.

Выражения для тока и напряжения на R -элементе следуют из соотношения (1.12) и закона Ома:

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (7.7)$$

$$u_R = Ri = Ee^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (7.8)$$

Для составления текстового описания послекоммутационной схемы следует, как всегда, разметить узлы, проставить параметры элементов и их обозначения (см. рис. 7.2). Ключ S полагается замкнутым и поэтому на схеме отсутствует.

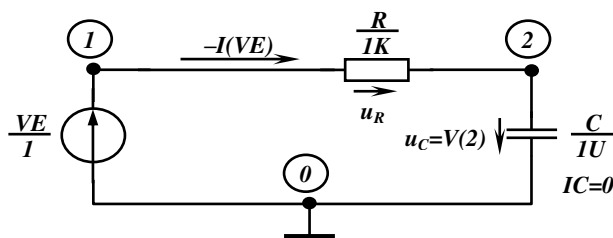


Рис. 7.2. RC-цепь в SPICE-обозначениях

Текстовое описание имеет вид (файл primer7_1.cir)

```
PRIMER 7_1 (STYLE SPICE2)
VE 1 0 DC 1
R 1 2 1K
C 2 0 1U IC=0
.SAVE ALL
.TRAN 50U 5M UIC
```

```
.PLOT TRAN v(2)
.PLOT TRAN -I(VE)
.END
```

Рассмотрим особенности данного текста:

- в описании C -элемента указан параметр $IC=0$, т. е. учтено нулевое начальное условие (7.4);

- директива **.TRAN** задает режим расчета и запоминания ПП с начального момента времени 0 до конечного значения 5 мс. Максимальная величина шага, используемая при расчете, не превысит 50 мкс. Выходные величины доступны для вывода с шагом 50 мкс. Таким образом, предполагается расчет примерно в 100 точках интервала. Расчет по постоянному току в момент $t=0$ не выполняется (указано ключевое слово **UIC**), поэтому в качестве независимого начального условия используется нулевое значение, задаваемое параметром $IC=0$ в описании C -элемента;

- напряжение на C -элементе $V(2)$ и ток $-I(VE)$ выводятся в графической форме, причем в директиве **.PLOT** используется ключевое слово **TRAN**.

Результаты расчетов показаны на рис. 7.3 и рис. 7.4.

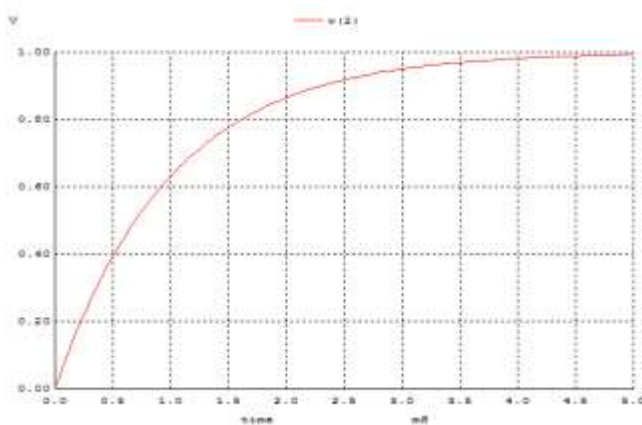


Рис. 7.3. ПП напряжения на C -элементе

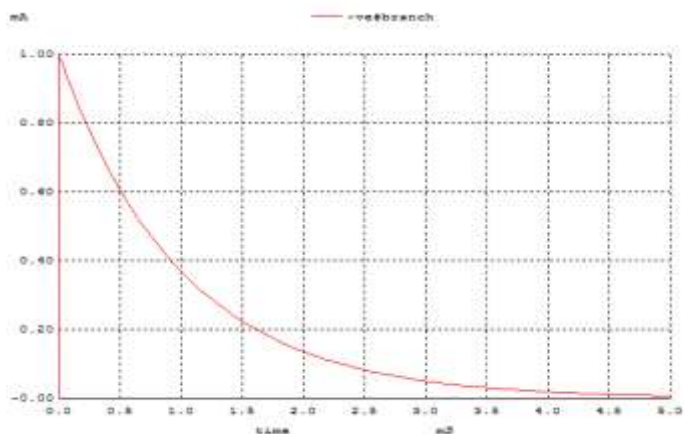


Рис. 7.4. ПП тока

Качественная оценка характера ПП вполне соответствует вышеприведенным предположениям о поведении решения дифференциального уравнения (7.5). Для количественной оценки погрешности полученных приближенных результатов проведем сравнение с точным решением (7.6)-(7.8). После подстановки исходных данных эти выражения принимают следующий вид:

$$u_C = (1 - e^{-1000t}) \text{ В}; \quad i = 0,001e^{-1000t} \text{ А}; \quad u_R = e^{-1000t} \text{ В.} \quad (7.9)$$

Для вывода найденных программой WinSpice3 значений напряжения на C-элементе (u_C^*) и тока (i^*) использовались директивы

```
.PRINT TRAN V(2)
.PRINT TRAN -I(VE)
```

Ниже в табл. 7.1 представлены укороченные листинги для напряжения $V(2)=u_C^*$ и тока $-I(VE)=-ve\#branch=i^*$.

Таблица 7.1

PRIMER 7_1			PRIMER 7_1		
Transient Analysis Sun Nov 04 11:42:05			Transient Analysis Sun Nov 04 11:42:05		
Index	time	v(2)	Index	time	-ve#branch
0	0.000000e+00	0.000000e+00	0	0.000000e+00	-0.000000e+00
1	5.000000e-07	4.997501e-04	1	5.000000e-07	9.995002e-04
2	1.000000e-06	9.992505e-04	2	1.000000e-06	9.990007e-04
3	2.000000e-06	1.997752e-03	3	2.000000e-06	9.980022e-04
4	4.000000e-06	3.991762e-03	4	4.000000e-06	9.960082e-04
5	8.000000e-06	7.967843e-03	5	8.000000e-06	9.920322e-04
6	1.600000e-05	1.587248e-02	6	1.600000e-05	9.841275e-04
7	3.200000e-05	3.149355e-02	7	3.200000e-05	9.685064e-04
8	6.400000e-05	6.199769e-02	8	6.400000e-05	9.380023e-04
9	1.140000e-04	1.077539e-01	9	1.140000e-04	8.922461e-04
10	1.640000e-04	1.512781e-01	10	1.640000e-04	8.487219e-04
11	2.140000e-04	1.926792e-01	11	2.140000e-04	8.073208e-04
12	2.640000e-04	2.320607e-01	12	2.640000e-04	7.679393e-04
.....				
97	4.514000e-03	9.890556e-01	97	4.514000e-03	1.094437e-05
98	4.564000e-03	9.895895e-01	98	4.564000e-03	1.041050e-05
99	4.614000e-03	9.900973e-01	99	4.614000e-03	9.902667e-06
100	4.664000e-03	9.905804e-01	100	4.664000e-03	9.419610e-06
101	4.714000e-03	9.910399e-01	101	4.714000e-03	8.960117e-06
102	4.764000e-03	9.914770e-01	102	4.764000e-03	8.523038e-06
103	4.814000e-03	9.918927e-01	103	4.814000e-03	8.107280e-06
104	4.864000e-03	9.922882e-01	104	4.864000e-03	7.711803e-06
105	4.914000e-03	9.926644e-01	105	4.914000e-03	7.335618e-06
106	4.964000e-03	9.930222e-01	106	4.964000e-03	6.977783e-06
107	5.000000e-03	9.932690e-01	107	5.000000e-03	6.731024e-06

Оказалось, что программа вычислила ПП в 108 точках заданного интервала, вместо ожидавшихся 100. Это объясняется работой алгоритма автоматического выбора шага интегрирования, упомянутого в п. 7.1. В директиве **.TRAN** задан шаг печати

50 мкс. В данном примере это одновременно и максимальная величина шага, используемая при расчете. Однако первый и второй шаги составили 0,5 мкс, то есть в 100 раз меньше заданного. Третий шаг — уже 1 мкс. Далее шаг увеличивается и достигает заданного значения 50 мкс на 9 шаге. После этого шаг остается неизменным и равным 50 мкс до конца вычислений.

Из полученных таблиц для напряжения на C -элементе (u_C^*) и тока (i^*) были выбраны значения с интервалом приблизительно 0,5 мс, которые использовались для определения абсолютной и относительной погрешностей найденного приближенного решения по формулам

$$\Delta(a^*) = |a - a^*|; \delta(a^*), \% = \frac{\Delta(a^*)}{|a^*|} 100,$$

где $\Delta(a^*)$ — абсолютная погрешность приближенной величины a^* ; $\delta(a^*), \%$ — относительная погрешность приближенной величины a^* в процентах.

Погрешности определялись относительно точных значений, которые вычислялись по (7.9) с точностью 7 значащих цифр. В таблицах 7.2 и 7.3 приведены соответствующие результаты.

Расчет погрешностей расчета напряжения на C -элементе

Таблица 7.2

N точки	t, c	u_C^*, B	u_C, B	$\Delta(u_C^*), B$	$\delta(u_C^*), \%$
0	0,00E+00	0,00E+00	0,000000E+00	0	неопределенность
17	5,140000E-04	4,019594E-01	4,019016E-01	5,77941E-05	1,437808E-02
27	1,014000E-03	6,373078E-01	6,372350E-01	7,28135E-05	1,142517E-02
37	1,514000E-03	7,800390E-01	7,799719E-01	6,7103E-05	8,602515E-03
47	2,014000E-03	8,666008E-01	8,665462E-01	5,45905E-05	6,299377E-03
57	2,514000E-03	9,190977E-01	9,190562E-01	4,15156E-05	4,516991E-03
67	3,014000E-03	9,509354E-01	9,509051E-01	3,03059E-05	3,186952E-03
77	3,514000E-03	9,702439E-01	9,702224E-01	2,14656E-05	2,212396E-03
87	4,014000E-03	9,819539E-01	9,819390E-01	1,49065E-05	1,518048E-03
97	4,514000E-03	9,890556E-01	9,890454E-01	1,01542E-05	1,026657E-03
107	5,000000E-03	9,932690E-01	9,932621E-01	6,947E-06	6,994076E-04

Расчет погрешностей расчета тока

Таблица 7.3

N точки	t, c	i^*, A	i, A	$\Delta(i^*), A$	$\delta(i^*), \%$
0	0,00E+00	0,00E+00	1,000000E-03	0,001	∞
17	5,140000E-04	5,980406E-04	5,980984E-04	5,77941E-08	9,663903E-03
27	1,014000E-03	3,626922E-04	3,627650E-04	7,28135E-08	2,007585E-02
37	1,514000E-03	2,199610E-04	2,200281E-04	6,7103E-08	3,050676E-02
47	2,014000E-03	1,333992E-04	1,334538E-04	5,45905E-08	4,092262E-02
57	2,514000E-03	8,090226E-05	8,094382E-05	4,15556E-08	5,136515E-02
67	3,014000E-03	4,906459E-05	4,909491E-05	3,03159E-08	6,178764E-02
77	3,514000E-03	2,975608E-05	2,977757E-05	2,14856E-08	7,220587E-02

87	4,014000E-03	1,804609E-05	1,806101E-05	1,49165E-08	8,265796E-02
97	4,514000E-03	1,094437E-05	1,095455E-05	1,01842E-08	9,305429E-02
107	5,000000E-03	6,731024E-06	6,737947E-06	6,923E-09	1,028521E-01

Анализ свидетельствует об удовлетворительной точности. Относительные погрешности напряжения и тока не превышают соответственно 0,01% и 0,1% на основной части расчетного интервала. Однако начальное значение тока не соответствует действительности. Причина этого состоит в том, что, как было отмечено выше в п. 7.2, при заданном ключевом слове UIC в директиве TRAN расчет по постоянному току в момент 0_+ не производится. Но уже на первом шаге ток принимает почти точное значение $9.995002e-04 \text{ A} \approx 1 \text{ mA}$ (см. табл. 7.1).

Поэтому, если необходимо получение точных значений именно при $t=0_+$, то необходимо убрать UIC, а также параметр IC в описании C-элемента. Также следует добавить директиву .IC V(2)=0, для задания начального условия (7.4). Окончательно, текстовое описание примет вид (файл primer7_1_1.cir).

PRIMER 7_1_1 (STYLE SPICE2)

.IC V(2)=0

VE 1 0 DC 1

R 1 2 1K

C 2 0 1U

.SAVE ALL

.TRAN 50U 5M

.PLOT TRAN v(2)

.PLOT TRAN -I(VE)

.PRINT TRAN v(2)

.PRINT TRAN -I(VE)

.END

В данном случае получается корректный результат при $t=0_+$: $i(0_+) = 1 \text{ mA}$.

ПРИМЕР 7.2. Рассмотрим схему, показанную на рис. 7.5. Последовательная RL -цепь подключается к источнику постоянного напряжения в результате замыкания ключа S в момент времени $t=0$.

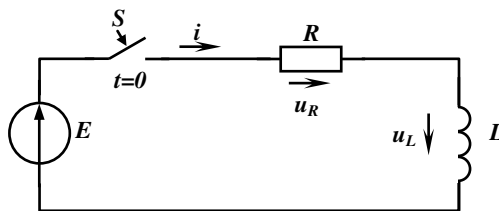


Рис. 7.5. RL -цепь, подключаемая к источнику постоянного напряжения: $R=1 \text{ Ом}$; $L=1 \text{ мГн}$; $E=1 \text{ В}$

Пусть до момента коммутации, соответствующего замыканию ключа S , токи и напряжения в цепи были нулевыми, то есть

$$i(0_-) = 0; u_R(0_-) = u_L(0_-) = 0. \quad (7.10)$$

В первый момент *после* коммутации ($t = 0_+$) ток через L -элемент (он же ток всей цепи) остается нулевым, согласно первому закону коммутации (7.1):

$$i(0_+) = i_L(0_+) = i_L(0_-) = 0. \quad (7.11)$$

Напряжение на L -элементе, наоборот, претерпевает резкий скачок от 0 до величины E , что следует из второго закона Кирхгофа для момента $t = 0_+$. Затем в цепи начинается ПП, обусловленный зарядкой L -элемента, ток нарастает, а напряжение на L -элементе постепенно снижается. По истечении времени установления $t_{уст}$ напряжение на L -элементе будет близко к нулю, а ток — к величине E/R . Эти выводы следуют из анализа дифференциального уравнения, описывающего данный ПП в *последкоммутационной* схеме при нулевых начальных условиях (7.11):

$$\tau \frac{di}{dt} + i = \frac{E}{R}, \quad (7.12)$$

где $\tau = \frac{L}{R}$ — постоянная времени цепи.

В рассматриваемом примере, как и в предыдущем, $\tau = \frac{L}{R} = \frac{10^{-3}}{1} = 10^{-3} \text{ с} = 1 \text{ мс}$.

Следовательно, время установления ПП $t_{уст} = 5 \text{ мс}$. Решение уравнения (7.12) имеет вид

$$i = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (7.13)$$

Выражения для тока и напряжения на L - и R -элементах следуют из соотношения (1.6) и закона Ома:

$$u_L = L \frac{di}{dt} = E e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (7.14)$$

$$u_R = Ri = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}). \quad (7.15)$$

Схема в SPICE-обозначениях представлена на рис. 7.6

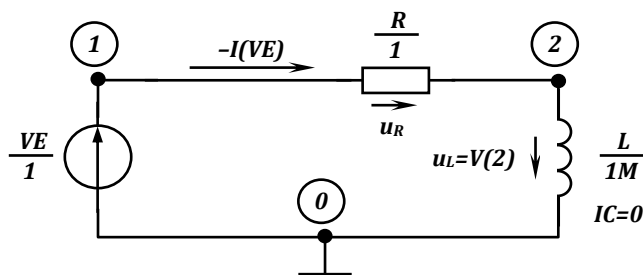


Рис. 7.6. RL -цепь в SPICE-обозначениях

Текстовое описание имеет вид (файл primer7_2.cir):

PRIMER 7_2 (STYLE SPICE2)

VE 1 0 DC 1

R 1 2 1

L 2 0 1M IC=0

.SAVE ALL

.TRAN 50U 5M UIC

.PLOT TRAN v(2)

```
.PLOT TRAN -I(VE)
.PRINT TRAN v(2)
.PRINT TRAN -I(VE)
.END
```

В описании L -элемента указан параметр $IC=0$, то есть учтено начальное условие (7.11). Результаты расчетов показаны на рис. 7.7 и рис. 7.8.

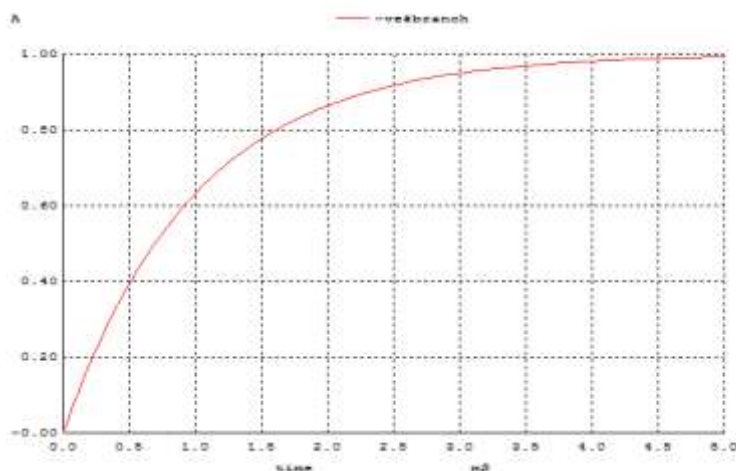


Рис. 7.7. ПП тока

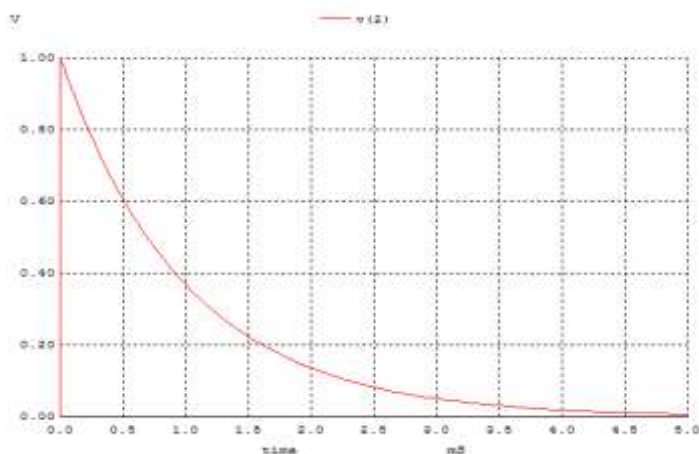


Рис. 7.8. ПП напряжения на L -элементе

Качественная оценка характера ПП вполне соответствует вышеприведенным предположениям о поведении решения дифференциального уравнения (7.13). Следует отметить аналогию с результатами анализа RC -цепи: напряжение на C -элементе (рис. 7.3) изменяется аналогично току через L -элемент (рис. 7.7), а ток RC -цепи (рис. 7.4) аналогичен напряжению на L -элементе (рис. 7.8). Это объясняется аналогиями дифференциальных уравнений (7.5) и (7.12) и начальных условий (7.4) и (7.11).

Рассмотрим расчет переходного процесса в цепи первого порядка при ненулевых начальных условиях. В качестве примера решим задачу, заимствованную из [1, с. 253], где приведено ее аналитическое решение, полученное классическим методом.

ПРИМЕР 7.3. В схеме, показанной на рис. 7.9, до коммутации был установившийся режим. Определить все токи и напряжение на конденсаторе в переходном процессе, возникающем после замыкания ключа S .

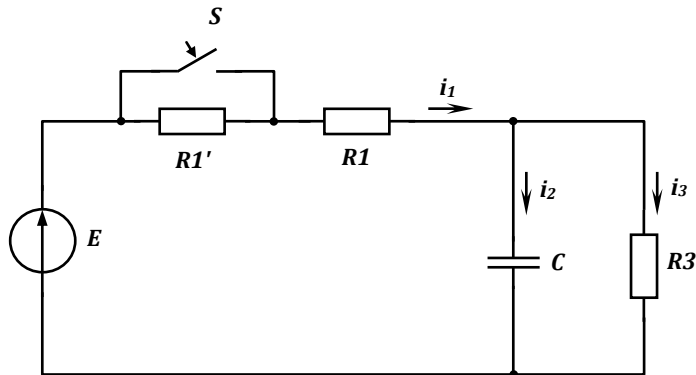


Рис. 7.9. Коммутируемая RC -цепь: $R'_1 = R_1 = R_3 = 50$ Ом; $C = 100$ мкФ; $E = 150$ В

Определим напряжение на конденсаторе до коммутации. Поскольку источник E постоянного тока, то до коммутации ток через конденсатор отсутствовал, и цепь представляла собой последовательное соединение источника и трех резисторов. Падение напряжения на R_3 , равное напряжению на конденсаторе, определяется как

$$U_{R_3} = u_C(0_-) = \frac{ER_3}{R'_1 + R_1 + R_3} = 50 \text{ В}.$$

Тогда, согласно второму закону коммутации (7.2), имеем

$$u_C(0_-) = u_C(0_+) = 50 \text{ В}. \quad (7.16)$$

Схема в SPICE-обозначениях представлена на рис. 7.10. Источники VA1 и VA2 с нулевым напряжением добавлены для их использования в качестве амперметров для измерения токов i_2 , i_3 соответственно. Источник питания схемы VE, кроме своего основного назначения, также используется как амперметр для измерения тока $(-i_1)$.

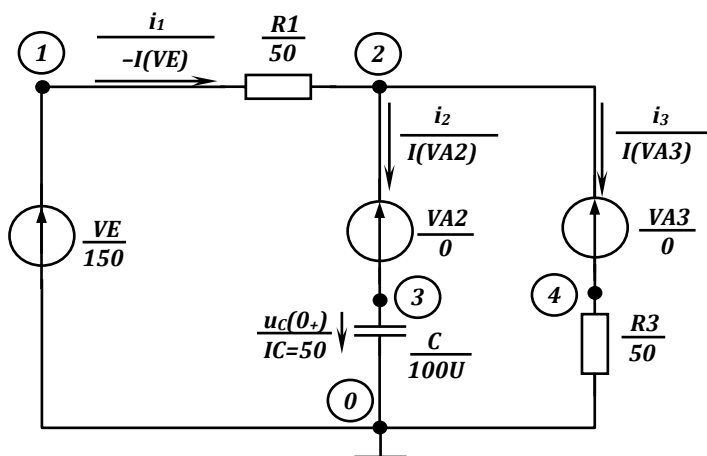


Рис. 7.10. RC-цепь в SPICE-обозначениях

Текстовое описание имеет вид (файл primer7_3.cir):

```
PRIMER 7_3 (STYLE SPICE2)
VE 1 0 DC 150
VA2 2 3 DC 0
VA3 2 4 DC 0
R1 1 2 50
R3 4 0 50
C 3 0 100U IC=50
.SAVE ALL
.TRAN 50U 10M UIC
.PLOT TRAN -I(VE) I(VA2) I(VA3)
.PLOT TRAN v(3)
.END
```

В строке описания конденсатора указано независимое начальное условие (7.16): $IC=50$. Директива **.TRAN** задает расчет ПП и запоминание результатов с начального момента времени 0 до конечного значения 10 мс, то есть на интервале 0...10 мс. Максимальная величина шага, используемая при расчете, не превысит 50 мкс. Выходные величины доступны для вывода с шагом 50 мкс. Таким образом, ожидаемое число расчетных точек — не менее 200. Расчет по постоянному току в момент 0_+ не выполняется, так как указано ключевое слово UIC. Директивы **.PLOT** задают вывод двух диаграмм, показанных показаны на рис. 7.11 и рис. 7.12: на первой изображаются ПП токов i_1, i_2, i_3 , на второй — ПП напряжения на конденсаторе $v(3)$.

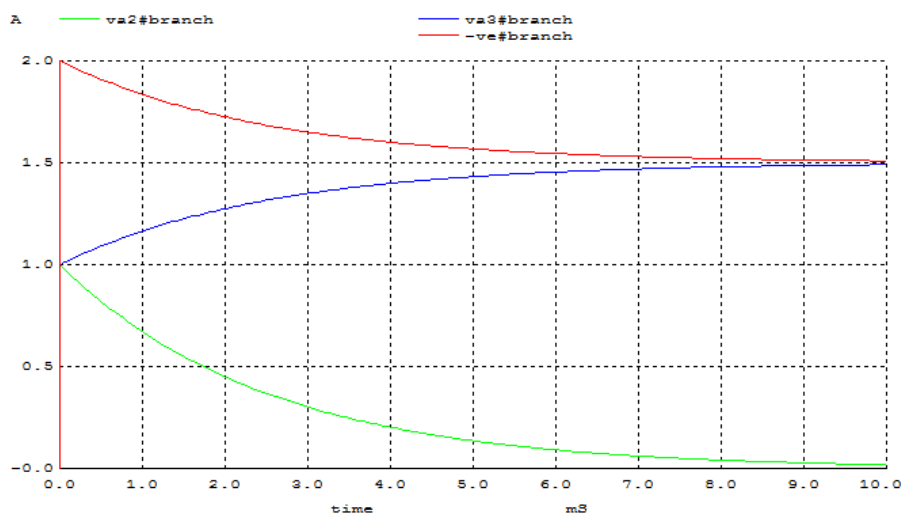


Рис. 7.11. ПП токов

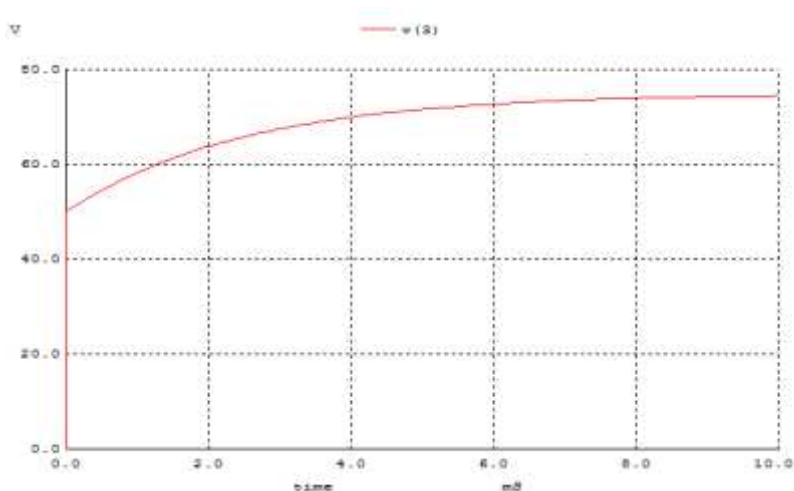


Рис. 7.12. ПП напряжения на C-элементе

Анализ данных зависимостей показывает их качественное соответствие с аналитическим решением, полученным классическим методом [1, с. 254]:

$$\begin{aligned} i_1 &= 1,5 + 0,5e^{-400t} \text{ A}; & i_2 &= e^{-400t} \text{ A}; \\ i_3 &= 1,5 - 0,5e^{-400t} \text{ A}; & u_C &= 75 - 25e^{-400t} \text{ В.} \end{aligned} \quad (7.17)$$

Постоянная времени переходного процесса $\tau = \frac{1}{400} = 2,5 \text{ мс}$

Для проведения количественного сравнения необходимо вывести числовые значения, что можно сделать с помощью директивы **.PRINT**. Напомним, что в опера-

тивной памяти результаты сохраняются в векторах, список которых отображается командой let:

```
WinSpice 3 -> let
Here are the vectors currently active:
Title: PRIMER 7_3
Name: tran1 (Transient Analysis)
Date: Sun Jan 13 16:49:00 2013

V(1)      : voltage, real, 208 long
V(2)      : voltage, real, 208 long
V(3)      : voltage, real, 208 long
V(4)      : voltage, real, 208 long
time      : time, real, 208 long [default scale]
va2#branch : current, real, 208 long
va3#branch : current, real, 208 long
ve#branch  : current, real, 208 long
```

Из списка следует, что программой сгенерированы восемь векторов по 208 элементов каждый. Интерес представляют V(3)-напряжение на конденсаторе и токи ветвей -ve#branch, va2#branch, va3#branch.

Вывод с помощью директивы PRINT осуществляется непосредственно в окно программы WinSpice3 и при достаточно большом объеме данных их начальная часть выходит за пределы окна и утрачивается. В таких случаях целесообразно отказаться от директивы PRINT и вывести (экспортировать) числовые результаты в текстовый файл, который можно просматривать любым текстовым редактором. Программа WinSpice3 поддерживает экспорт в текстовых форматах txt и csv. Описание csv-формата, а также процедура экспорта в csv-файл и его импорт в программу Excel описаны ранее в примере 4.6. Для экспорта интересующих данных в файл result7_3.csv следует выполнить команду

```
WinSpice 4 -> write "C:\results\result7_3.csv" V(3) (-VE#branch) VA2#branch VA3#branch
```

Разумеется, папка results на диске C:\ должна быть предварительно создана. После импорта файла result7_3.csv в табличный процессор. Excel получаем следующую таблицу.

Таблица 7.4

N	time	v(3)	(-ve#branch)	va2#branch	va3#branch
0	0,0000E+00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	5,0000E-07	50,0050	1,9999	0,9998	1,0001
2	1,0000E-06	50,0100	1,9998	0,9996	1,0002
3	2,0000E-06	50,0200	1,9996	0,9992	1,0004
4	4,0000E-06	50,0400	1,9992	0,9984	1,0008
...
57	2,5140E-03	65,8547	1,6829	0,3658	1,3171
...
107	5,0140E-03	71,6357	1,5673	0,1346	1,4327
...

157	7,5140E-03	73,7624	1,5248	0,0495	1,4752
...
207	1,0000E-02	74,5422	1,5092	0,0183	1,4908

Точки с номерами 57, 107, 157, 207 приблизительно равны моментам времени $\tau, 2\tau, 3\tau, 4\tau$ соответственно. Подстановка этих значений времени из столбца time в выражения (7.17) и сравнение с данными таблицы 7.4 свидетельствуют о достаточно точном результате численного решения.

Для начального момента времени $t=0_+$ (точка №0 в табл. 7.4) нулевые значения не соответствуют действительности. Из выражений (7.17) следует, что в данный момент

$$u_C(0_+) = 50 \text{ В}; i_1(0_+) = 2 \text{ А}; i_2(0_+) = 1 \text{ А}; i_3(0_+) = 1 \text{ А}. \quad (7.18)$$

Здесь возникает та же проблема, что и в примере 7.1: при заданном ключевом слове UIC в директиве **.TRAN** расчет по постоянному току в момент 0_+ не производится. Но уже на первом шаге искомые величины принимают почти точное значение (см. точку №1 в табл. 7.4).

Поэтому, если необходимо получение точных значений именно при $t=0_+$, то необходимо убрать UIC, а также параметр IC в описании C-элемента. Также следует добавить директиву .IC V(3)=50, для задания начального условия (7.16). Окончательно, текстовое описание примет вид (файл primer7_3_1.cir).

```
PRIMER 7_3_1 (STYLE SPICE2)
.IC V(3)=50
VE 1 0 DC 150
VA2 2 3 DC 0
VA3 2 4 DC 0
R1 1 2 50
R3 4 0 50
C 3 0 100U
.SAVE ALL
.TRAN 50U 10M
.PLOT TRAN -I(VE) I(VA2) I(VA3)
.PLOT TRAN v(2)
.END
```

Поскольку в данном случае интерес представляют только начальные значения, вместо экспорта в csv-формат используем команду print:

```
WinSpice 2 -> print V(3)[0] (-VE#branch[0]) VA2#branch[0] VA3#branch[0]
v(3)[0] = 5.000000e+01
(-ve#branch[0]) = 2.000009e+00
va2#branch[0] = 1.000018e+00
va3#branch[0] = 9.999911e-01
```

Получаем корректный результат при $t=0_+$, совпадающий с (7.18).

Рассмотрим расчет переходного процесса в цепи второго порядка при ненулевых начальных условиях. В качестве примера решим задачу, заимствованную из [1, с. 256 — 258], где приведено ее аналитическое решение, полученное классическим методом.

ПРИМЕР 7.4. В схеме, показанной на рис. 7.13, до коммутации существовал установившийся режим, причем C-элемент был разряжен. Определить ток через L-элемент и напряжение на C-элементе в переходном процессе, начинающемся после замыкания ключа S.

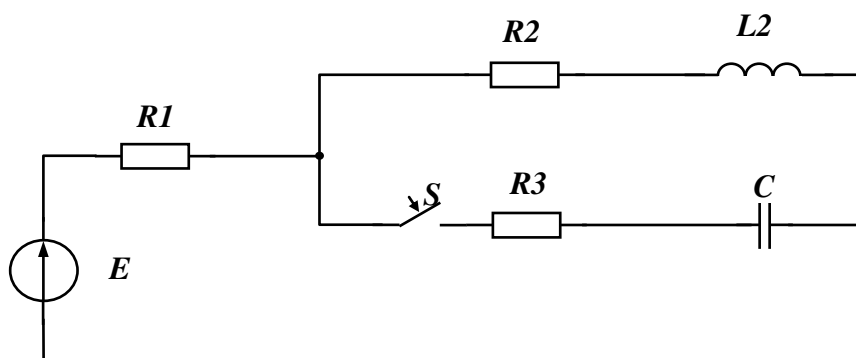


Рис. 7.13. Коммутируемая RLC -цепь: $R_1 = R_3 = 50 \text{ Ом}$; $R_2 = 10 \text{ Ом}$; $C = 150 \text{ мкФ}$; $L = 2 \text{ Гн}$; $E = 120 \text{ В}$

Определим независимые начальные условия. Поскольку до коммутации C -элемент был разряжен, то $u_C(0_-) = 0$. Следовательно, по второму закону коммутации $u_C(0_-) = u_C(0_+) = 0$. Постоянный ток, протекавший через L -элемент до коммутации, определяется соотношением

$$i_2(0_-) = \frac{E}{R_1 + R_2} = 2 \text{ А}. \quad (7.19)$$

Следовательно, по первому закону коммутации $i_2(0_-) = i_2(0_+) = 2 \text{ А}$. Схема в SPICE-обозначениях представлена на рис. 7.14.

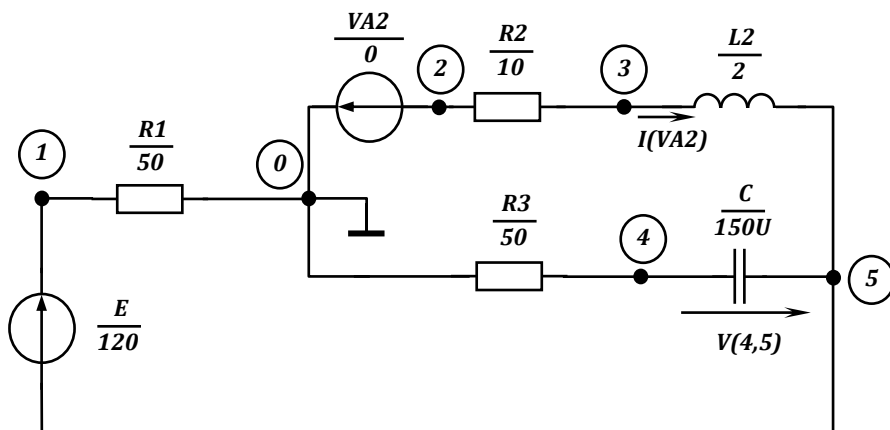


Рис. 7.14. RLC -цепь в SPICE-обозначениях

Текстовое описание имеет вид (файл primer7_4.cir):

PRIMER 7_4 (STYLE SPICE2)

VE 1 5 DC 120

VA2 0 2 DC 0

R1 1 0 50

R2 2 3 10

```

R3 4 0 50
C 4 5 150U IC=0
L2 3 5 2 IC=2
.SAVE ALL
.TRAN 100u 0.25 UIC
.PLOT TRAN I(VA2)
.PLOT TRAN V(4,5)
.END

```

Результаты расчетов показаны на рис. 7.15 и рис. 7.16.

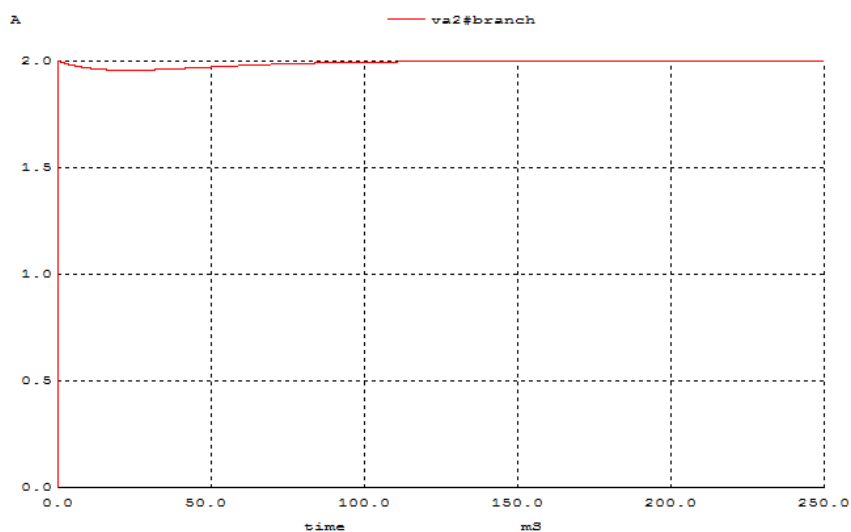


Рис. 7.15. ПП тока, протекающего через L -элемент

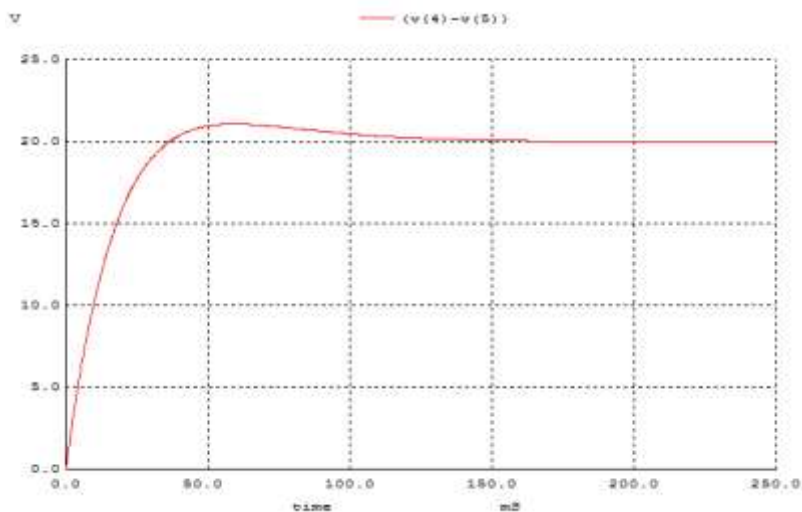


Рис. 7.16. ПП напряжения на C -элементе

Полученные зависимости соответствуют аналитическому решению, приведенному в [1, с. 258]:

$$u_c = 20 + 37,9 e^{-42,1t} \sin(15,2t - 31^\circ 52') \text{ В},$$

$$i_2 = 2 - 0,328 e^{-42,1t} \sin 15,2t \text{ А}.$$

Колебательный характер решения в данном случае не проявляется, так как постоянная времени затухания процесса τ много меньше периода его свободных колебаний T_0 :

$$\tau = \frac{1}{42,1} \ll T_0 = \frac{2\pi}{15,2}.$$

Таким образом, затухание свободной составляющей ПП происходит примерно за четверть периода свободных колебаний. На рис. 7.15 видно, что ток слабо изменяется. Чтобы рассмотреть эти изменения сдвинем начало отсчета по оси токов в точку 1,95 А, а максимальное значение установим на 2,1 А. Для этого выполним в окне WinSpice3 команду

WinSpice 1 -> plot i(va2) ylimit 1.95 2.01

В результате ее выполнения получаем диаграмму рис. 7.17, на которой процесс представлен достаточно детально.

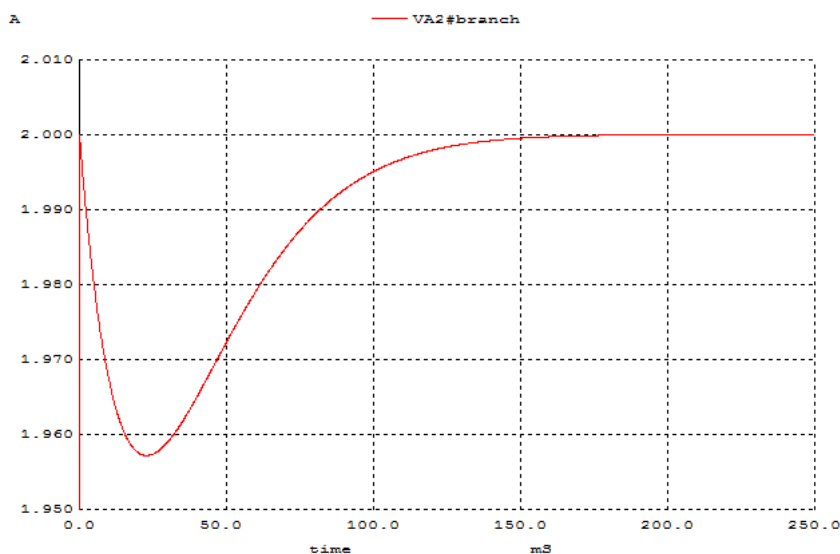


Рис. 7.17. ПП тока, протекающего через L -элемент в крупном масштабе

ПРИМЕР 7.5. схеме рис. 7.13 необходимо рассчитать ПП при трех значениях сопротивления R_I : 50, 250, 500 Ом. Построить совмещенные диаграммы искомых величин при заданных сопротивлениях, а также отдельные диаграммы для $R_I=500$ Ом.

Так как по условию задачи необходимо изменять R_I , то используем стиль SPICE3, позволяющий осуществить это с помощью команды alter. Также следует иметь в виду, что начальный ток $i_2(0_-) = i_2(0_+)$, протекающий через L -элемент, зависит от R_I согласно (7.19), то есть придется изменять значение параметра IC для элемента L2. Цепной файл primer7_5.cir имеет следующий вид:

```

PRIMER 7_5 (STYLE SPICE3)
VE 1 5 DC 120
VA2 0 2 DC 0
R1 1 0 50
R2 2 3 10
R3 4 0 50
C 4 5 150U IC=0
L2 3 5 2 IC=2
.control
destroy all
echo =====
echo PEREHODNYI PROCESS PRI IZMENENII R1=(50, 250, 500) Om
echo =====
* perehodnyi process pri R1=50, L2(IC)=2
tran 100u 0.25 uic
print @R1[resistance] @L2[ic]
*
* perehodnyi process pri R1=250, L2(IC)=0.4615
alter @R1[resistance]=250
alter @L2[ic]=0.4615
tran 100u 0.25 uic
print @R1[resistance] @L2[ic]
*
* perehodnyi process pri R1=500, L2(IC)=0.2353
alter @R1[resistance]=500
alter @L2[ic]=0.2353
tran 100u 0.25 uic
print @R1[resistance] @L2[ic]
*
* GRAFIK NAPR. NA KONDENSATORE PRI R1-var
plot tran1.v(4)-tran1.v(5)
+tran2.v(4)-tran2.v(5)
+tran3.v(4)-tran3.v(5)
+title "NAPR. NA KONDENSATORE PRI R1-var"
*
* GRAFIK TOKA CHEREZ IDUCTIVNOST PRI R1-var
plot tran1.va2#branch tran2.va2#branch tran3.va2#branch
+title "TOK CHEREZ IDUCTIVNOST PRI R1-var"
*
* GRAFIKI NAPR. I TOKA PRI R1=500
plot tran3.v(4)-tran3.v(5)
+title "NAPR. NA KONDENSATORE PRI R1=500"
plot tran3.va2#branch title "TOK CHEREZ IDUCTIVNOST PRI R1=500"
+ ylimit 220m 240m
.endc
.end

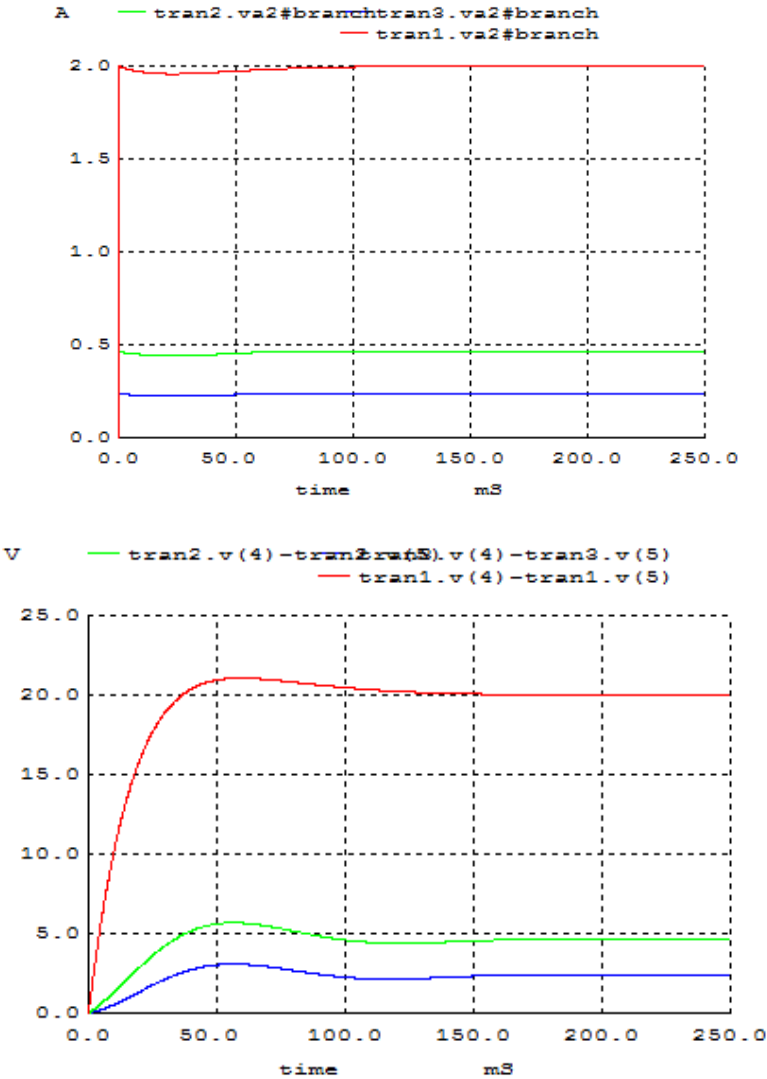
```

В сценарии команда `tran` выполняется три раза (для трех пар значений `R1` и `ic`) и, соответственно, формируются три анализа с именами `tran1`, `tran2` и `tran3`, содержащие одинаковый набор векторов. Эти имена можно вывести командой `setplot`, а набор

векторов — командой `let`. Таким образом, при выводе результатов надо указывать не только имя вектора, но и имя анализа, разделяя их точкой (по аналогии с примером 4.15). Так, например, для определения напряжения на *C*-элементе в третьем анализе необходимо вычислить разность потенциалов узлов 4 и 5 как `tran3.v(4)-tran3.v(5)`.

В директивах `plot` указаны пояснительные заголовки (`title`), а в последней команде задан параметр `ulimit` для укрупнения масштаба.

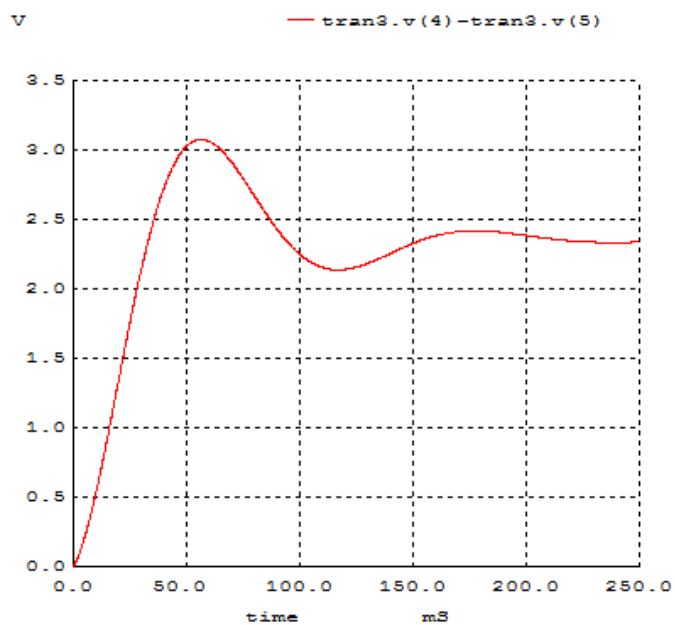
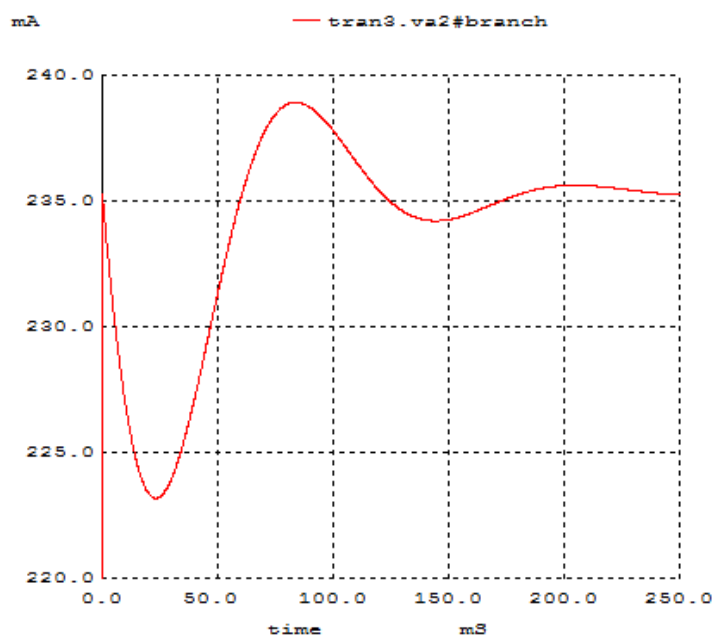
Результаты расчетов приведены на рис. 7.18 и рис. 7.19.



а)

б)

Рис. 7.18. Совмещенные графики ПП тока, протекающего через *L*-элемент (а) и напряжения на *C*-элементе (б) при заданных значениях *R_L*



a)

б)

Рис. 7.19. Графики ПП тока, протекающего через L -элемент (а) и напряжения на C -элементе (б) при $R_1=500 \text{ Ом}$

Анализ полученных зависимостей свидетельствует о проявлении колебательного характера ПП при увеличении сопротивления R_L . Наиболее отчетливо это видно на рис. 7.19.

7.4. Переходные процессы в цепях с изменяющимися во времени источниками

Как было отмечено выше, ПП возникают также при изменениях токов и напряжений независимых источников. В этом случае в их описаниях необходимо задать соответствующие функции времени. Источники этого типа часто называют *сигнальными*. В WinSpice3 возможен выбор из пяти вариантов сигнальных источников:

- импульсный **PULSE**(список параметров);
- синусоидальный **SIN**(список параметров);
- экспоненциальный **EXP**(список параметров);
- кусочно-линейный **PWL**(список параметров);
- частотно-модулированный **SFFM**(список параметров).

В круглых скобках данных спецификаций приводятся списки параметров, определяющие конкретный вид временной функции источника. Каждому параметру соответствует своя позиция в списке. При описании конкретного источника числовые значения параметров записываются в соответствующих позициях. Запись «нуля» в позиции параметра устанавливает его «значение по умолчанию» (не обязательно нулевое). К этому же результату приводит опускание одного или нескольких параметров, если они находятся в конце списка. Некоторые «значения по умолчанию» привязаны к интервалам TSTEP и TSTOP из директивы **.TRAN** (см. п.7.2).

Спецификации независимых постоянных и переменных (для частотного анализа) источников были рассмотрены ранее в пп. 1.2.1, 1.2.2 и 4.3.1 соответственно. В отличие от них, для сигнальных источников напряжения и тока после указания имен зажимов N1 и N2 записывается спецификация одного из пяти приведенных вариантов. Таким образом, описания независимых сигнальных источников напряжения и тока имеют соответственно следующий вид:

VXXXXXXX N1 N2 <PULSE()> <SIN()> <EXP()> <PWL()> <SFFM()>

IXXXXXXX N1 N2 <PULSE()> <SIN()> <EXP()> <PWL()> <SFFM()>

7.4.1. Источник импульсного сигнала **PULSE()**

Электрическим импульсом называется кратковременное скачкообразное изменение электрического напряжения или силы тока. В общем случае спецификация **PULSE()** описывает периодически повторяющиеся импульсы трапецеидальной формы и имеет вид

PULSE(Y1 Y2 TD TR TF PW PER).

Временная диаграмма с указанием характерных параметров импульсного источника приведена на рис. 7.20.

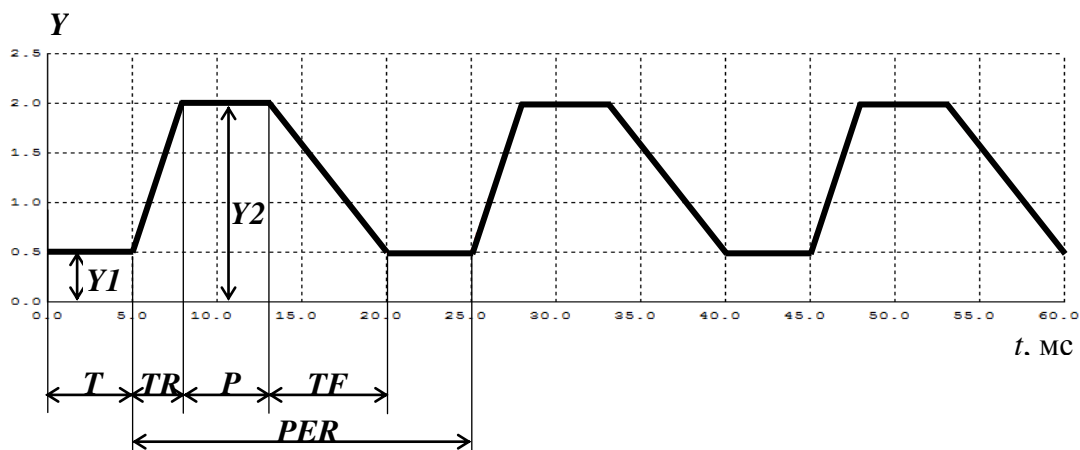


Рис. 7.20. Временная диаграмма импульсного источника и ее характерные параметры

Физический смысл параметров и их значения по умолчанию приведены в таблице 7.5.

Таблица 7.5

Обозначение параметра	Физический смысл	Размерность	Значение по умолчанию
Y1	Начальное значение (напряжение или ток)	В или А	
Y2	Максимальное значение (напряжение или ток)	В или А	
TD	Начало переднего фронта импульса (задержка)	с	0
TR	Длительность переднего фронта (время нарастания)	с	TSTEP
TF	Длительность заднего фронта (время спада, время среза)	с	TSTEP
PW	Ширина вершины импульса	с	TSTOP
PER	Период повторения	с	TSTOP

Рассмотрим характерные примеры описаний импульсных источников с пояснениями:

1) V5 7 15 PULSE(0 5.2 5m 0.1n 0.1n 1u 2u)

Источник периодических импульсов напряжения V5, включенный между узлами 7 (плюс) и 15 (минус). Напряжение изменяется, начиная с момента времени 5 мс (задержка), от нуля до 5,2 В с периодом 2 мкс. Длительности переднего и заднего фронтов равны 0,1 нс, а ширина вершины импульса составляет 1 мкс;

2) IS2 25 IN PULSE(-1.2 2.54 1m 0.1m 0.1m 9m)

Источник одиночного импульса тока IS2, ток которого протекает внутри источника в направлении от узла 25 к узлу IN. Импульс начинается с задержкой 1 мс, изменяясь от (-1,2) А до 2,54 А. Длительности переднего и заднего фронтов равны 0,1 мс, а ширина вершины импульса составляет 9 мс. Заданы только 6 параметров. Поскольку последний параметр PER опущен, то его значение устанавливается программой WinSpice3 по умолчанию равным параметру TSTOP в директиве .TRAN (см. табл 7.5);

3) VIMP OUT 25S PULSE(0 5 2.5m 0.1m)

Источник скачка напряжения 0...5 В, включенный между узлами OUT (плюс) и 25S (минус). Скачок начинается с задержкой 2,5 мс и характеризуется длительностью переднего фронта 0,1 мс. Заданы только 4 параметра. Поскольку последние 3 параметра TF, PW и PER опущены, то их значения устанавливаются программой WinSpice3 по умолчанию согласно табл. 7.5.

Теперь рассмотрим несколько примеров расчетов с импульсными источниками.

ПРИМЕР 7.6. Параметры источника периодических импульсов напряжения с именем VIMP имеют следующие значения (рис. 7.20): Y1=0,5 В; Y2=2 В; TD=5 мс; TR=3 мс; TF=7 мс; PW=5 мс; PER=20 мс. Описание источника, подключенного между узлами 1 и 0, имеет вид

VIMP 1 0 PULSE(0.5 2 5m 3m 7m 5m 20m)

Для проверки рассчитаем простейшую цепь, состоящую из источника VIMP и подключенного к нему резистора. Последний необходим для замыкания цепи, поэтому его сопротивление может быть задано произвольно. Расчет будем проводить на интервале 0...60 мс, что соответствует трем периодам сигнала. Схемный файл primer 7_6 содержит следующее описание:

```
PRIMER 7_6 (STYLE SPICE2)
*IMPULSNIU ISTOCHNIK
VIMP 1 0 PULSE(0.5 2 5m 3m 7m 5m 20m)
R 1 0 10k
.TRAN 0.1m 60m
.PLOT TRAN V(1) YLIMIT 0 2.5
.END
```

В результате получаем зависимость, совпадающую с рис. 7.20.

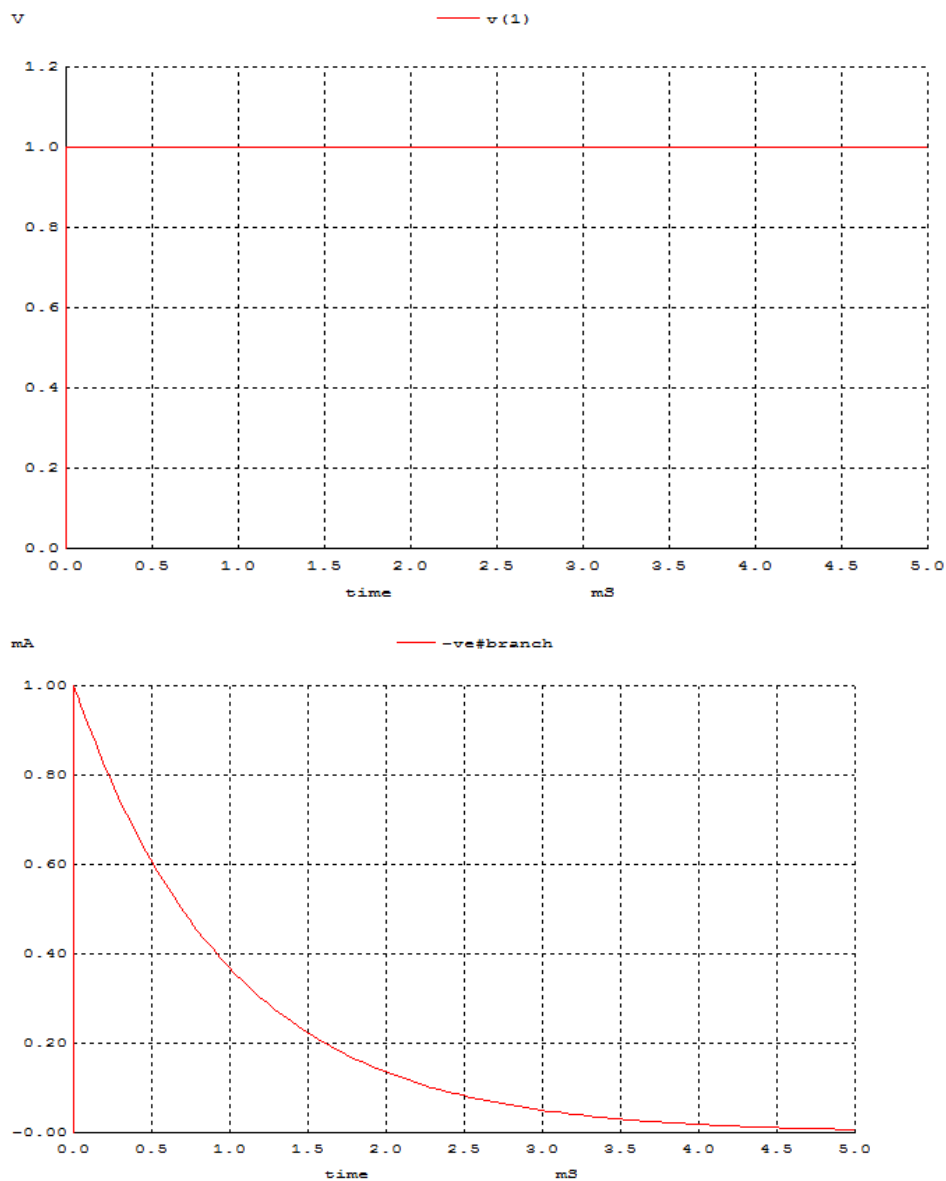
ПРИМЕР 7.7. С помощью спецификации PULSE можно задавать и непериодические сигналы. Например, в схеме на рис. 7.1 вместо источника VE и ключа S можно использовать источник скачкообразного напряжения 1 В. Для этого в файле primer7_1.cir заменим описание источника постоянного тока VE одноименным импульсным источником

VE 1 0 PULSE(0 1 0 1U).

Данная запись задает Y1=0; Y2=1 В; TD=0 с; TR=1 мкс. Параметры TF, PW, PER опустим, тем самым присваивая им значения по умолчанию согласно таблице 7.5. Таким образом, TF=TSTEP=50 мкс; PW=TSTOP=5 мс; PER=TSTOP=5 мс. Поскольку PW задано равным PER, то на всем расчетном интервале (0...TSTOP) напряжение будет равно Y2=1 В, что и требуется. Текстовое описание имеет вид (файл primer7_7.cir)

```
PRIMER 7_7 (STYLE SPICE2)
VE 10 PULSE(0 1 0 1U)
R 1 2 1K
C 2 0 1U IC=0
.SAVE ALL
.TRAN 50U 5M UIC
.PLOT TRAN V(1) YLIMIT 0 1.2
.PLOT TRAN v(2)
.PLOT TRAN -I(VE)
.PRINT TRAN v(2)
.PRINT TRAN -I(VE)
.END
```

Полученные временные зависимости напряжения импульсного источника и тока в цепи приведены на рис. 7.21.



а)

б)

Рис. 7.21. Временные диаграммы напряжения импульсного источника (а) и тока в цепи (б)

Из сравнения рис. 7.21 б и рис. 7.4 видно, что результаты расчетов ПП тока практически совпадают.

7.4.2. Источник синусоидального сигнала SIN()

В общем случае спецификация SIN() задает синусоидально изменяющееся во времени напряжение или ток с экспоненциальным затуханием:

$$y(t) = \begin{cases} Y_0, & 0 \leq t < t_d \\ Y_0 + Y_a e^{-\theta(t-t_d)} \sin(2\pi f(t-t_d)), & t \geq t_d \end{cases} \quad (7.20)$$

где переменные описаны в табл. 7.6.

Спецификация записывается в виде

SIN(Y0 YA FREQ TD THETA)

Таблица 7.6

Обозначение параметра в формуле (7.20)	Физический смысл	Обозначение параметра в спецификации SIN()	Размерность	Значение по умолчанию
Y_0	Постоянная составляющая (напряжение или ток)	Y0	В или А	
Y_a	Амплитуда (напряжение или ток)	YA	В или А	
f	Частота	FREQ	Гц	1/TSTOP
t_d	Задержка	TD	с	0
θ	Коэффициент затухания	THETA	1/с	0

При заданной частоте FREQ количество периодов N зависит от параметров TD и TSTOP и определяется соотношением $N = \text{FREQ} * (\text{TSTOP} - \text{TD})$. Если частота не задана, то согласно табл. 6.7 $\text{FREQ} = (\text{TSTOP})^{-1}$ и источник генерирует часть периода сигнала, определяемую вышеприведенной формулой. Если при этом $\text{TD} = 0$, то генерируется один полный период.

Рассмотрим характерные примеры описаний синусоидальных источников с пояснениями:

1) V_SUPPL3 53 5 SIN (1.5 3 10k 0.5m)

Источник незатухающего синусоидального напряжения V_SUPPL3 частотой 10 кГц, амплитудой 3 В и постоянной составляющей 1,5 В, включенный между узлами 53 (плюс) и 5 (минус). Задержка составляет 0,5 мс. Задано 4 параметра. Пятый параметр, коэффициент затухания THETA, опущен, поэтому он имеет по умолчанию нулевое значение. Временная диаграмма с обозначениями параметров представлена на рис. 7.22.

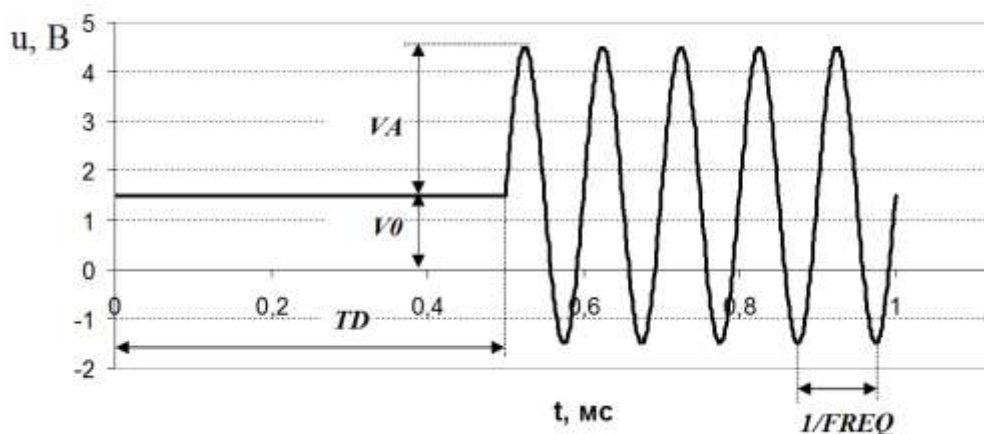


Рис. 7.22. Временная диаграмма синусоидального источника напряжения и ее характерные параметры

2) IZ NN 5 SIN (1.5 3 10k 0.1m 5000)

Источник затухающего синусоидального тока IZ частотой 10 кГц, амплитудой 3 А и постоянной составляющей 1,5 А, ток которого протекает внутри источника в направлении от узла NN к узлу 5. Задержка составляет 0,1 мс, коэффициент затухания равен 5000 с^{-1} . Временная диаграмма представлена на рис. 7.23.

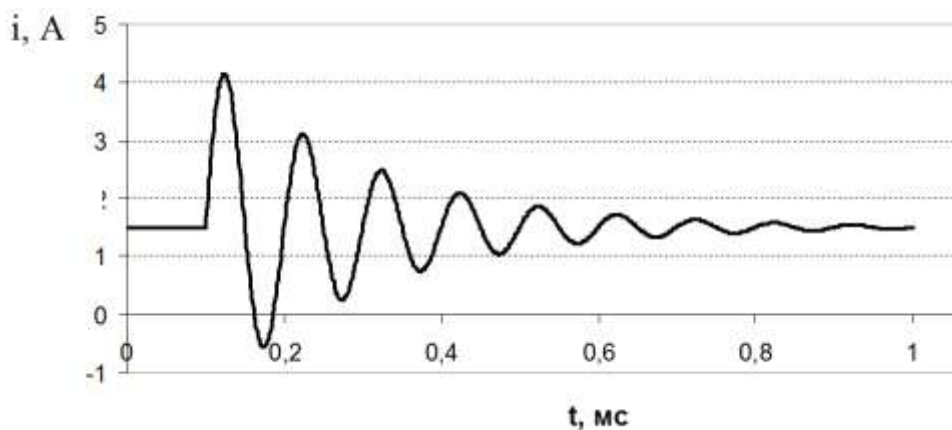


Рис. 7.23. Временная диаграмма затухающего синусоидального источника тока

3) IZ NN 5 SIN (1.5 3 10k 0.1m -1000)

Тот же источник, что и в предыдущем примере, но при отрицательном коэффициенте затухания (-1000 с^{-1}), что приводит к возрастанию колебаний. Временная диаграмма представлена на рис. 7.24.

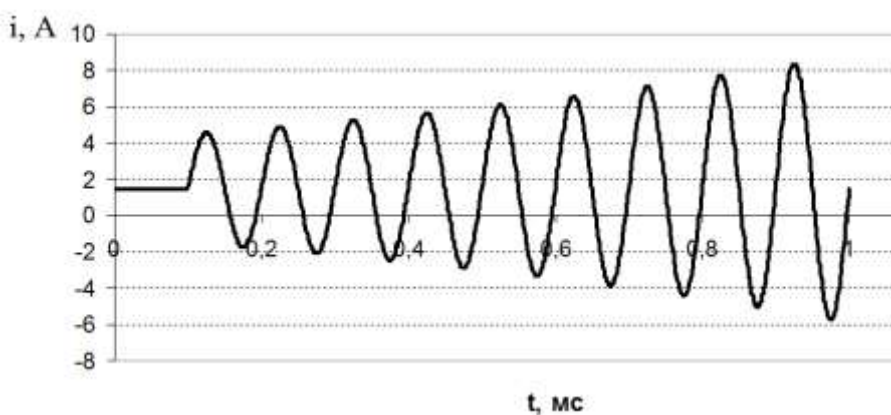


Рис. 7.24. Временная диаграмма возрастания синусоидального источника тока при отрицательном коэффициенте затухания

4) $V_e 1 0 \text{ SIN}(0 200)$

Источник *одного периода* незатухающего синусоидального напряжения V_e частотой по умолчанию $(TSTOP)^{-1}$ Гц, амплитудой 200 В без постоянной составляющей и задержки, включенный между узлами 1 (плюс) и 0 (минус).

Переходные процессы в цепях переменного тока часто обусловлены включением электрической сети. В данном случае постоянная составляющая, задержка и затухание отсутствуют ($Y_0=0$, $t_d=0$, $\theta=0$) и выражение (7.20) принимает вид

$$y(t) = Y_a \sin(2\pi f t), \quad t \geq 0 \quad (7.21)$$

Из данного выражения следует, что в начальный момент времени ($t=0$) значение источника $y(0)$ равно нулю. Однако, как правило, при $t=0$ значение источника отлично от нуля и выражение (7.21) неприменимо. Источник в данном случае должен описываться с учетом начальной фазы ψ , а именно

$$y(t) = Y_a \sin(2\pi f t + \psi), \quad t \geq 0 \quad (7.22)$$

Покажем, что (7.22) можно получить из (7.20), задавая отрицательную задержку $t_d < 0$. Тогда из (7.20) имеем

$$y(t) = Y_a \sin(2\pi f t + 2\pi f |t_d|), \quad t \geq 0. \quad (7.23)$$

Из сравнения (7.22) и (7.23) следует $\psi = 2\pi f |t_d|$, откуда определяется соответствующая задержка

$$t_d = -\frac{\psi}{2\pi f}. \quad (7.24)$$

Данное выражение дает правильное значение, если начальная фаза ψ в (7.22) положительна. В противном случае следует добавить к ψ один период, т. е. 2π или 360° .

Пусть, например, нужно описать источник синусоидального напряжения $u = 127 \sin(314,16t + 50^\circ)$ В. Согласно (7.24) имеем

$$t_d = -\frac{50 \frac{\pi}{180}}{314,16} = -0,002778 \text{ с} = -2,778 \text{ мс}$$

Частота источника $f=314,16/(2\pi)=50$ Гц. Соответствующая спецификация имеет вид

$$\text{SIN}(0 \ 127 \ 50 \ -2.778\text{m} \ 0)$$

Временная диаграмма напряжения рассматриваемого источника приведена на рис. 7.25

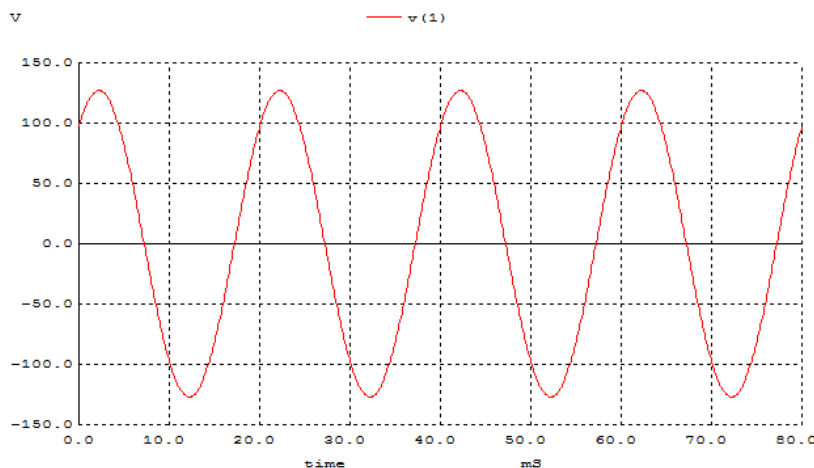


Рис. 7.25. Временная диаграмма синусоидального источника напряжения при положительной начальной фазе $\psi = 50^\circ$

Пусть источник синусоидального напряжения отличается только знаком начальной фазы от вышерассмотренного:

$$u = 127 \sin(314,16t - 50^\circ) \text{ В. (7.25)}$$

Преобразуем отрицательную начальную фазу $\psi = -50^\circ$ в положительную, добавив 360° . Получим $\psi = 310^\circ$, после чего по формуле (7.24) получим

$$t_d = -\frac{310 \frac{\pi}{180}}{314,16} = -0,01722 \text{ с} = -17,22 \text{ мс}$$

Спецификация источника, соответствующая (7.25), имеет вид

$$\text{SIN}(0 \ 127 \ 50 \ -17.22\text{m} \ 0)$$

Временная диаграмма напряжения рассматриваемого источника приведена на рис. 7.26

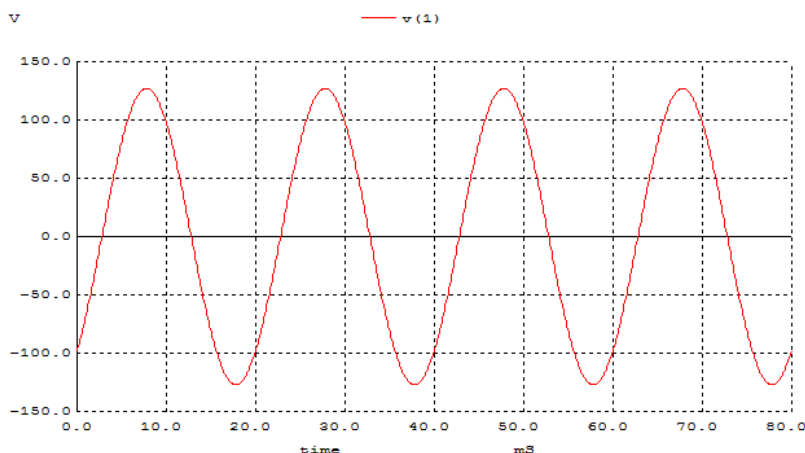


Рис. 7.26. Временная диаграмма синусоидального источника напряжения при положительной начальной фазе $\psi = -50^\circ$

Рассмотрим расчет переходного процесса в цепи первого порядка при ненулевых начальных условиях. В качестве примера решим задачу, заимствованную из [1, с. 254], где приведено ее аналитическое решение, полученное классическим методом.

ПРИМЕР 7.8. В схеме, показанной на рис. 7.27, до коммутации был установившийся синусоидальный режим. Определить ток и напряжение на L -элементе в переходном процессе, возникающем после замыкания ключа S .

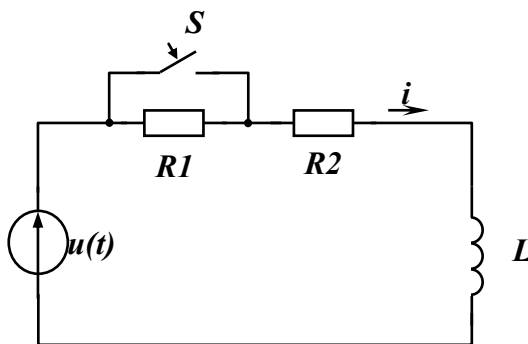


Рис. 7.27. Коммутация в RL -цепи с источником синусоидального напряжения: $R_1=R_2=2\text{ Ом}$; $L=9,55\text{ мГн}$; $u(t) = 127\sin(314,16t - 50^\circ)\text{ В}$

Определим начальное условие $i_L(0_+)$ для индуктивного элемента. До коммутации в цепи существовал установившийся синусоидальный режим, обусловленный источником $u(t)$. Ток, протекавший в цепи, можно определить по закону Ома для комплексных амплитуд:

$$\underline{i}_m = \frac{\underline{\dot{U}}_m}{\underline{Z}} = \frac{127e^{-j50^\circ}}{4 + j3} = 25,4e^{-j86,87^\circ}\text{ А}.$$

Тогда мгновенное значение будет иметь вид $i(t) = 25,4 \sin(314,16t - 86,87^\circ)$ А. В момент времени непосредственно перед коммутацией ($t=0_-$) ток можно найти из общего выражения, положив в нем $t=0$, т.е. $i(0_-) = 25,4 \sin(-86,87^\circ) = -25,36$ А. По первому закону коммутации $i_L(0_+) = i_L(0_-) = -25,36$ А.

Для составления текстового описания *послекоммутационной* схемы следует разметить узлы, проставить параметры элементов и их обозначения (см. рис. 7.28). Ключ S полагается замкнутым, и поэтому на схеме отсутствует $R1$.

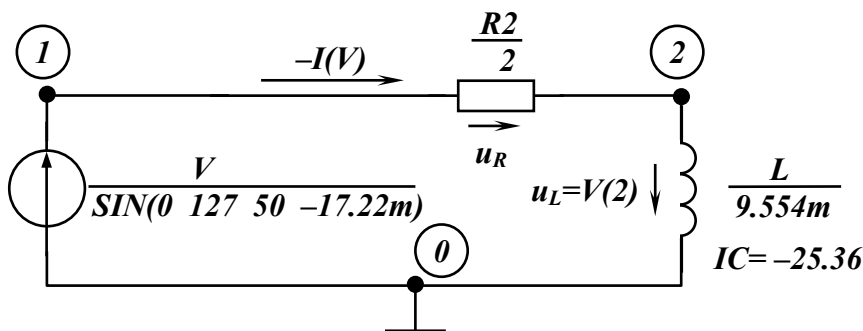


Рис. 7.28. Исследуемая RL -цепь в SPICE-обозначениях

Спецификация синусоидального источника рассматривалась выше в качестве примера (см. формулу (7.25)). С учетом этого текстовое описание имеет вид (файл primer7_8.cir)

```
PRIMER 7_8 (STYLE SPICE2)
R2 1 2 2
L 2 0 9.554M IC=-25.36
V 1 0 SIN(0 127 50 -17.22m)
.TRAN 0.1m 60m UIC
.SAVE ALL
.PLOT TRAN V(1)
.PLOT TRAN -I(V)
.END
```

Мгновенные значения напряжения источника представлены на рис. 7.29

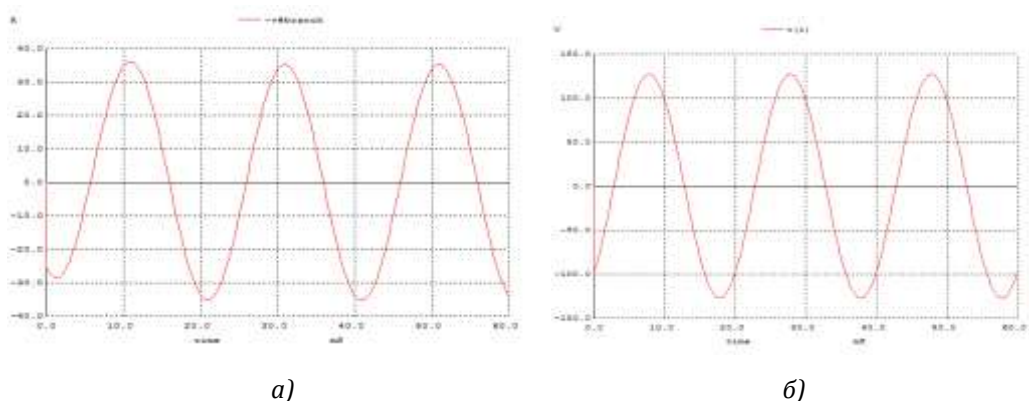


Рис. 7.29. Временные диаграммы напряжения источника (а) и тока в цепи (б)

Точное решение данной задачи приведено в [1, с. 255]:

$$i(t) = 35,22 \sin(314,16t - 106^\circ 20') + 8,45e^{-210t} \text{ А} \quad (7.26)$$

На рис. 7.29, б видно, что первый минимум тока меньше по абсолютной величине последующих минимумов. По мере затухания ПП устанавливаются синусоидальные колебания тока с амплитудой 35,22 А, что соответствует точному решению (7.26).

ПРИМЕР 7.9. В схеме, показанной на рис. 7.13, параметры элементов соответствуют примеру 7.4. Однако вместо источника постоянного напряжения E используется синусоидальный источник $e(t) = 127 \sin(314,16t + 40^\circ)$ В. Как и в примере 7.4, требуется определить ток через L -элемент и напряжение на C -элементе в переходном процессе, начинающемся после замыкания ключа S .

Точное решение данной задачи приведено в [1, с. 259-261], где начальные условия для C - и L -элементов определяются из расчета установившегося синусоидального режима до коммутации: $u_C(0_+) = 0$; $i_L(0_+) = i_2(0_+) = -0,1415$ А.

Текстовое описание выполняется по рис. 7.14 с учетом синусоидального характера источника. $e = 127 \sin(314,16t + 40^\circ)$ В. Частота источника $f = 314,16 / (2\pi) = 50$ Гц. Для задания начальной фазы определяем соответствующее значение t_d . Согласно (7.24) имеем

$$t_d = -\frac{40 \frac{\pi}{180}}{314,16} = -0,002222 \text{ с} = -2,222 \text{ мс}$$

Таким образом, источник описывается строкой

VE 1 5 SIN(0 127 50 -2.222m)

С учетом этого текстовое описание имеет вид (файл primer7_9.cir)

PRIMER 7_9 (STYLE SPICE2)

VE 1 5 SIN(0 127 50 -2.222m)

VA2 0 2 DC 0

R1 1 0 50

R2 2 3 10

R3 4 0 50

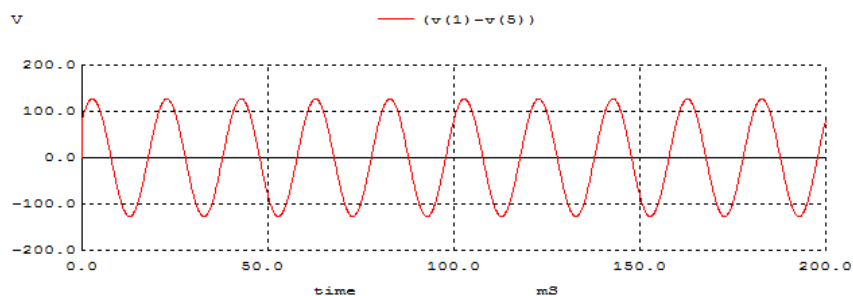
C 4 5 150U IC=0

L2 3 5 2 IC=-0.1415

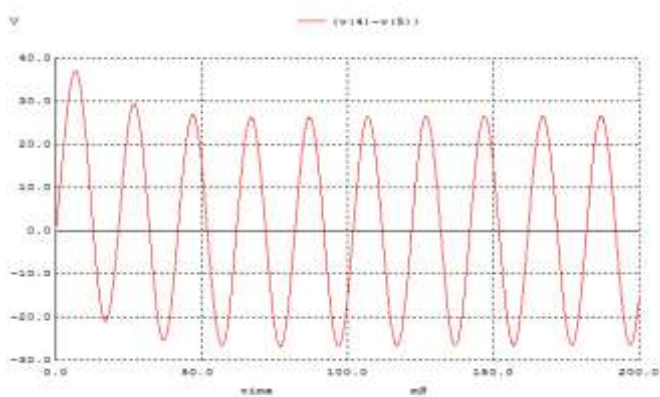
.SAVE ALL

```
.TRAN 100u 0.2 UIC
.PLOT TRAN V(1,5)
.PLOT TRAN I(VA2)
.PLOT TRAN V(4,5)
.END
```

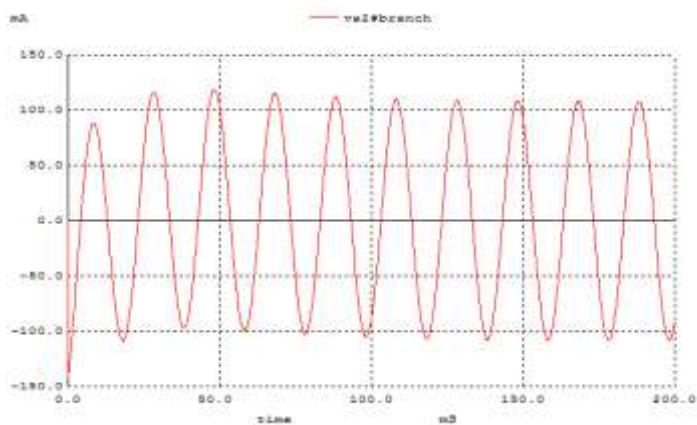
Результаты расчета приведены на рис. 7.30



а)



б)



в)

Рис. 7.30. Временные диаграммы напряжения источника (а), напряжения на C -элементе (б) и тока через L -элемент (в)

7.4.3. Источник экспоненциального сигнала EXP()

В общем случае спецификация EXP() задает экспоненциальный импульс напряжения или тока:

$$y(t) = \begin{cases} Y_1, & 0 \leq t < t_1 \\ Y_1 + (Y_2 - Y_1)(1 - e^{-\frac{t-t_1}{\tau_1}}), & t_1 \leq t < t_2 \\ Y_1 + (Y_2 - Y_1)(1 - e^{-\frac{t-t_1}{\tau_1}}) + (Y_1 - Y_2)(1 - e^{-\frac{t-t_2}{\tau_2}}), & t \geq t_2 \end{cases} \quad (7.27)$$

где переменные описаны в табл. 7.7.

Спецификация записывается в виде

EXP(Y1 Y2 T1 TAU1 T2 TAU2)

Таблица 7.7

Обозначение параметра в формуле (7.27)	Физический смысл	Обозначение параметра в спецификации SIN()	Размерность	Значение по умолчанию
Y_1	Начальное значение (напряжение или ток)	Y1	В или А	
Y_2	Максимальное значение (напряжение или ток)	Y2	В или А	
t_1	Начало переднего фронта	T1	с	0
τ_1	Постоянная времени переднего фронта	TAU1	с	TSTEP
t_2	Начало заднего фронта	T2	с	T1+TSTEP
τ_2	Постоянная времени заднего фронта	TAU2	с	TSTEP

На рис. 7.31 показан общий вид экспоненциального импульса и показаны его характерные параметры.

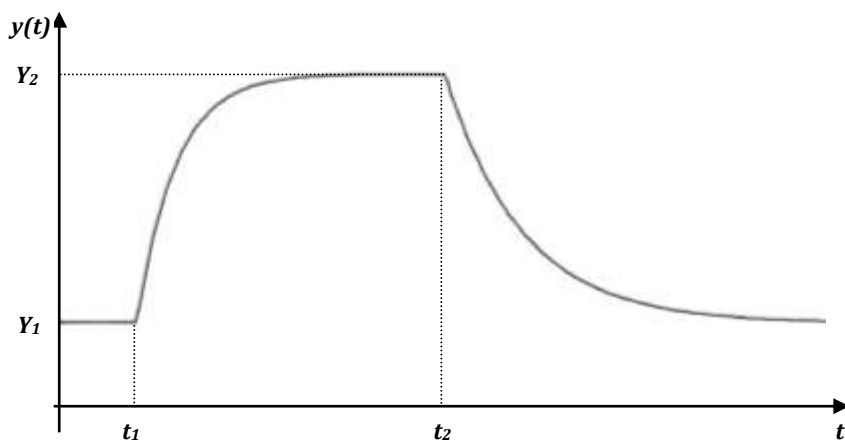


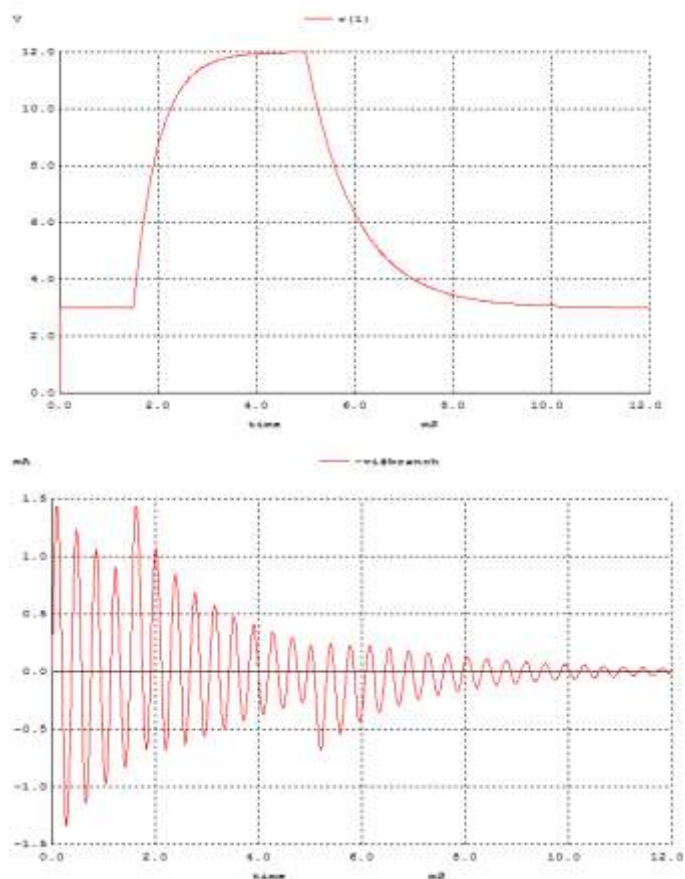
Рис. 7.31. Временная диаграмма экспоненциального напряжения и ее характерные параметры

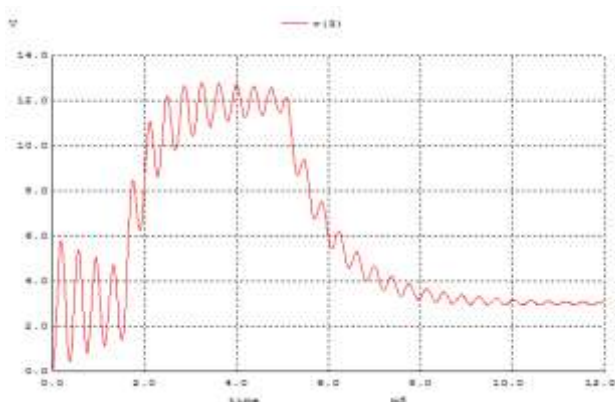
ПРИМЕР 7.10. Источник экспоненциального напряжения подключается к последовательной RLC -цепи со следующими параметрами: $R=100$ Ом, $L=120$ мГн, $C=30$ нФ. Параметры источника: $Y_1=3$, $Y_2=12$ В, $T_1=1,5$ мс, $\text{TAU1}=0,5$ мс, $T_2=5$ мс, $\text{TAU2}=1$ мс. Найти ток и напряжение на емкостном элементе в переходном процессе. Начальные условия принять нулевыми.

Текстовое описание составим без изображения схемы ввиду ее простоты (файл primer7_10.cir):

```
PRIMER 7_10 (STYLE SPICE2)
VI 1 0 EXP(3 12 1.5m 0.5m 5m 1m)
R 1 2 100
L 2 3 120m IC=0
C 3 0 30n IC=0
.TRAN 10u 12m UIC
.SAVE ALL
.PLOT TRAN V(1)
.PLOT TRAN -I(VI)
.PLOT TRAN V(3)
.END
```

Результаты расчетов приведены на рис. 7.32





- а)
б)
в)

Рис. 7.32. Временные диаграммы напряжения источника (а), тока через L -элемент (б) и напряжения на C -элементе (в)

ПРИМЕР 7.11. В схеме рис. 7.5 источник ЭДС изменяется по закону $e(t) = 100e^{-\frac{t}{2}}$ В, $R=2$ Ом, $L=4$ Гн. Найти ток, напряжение на L -элементе и мгновенные мощности в переходном процессе, возникающем после замыкания ключа S . Начальные условия принять нулевыми [1, с.279].

На рис. 7.33 представлена зависимость ЭДС от времени.

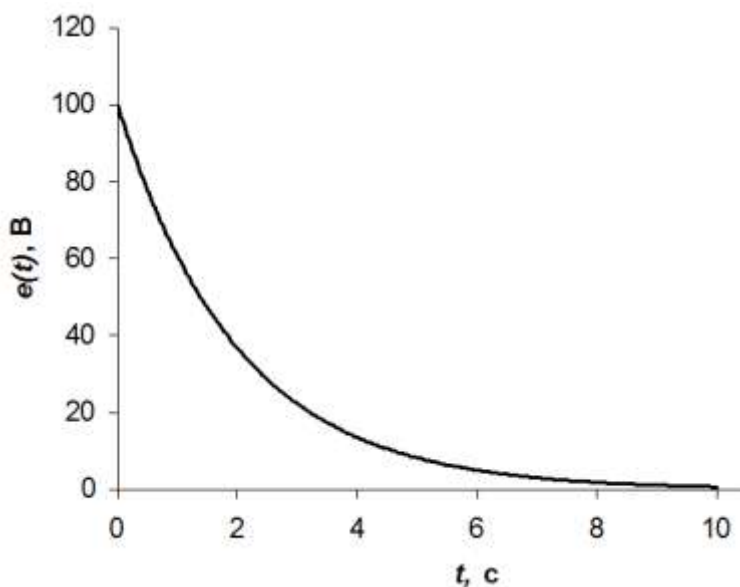


Рис. 7.33. Временная зависимость ЭДС источника

Из сравнения рис. 7.33 и рис. 7.31 следует, что $Y_0=0$, $Y_1=100$ В, $T_1=0$, $\text{TAU}_1=0$, $T_2=0$, $\text{TAU}_2=2$ с. Соответствующая спецификация источника имеет вид
`EXP(0 100 0 0 0 2)`.

Поскольку по условию требуется найти мгновенные мощности, используем стиль SPICE3. Введем в рассмотрение следующие переменные:

i_c — ток в цепи;

p_{resist} — мгновенная мощность R -элемента (p_R);

p_{induct} — мгновенная мощность L -элемента (p_L);

p_{cir} — мгновенная мощность цепи (p).

В результате получим текстовое описание схемы (файл primer7_11.cir):

PRIMER 7_11 (STYLE SPICE3)

VE 1 0 EXP(0 100 0 0 0 2)

R 1 2 2

L 2 0 4 IC=0

.control

destroy all

tran 5m 10 uic

let ic=-ve#branch

plot v(1)

plot ic

plot v(2)

let p_resist=v(1,2)*ic

let p_induct=v(2)*ic

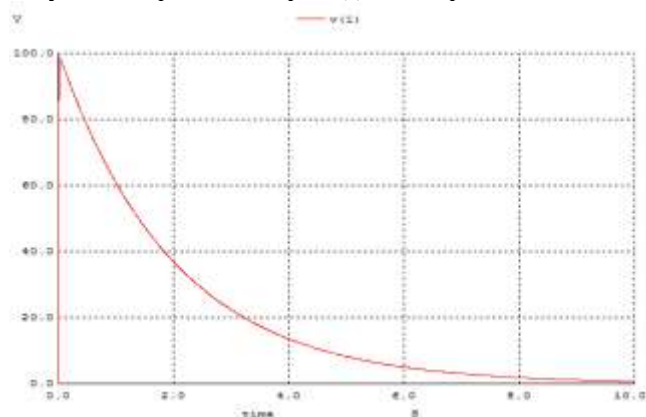
let p_cir=v(1)*ic

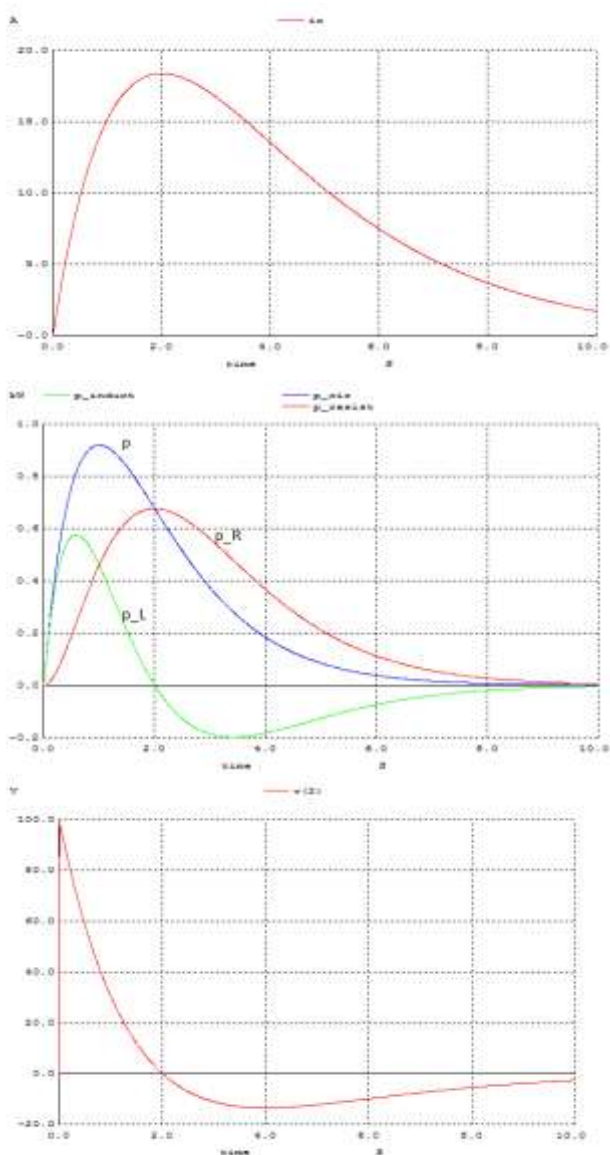
plot p_resist p_induct p_cir

.endc

.END

Результаты расчетов приведены на рис. 7.34.





а)
б)
в)
г)

Рис. 7.34. Временные диаграммы напряжения источника (а), тока через L -элемент (б), напряжения на L -элементе (в) и мгновенных мощностей (г)

Полученные результаты совпадают с точным решением, полученным операторным методом [1, с.279]

$$i = 25te^{-\frac{t}{2}} \text{ A}; \quad u_L = 100e^{-\frac{t}{2}}(1 - 0,5t).$$

Следует отметить, что по рис. 7.34, г можно проверить баланс мгновенных мощностей $p = p_R + p_L$ в любой момент времени.

7.4.4. Источник кусочно-линейного сигнала PWL()

В общем случае спецификация PWL() задает кусочно-линейную функцию изменения во времени напряжения или тока источника. Графически такой сигнал изображается ломаной линией (рис. 7.35).

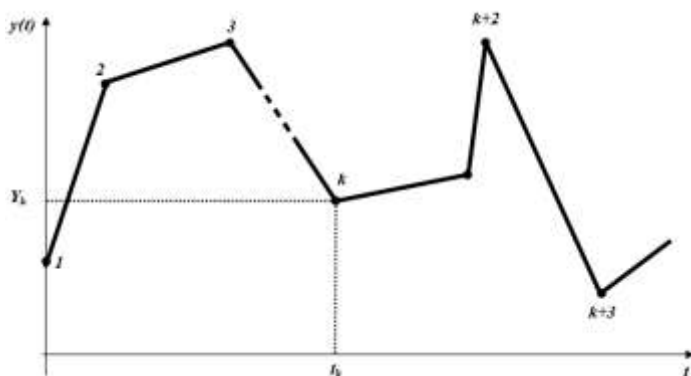


Рис. 7.35. Временная диаграмма кусочно-линейного сигнала и ее характерные параметры

Данная функция однозначно описывается списком пар координат (t_k, Y_k) точек излома, составленным в порядке возрастания времени. N пар координат задают ломаную линию, состоящую из $N-1$ участков: $PWL(T1 Y1 T2 Y2 T3 Y3 \dots TN YN)$. После окончания последнего участка функция сохраняет значение YN до окончания расчетного интервала TSTOP.

Мгновенные значения рассматриваемых источников в процессе вычислений определяются программой WinSpice методом кусочно-линейной интерполяции. В отличие от спецификации PULSE, можно задавать одиночные импульсы достаточно произвольной формы.

Рассмотрим характерные примеры описаний кусочно-линейных источников с пояснениями:

1) IPULS ST1 BTA PWL(0 1)

Источник единичного скачка тока, протекающего внутри источника от узла ST1 к BTA. Скачок начинается в нулевой момент времени и продолжается до окончания расчетного интервала TSTOP. Для задания этого источника также можно использовать описанную выше спецификацию PULSE (см. пример 7.7);

2) V1 5 9 PWL(1m 0 2m 5.0 5m 0)

Источник одиночного треугольного импульса напряжения V1 подключен к узлам 5 (плюс) и 9 (минус). Импульс начинается в момент времени 1 мс с нулевого значения, достигает максимума 5 В при 2 мс и спадает до нуля при 5 мс.

Рассчитаем ПП в цепи со сложным кусочно-линейным импульсным источником сигнала.

ПРИМЕР 7.12. В схеме рис. 7.36, содержащей ИНУН, источник входного напряжения $u_{вх}$ изменяется, как показано на рис. 7.37. Определить ПП выходного напряжения $u_{вых}$ при нулевых начальных условиях.

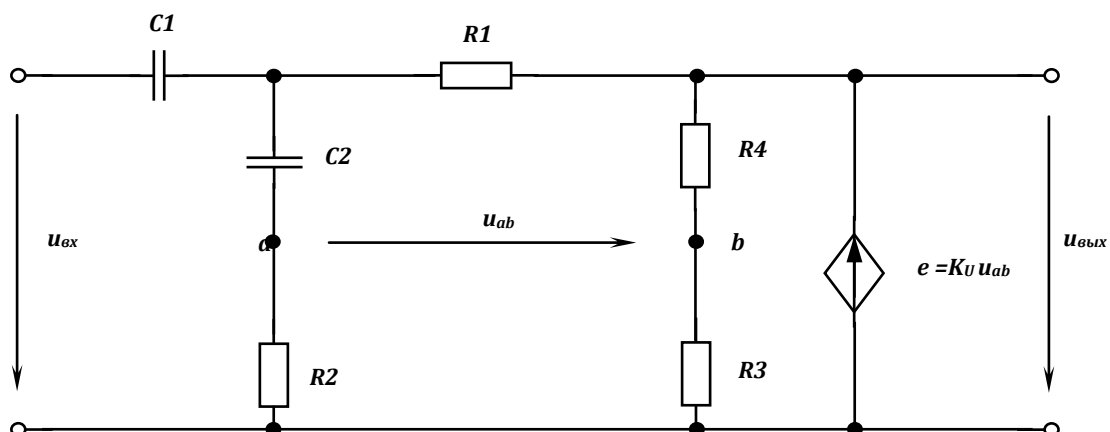


Рис. 7.36. Цепь с источником кусочно-линейного напряжения: $R_1=10$ кОм; $R_2=1$ кОм; $R_3=100$ Ом; $R_4=1,8$ кОм; $C_1=C_2=0,1$ мкФ; $K_U=10^6$; $u_{вх}$ см. рис. 7.37

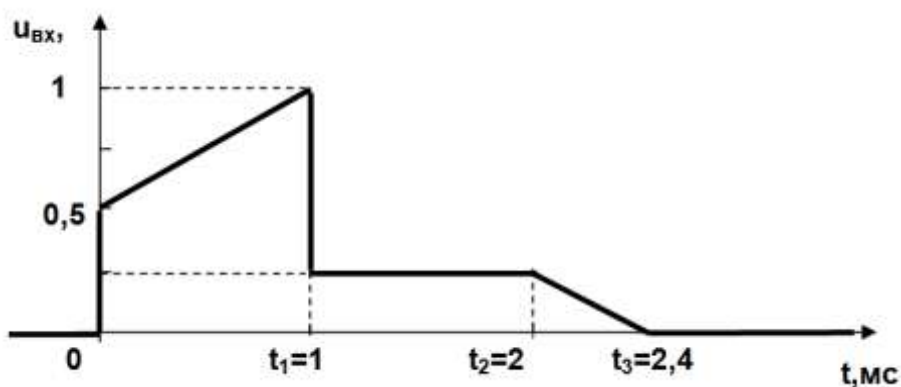


Рис. 7.37. Временная диаграмма источника кусочно-линейного импульсного напряжения и ее характерные параметры

Схема рис. 7.36 содержит ИНУН с которого снимается выходное напряжение. Управляющее напряжение приложено между узлами a и b . Большое заданное значение коэффициента управления $K_U=10^6$ вполне реалистично, например, для операционных усилителей. ИНУН и другие зависимые источники рассматривались выше в п. 3.3.3. Схема в SPICE-обозначениях приведена на рис. 7.38.

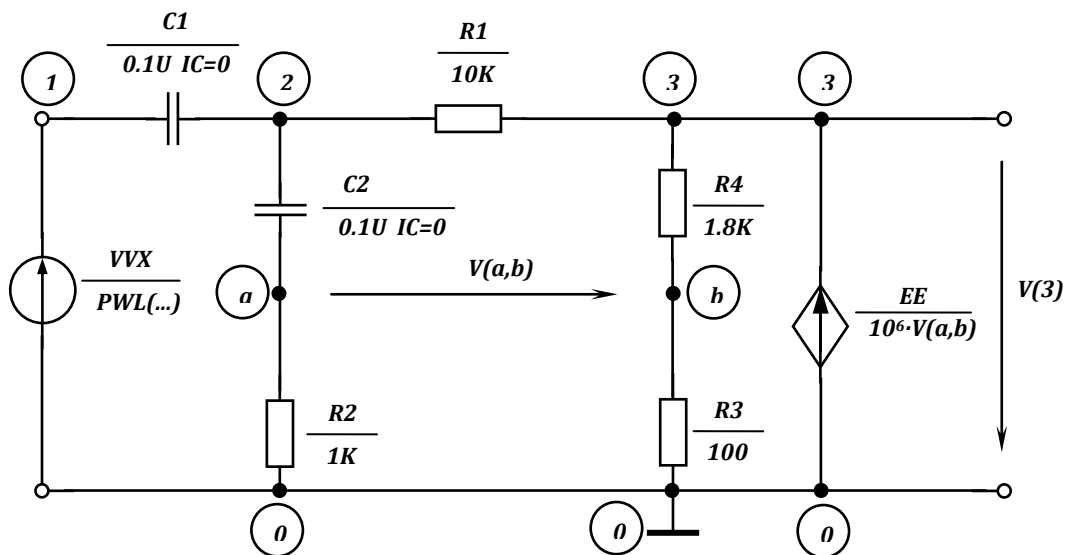


Рис. 7.38. Схема в SPICE-обозначениях

Текстовое описание имеет вид (файл primer7_12.cir)

PRIMER 7_12 (STYLE SPICE2)

VVX 1 0 PWL(0 0.5 1m 1 1m 0.25 2m 0.25 2.4m 0)

C1 1 2 0.1U IC=0

C2 2 A 0.1U IC=0

R1 2 3 10K

R2 A 0 1K

R3 B 0 100

R4 3 B 1.8K

EE 3 0 A B 1MEG

.SAVE ALL

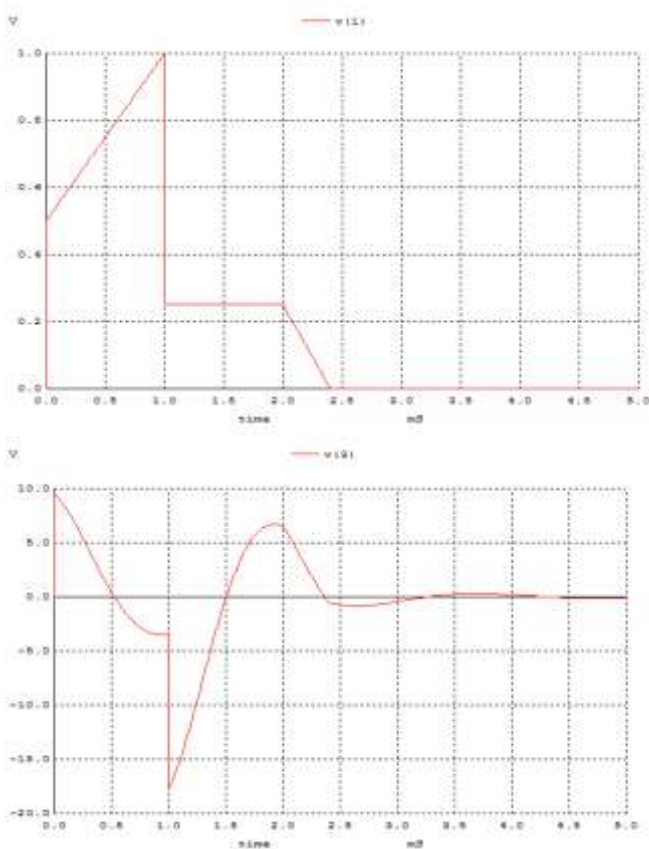
.TRAN 10u 5m UIC

.PLOT TRAN V(3)

.PLOT TRAN V(1)

.END

Результаты расчетов представлены на рис. 7.39 и полностью совпадают с точным решением, полученным автором методом интеграла Дюамеля.



а)
б)

Рис. 7.39. Временные диаграммы входного (а) и выходного (б) напряжений

7.4.5. Источник частотно-модулированного сигнала SFFM()

В общем случае спецификация SFFM() задает частотно-модулированное напряжение или ток источника

$$y(t) = Y_0 + Y_a \sin(2\pi f_c t + m \sin(2\pi f_s t)) , (7.28)$$

где переменные описаны в табл. 7.8.

Спецификация записывается в виде
SFFM(Y0 YA FC MDI FS)

Таблица 7.8

Обозначение параметра в формуле (7.28)	Физический смысл	Обозначение параметра в спецификации SIN()	Размерность	Значение по умолчанию
Y_0	Постоянная составляющая (напряжение или ток)	Y0	В или А	
Y_a	Максимальное	YA	В или А	

	значение (напряжение или ток)			
f_C	Частота несущей	FC	Гц	1/TSTOP
m	Индекс частотной модуляции	MDI		
f_S	Частота модуляции	FS	Гц	1/TSTOP

В качестве примера рассмотрим источник с параметрами $Y0=0$, $YA=1$, $FC=19,5$ МГц, $MDI=3$, $FS=2$ МГц. Спецификация данного сигнала имеет вид
SFFM(0 1 19.5MEG 3.0 2MEG)

Временная диаграмма данного частотно-модулированного сигнала приведена на рис. 7.40

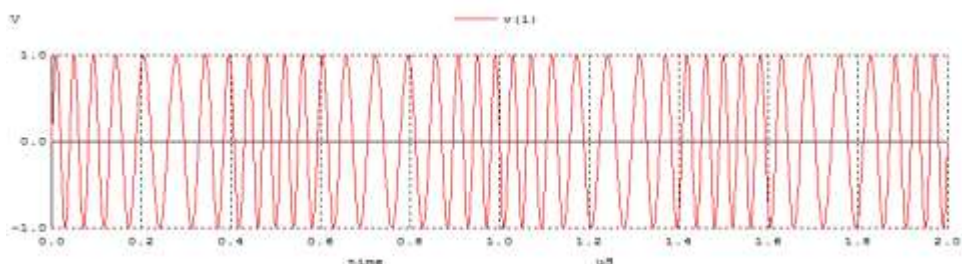


Рис. 7.40. Временная диаграмма частотно-модулированного сигнала

ПРИМЕР 7.13. Источник входного напряжения $u_{вх}$ изменяется, как показано на рис. 7.40. Определить ПП выходного напряжения $u_{вых}$ в схеме колебательного контура рис. 7.41 при нулевых начальных условиях.

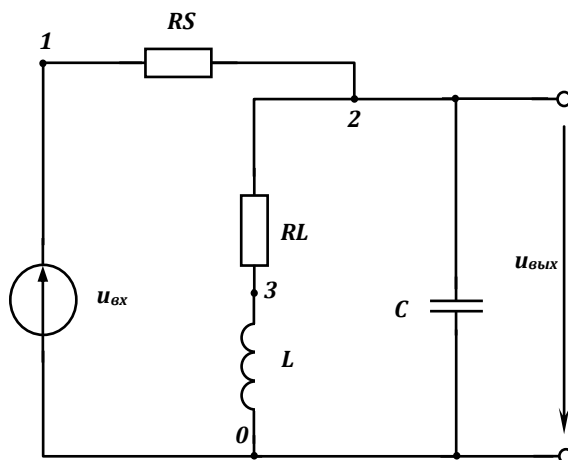


Рис. 7.41. Колебательный контур под воздействием источника частотно-модулированного напряжения: $R_S=100$ Ом; $R_L=0,5$ Ом; $L=110$ нГн; $C=475$ пФ

Текстовое описание имеет вид (файл primer7_13.cir)

```

PRIMER 7_13 (STYLE SPICE2)
*.OPTIONS RELTOL=0.00001
VS 1 0 SFFM(0 1 19.5MEG 3.0 2MEG)
RS 1 2 100
RL 2 3 0.5
L 3 0 110N
C 2 0 475P
.TRAN 1N 2U
.PLOT TRAN V(1)
.PLOT TRAN V(2)
.END

```

Следует обратить внимание на директиву OPTIONS, задающую значение относительной точности RELTOL=0,00001. В данном случае она не активна, поскольку перед ней стоит знак комментария. Поэтому расчет выполняется со значением RELTOL=0,001 по умолчанию. Однако при анализе ПП в цепях с колебательными контурами (особенно высокочастотными) могут возникать значительные погрешности. В таких задачах следует разблокировать директиву OPTIONS для получения высокой точности результатов. В рассмотренном примере добротность контура невелика, поэтому используется значение RELTOL по умолчанию.

Результаты расчета представлены на рис. 7.42. Видно, что резонансный контур в данном случае преобразует частотно-модулированные колебания в амплитудно-модулированные.

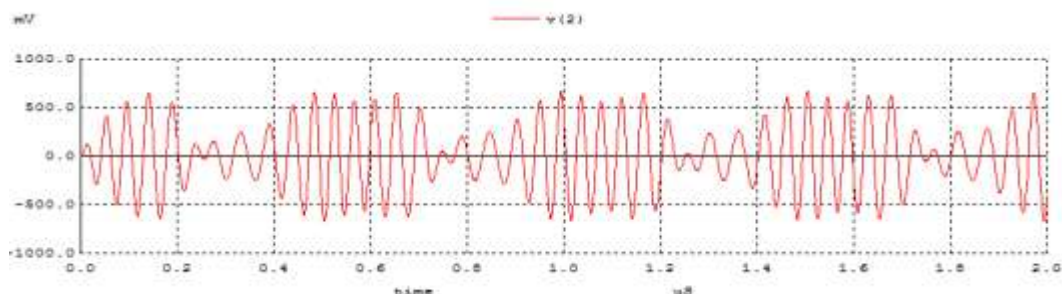


Рис. 7.42. Амплитудная модуляция на выходе колебательного контура

7.5. Комбинирование расчета переходных процессов с другими видами анализа

В рассмотренных выше примерах рассчитывались исключительно ПП в последовательной схеме. Однако, кроме ПП, интерес может представлять определение установившихся режимов постоянного или переменного тока, а также частотных характеристик. Эти виды анализа (.OP, .DC, .TF, .AC) изучались в предыдущих главах данной книги. Таким образом, для каждого анализа можно составить свое текстовое описание в отдельном файле, что не всегда удобно. Покажем на конкретном примере, что в рамках одного текстового описания возможно объединение различных видов расчета электрических цепей.

ПРИМЕР 7.14. В схеме с взаимной индуктивностью рис. 7.43 при нулевых начальных условиях происходит замыкание ключа S, в результате чего подключается источник синусоидального напряжения $u(t) = 170\sin(314,16t + 30^\circ)$ В. Определить:

- 1) переходные процессы тока i_1 при трех значениях коэффициента взаимной индукции $M=(15; 25; 35)$ мГн;
- 2) комплекс действующего значения тока i_1 на частоте 1000 Гц при $M=25$ мГн;
- 3) построить АЧХ и ФЧХ входного сопротивления схемы относительно зажимов источника в диапазоне 10 Гц...100 кГц при $M=25$ мГн.

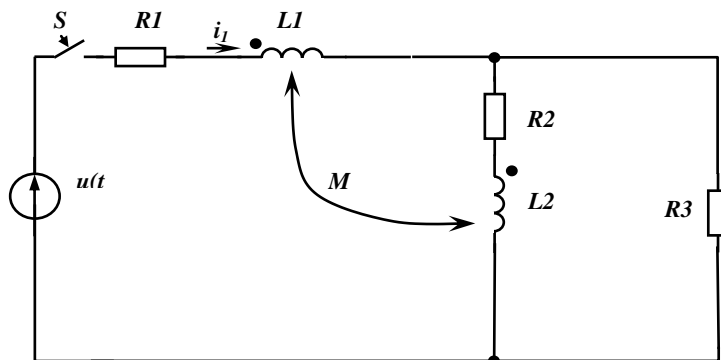


Рис. 7.43. Схема с взаимной индуктивностью: $R_1=10$ Ом; $R_2=5$ Ом; $R_3=15$ Ом; $L_1=30$ мГн; $L_2=50$ мГн; $M=(15; 25; 35)$ мГн

Из условия задачи следует, что необходимо выполнить три вида анализа:

- 1) переходные процессы при трех различных значениях M (три директивы TRAN);
- 2) расчет установившегося синусоидального режима на фиксированной частоте 1000 Гц (директива AC);
- 3) расчет частотных характеристик в заданном диапазоне частот (директива AC).

Сначала вычислим параметры, необходимые для составления текстового описания. Задержка синусоидального сигнала, соответствующая 30° , определяется формулой (7.24)

$$t_d = -\frac{30 \frac{\pi}{180}}{314,16} = -0,001667 \text{ с} = -1,667 \text{ мс}.$$

Для расчета комплекса действующего значения тока i_1 потребуется действующее значение напряжения источника $170 / \sqrt{2} = 120,2$ В.

С учетом найденных параметров источник, включенный между узлами 1 и 0, можно описать одной строкой следующим образом:

VU 1 0 AC 120.2 30 SIN(0 170 50 -1.667m).

Здесь AC 120.2 30 задает источник для выполнения пп.2 и 3 условия задачи, а оставшаяся часть строки соответствует п.1.

Определим значения коэффициента индуктивной связи K , используемого при описании цепей с взаимной индукцией (п. 4.4.3). Согласно выражению (4.19) получаем

Таблица 7.9

M , мГн	15	25	35
K	0,3873	0,6455	0,9037

Схема в SPICE-обозначениях приведена на рис. 7.44

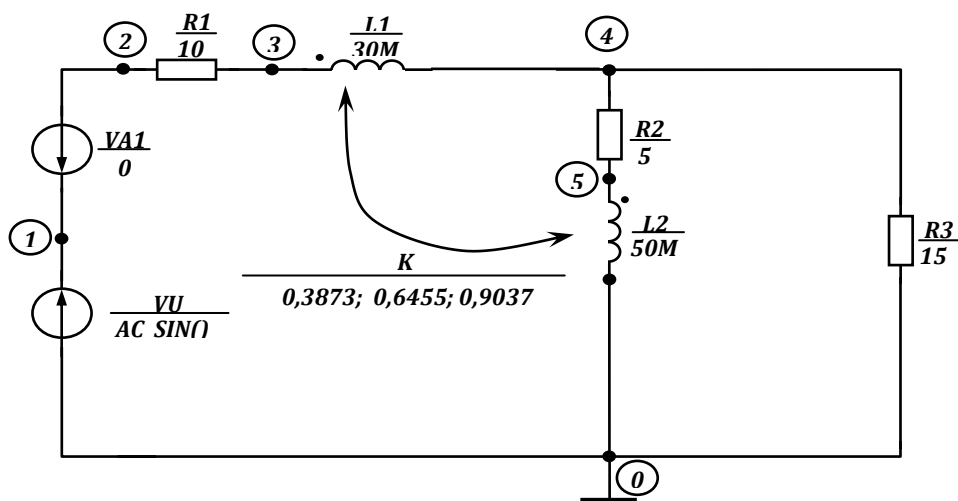


Рис. 7.44. Схема с взаимной индуктивностью в SPICE-обозначениях

Текстовое описание составим в стиле SPICE3 по аналогии с примером 4.15, где с помощью команды alter изменяется коэффициент магнитной связи K :

```
alter @K[coefficient]=<значение>.
```

Текстовое описание имеет вид (файл primer7_14.cir)

```
PRIMER 7.14 (STYLE SPICE3)
VU 1 0 AC 120.2 30 SIN(0 170 50 -1.667m)
VA1 1 2 DC 0
R1 2 3 10
R2 4 5 5
R3 4 0 15
L1 3 4 30M IC=0
L2 5 0 50M IC=0
K1 L1 L2 0.3873
.control
destroy all
set units=degrees
save v(1) va1#branch
*1)-----K=0.3873-----
tran 10u 0.1 uic
let i11=va1#branch

*1)-----K=0.6455-----
alter @K1[coefficient]=0.6455
tran 10u 0.1 uic
let i12=va1#branch

*1)-----K=0.9037-----
alter @K1[coefficient]=0.9037
tran 10u 0.1 uic
```

```

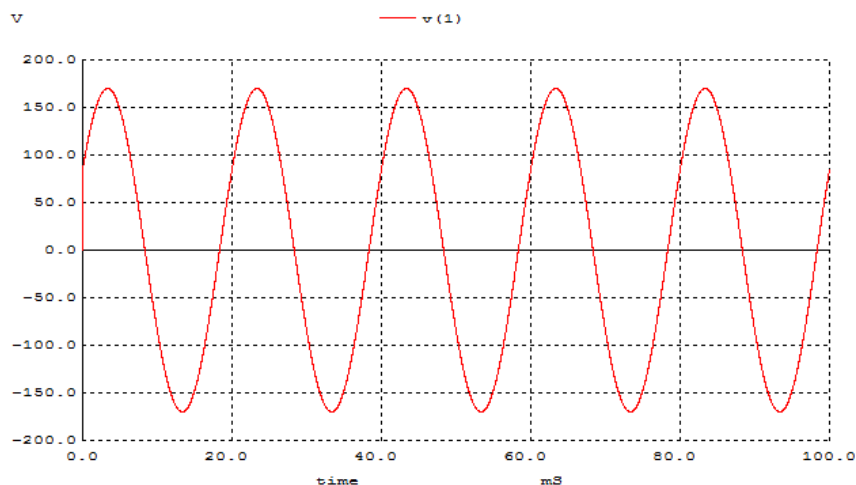
let i13=va1#branch
*-----
plot v(1)
plot i11 i12 i13
*2)-----K=0.6455-----
alter @K1[coefficient]=0.6455
ac lin 1 1000 1000
echo =====
echo AMPLITUDA I FAZA TOKA i1
echo =====
print mag(va1#branch) ph(va1#branch)
*3)-----
ac dec 50 10 100K
let zvx=V(1)/va1#branch
plot mag(zvx)
plot ph(zvx)
*-----
.endc
.END

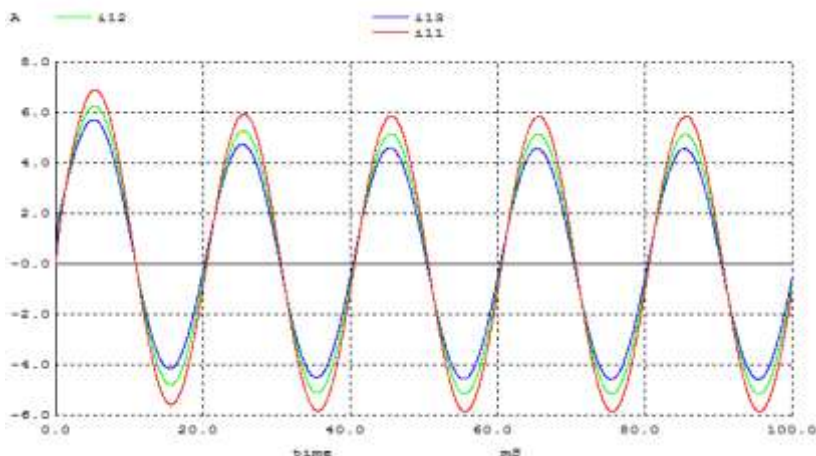
```

Поясним основные команды блока сценария. Первое значение $K=0,3873$ задается в описании магнитосвязанных индуктивностей

```
K1 L1 L2 0.3873
```

После выполнения директивы tran результат расчета ПП записывается в вектор i11. Далее с помощью команды alter изменяется коэффициент магнитной связи K согласно табл. 7.9 и формируются векторы i12 и i13. Затем командами plot выводятся графики входного напряжения и тока i_1 при различных K (см.рис. 7.45, а, б).





а)
б)

Рис. 7.45. Временные диаграммы входного напряжения (а) и тока i_1 (б)

Для выполнения п.2 условия задачи командой alter вновь устанавливается $K=0,6455$. Директива

```
ac lin 1 1000 1000
```

рассчитывает комплексы действующего значения в цепи на частоте 1000 Гц.

Значения амплитуды и фазы искомого тока i_1 выводятся в виде

```
=====
AMPLITUDA I FAZA TOKA i1
=====
mag(va1#branch) = 9.967145e-01
ph(va1#branch) = -3.81548e+01
```

Последняя директива (ac dec 50 10 100K) вычисляет частотные характеристики согласно п.3 условия. Входное сопротивление $z_{вх}$ определяется по закону Ома и его модуль (АЧХ), а также аргумент (ФЧХ) выводятся в графической форме.

Аналитическое решение данной задачи для ПП тока i_1 , полученное операторным методом для $K=0,6455$, дано в [1, с. 288].

7.6. Определение гармонического состава установившегося процесса при периодическом несинусоидальном воздействии

Ранее в разделе 4.6 нами уже обсуждались периодические несинусоидальные токи в электрических цепях, возбуждаемые соответствующими источниками. В примере 4.17 рассматривалась реакция активного фильтра (рис. 4.51) на входное воздействие в виде периодических прямоугольных импульсов. Использовалось известное табличное разложение входного сигнала на сумму нескольких гармонических составляющих кратных частот (ряд Фурье). Для каждой гармоники с помощью директивы AC определялись комплексные амплитуды выходного напряжения. Иными словами, по известному спектру входного сигнала вычислялся спектр выходного сигнала. После перехода к мгновенным значениям гармоник и их суммирования была получена временная диаграмма выходного напряжения рис. 4.53. Следует отметить приближенный

характер данного решения, поскольку на практике ограничиваются несколькими гармониками, то есть используют усеченный ряд Фурье.

Эту задачу можно решить другим способом, рассматривая установившийся периодический режим как результат затухания переходного процесса. Причем в данном случае погрешность усечения ряда Фурье отсутствует. Применим этот подход к задаче, условие которой приведено примере 4.17.

ПРИМЕР 7.15. На вход активного фильтра рис. 4.46 подключен источник периодического прямоугольного напряжения с амплитудой $U_m=5$ В и периодом $T=0,01$ с (рис. 4.51). Найти мгновенное значение установившегося выходного напряжения. Определить гармонический состав входного и выходного сигналов до девятой гармоники включительно.

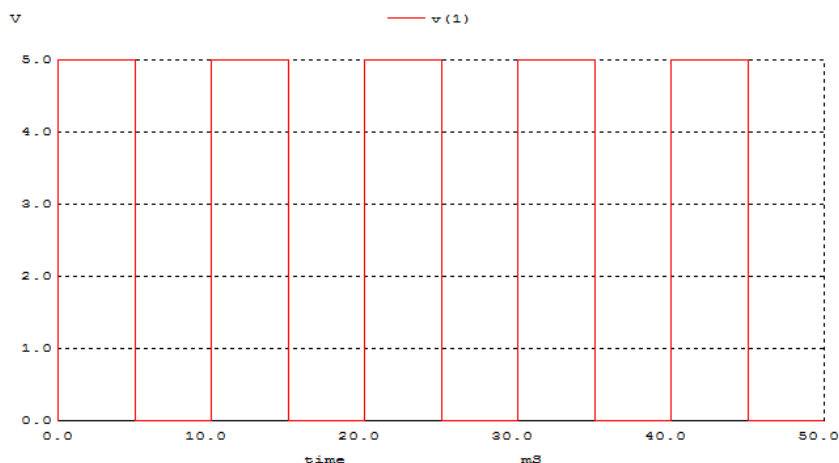
В соответствии с рис. 4.51 и правилами задания спецификации PULSE (см. п. 7.4.1) источник входного сигнала можно описать как

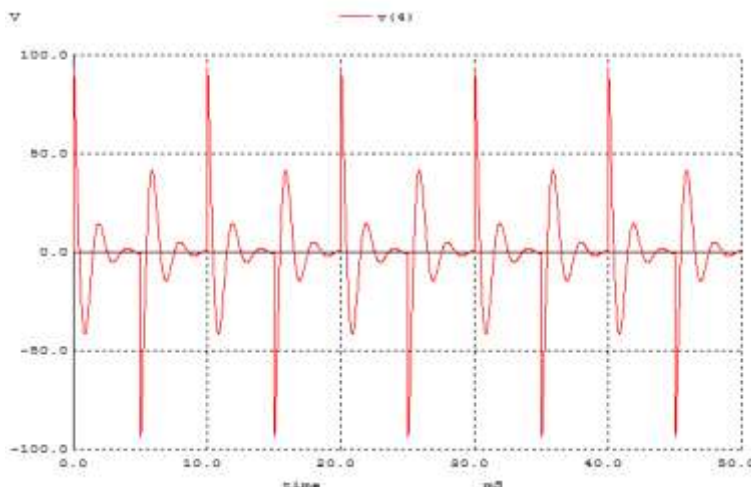
```
Vvx 1 0 PULSE(0 5 0 0 0 0.005 0.01)
```

Начальные условия полагаем нулевыми. Тогда, используя схему в SPICE-обозначениях рис. 4.47, можно составить следующее текстовое описание (файл primer7_15.cir)

```
PRIMER 7_15 (STYLE SPICE2)
Vvx 1 0 PULSE(0 5 0 0 0 0.005 0.01)
VA 1 6
R1 2 4 10K
R2 3 0 1K
R3 5 0 100
R4 4 5 1.8K
C1 6 2 0.1U IC=0
C2 2 3 0.1U IC=0
E 4 0 3 5 1MEG
.SAVE ALL
.TRAN 0.00002 0.05 UIC
.PLOT TRAN V(1)
.PLOT TRAN V(4)
.END
```

Результаты расчетов представлены на рис. 7.46.





а)
б)

Рис. 7.46. Временные диаграммы входного (а) и выходного (б) напряжений

Сравнение рис. 7.46, б и рис. 4.53 говорит о некотором отличии результатов, что объясняется усечением ряда Фурье.

Задача, однако, решена не полностью, поскольку не найден гармонический состав входного и выходного сигналов. Для завершения расчетов необходимо воспользоваться специальными директивами FOUR и (или) SPEC.

7.6.1. Фурье-анализ результатов расчета переходных процессов (директива *.four*)

Как известно, результаты расчетов токов и напряжений, выполняемых в WinSpice3, формируются в виде векторов. Если полученное с помощью директивы *.TRAN* решение заканчивается установившимся периодическим процессом, то такой вектор можно подвергнуть Фурье-анализу (4.24) с целью определения его гармонического состава. Для этого предназначена директива **.FOUR**, имеющая следующий вид:

.FOUR FREQ OV1 <OV2 OV3 ...>

где FREQ — частота основной гармоники, Гц (FREQ>0);
OV1, OV2, OV3 ...—анализируемые векторы.

Как и все директивы «с точкой», соответствующие стилю SPICE2, она включается в текстовое описание. Разложение в ряд Фурье происходит на последнем периоде, то есть на интервале

$$(TSTOP - T) < t < TSTOP,$$

где $T = (\text{FREQ})^{-1}$ — период установившегося процесса.

Таким образом, параметр TSTOP в директиве **.TRAN** должен быть выбран достаточно большим, чтобы процесс достиг установившегося периодического состояния. В результате выполнения директивы **.FOUR** определяются постоянная составляющая и девять гармоник (по умолчанию). Кроме этого вычисляется и выводится коэффициент гармоник (THD) по формуле

$$THD = \frac{1}{A_1} \left(\sum_{n=2}^{nfreqs-1} A_n^2 \right)^{1/2},$$

где

A_1 — амплитуда основной гармоники; $nfreqs$ — количество вычисляемых гармоник (по умолчанию 10); A_n — амплитуда высшей гармоники ($2 \leq n \leq (nfreqs - 1)$).

При задании параметра TMAX в директиве .TRAN для получения высокой точности следует соблюдать соотношение $TMAX < 0,01T$.

В примере 7.15 частота основной гармоники может быть найдена из условия задачи

$$FREQ = T^{-1} = 100 \text{ Гц}$$

Из анализа ПП выходного сигнала рис. 7.46, б следует, что процесс достиг установившегося периодического состояния. Следовательно, для получения спектров входного и выходного сигналов надо добавить директиву .FOUR 100 V (1) V(4) в файл primer7_15.cir. Получаем новый файл (primer7_15_1.cir):

```
PRIMER 7_15_1 (STYLE SPICE2)
Vvx 1 0 PULSE(0 5 0 0 0 0.005 0.01)
VA 1 6
R1 2 4 10K
R2 3 0 1K
R3 5 0 100
R4 4 5 1.8K
C1 6 2 0.1U IC=0
C2 2 3 0.1U IC=0
E 4 0 3 5 1MEG
.SAVE ALL
.TRAN 0.00002 0.05 UIC
.PLOT TRAN V(1)
.PLOT TRAN V(4)
.FOUR 100 V (1) V(4)
.END
```

В результате, кроме графиков рис. 7.46, получим две таблицы для входного $v(1)$ и выходного $v(2)$ сигналов.

Transient analysis ... 100%

Fourier analysis for v (1) :

No. Harmonics: 10, THD: 42.9161 %, Gridsize: 200, Interpolation Degree: 1

Harmonic	Frequency	Magnitude	Phase	Norm. Mag	Norm. Phase
0	0.000000e+00	2.500000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00
1	1.000000e+02	3.183230e+00	-9.00000e-01	1.000000e+00	0.000000e+00
2	2.000000e+02	2.400491e-16	-9.25671e+01	7.541054e-17	-9.16671e+01
3	3.000000e+02	1.061426e+00	-2.70000e+00	3.334430e-01	-1.80000e+00
4	4.000000e+02	4.859220e-16	-4.69811e+01	1.526506e-16	-4.60811e+01
5	5.000000e+02	6.372747e-01	-4.50000e+00	2.001975e-01	-3.60000e+00
6	6.000000e+02	3.138395e-16	-2.33412e+01	9.859154e-17	-2.24412e+01
7	7.000000e+02	4.556460e-01	-6.30000e+00	1.431395e-01	-5.40000e+00

```

8  8.000000e+02 3.022752e-16 -6.56267e+01 9.495866e-17 -6.47267e+01
9  9.000000e+02 3.548585e-01 -8.10000e+00 1.114775e-01 -7.20000e+00

```

Fourier analysis for v(4):

No. Harmonics: 10, THD: 1070.77 %, Gridsize: 200, Interpolation Degree: 1

Harmonic	Frequency	Magnitude	Phase	Norm. Mag	Norm. Phase
0	0.000000e+00	-1.88147e-01	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00
1	1.000000e+02	2.444079e+00	1.762735e+02	1.000000e+00	0.000000e+00
2	2.000000e+02	4.421451e-01	-9.39900e+01	1.809046e-01	-2.70264e+02
3	3.000000e+02	9.488231e+00	1.484835e+02	3.882129e+00	-2.77900e+01
4	4.000000e+02	6.792377e-01	-1.20142e+02	2.779115e-01	-2.96415e+02
5	5.000000e+02	1.879871e+01	8.749501e+01	7.691532e+00	-8.87785e+01
6	6.000000e+02	5.501861e-01	-1.76920e+02	2.251098e-01	-3.53194e+02
7	7.000000e+02	1.289120e+01	3.749153e+01	5.274461e+00	-1.38782e+02
8	8.000000e+02	2.953992e-01	1.620701e+02	1.208632e-01	-1.42034e+01
9	9.000000e+02	8.616272e+00	1.948827e+01	3.525365e+00	-1.56785e+02

Таблицы содержат следующие столбцы:

Harmonic — номер гармоники. Нулевое значение соответствует постоянной составляющей;

Frequency — частота гармоники, Гц;

Magnitude — амплитуда гармоники в основных единицах системы СИ (в данном случае в вольтах);

Phase — начальная фаза гармоники в градусах;

Norm. Mag — нормализованная амплитуда гармоники (т. е. нормированная на амплитуду первой гармоники). Для постоянной составляющей всегда имеет нулевое значение;

Norm. Phase — нормализованная начальная фаза гармоники в градусах, определяемая разностью начальных фаз рассматриваемой и первой гармоник. Для постоянной составляющей и первой гармоники всегда имеет нулевое значение;

Из заголовка таблицы можно извлечь следующую информацию:

No. Harmonics — число рассчитываемых гармоник (по умолчанию 10);

THD — коэффициент гармоник;

Gridsize — число точек, используемых для интерполяции при численном разложении в ряд Фурье (по умолчанию 200);

Interpolation Degree — степень интерполяционного полинома (по умолчанию 1).

Сравнение полученных результатов с решением примера 4.17 свидетельствует о приемлемой точности расчетов. Точность, как правило, можно повысить, увеличив значение Gridsize. Для этого надо сразу после запуска WinSpice3 выполнить команду
set fourgridsize=400

Если после этого загрузить тот же самый цепной файл primer7_15_1.cir, то можно заметить, что параметр Gridsize стал равен 400 и точность увеличилась.

Можно также увеличить степень интерполяционного полинома, предварительно выполнив команду, задающую второй порядок интерполяционного полинома (Interpolation Degree)

set polydegree=2

Следует заметить, однако, что увеличение данного параметра свыше 1 часто не приводит к повышению точности результатов.

Число вычисляемых гармоник также можно изменить командой SET:
set nfreqs=15

В результате будет определена постоянная составляющая и 14 гармоник.

При использовании стиля SPICE3 вместо директивы **.FOUR** следует применять аналогичную команду **fourier**, обладающую несколько более широкими возможностями. Допускается Фурье-анализ не только самих векторов токов и напряжений, но и выражений на их основе. Общий формат команды:

fourier freq exp1 <exp2 exp3 ...>

где freq — частота основной гармоники, Гц; exp1, exp2, exp3 ...—анализируемые векторы, которые в общем случае могут быть выражениями.

Таким образом, рассмотренный выше пример primer7_15_1.cir можно модифицировать в соответствии со стилем SPICE3 (primer7_15_2.cir):

```
PRIMER 7_15_2 (STYLE SPICE3)
Vvx 1 0 PULSE(0 5 0 0 0 0.005 0.01)
VA 1 6
R1 2 4 10K
R2 3 0 1K
R3 5 0 100
R4 4 5 1.8K
C1 6 2 0.1U IC=0
C2 2 3 0.1U IC=0
E 4 0 3 5 1MEG
.control
destroy all
*set fourgridsize=400
*set polydegree=2
*set nfreqs=15
tran 0.00002 0.05 uic
plot v(1)
plot v(4)
fourier 100 v(1) v(4)
.endc
.END
```

Результаты выполнения данного и предыдущего примеров совпадают. Обратите внимание, что параметры, устанавливаемые командами SET, которые рассматривались выше, включены непосредственно в сценарий. В данном примере эти команды не активны, так как перед ними стоят знаки комментария («звездочки»). Читателю предлагается убрать «звездочки» и оценить изменения в результатах расчета.

Следует отметить, что рассмотренные команды **.FOUR** и **fourier** не создают дополнительных векторов, а лишь вычисляя и распечатывают заданное число гармоник на основе данных последнего периода.

7.6.2. Вычисление спектров сигналов с помощью команды SPEC

Гармонический состав периодической функции можно определить также с помощью команды `spes`, которая доступна только в стиле SPICE3. Данная команда вычисляет прямое дискретное преобразование Фурье (ДПФ) заданных векторов, полученных в результате анализа ПП. Причем используется не последний период, как в случае `fourier`, а все компоненты вектора. Задание частоты основной гармоники при этом не требуется. Общий формат команды:

spec startf stopf stepf ov1 <ov2, ov3 ... >

где `ov1`, `ov2`, `ov3` ...—анализируемые векторы;

`startf` — начальная частота спектрального диапазона, Гц. (`startf` ≥ 0);

`stopf` — конечная частота спектрального диапазона, Гц. (`stopf` $>$ `startf`);

`stepf`— шаг по частоте, Гц.

Шаг по частоте должен удовлетворять соотношению

$$\text{stepf} \geq \frac{1}{\text{TSTOP}-\text{TSTART}}. \quad (7.29)$$

Наибольшая точность достигается при выполнении равенства в (7.29). При нарушении данного неравенства выдается сообщение

ERROR: time span limits step freq to XXXXX Hz,

в котором XXXXX —минимально возможное значение `stepf`.

Следует отметить, что при анализе установившегося периодического режима на интервале времени (`TSTOP-TSTART`) вектор должен сод 5...10 полных периодов сигнала. Переходный процесс к моменту времени `TSTOP` должен установиться. Таким образом, чтобы правильно выбрать `TSTART` и `TSTOP` необходимо сначала задать `TSTART=0`. Затем, подбирая `TSTOP`, получить установившийся периодический режим, после чего присвоить `TSTART` значение, соответствующее окончанию ПП.

Существует еще одна особенность, которую обязательно надо упомянуть. Для вычисления ДПФ нужны значения преобразуемой временной функции в *равноотстоящих* точках. Однако выше отмечалось, что шаг по времени может автоматически изменяться программой WinSpice3 в зависимости от требуемой точности. Поэтому перед применением команды `spes` необходимо преобразовать вектор с учетом равномерной временной шкалы. Эту процедуру для всех векторов осуществляет специальная команда `linearize`.

В отличие от `fourier`, при выполнении `spes` формируются комплексные векторы спектров. Амплитудный спектр выводится на печать командой `plot mag(<ov>)`, где `<ov>` — имя преобразованного вектора.

Рассмотрим задачу из примера 7.15. Из рис. 7.46, б следует, что в данном частном случае ПП практически не наблюдается, и сразу устанавливается периодический режим. Это объясняется тем, что за время действия входного импульса ПП успевает затухнуть, и каждый новый импульс начинается при нулевых начальных условиях. Следовательно, можно задать `TSTART=0`. Параметр `TSTOP=0,05` оставляем прежним, поскольку он обеспечивает расчет пяти полных периодов. Параметр `startf=0`, поскольку надо определить постоянную составляющую. Значение `stopf=1000` Гц, так как по условию нужно найти все гармоники до девятой включительно (900 Гц). И, наконец, шаг по частоте найдем по формуле (7.29): `stepf=20` Гц.

С учетом найденных значений составим следующее текстовое описание (файл `primer7_15_3.cir`):

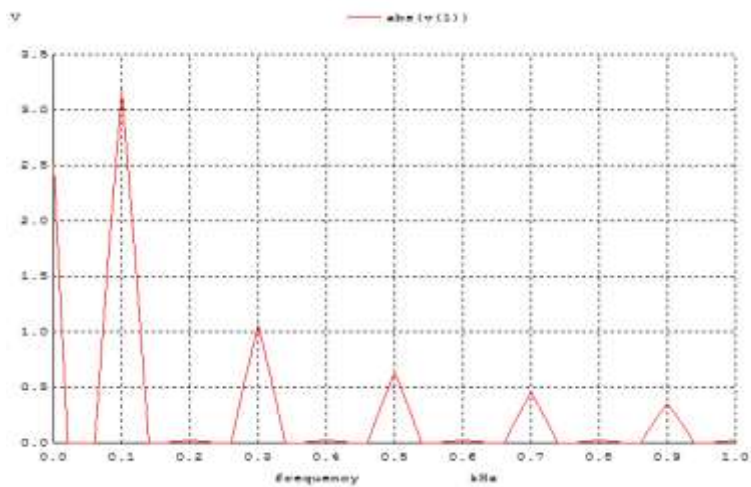
PRIMER 7_15_3 (STYLE SPICE3)

```

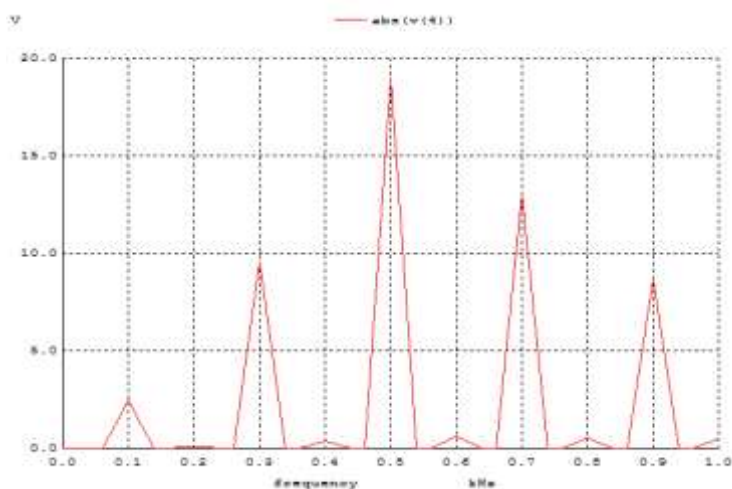
Vvx 1 0 PULSE(0 5 0 0 0 0.005 0.01)
VA 1 6
R1 2 4 10K
R2 3 0 1K
R3 5 0 100
R4 4 5 1.8K
C1 6 2 0.1U IC=0
C2 2 3 0.1U IC=0
E 4 0 3 5 1MEG
.control
destroy all
save all
tran 0.00002 0.05 0 uic
plot v(1)
plot v(4)
linearize
spec 0 1000 20 v(1) v(4)
plot abs(v(1))
plot abs(v(4))
.endc
.end

```

Амплитудные спектры входного и выходного сигналов приведены на рис. 7.47



a)



б)

Рис. 7.47. Амплитудные спектры входного (а) и выходного (б) напряжений

В идеальном случае график спектра периодической функции представляет собой набор вертикальных отрезков, длины которых пропорциональны амплитуде (линейчатый спектр). Отрезки располагаются на частотах гармоник. Однако на рис. 7.47 вместо отрезков присутствуют треугольники, вершины которых расположены на частотах гармоник. Это, так называемый эффект «размазывания», объясняется малым значением TSTOP. При его увеличении (и, соответственно, уменьшении параметра stepf) основания треугольников будут уменьшаться при сохранении их высоты, и треугольники приблизятся к вертикальным отрезкам. Ординаты вершин треугольников соответствуют амплитудам гармоник, полученным в предыдущем примере (файл primer7_15_1.cir).

На рис. 7.48 приведен спектр выходного напряжения при TSTOP=0.1 и stepf=10.

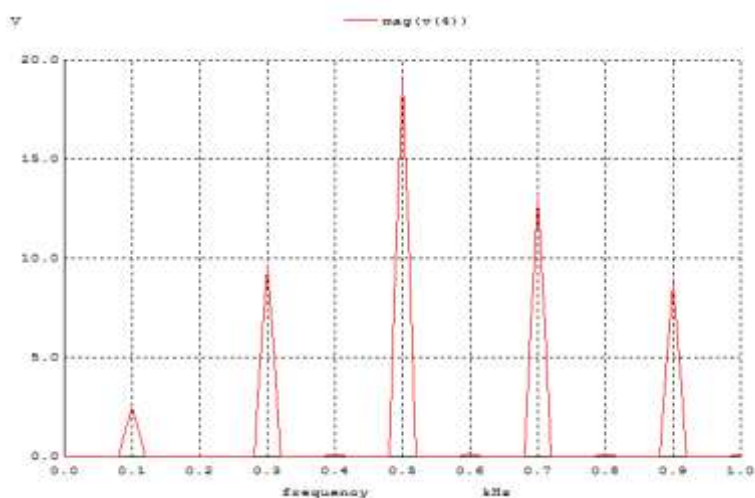


Рис. 7.48. Амплитудный спектр выходного напряжения при увеличенном значении TSTOP

Следует отметить на рис. 7.47 и рис. 7.48 наличие маленьких треугольников на частотах четных гармоник (200, 400, 600...) Гц, которых, строго говоря, в данной задаче быть не должно. Их присутствие обусловлено приближенным характером ДПФ. Однако на рис. 7.48 эти треугольники значительно меньше, что говорит о повышении точности расчета ДПФ при увеличении интервала времени TSTOP.

Теперь обратимся к случаю, когда установившийся периодический процесс достигается по прошествии некоторого интервала времени t_{ycm} . Увеличим значения емкостей в примере 7.15 до 1,5 мкФ и увеличим расчетное время вдвое (TSTOP=0,1 с). На рис. 7.49 представлен ПП для выходного напряжения.

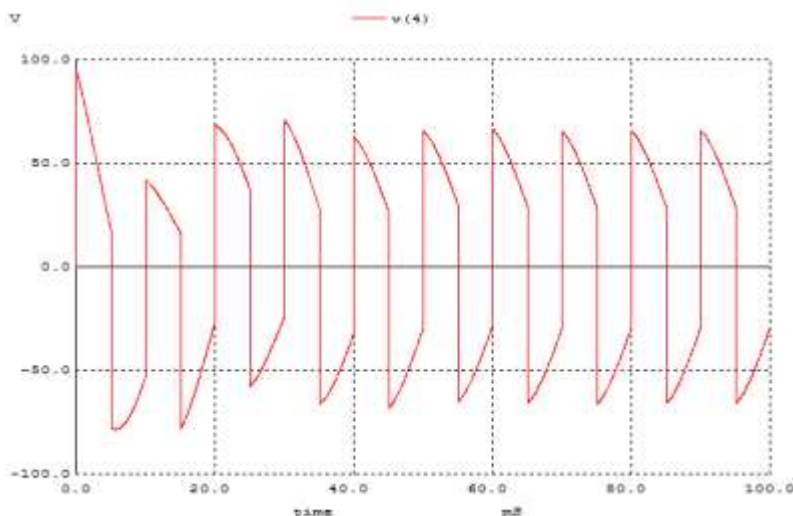


Рис. 7.49. Временная диаграмма выходного напряжения при увеличенных емкостях

Из сравнения рис. 7.46, б и рис. 7.49 видно, что в последнем случае установившийся периодический процесс достигается при $t_{ycm}=0,5$ с и представлен пятью периодами сигнала. Следовательно, TSTART= $t_{ycm}=0,5$ с. Для увеличения числа установившихся периодов увеличим TSTOP до 0,15 с.

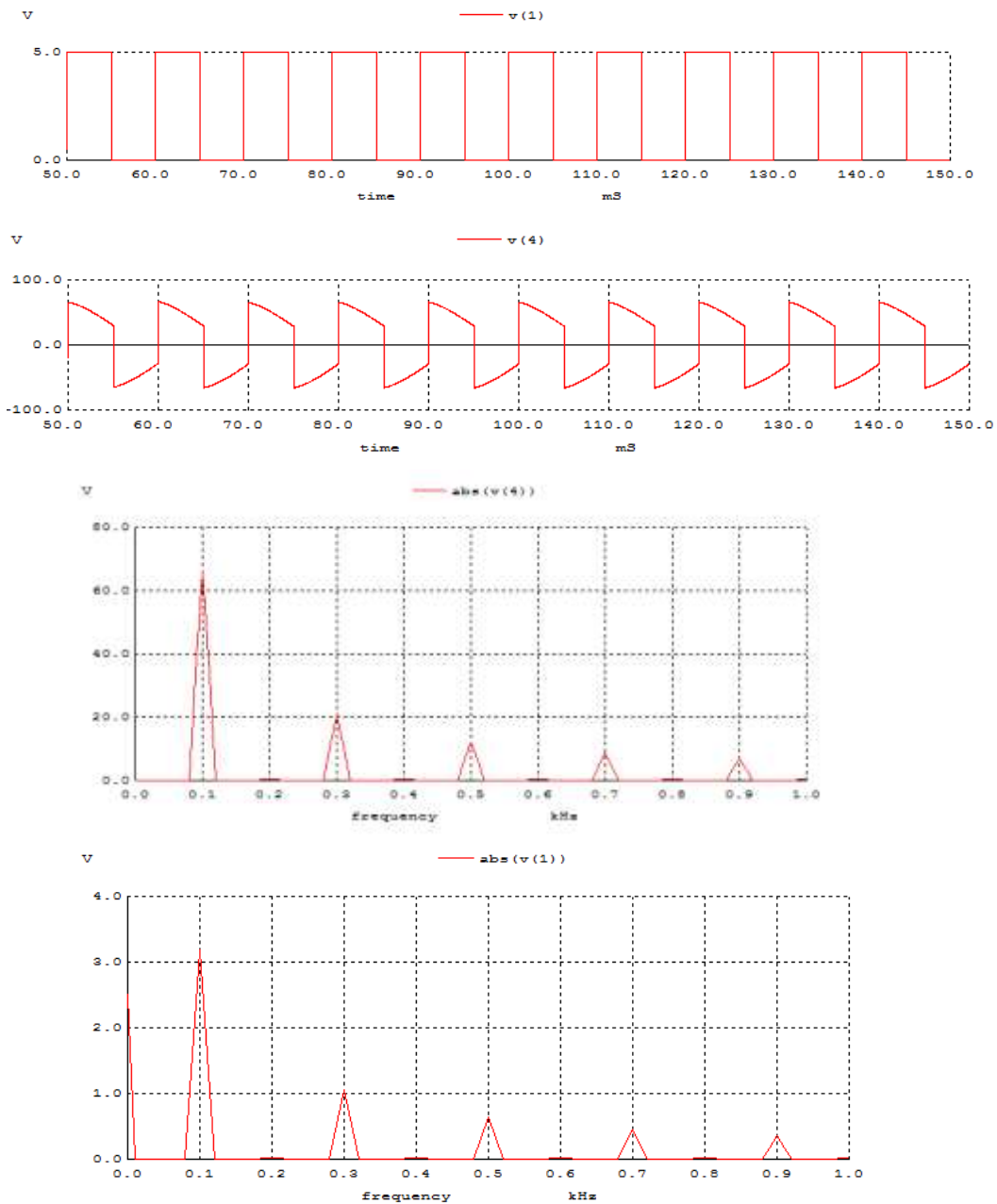
С учетом найденных значений составим следующее текстовое описание (файл primer7_15_4.cir). Изменения по отношению к файлу primer7_15_3.cir выделены жирным шрифтом:

```
PRIMER 7_15_4 (STYLE SPICE3)
Vvx 1 0 PULSE(0 5 0 0 0 0.005 0.01)
VA 1 6
R1 2 4 10K
R2 3 0 1K
R3 5 0 100
R4 4 5 1.8K
C1 6 2 1.5U IC=0
C2 2 3 1.5U IC=0
E 4 0 3 5 1MEG
.control
destroy all
save all
tran 0.00002 0.15 0.05 uic
```

```

plot v(1)
plot v(4)
linearize
spec 0 1000 10 v(1) v(4)
plot abs(v(1))
plot abs(v(4))
.endc
.end

```



- a)
- б)
- в)
- г)

Рис. 7.50. Входной (а) и выходной (б) сигналы на интервале (TSTART...TSTOP) и их амплитудные спектры (в) и (г) соответственно

Выясним, какие векторы являются текущими или активными. Напомним, что просмотреть информацию о созданных текущих активных векторах можно с помощью команд `let` или `display`:

WinSpice 1 -> display

Here are the vectors currently active:

Title: PRIMER 7_15_4 (STYLE SPICE3)

Name: sp1 (Spectrum)

Date: Sun Aug 18 16:04:13 2013

```
frequency      : frequency, real, 101 long [default scale]
v(1)           : voltage, complex, 101 long
v(4)           : voltage, complex, 101 long
```

Видно, что в текущем анализе с именем sp1 (Spectrum) созданы два активных комплексных вектора v(1) и v(4) длиной 101 элемент каждый, соответствующие шкале частот frequency. Действительный вектор frequency содержит 101 значение частоты от startf до stopf с равномерным шагом stepf. Векторы комплексных спектров можно вывести на печать командой `print`, например,

WinSpice 2 -> print v(1)

PRIMER 7_15_4 (STYLE SPICE3)

Spectrum Sun Aug 18 16:04:13 2013

Index v(1)

0 2.510000e+00, 0.000000e+00

1 6.364191e-13, -8.599044e-14

2 8.545266e-14, 5.920436e-15

3 -6.113027e-15, 8.955472e-14

4 -1.026954e-13, -1.392553e-14

5 1.239694e-14, -1.020267e-13

6 1.318139e-13, 1.722325e-14

7 -7.398218e-14, 1.674728e-13

8 -1.576664e-13, -1.174439e-13

9 -1.999921e-02, 1.591403e+00

10 -3.999842e-02, 3.182806e+00

11 -1.999921e-02, 1.591403e+00

.....

.....

100 1.984229e-02, 2.506665e-03

Здесь столбец Index содержит номера точек оси частот, а значения частоты определяется как $\text{Index} \cdot \text{stepf}$. Средний столбец — действительная часть комплексного вектора, правый столбец — мнимая часть.

Жирным шрифтом выделены постоянная составляющая и первая гармоника входного сигнала. Промежуточные значения малы, и их значениями можно пренебречь. Для получения спектра гармоник не обязательно распечатывать все значения. Выведем, например, значение спектра, соответствующее седьмой гармонике

```
WinSpice 3 -> print v(1)[70]
v(1)[70] = -3.99227e-02,4.526781e-01
```

Теперь выведем на печать амплитудный спектр до 9-й гармоники включительно:

```
WinSpice 4 -> print mag(v(1)[0]) mag(v(1)[10]) mag(v(1)[30]) mag(v(1)[50])
mag(v(1)[70]) mag(v(1)[90])
mag(v(1)[0]) = 2.510000e+00
mag(v(1)[10]) = 3.183057e+00
mag(v(1)[30]) = 1.060907e+00
mag(v(1)[50]) = 6.364103e-01
mag(v(1)[70]) = 4.544352e-01
mag(v(1)[90]) = 3.533006e-01
```

Результаты совпадают до 3-й значащей цифры с примером 4.17.

Зададимся теперь следующим вопросом: куда исчезли векторы $v(1)$ и $v(4)$, содержащие результаты расчета переходного процесса, графики которого приведены на рис. 7.50, а, б? Здесь надо вспомнить, что при выполнении каждого вида анализа WinSpice3 создает отдельный набор векторов (см. пример 4.15). Только один из наборов является активным, а именно, полученный в результате последнего анализа. В рассматриваемом примере это анализ, выполненный командой `spes` с именем `sp1` (Spectrum) (см. выше вывод команды `display`). Полный список имен всех выполненных видов анализа, всегда можно вывести на экран командой `setplot`:

```
WinSpice 5 -> setplot
Type the name of the desired plot:
```

```
new    New plot
Current sp1  PRIMER 7_15_4 (STYLE SPICE3) (Spectrum)
tran2  PRIMER 7_15_4 (STYLE SPICE3) (Transient Analysis (linearized))
tran1  PRIMER 7_15_4 (STYLE SPICE3) (Transient Analysis)
const  Constant values (constants)
?
```

Отсюда следует, что в результате выполнения файла `primer7_15_4.cir`, программа WinSpice3 выполнила три вида анализа:

- tran1 — анализ переходных процессов;
- tran2 — линеаризация векторов, полученных в TRAN1, т. е. пересчет их значений с целью получения равноотстоящих временных отсчетов (команда `linearize`);
- sp1 — вычисление комплексных спектров (анализ помечен как текущий — Current).

Набор `const` генерируется при запуске WinSpice3 и содержит предопределенные математические и физические скалярные константы.

Для изменения текущего набора векторов необходимо после знака «вопрос» ввести имя соответствующего анализа. То же самое можно сделать, выполнив команду `setplot <имя анализа>`

Например, чтобы переключиться на набор векторов, полученный в результате выполнения анализа `tran1`, выполним команду `setplot tran1`,

после чего командой `let` или `display` посмотрим список активных векторов:

```
WinSpice 6 -> setplot tran1
```

```
WinSpice 7 -> let
```

```
Here are the vectors currently active:
```

```
Title: PRIMER 7_15_4 (STYLE SPICE3)
```

```
Name: tran1 (Transient Analysis)
```

```
Date: Sun Aug 18 16:04:13 2013
```

```
E#branch      : current, real, 5120 long
V(1)          : voltage, real, 5120 long
V(2)          : voltage, real, 5120 long
V(3)          : voltage, real, 5120 long
V(4)          : voltage, real, 5120 long
V(5)          : voltage, real, 5120 long
V(6)          : voltage, real, 5120 long
VA#branch     : current, real, 5120 long
Vvx#branch    : current, real, 5120 long
time          : time, real, 5120 long [default scale]
```

Как и следовало ожидать, набор векторов содержит потенциалы всех узлов и токи источников напряжения, что соответствует команде `save all` (см. текст в файле `primer7_15_4.cir`). Таким образом, векторы `v(1)` и `v(4)`, содержащие результаты расчета переходного процесса, нигде не исчезли, а находятся в своем наборе с именем `tran1`. Все векторы действительные, длиной 5120 элементов.

7.7. Использование моделей ключей для расчета переходных процессов в коммутируемых цепях

В SPICE-описаниях рассмотренных выше задач, где ПП возникают после замыкания или размыкания ключей (т. е. коммутации), сами ключи отсутствуют. ПП анализируется в *послекоммутационной* схеме, а *докоммутационное* состояние учитывается в виде начальных условий. Следовательно, докоммутационный режим должен быть предварительно определен, и одна задача, по существу, распадается на две. Логично использовать модель ключа, чтобы объединить эти две задачи в одну с нулевыми начальными условиями для докоммутационной схемы. Такой подход возможен для широкого класса задач, в которых по условию до коммутации существовал установившийся режим. Главное преимущество данного способа состоит в отсутствии необходимости определения начальных условий.

Перечислим основные этапы расчета ПП с использованием модели ключа:

1) в докоммутационной схеме определяется ПП при нулевых начальных условиях, причем расчетный TSTOP интервал должен быть выбран достаточным для дости-

жения установившегося процесса. На всем временном интервале ключ должен быть в докоммутационном состоянии;

2) по полученным результатам определяется время установления $t_{уст}$;

3) время срабатывания ключа задается равным $t_{ср} \geq t_{уст}$;

4) выполняется окончательный расчет схемы, причем для получения ПП в по-
слекоммутационной схеме следует установить в директиве .TRAN параметр TSTART=
 $t_{ср}$.

В WinSpice3 присутствуют два варианта ключа: управляемый напряжением (КУН) и управляемый током (КУТ). К сожалению, необходимый для рассматриваемых задач ключ, управляемый временем, отсутствует. Можно, однако, обойти это ограничение, управляя ключом с помощью напряжения или тока, зависящего времени.

7.7.1. Описание ключей

Общее описание КУН:

SXXXXXXX N+ N- NC+ NC- MNAME <ON><OFF>

где

N+ N- — номера узлов, к которым подключен ключ;

NC+ NC- — номера узлов «плюс» и «минус» управляющего напряжения $u_{упр}$;

MNAME — имя модели ключа, содержащей его параметры;

ON, OFF — начальное состояние ключа: ON-включено (замкнут), OFF-выключено (разомкнут). Для безгистерезисных ключей (см. ниже п.7.7.2.1) эти параметры опускаются.

Условно-графическое обозначение КУН приведено на рис. 7.51

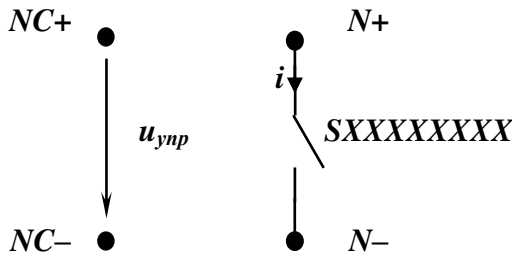


Рис. 7.51. Ключ, управляемый напряжением

Ниже приведены некоторые примеры описания КУН:

1) SINT1 5 12 13 184 SWITCH1 ON

КУН с именем SINT1 включен между узлами 5 и 12 и управляется напряжением между узлами 13 (плюс) и 184 (минус). Параметры ключа описываются моделью с именем SWITCH1. Начальное состояние ключа — замкнут;

2) SA17 23 8 18 0 SM2 OFF

КУН с именем SA17 включен между узлами 23 и 8 и управляется напряжением между узлами 18 (плюс) и 0 (минус). Параметры ключа описываются моделью с именем SM2. Начальное состояние ключа — разомкнут.

Общее описание КУТ:

WXXXXXXX N+ N- VNAME MNAME <ON><OFF>

где

VNAM — имя источника напряжения, ток которого i_{ynp} управляет работой ключа. Положительное направление тока соответствует его протеканию через источник от «плюса» к «минусу».

Условно-графическое обозначение КУТ приведено на рис. 7.52

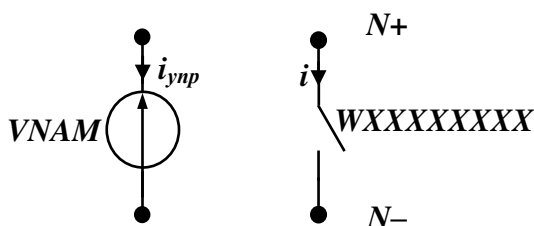


Рис. 7.52. Ключ, управляемый током

Ниже приведены некоторые примеры описания КУТ:

1) WS5 6 1 VUPR SVM1 ON

КУТ с именем WS5 включен между узлами 6 и 1 и управляется током i_{ynp} источника напряжения VUPR. Параметры ключа описываются моделью с именем SVM1. Начальное состояние ключа — замкнут;

2) WAP 0 3 V14 AVAR OFF

КУТ с именем WAP включен между узлами 0 и 3 и управляется током i_{ynp} источника напряжения V14. Параметры ключа описываются моделью с именем AVAR. Начальное состояние ключа — разомкнут.

Итак, в описания ключей входит параметр MNAME — имя модели. Понятие SPICE-модели подробно рассмотрено ниже, так как оно используется применительно и к другим компонентам электрических и электронных цепей.

7.7.2. Модели ключей

В отличие от изученных нами ранее простейших пассивных и активных элементов ключи относятся к сложным компонентам, свойства которых в SPICE описываются специальной директивой **.MODEL** с произвольным уникальным именем MNAME. Смысл ее введения состоит в том, что сложные компоненты характеризуются большим числом параметров, которые целесообразно вынести в отдельное описание. Кроме этого, при большом количестве однотипных компонентов в схеме применение общей модели сокращает текст, улучшает его восприятие и уменьшает вероятность ошибочного задания параметров.

К категории сложных в SPICE3 относятся электронные компоненты микросхем (полупроводниковые резисторы и конденсаторы, диоды, транзисторы), а также ключи и длинные линии. Компактная форма задания параметров и их унификация позволяет производителям электронных компонентов создавать библиотеки моделей и распространять их среди разработчиков.

Общий формат, используемый для сложных компонентов, имеет вид

.MODEL MNAME TYPE(PNAME1=PVAL1 PNAME2=PVAL2 ...),

где

MNAME — уникальное произвольное имя модели, начинающееся с буквы;

TYPE — имя типа модели (предопределенные имена);

PNAME1, PNAME1, ... — предопределенные имена параметров модели;

PVAL1, PVAL1, ... — значения параметров модели.

Если некоторые параметры модели не заданы явно, то WinSpice3 принимает их значения по умолчанию.

7.7.2.1. Модель ключа, управляемого напряжением

В SPICE3 для КУН *предопределено имя типа модели SW*. Параметры модели описаны в табл. 7.10.

Таблица 7.10

Имя параметра	Физический смысл	Размерность	Значение по умолчанию
VT	пороговое управляющее напряжение	В	0
VH	напряжение гистерезиса	В	0
RON	сопротивление замкнутого ключа	Ом	1
ROFF	сопротивление разомкнутого ключа	Ом	$(GMIN)^{-1} = 10^{12}$

Примечание: GMIN — величина минимальной проводимости, допускаемой в WinSpice3 по умолчанию ($GMIN = 10^{-12}$ См).

Приведем некоторые пояснения к таблице. Под гистерезисом в физике понимается запаздывание изменения физической величины, характеризующей состояние объекта, от изменения другой физической величины, определяющей внешние условия.

В рассматриваемом случае объектом является КУН. Физической величиной, характеризующей его состояние, является сопротивление ключа (RON, ROFF), а физической величиной, определяющей внешние условия, является пороговое управляющее напряжение VT.

Таким образом, в общем случае ключ замыкает свои контакты *не в момент, когда $u_{упр} = VT$* , а при большем на величину гистерезиса VH управляющем напряжении. Размыкание происходит при меньшем на эту же величину напряжении. Реальным ключам всегда свойственен некоторый гистерезис. Например, электромагнитные реле характеризуются напряжениями срабатывания и отпускания. Если параметр VH=0, то ключ называется безгистерезисным.

Итак, КУН замыкается, если $u_{упр} > (VT + VH)$ и размыкается, если $u_{упр} < (VT - VH)$. Если же начальное значение управляющего напряжения находится в зоне гистерезиса

$$(VT - VH) < u_{упр} < (VT + VH),$$

то ключ может быть в одном из состояний. В данном случае для однозначности следует использовать параметр ON или OFF. Для безгистерезисных ключей эти параметры можно опустить.

Дополним моделями примеры описания КУН из п. 7.7.1:

1) SINT1 5 12 13 184 SWITCH1

.MODEL SWITCH1 SW(VT=2 VH=0 RON=1m)

Безгистерезисный ключ SINT1 замыкается при $u_{упр} > 2$ В и размыкается при $u_{упр} < 2$ В. Сопротивление замкнутого ключа (RON) составляет 1 мОм, а разомкнутого (ROFF) — 10^{12} Ом;

2) SA17 23 8 18 0 SM2 OFF

.MODEL SM2 SW(VT=5.5 VH=0.5 RON=10m ROFF=1meg)

Ключ SA17 замыкается при $u_{ynp} > 6 \text{ В}$ и размыкается при $u_{ynp} < 5 \text{ В}$. Сопротивление замкнутого ключа (RON) составляет 10 мОм, а разомкнутого (ROFF) — 1 МОм.

7.7.2.2. Модель ключа, управляемого током

Рассмотрим теперь модель КУТ, для которой *предопределено имя типа модели CSW*. Параметры модели описаны в табл. 7.11.

Таблица 7.11

Имя параметра	Физический смысл	Размерность	Значение по умолчанию
IT	пороговый управляющий ток	А	0
IH	ток гистерезиса	А	0
RON	сопротивление замкнутого ключа	Ом	1
ROFF	сопротивление разомкнутого ключа	Ом	$(GMIN)^{-1} = 10^{12}$

КУТ замыкается, если $i_{ynp} > (IT + IH)$ и размыкается, если $i_{ynp} < (IT - IH)$.

Дополним моделями примеры описания КУТ из п. 7.7.1:

1) WS5 6 1 VUPR SVM1

.MODEL SWM1 CSW(IT=3 RON=0.5)

Безгистерезисный ключ WS5 замыкается при $i_{ynp} > 3 \text{ А}$ и размыкается при $i_{ynp} < 3 \text{ А}$. Сопротивление замкнутого ключа (RON) составляет 0,5 Ом, а разомкнутого (ROFF) — 10^{12} Ом ;

2) WAP 0 3 V14 AVAR OFF

.MODEL AVAR CSW(IT=500m IH=100m RON=100m ROFF=500k)

Ключ WAP замыкается при $i_{ynp} > 600 \text{ мА}$ и размыкается при $i_{ynp} < 400 \text{ мА}$. Сопротивление замкнутого ключа (RON) составляет 100 мОм, а разомкнутого (ROFF) — 500 кОм.

7.7.2.3. Модель ключа, управляемого временем

Как уже отмечалось в начале данного раздела, необходимый для рассматриваемых задач ключ, управляемый временем (КУВ), отсутствует. Однако его можно легко смоделировать, применяя ключи, управляющие переменные которых зависят от времени. Какой из них использовать, КУН или КУТ, несущественно. В дальнейшем будем рассматривать КУН в качестве основы КУВ. Общая схема КУВ, коммутирующего некоторую цепь Ц, показана на рис. 7.53.

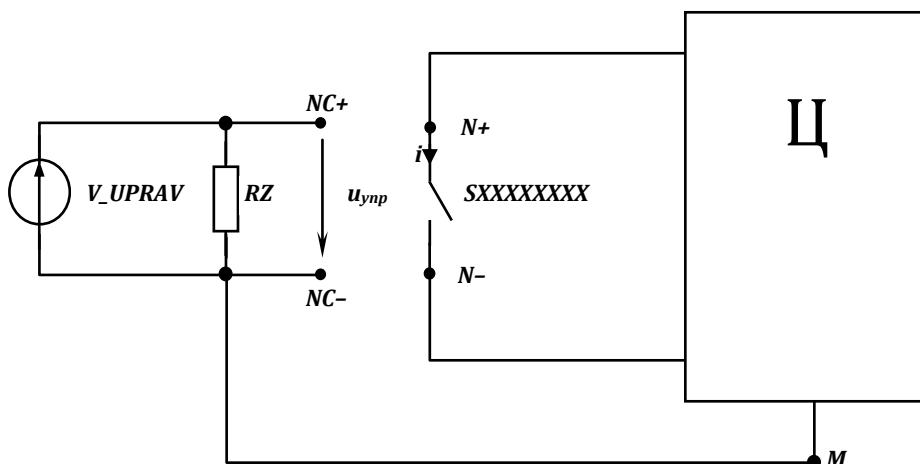


Рис. 7.53. Ключ, управляемый временем

Ключ управляется источником V_UPRAV , напряжение которого изменяется во времени по заданному закону. Резистор RZ необходим для замыкания зажимов источника. Его сопротивление может быть задано произвольно, например, 100 Ом. Для связности схемы узел $NC-$ соединен с произвольным узлом цепи Ц.

Простейшей временной функцией управляющего напряжения является его скачкообразное изменение, например, от (-1 В) до 1 В (рис. 7.54).

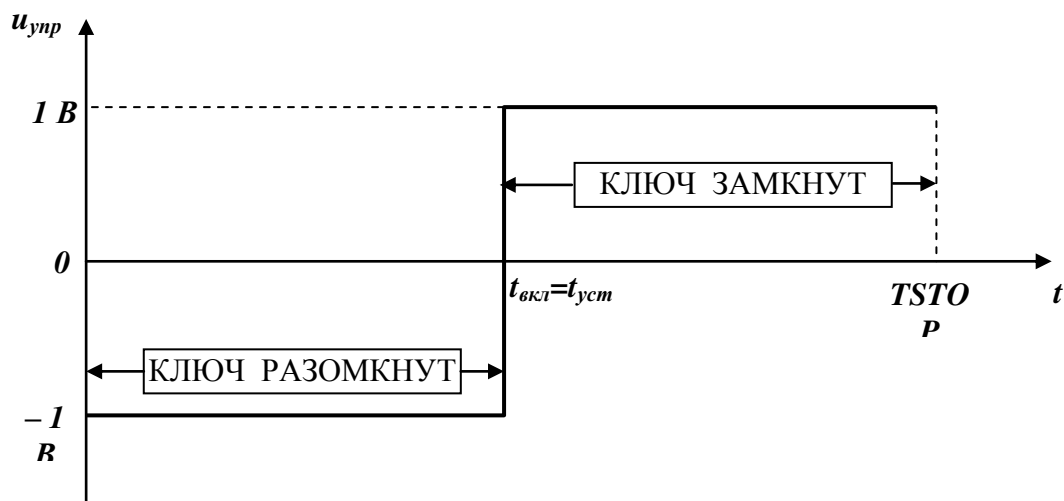


Рис. 7.54. Простейшая временная функция управляющего напряжения

Для безгистерезисного ключа ($VH=0$) и нулевого порогового напряжения ($VT=0$) функция рис. 7.54 обеспечивает замыкание контактов при $t > t_{CP}$.

Таким образом, SPICE- описание схемы с КУВ рис. 7.53, управляемым функцией рис. 7.54, имеет вид

```
V_UPRAV NC+ NC- PWL(0 -1 t_ср -1 t_ср 1 TSTOP 1)
RZ NC+ NC- 100
```

```

XXXXXXXXXX N+ N- NC+ NC- MYSWITCH
.MODEL MYSWITCH SW(ROn=10M)

```

Модель с именем MYSWITCH устанавливает все параметры ключа по умолчанию (табл. 7.10), кроме RON, который для большинства рассматриваемых задач можно задать равным 10 мОм.

Для получения КУВ, обеспечивающего *размыкание* контактов при $t > t_{\text{ср}}$, следует изменить полярность подключения источника V_UPRAV или изменить полярность в описании ключа (т. е. NC+ и NC- поменять местами).

7.7.3. Примеры использования ключей

ПРИМЕР 7.16. Вернемся к примеру 7.4, рис 7.13 и решим задачу с применением КУВ. Схема в SPICE-обозначениях представлена на рис. 7.55, на которой по сравнению с рис. 7.14 добавлен ключ и управляющая цепь (источник V_UPRAV и резистор RZ).

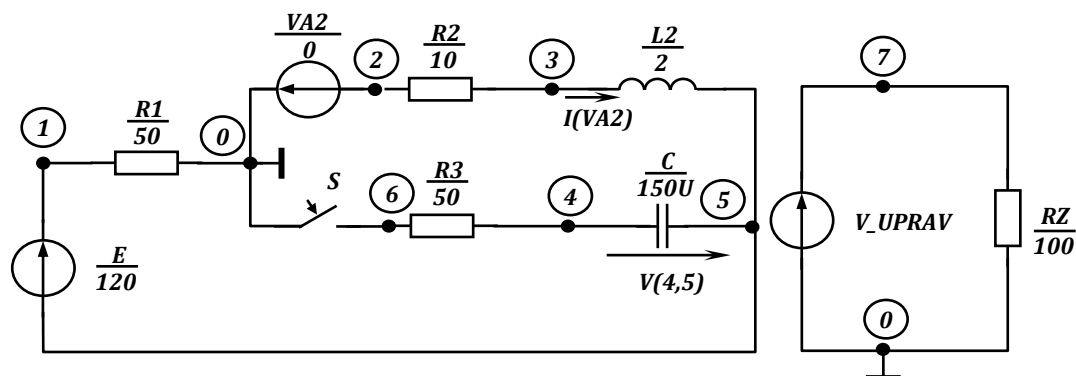


Рис. 7.55. Схема с КУВ в SPICE-обозначениях

В соответствии с приведенными в начале данного раздела основными этапами расчета ПП определим ПП в *докоммутационной* схеме при нулевых начальных условиях. Расчетный интервал TSTOP должен быть выбран достаточным для достижения установившегося процесса. Установим TSTOP=500 мс. На всем временном интервале ключ должен быть в докоммутационном состоянии (разомкнут в данной задаче). Для этого $t_{\text{ср}} = \text{TSTOP}$. Соответствующее текстовое описание имеет вид (файл primer7_16.cir)

```

PRIMER 7_16 (STYLE SPICE2)
VE 1 5 DC 120
VA2 0 2 DC 0
R1 1 0 50
R2 2 3 10
R3 4 6 50
C 4 5 150U IC=0
L2 3 5 2 IC=0
*---- KLUCH -----
.IC V(7)=-1; v moment t=0
V_UPRAV 7 0 PWL(0 -1 500M -1)
S 6 0 7 0 MYSWITCH
RZ 7 0 100

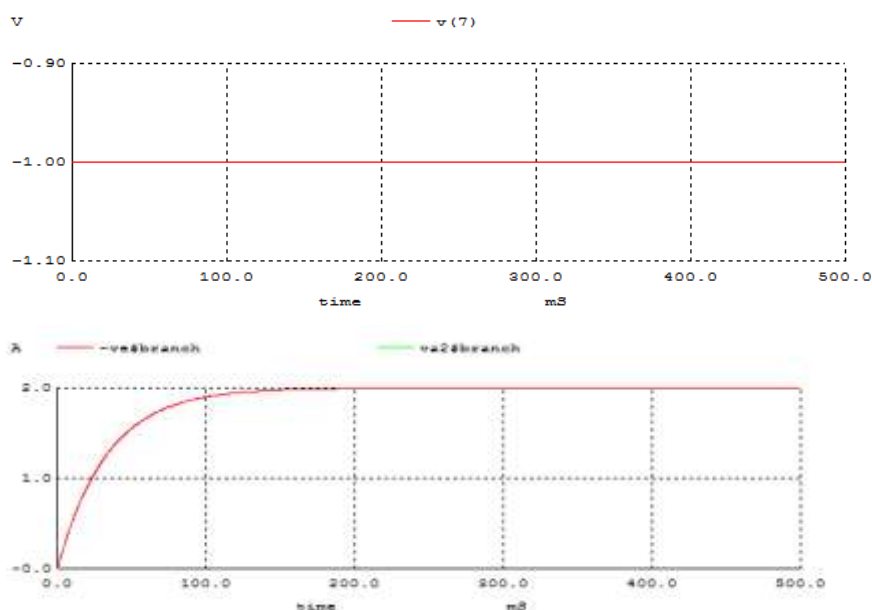
```

```
.MODEL MYSWITCH SW(RON=10M)
*-----
.SAVE ALL
.TRAN 100u 500M UIC
.PLOT TRAN V(7)      ; upravl. napr.
.PLOT TRAN -I(VE) I(VA2) ; tok v L
.PLOT TRAN V(3,5)    ; napr. na L
.PLOT TRAN V(4,5)    ; napr. na C
.END
```

Описание ключа, выделенное пунктиром, соответствует КУВ (см. пп. 7.7.2.3). Директива

.IC V(7)= —1 задает управляющее напряжение в момент времени $t=0$.

Результаты расчета приведены на рис. 7.56.



а)
б)

Рис. 7.56. Переходный процесс в докоммутационной схеме (ключ разомкнут):
а — управляющее напряжение; б — ток i_L

На рис. 7.56, а видно, что управляющее напряжение равно (–1 В) в течение всего расчетного интервала, следовательно, ключ разомкнут и в докоммутационной цепи происходит ПП при нулевых начальных условиях. Из анализа рис. 7.56, б следует, что апериодический ПП изменения тока заканчивается при $t_{уст}=200$ мс, когда он достигает 2 А. Примем значение времени срабатывания ключа $t_{ср}=t_{уст}=200$ мс.

Для окончательного расчета выполним следующие изменения в тексте файла primer7_16.cir:

1) V_UPRAV 7 0 PWL(0 -1 200M -1 200M 1 500M 1)

При $t_{CP} = 200$ мс управляющее напряжение скачком изменяется от (-1 В) до (+1 В), что приводит к замыканию ключа;

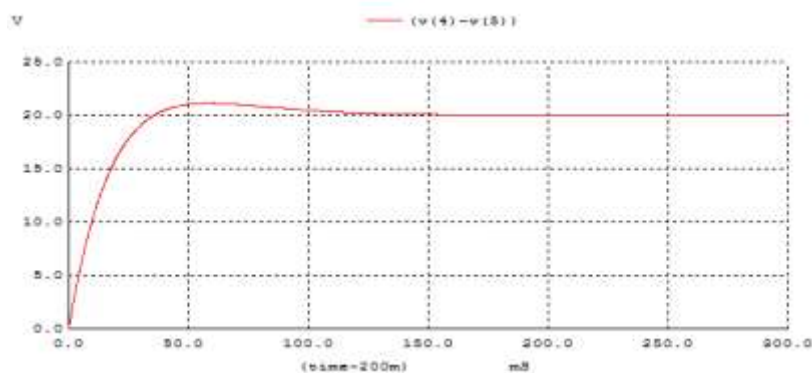
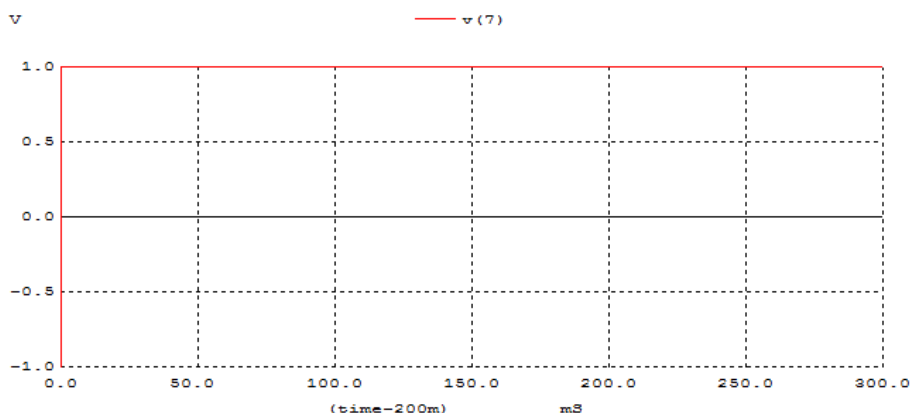
2) .TRAN 100u 500M 200M UIC

Здесь добавлен параметр TSTART= $t_{CP} = 200$ мс, то есть будут сохраняться результаты, относящиеся только к послекоммутационному режиму ($t \geq t_{CP} = 200$ мс);

3) .PLOT TRAN V(7) vs (TIME-200m)

Начало отсчета ($t = 0$) на графике смещается в точку $t_{CP} = 200$ мс путем вычитания из вектора времени (по умолчанию TIME) величины TSTART= $t_{CP} = 200$ мс.

Полученный файл (primer7_16_1.cir) после выполнения выводит результаты, показанные на рис. 7.57



а)

б)

Рис. 7.57. Переходный процесс в послекоммутационной схеме (ключ замкнут): а — управляющее напряжение; б — напряжение на емкостном элементе

На рис. 7.57, а видно, что управляющее напряжение равно 1 В в течение интервала времени (TSTART...TSTOP), следовательно, ключ замкнут и в послекоммутационной цепи происходит ПП при ненулевых начальных условиях. Сравнение рис. 7.57, б и рис. 7.16 показывает их полное соответствие.

В заключение данного примера читателю предлагается получить и проанализировать решение для случая, когда ключ в исходном состоянии *разомкнут*. Как было отмечено в пп.7.7.2.3, с этой целью можно изменить полярность подключения источника V_UPRAV , а именно

V_UPRAV 0 7 PWL(0 -1 200M -1 200M 1 500M 1).

ПРИМЕР 7.17. Рассмотрим электрическую цепь, коммутация в которой осуществляется переключением двухпозиционного ключа S из положения 1 в положение 2 (см. рис. 7.58). Необходимо найти токи в ветвях и напряжения на катушках после коммутации.

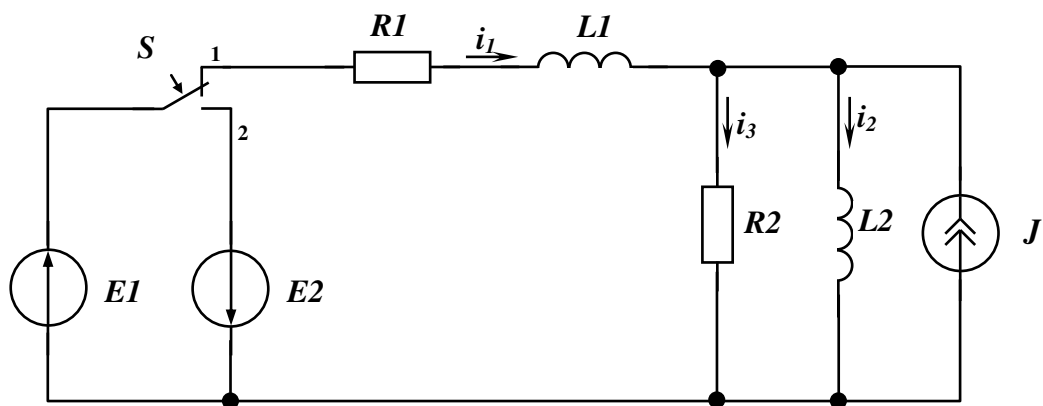


Рис. 7.58. Схема с двухпозиционным ключом S : $R_1 = R_2 = 10$ Ом; $L_1 = L_2 = 0,1$ Гн; $E_1 = E_2 = 100$ В; $J = -10$ А

Модель двухпозиционного ключа в SPICE отсутствует, поэтому заменим S двумя обычными ключами $S1$ и $S2$. До коммутации был замкнут $S1$, а $S2$ разомкнут. В момент коммутации t_{cp} ключ $S2$ замыкается, а $S1$ размыкается, и в цепи начинается ПП. Схема в SPICE-обозначениях приведена на рис. 7.59.

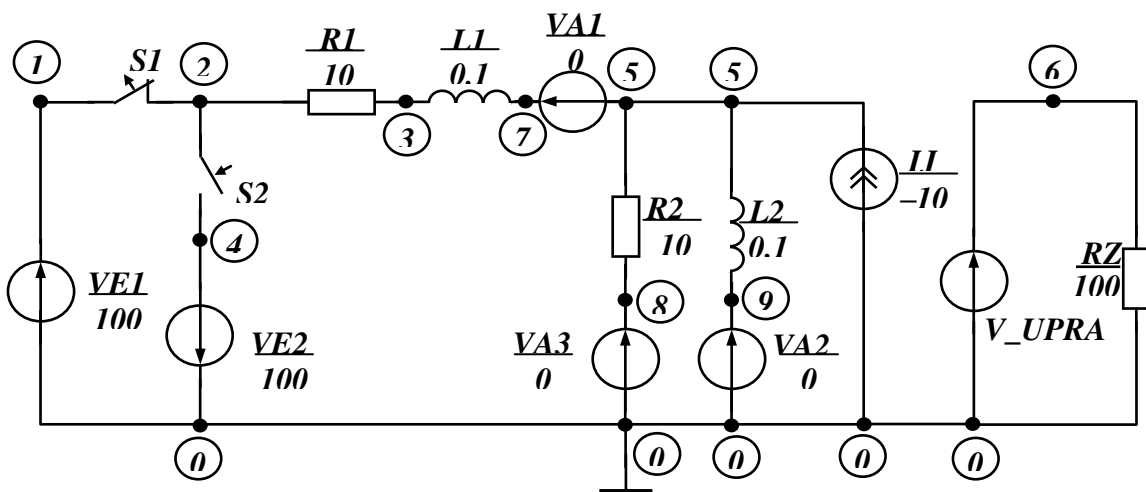
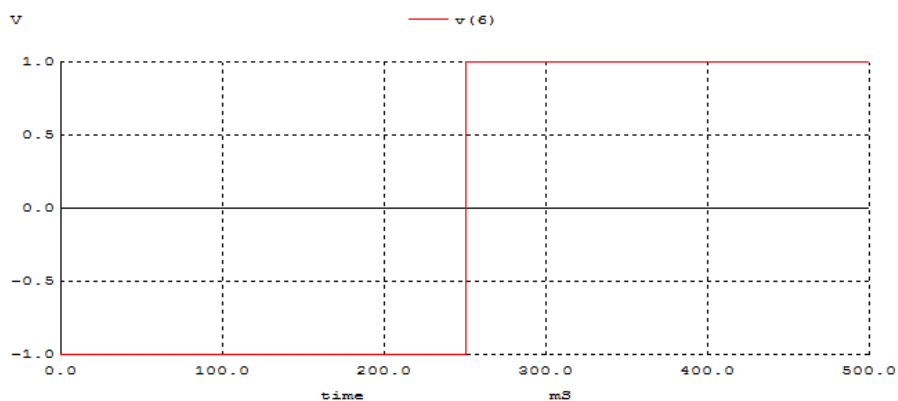
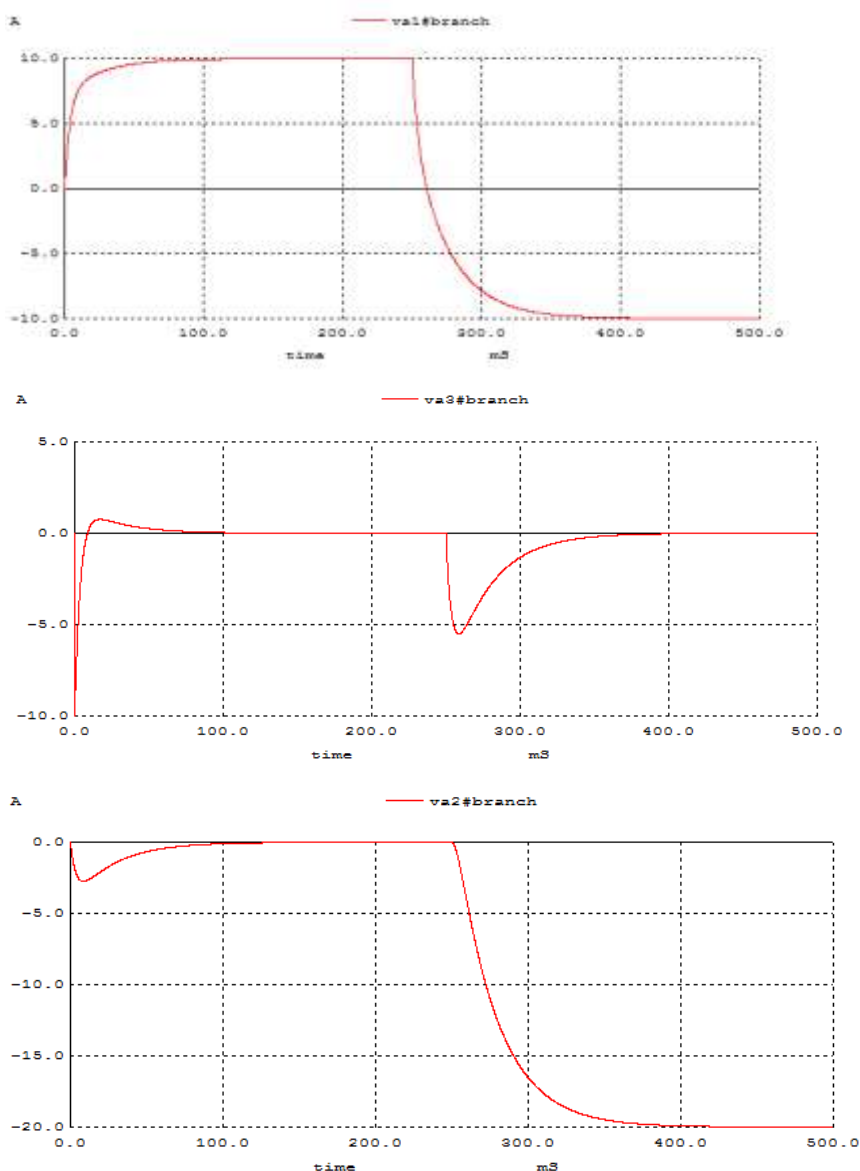


Рис. 7.59. Схема с двухпозиционным ключом в SPICE-обозначениях

Предположим, что время установления докоммутационного процесса $t_{уст}=250$ мс. Тогда можно принять $t_{CP} = t_{уст}=250$ мс. Время окончания послекоммутационного процесса TSTOP ориентировочно установим равным 500 мс.

```
PRIMER 7_17 (STYLE SPICE2)
VE1 1 0 DC 100
VE2 0 4 DC 100
IJ 0 5 DC -10
VA1 7 5 DC 0
VA2 9 0 DC 0
VA3 8 0 DC 0
*----- KLUCHI S1, S2-----
.IC V(6)=-1
V_UPRAV 6 0 PWL(0 -1 250M -1 250M 1 500M 1)
S1 1 2 0 6 SWITCH
S2 2 4 6 0 SWITCH
.MODEL SWITCH SW(ON=10m)
RZ 6 0 100
*-----
R1 2 3 10
R2 5 8 10
L1 3 7 0.1 IC=0
L2 5 9 0.1 IC=0
.SAVE ALL
.TRAN 0.0001 500M UIC
.PLOT TRAN V(6)
.PLOT TRAN I(VA1)
.PLOT TRAN I(VA2)
.PLOT TRAN I(VA3)
.PLOT TRAN V(3,7) V(5,9)
.END
```





а)б)г)з)

Рис. 7.60. Переходные процессы в докоммутационной ($t < 200$ мс) и послекоммутационной ($t \geq 200$ мс) схемах (ключ замкнут): а — управляющее напряжение; б, в, г — токи i_1 , i_2 , i_3 соответственно

По аналогии с предыдущим примером (файл `primer7_16_1.cir`), начало отсчета ($t = 0$) на графике можно сместить в точку $t_{CP} = 250$ мс путем вычитания из вектора времени (по умолчанию TIME) величины TSTART = $t_{CP} = 250$ мс. Соответствующее описание приведено в файле `primer7_17_1.cir`. Аналитическое решение для данного примера [6, задача 8-24, с. 77] приведено в [6, с. 478].

Выводы

1. ПП обусловлены резкими изменениями режима цепи (отключение или подключение какой-нибудь ветви, изменение напряжения или тока источника и т. п.) и возникают при наличии реактивных элементов. ПП имеют место на интервале времени между двумя установившимися состояниями. В пассивных цепях с потерями ПП всегда затухает и переходит в установившийся режим, причем характер ПП может быть как периодическим (колебательным), так и аperiodическим (без колебаний). Если в цепи присутствуют управляемые источники, то для затухания ПП цепь должна обладать свойством устойчивости. В противном случае токи и напряжения с течением времени нарастают, и установившийся режим не достигается.

2. Возникновение ПП часто сопровождается большими перенапряжениями, сверхтоками, электромагнитными колебаниями, которые могут нарушить работу устройства вплоть до выхода его из строя. С другой стороны, ПП находят широкое полезное практическое применение в информационной и силовой электронике.

3. Для расчета и анализа дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы, используются как аналитические, так и численные методы. В Spice3 по умолчанию реализуется численный неявный метод трапеций (второго порядка точности) с автоматическим выбором шага интегрирования, обеспечивающий заданную точность приближенного решения.

4. Расчетный интервал, шаг и другие параметры расчета описываются директивой **.TRAN**:

.TRAN TSTEP TSTOP <TSTART <TMAX>><UIC>

или

.TRAN TSTEP TSTOP <TSTART <TMAX>><SKIPBP>

5. Начальные значения узловых потенциалов описываются директивой

.IC V(NODNUM)=VAL V(NODNUM)=VAL ...

Если ключевое слово **UIC** в директиве **.TRAN** опущено, то начальный режим по постоянному току рассчитывается до старта процедуры анализа ПП. В этом случае значения узловых напряжений, указанные в директиве **.IC**, используются для расчета начальных условий.

6. В директивах **.PRINT** и **.PLOT** (стиль Spice2) надо указывать ключевое слово **TRAN**

.PLOT TRAN ...

.PLOT TRAN ...

7. При большом объеме выходных данных вместо директивы **.PRINT** лучше использовать команду **write** для экспорта файла в текстовом формате **csv** (см. примеры 4.6, 7.3).

8. При исследовании влияния изменения какого-либо параметра цепи (сопротивления, индуктивности, емкости) необходимо помнить, что начальные условия, как правило, изменяются. После каждого изменения параметра необходимо повторять директиву **tran**. Соответственно создаются наборы векторов с именами **tran1**, **tran2**, **tran3** и т. д., содержащие числовые результаты искомых ПП (см. пример 7.5).

9. Причиной ПП могут быть изменения мгновенных значений токов и напряжений независимых источников. В этом случае в их описаниях необходимо задать соответствующие функции времени. Источники этого типа часто называют *сигнальными*. В WinSpice3 возможен выбор из пяти вариантов сигнальных источников (п. 7.4):

- импульсный **PULSE()**;
- синусоидальный **SIN()**;

- экспоненциальный EXP();
- кусочно-линейный PWL();
- частотно-модулированный SFFM().

Таким образом, описания независимых сигнальных источников напряжения и тока имеют следующий вид:

VXXXXXXX N1 N2 <PULSE()> <SIN()> <EXP()> <PWL()> <SFFM()>

IXXXXXXXX N1 N2 <PULSE()> <SIN()> <EXP()> <PWL()> <SFFM()>

10. Следует обратить внимание на директиву **.OPTIONS RELTOL=<значение>**, задающую относительную точность вычислений. При отсутствии этой директивы **RELTOL=0.001** по умолчанию, что вполне достаточно для большинства случаев. Однако при расчетах ПП в цепях с колебательными контурами (особенно высокочастотными) могут возникать значительные погрешности. В данной ситуации надо явно задать директиву с меньшим значением параметра, например, 0.00001.

11. Возможно комбинирование расчета ПП с другими видами анализа в одном файле (см. пример 7.14).

12. Если полученное с помощью директивы **.TRAN** решение заканчивается установившимся периодическим процессом, то такой вектор можно подвергнуть Фурье-анализу (4.24) с целью определения его гармонического состава (спектра). Для этого предназначена директива **.FOUR**, имеющая в стиле Spice2 следующий вид:

.FOUR FREQ OV1 <OV2 OV3 ...>

При использовании стиля SPICE3 вместо директивы **.FOUR** следует применять аналогичную команду **fourier**, обладающую несколько более широкими возможностями. Допускается Фурье-анализ не только самих векторов токов и напряжений, но и выражений на их основе. Общий формат команды:

fourier freq exp1 <exp2 exp3 ...>

При использовании стиля SPICE3 спектр можно рассчитать также с помощью команды **spres**. Данная команда вычисляет прямое дискретное преобразование Фурье (ДПФ) заданных векторов, полученных в результате анализа ПП (см. пп.7.6.2).

13. Для моделирования процесса коммутации в WinSpice3 присутствуют два варианта ключа: управляемый напряжением (КУН) и управляемый током (КУТ) (см. п.7.7)

Общее описание КУН:

SXXXXXXX N+ N- NC+ NC- MNAME <ON><OFF>

Общее описание КУТ:

WXXXXXXX N+ N- VNAME MNAME <ON><OFF>

Ключи относятся к сложным компонентам, свойства которых в SPICE описываются специальной директивой **.MODEL** с произвольным уникальным именем MNAME. Смысл ее введения состоит в том, что сложные компоненты характеризуются большим числом параметров, которые целесообразно вынести в отдельное описание. Общий формат, используемый для сложных компонентов, имеет вид

.MODEL MNAME TYPE(PNAME1=PVAL1 PNAME2=PVAL2 ...),

14. На основе КУН, КУТ реализуются двухпозиционные ключи. Добавление сигнального управляющего источника дает возможность создать модель ключа, управляемого временем (см. пп.7.7.2.3).

Глава 8. ЦЕПИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

В предыдущих разделах рассматривались установившиеся и переходные процессы в линейных цепях с *сосредоточенными* параметрами. При теоретическом анализе принималось допущение о локализации (сосредоточении) электромагнитных процессов в бесконечно малых объемах (точках). Поэтому идеальным элементам с параметрами R, L, C, M , замещающим данные процессы, соответствовали бесконечно малые размеры. Аналогично в физике вводится понятие материальной точки, обладающей определенной массой. Провода, как правило, предполагались идеальными сверхпроводниками ($R=0$), и их размеры также не учитывались. Таким образом, при анализе цепей с сосредоточенными параметрами размеры цепи не принимаются во внимание. При возбуждении такой цепи источниками, зависящими от времени, все токи и напряжения зависят только от времени. Иными словами, в случае сосредоточенных параметров изменение электромагнитного состояния происходит мгновенно по всей цепи.

Из теории электромагнитного поля известно, что энергия передается посредством волн. В связи с этим рассмотренный выше подход справедлив, если, например, в цепи переменного тока время распространения волны по цепи (τ) *много меньше* периода изменения токов и напряжений (T). Поскольку скорость распространения электромагнитных волн близка к скорости света (c), τ часто оказывается малой величиной, и тогда анализируемое устройство можно отнести к классу цепей с сосредоточенными параметрами.

Например, рассмотрим линию электропередач длиной $l=10$ км, подключенную к генератору синусоидального напряжения с частотой $f=50$ Гц. Тогда

$$\tau = \frac{l}{c} = \frac{10}{3 \cdot 10^5} = 3,33 \cdot 10^{-5} \text{ с} = 33,3 \text{ мкс}; \quad T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ с} = 20000 \text{ мкс}; \quad \tau \ll T$$

Мгновенные значения токов и напряжений *вдоль* данной линии устанавливаются «почти» одновременно, за 33,3 мкс (по сравнению с периодом источника $T=20000$ мкс). В данном случае говорят о линии с *сосредоточенными* параметрами. При расчетах ее можно заместить схемой из идеальных элементов R, L, C .

Если эту же линию подключить к генератору с частотой $f=50$ кГц, то $T=20$ мкс и неравенство изменяется:

$$\tau > T. \quad (8.1)$$

Теперь распределение токов и напряжений вдоль линии будет отличаться от предыдущего случая, поскольку при движении волны напряжение генератора успевает существенно измениться (от U_{\max} до $-U_{\max}$). В данном случае говорят о линии с *распределенными* параметрами или о «*длинной линии*». Важно подчеркнуть, что в длинных линиях токи и напряжения зависят не только от времени, но и от *места* их определения.

Итак, выражение (8.1) можно использовать в качестве критерия соответствия устройства классу цепей с распределенными параметрами. Иногда удобнее переформулировать (8.1) в терминах длины волны ($\lambda=cT$) и наибольшего размера цепи (l):

$$\tau = \frac{l}{c} > T; \quad l > cT = \lambda.$$

Окончательно получим

$$l > \lambda \quad \text{или} \quad l^* > 1, \quad (8.2)$$

где $l^* = l\lambda^{-1}$ — нормализованная длина линии.

Обычно термин «длинная линия» на практике используют, когда длина волны соизмерима с размерами линии, т. е. $l^* > 0,05 \dots 0,1$. Если линия предназначена для передачи диапазона частот, то в неравенствах (8.1), (8.2) под T и λ следует понимать период и длину волны, соответствующие *наибольшей* частоте диапазона.

При расчетах бесконечно малый участок линии замещается схемой из идеальных элементов, что дает возможность математического описания в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных (см. далее п.8.1). Поскольку уравнения характеризуют токи и напряжения в произвольной точке линии, то и параметры должны быть известны в окрестности этой точки, т. е. они должны быть *непрерывно* распределены вдоль линии. Если распределение равномерно, то линия называется однородной и характеризуется величинами, отнесенными к единице длины. Эти величины называются *погонными* или *первичными* параметрами и подразделяются на *продольные* (R_0 — сопротивление, L_0 — индуктивность) и *поперечные* (G_0 — проводимость, C_0 — емкость).

Погонные параметры имеют следующий физический смысл: R_0 — продольное активное сопротивление прямого и обратного проводов на единицу длины линии (Ом/м); L_0 — индуктивность контура, образованного прямым и обратным проводами на единицу длины (Гн/м); G_0 — поперечная активная проводимость утечки между проводами на единицу длины (См/м), обусловленная несовершенством изоляции; C_0 — емкость двух проводов линии на единицу длины (Ф/м).

Погонные параметры определяются конструкцией линии, используемыми проводящими и диэлектрическими материалами и, в той или иной мере, зависят от частоты. В дальнейшем изложении погонные параметры полагаются равными известным постоянным значениям.

8.1. Телеграфные уравнения

Рассмотрим линию (рис. 8.1), к началу которой подключен генератор напряжения $e_T(t)$ с внутренним сопротивлением R_T , а к концу — нагрузка R_H . Пусть длина линии l удовлетворяет неравенству (8.2), поэтому данная линия является «длинной». Из вышеизложенного следует, что напряжение и ток, возбуждаемые генератором, будут изменяться не только во времени, но и *вдоль* линии. С математической точки зрения они должны рассматриваться как функции двух переменных, а именно: $u = u(x, t)$, $i = i(x, t)$, где x — расстояние, отсчитываемое от начала линии (или, как говорят, от генератора). Соответствующее место на линии носит название «точка линии» (см. рис. 8.1).

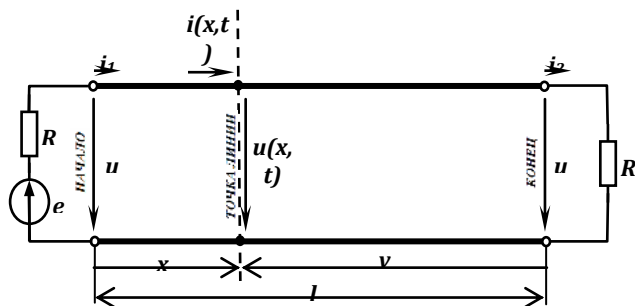


Рис. 8.1. Длинная линия с генератором в начале и нагрузкой на конце

Для составления дифференциальных уравнений рассмотрим бесконечно малый участок однородной линии dx (см. рис. 8.2).

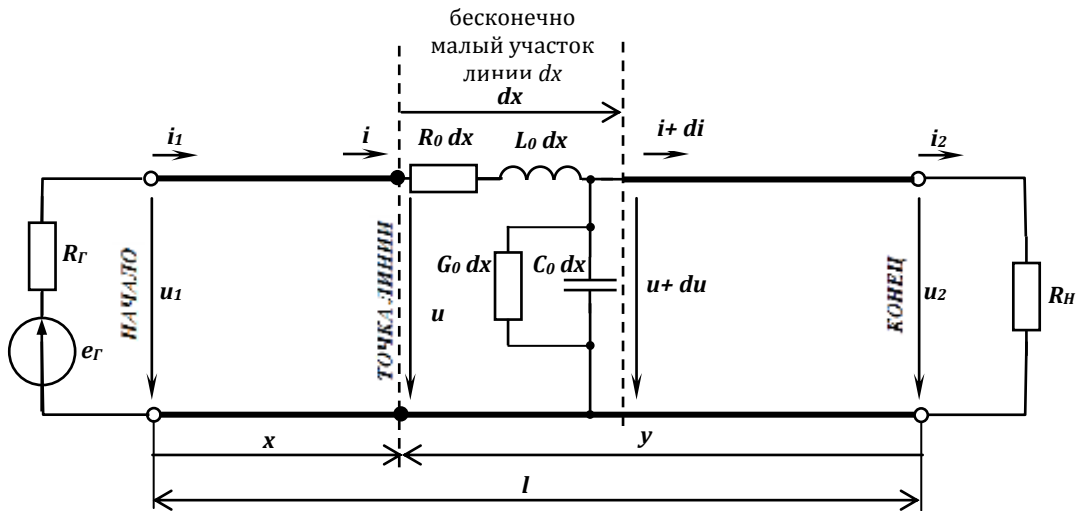


Рис. 8.2. Напряжения и токи на бесконечно малом участке dx длинной линии

Для схемы замещения малого участка, ограниченного пунктирными линиями, на основании законов Кирхгофа можно составить линейные дифференциальные уравнения в частных производных (телеграфные уравнения) [1, с. 358, 359], :

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \end{aligned} \quad (8.3)$$

В общем случае данные уравнения описывают динамические процессы в однородной линии при $t \geq 0$. Для получения их однозначного решения необходимо знать не только начальные условия $u_0(x) = u(x, 0)$, $i_0(x) = i(x, 0)$, но и граничные условия: $u_1(t) = u(0, t)$, $i_1(t) = i(0, t)$ – в начале линии; $u_2(t) = u(l, t)$, $i_2(t) = i(l, t)$ – в конце линии.

Часто удобнее отсчитывать координату точки от конца линии (или, как говорят, от нагрузки). В этом случае $u = u(y, t)$, $i = i(y, t)$, где $y = l - x$. В этом случае $dx = (-dy)$ и (8.3) принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial y} &= R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \\ \frac{\partial i}{\partial y} &= G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \end{aligned} \quad (8.4)$$

при начальных условиях $u_0(y) = u(y, 0)$, $i_0(y) = i(y, 0)$ и граничных условиях:

$u_1(t) = u(l, t)$, $i_1(t) = i(l, t)$ — в начале линии; $u_2(t) = u(0, t)$, $i_2(t) = i(0, t)$ — в конце линии.

Следует иметь в виду, что при активных сопротивлениях генератора и нагрузки граничные условия связаны между собой очевидными алгебраическими уравнениями

$$u_1 = e_{\Gamma} - R_{\Gamma} i_1; u_2 = R_{\Pi} i_2.$$

Аналитическое решение телеграфных уравнений обычно осуществляется операторным методом, причем конечные аналитические выражения получаются весьма громоздкими [1, с. 401-404]. В WinSpice3 используются два приближенных численных способа. Первый состоит в замещении линии эквивалентной цепной схемой. Второй способ, более совершенный, базируется на временной свертке входного сигнала с импульсной функцией цепи [19, с. 47]. Применение этих способов описано ниже в подразделе 8.3.

Как и в цепях с сосредоточенными параметрами, при коммутации (т. е. включении, отключении, переключении) источника или нагрузки в длинных линиях возникают переходные процессы. Их причиной могут также являться грозовые разряды. Однако, в отличие от цепей с сосредоточенными параметрами, в линиях возникают движущиеся (бегущие) волны. Они распространяются по линии, претерпевая отражения, от начала к концу и в противоположном направлении. Если линия состоит из нескольких нагруженных отрезков, то отражения будут происходить в местах их соединения (стыках). Наложение этих волн может создавать достаточно сложные результирующие формы. В разных точках линии будут наблюдаться различные процессы. В линиях с потерями ($R_0 \neq 0$, $G_0 \neq 0$) переходные процессы имеют затухающий характер. В линиях без потерь ($R_0 = 0$, $G_0 = 0$) могут наблюдаться незатухающие колебания или вообще переходный процесс может отсутствовать (например, при включении согласованной линии на постоянное напряжение).

8.2. Установившийся гармонический процесс в однородной линии

Рассмотрение установившегося гармонического режима имеет большое практическое значение, поскольку линии электропередач переменного тока работают на фиксированной частоте. В линиях автоматики, телемеханики и связи передача сигналов реализуется с помощью несущих частот. Так же, как и в цепях с сосредоточенными параметрами, значительный интерес представляют частотные характеристики.

Предположим, что ЭДС генератора изменяется по синусоидальному закону с частотой ω . Тогда в силу линейности цепи напряжение и ток в произвольной точке линии будут также синусоидальными с той же частотой ω . Как известно из теории цепей переменного тока, для устранения зависимости от времени можно воспользоваться символическим методом. Ток и напряжение записываются в виде комплексных, а операция дифференцирования по времени заменяется сомножителем $j\omega$. В результате из уравнений (8.4) получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{U}}{dy} &= R_0 \dot{I} + j\omega L_0 \dot{I}; \\ \frac{d\dot{I}}{dy} &= G_0 \dot{U} + j\omega C_0 \dot{U}. \end{aligned} \quad (8.5)$$

Важно отметить, что в данные соотношения время уже не входит, поэтому используются обыкновенные производные. После введения новых параметров \underline{Z}_0 и \underline{Y}_0 получаем

$$\frac{d\dot{U}}{dy} = \underline{Z}_0 \dot{I};$$

$$\frac{d\dot{I}}{dy} = \underline{Y}_0 \dot{U},$$

где

$\underline{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0$ – продольное комплексное погонное сопротивление;

$\underline{Y}_0 = G_0 + j\omega C_0$ – поперечная комплексная погонная проводимость.

Данную систему можно свести к одному дифференциальному уравнению относительно напряжения или относительно тока.

$$\frac{d^2 \dot{U}}{dy^2} - \underline{\gamma}^2 \dot{U} = 0; \quad (8.6)$$

$$\frac{d^2 \dot{I}}{dy^2} - \underline{\gamma}^2 \dot{I} = 0 \quad (8.7)$$

с граничными условиями

$$\dot{U}(0) = \dot{U}_2, \quad \dot{U}(l) = \dot{U}_1, \quad \dot{I}(0) = \dot{I}_2, \quad \dot{I}(l) = \dot{I}_1, \quad \dot{U}_1 = \dot{E}_T - \underline{Z}_T \dot{I}_1; \quad \dot{U}_2 = \underline{Z}_H \dot{I}_2.$$

В уравнениях (8.6), (8.7) $\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} = \alpha + j\beta$,

где $\underline{\gamma}$ — постоянная распространения; $\alpha = \alpha(\omega)$ — постоянная ослабления (Нп/м);

$\beta = \beta(\omega)$ — постоянная изменения фазы (рад/м).

Расстояние λ , на котором фаза волны изменяется на 2π , называется длиной волны: $\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$;

Фазовая скорость распространения волны определяется отношением длины волны к периоду ее изменения во времени T :

$$v_\phi = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{\beta} < c$$

Полученным уравнениям соответствует схема замещения, показанная на рис. 8.3

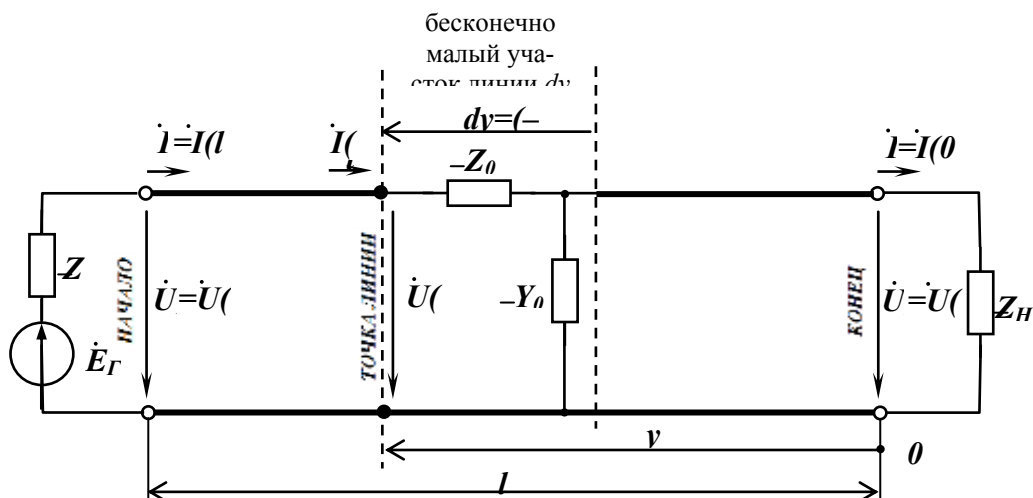


Рис. 8.3. Схема замещения малого участка линии для установившегося гармонического режима

Решение уравнений (8.6), (8.7) можно привести к виду

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} y + \dot{I}_2 \underline{Z}_B \operatorname{sh} \underline{\gamma} y; \quad (8.8)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_B} \operatorname{sh} \underline{\gamma} y + \dot{I}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} y, \quad (8.9)$$

где $\underline{Z}_B = \frac{\underline{Z}_0}{\underline{\gamma}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}}$ - волновое или характеристическое сопротивление.

Для линий, работающих на высоких частотах, когда $R_0 \ll \omega L_0$ и $G_0 \ll \omega C_0$, можно положить $R_0 = 0$, $G_0 = 0$ в вышеприведенных уравнениях. Такая идеализированная линия носит название «линия без потерь». В данном случае волновое сопротивление становится чисто активным, а постоянная распространения - чисто мнимой величиной:

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}; \quad \underline{\gamma} = j\beta, \text{ где } \beta = \omega \sqrt{L_0 C_0}; \quad \lambda = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{L_0 C_0}}; \quad v_\phi = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}.$$

Для воздушных линий без потерь $v_\phi = c$, для коаксиальных кабелей $v_\phi = c(\epsilon_r \mu_r)^{-0.5}$, где ϵ_r и μ_r - относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости изоляции кабеля соответственно. Для применяемых при изготовлении кабелей диэлектриков $\mu_r = 1$.

Время задержки распространения сигнала можно найти по формуле

$$t_d = \frac{l}{v_\phi} = l \sqrt{L_0 C_0}, \quad (8.10)$$

откуда следует, что время задержки можно рассматривать в качестве обобщенного вторичного параметра линии без потерь.

С другой стороны

$$t_d = \frac{l}{v_\phi} = \frac{l}{\lambda f} = \frac{l^*}{f}, \quad (8.11)$$

где l^* – нормализованная длина линии.

Таким образом, линию без потерь можно задать двумя способами:

1) волновым сопротивлением Z_B и временем задержки распространения сигнала t_d (8.10);

2) волновым сопротивлением Z_B , частотой f и нормализованной длиной l^* (8.11).

Уравнения линии для линии без потерь упрощаются по сравнению с (8.8), (8.9) и имеют вид

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \cos \beta y \cdot \dot{I}_2 j Z_B \sin \beta y; \quad (8.12)$$

$$\dot{I} = j \frac{\dot{U}_2}{Z_B} \sin \beta y \cdot \dot{I}_2 \cos \beta y. \quad (8.13)$$

Аргумент βy можно преобразовать, введя нормализованную координату $y^* = y/\lambda$. Тогда

$\beta y = \beta \lambda y^* = 2\pi y^*$ и уравнения (8.12) и (8.13) приобретают нормализованный вид

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \cos 2\pi y^* \cdot \dot{I}_2 j Z_B \sin 2\pi y^*;$$

$$\dot{I} = j \frac{\dot{U}_2}{Z_B} \sin 2\pi y^* + \dot{I}_2 \cos 2\pi y^*.$$

8.3. Описание длинных линий в WinSpice3

Поддерживаются описания линий трех типов:

- 1) линия без потерь (TXXXXXXX);
- 2) линия с потерями (OXXXXXXX);
- 3) RC-линия на базе цепной схемы из RC-звеньев (UXXXXXXX).

Ниже рассмотрены описания TXXXXXXX и OXXXXXXX. RC-линия может быть задана как частный случай линии с потерями, поэтому описание UXXXXXXX в данной книге не приводится. Ознакомиться с ним можно в руководстве пользователя WinSpice3 [19, с. 49].

8.3.1. Линия без потерь

Общее описание в обозначениях, показанных на рис.8.4, имеет вид

**TXXXXXXX N1 N2 N3 N4 Z0=VALUE <TD=VALUE> <F=FREQ <NL=NRMLN>>
+ <IC=V1, I1, V2, I2>**

где N1, N2 — положительный и отрицательный полюсы начала линии соответственно;

N3, N4 — положительный и отрицательный полюсы конца линии соответственно;

Z0 — волновое сопротивление; TD — задержка распространения;

F — частота;

NL — нормализованная длина линии (8.2), т. е. $NL = l\lambda^{-1}$, где λ - длина волны на частоте F. По умолчанию $NL=0,25$, что соответствует четвертьволновой линии;

IC — вектор начальных условий в начале и конце линии, используемый при расчете переходных процессов, если в директиве TRAN указана опция UIC.

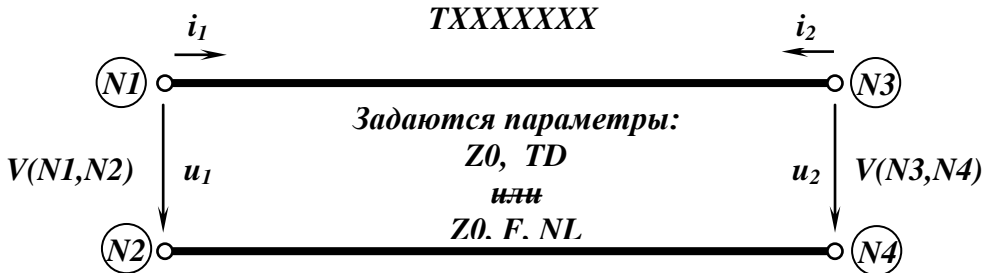


Рис. 8.4. Обозначения, принятые при описании линии без потерь

Замечания:

1) при расчете наиболее распространенного случая, когда генератор подключен к входу, а нагрузка к выходу, номера отрицательных полюсов должны совпадать, т. е. $N2=N4$;

2) свойства линии допустимо описывать в данной модели только двумя способами:

а) заданием параметров $Z0$ и TD ;

б) заданием $Z0$, F и NL . При этом параметр TD не указывается, но может быть найден по формуле (8.11) как NL/F . Если параметр NL опущен, то его значение принимается равным 0,25 (четвертьволновая линия). Наличие двух способов описания позволяет выбрать наиболее удобный из них в зависимости от имеющихся исходных данных.

3) указание параметра F не означает, что линия работает в гармоническом режиме, а служит лишь для определения TD по формуле (8.11)

Ниже приведены примеры описания линий без потерь:

1) T1 1 0 2 0 $Z0=50$ $TD=10N$

задана линия с именем T1, характеризующаяся волновым сопротивлением 50 Ом и временем задержки 10 нс. Начало линии подключено к узлам 1 (плюс) и 0 (минус). Конец линии — к узлам 2 (плюс) и 0 (минус);

2) TDELAY 10 5 LOAD 5 $Z0=75$ $F=12MEG$ $NL=0.3$

задана линия с именем TDELAY, характеризующаяся волновым сопротивлением 75 Ом, с нормализованной длиной 0,3 на частоте 12 МГц. Начало линии подключено к узлам 10 (плюс) и 5 (минус). Конец линии — к узлам LOAD (плюс) и 5 (минус). Время

задержки можно определить по (8.11): $\frac{0,3}{12 \cdot 10^6} = 0,025 \cdot 10^{-6} = 25$ нс.

Приведенная модель используется для расчета линий задержки, полосковых линий печатных плат, радиочастотных кабелей. Однако в [19, с.47] отмечено, что модель линии с потерями (см. ниже) обладает большим быстродействием и, как правило, дает более точные результаты, если положить $R_0 = 0$, $G_0 = 0$.

8.3.2. Линия с потерями

Линия с потерями описывается следующей строкой (используется буква "O", ноль):

OXXXXXXXX N1 N2 N3 N4 MNAME

где N1, N2, N3, N4 — имеют тот же смысл, что и в предыдущем случае (п. 8.2.1);

MNAME — уникальное произвольное имя модели линии, начинающееся с буквы.

Как и рассмотренные ранее ключи (см. пп. 7.7.2), линия с потерями относится к сложным компонентам, свойства которых в SPICE описываются специальной директивой .MODEL с предопределенным именем типа модели LTRA:

.MODEL MNAME LTRA(PNAME1=PVAL1 PNAME2=PVAL2 ...)

где PNAME1, PNAME1, ... — предопределенные имена параметров модели;

PVAL1, PVAL1, ... — значения параметров модели.

Если некоторые параметры модели не заданы явно, то WinSpice3 принимает их значения по умолчанию.

Основные параметры модели LTRA описаны в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Имя параметра	Физический смысл	Размерность	Значение по умолчанию
R	погонное продольное сопротивление	Ом/м	0
L	погонная индуктивность	Гн/м	0
G	погонная поперечная проводимость	См/м	0
C	погонная емкость	Ф/м	0
LEN	длина линии	м	—

В таблице размерность погонных параметров указана в расчете на один метр и длина линии в метрах. Можно заменить метр километром, но длину линии при этом надо тоже задавать в километрах и пропорционально пересчитать погонные параметры (т. е. умножить на 1000). Имеется еще ряд параметров, обеспечивающих управление вычислительным процессом, необходимость использования которых возникает довольно редко [19, с. 48].

Применение данной модели позволяет рассчитывать широкий класс линий, как в переходном процессе, так и на переменном и постоянном токе.

Следует отметить некоторые ограничения модели LTRA. Ее использование возможно только для следующих типов однородных линий:

1) линия с продольными потерями или RLC-линия. Поперечные потери не учитываются ($G=0$);

2) линия без потерь или LC-линия ($R=0$, $G=0$). Результаты обычно имеют более высокую точность, чем при использовании модели TXXXXXXX (пп. 8.2.1);

3) линия без реактивностей или RG-линия ($L=0$, $C=0$);

4) резистивно-емкостная линия или RC-линия ($L=0$, $G=0$).

Для любых других сочетаний параметров получение результата не предусмотрено.

8.4. Примеры расчетов длинных линий

В данном подразделе рассмотрен ряд примеров расчета длинных линий в установившемся гармоническом и переходном режимах. Для линий без потерь используются описания TXXXXXXX и OXXXXXXX (более точное). Для линий с потерями используется описание OXXXXXXX.

8.4.1. Установившийся гармонический режим длинной линии

8.4.1.1. Линия без потерь

ПРИМЕР 8.1. Воздушная линия без потерь (см. рис. 8.5) длиной 100 м питается от идеального источника синусоидального напряжения u_s с действующим значением $U_s = 5$ В и частотой 1 МГц. К концу линии подключен пассивный двухполюсник с параметрами $R_n = 40$ Ом, $L_n = 30$ мкГн, $C_n = 250$ пФ. Погонные параметры линии: $R_0 = 0$, $G_0 = 0$, $L_0 = 2,78$ мкГн/м, $C_0 = 4$ пФ/м. Определить входное сопротивление \underline{Z}_{IN} , входной и выходной токи, выходное напряжение.

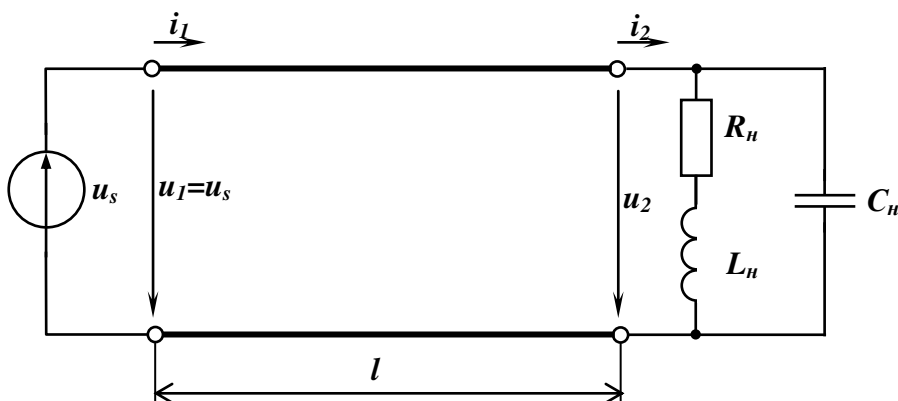


Рис. 8.5. Линия без потерь, нагруженная на пассивный двухполюсник

Используем описание линии без потерь вида TXXXXXXX в варианте с заданием параметров Z0 и TD; (см. пп. 8.2.1). Определим их через исходные данные по формулам

$$Z_0 = Z_B = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = 833,7 \text{ Ом}; \quad TD = t_d = \frac{l}{c} = 333,3 \text{ нс}.$$

Схема в Spice-обозначениях представлена на рис. 8.6.

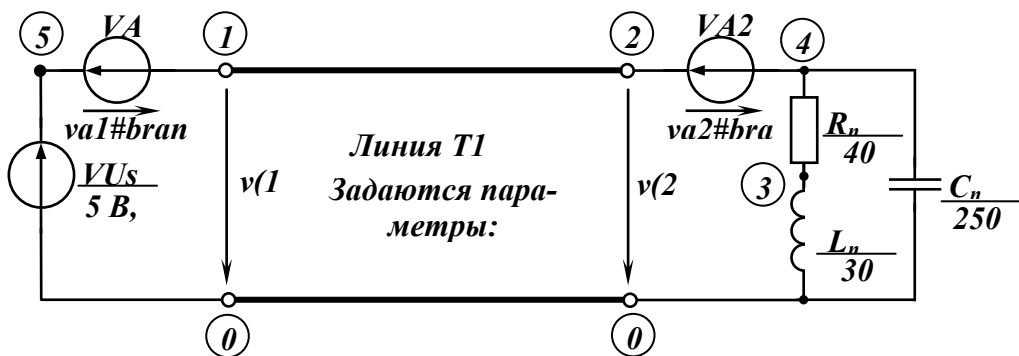


Рис. 8.6. Схема в Spice-обозначениях

Для определения входного и выходного токов в схему включены «амперметры» VA1 и VA2 соответственно. Текстовое описание схемы и полученные результаты приведены в табл. 8.2

Таблица 8.2

Текстовое описание	Результаты расчета
PRIMER 8_1 (STYLE SPICE3) VUs 5 0 AC 5 0 DC 0 VA1 5 1 DC 0 VA2 2 4 DC 0 Rn 4 3 40 Ln 3 0 30u Cn 4 0 250p T1 1 0 2 0 Z0=833.7 TD=333.3n .control destroy all set units=degrees ac lin 1 1meg 1meg echo ***VHOD**** print mag(v(1)) ph(v(1)) print mag(va1#branch) ph(va1#branch) echo ***VYHOD*** print mag(v(2)) ph(v(2)) print mag(va2#branch) ph(va2#branch) echo ***VHODNOYE SOPROTIVLENIE*** let zin=v(1)/(va1#branch) print mag(zin) ph(zin) .endc .end	***VHOD**** mag(v(1)) = 5.000000e+00 ph(v(1)) = 0.000000e+00 mag(va1#branch)=6.533231e-03 ph(va1#branch) =7.996778e+01 ***VYHOD*** mag(v(2)) = 2.298324e+00 ph(v(2)) = -2.09511e+01 mag(va2#branch)=8.429213e-03 ph(va2#branch)= -9.38695e+01 ***VHODNOYE SOPROTIVLENIE*** mag(zin) = 7.653182e+02 ph(zin) = -7.99678e+01

Результаты показательной форме:

$$\underline{Z}_{IN} = 765,3e^{-j79,97^\circ} \text{ Ом}; \quad \dot{I}_1 = 6,533e^{j79,97^\circ} \text{ мА}; \quad \dot{I}_2 = 8,429e^{-j93,87^\circ} \text{ мА}; \quad \dot{U}_2 = 2,298e^{-j20,95^\circ} \text{ В}.$$

Проверка осуществлялась по известным соотношениям для линии без потерь:

$$\underline{Z}_{IN} = Z_B \frac{\underline{Z}_H + jZ_B \operatorname{tg}(\beta l)}{Z_B + j\underline{Z}_H \operatorname{tg}(\beta l)}; \quad i_1 = \frac{\dot{U}_s}{\underline{Z}_{IN}}; \quad \dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_s}{\cos(\beta l) + jZ_B \underline{Z}_H^{-1} \sin(\beta l)}; \quad i_2 = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_H}$$

где \underline{Z}_H — комплексное сопротивление нагрузочного двухполюсника.

Результаты расчетов по данным формулам практически совпали с данными из табл. 8.2.

Пусть в условии задачи вместо длины линии были бы заданы параметры F и NL, например, F=10 МГц и NL=3,333. Тогда, как было указано в пп. 8.2.1, параметр времени задержки TD не используется, но может быть найден по формуле (8.11) как NL/F=333,3 нс, что соответствует условию решенной выше задачи. В данном случае описание линии имеет вид

T1 1 0 2 0 Z0=833.7 F=10meg NL=3.333

и результаты расчетов совпадают с данными табл. 8.2.

Попробуем использовать для линии без потерь описание линии с потерями (пп. 8.2.2). Для этого надо положить параметры R и G равными нулю. Остальные величины задаются в соответствии с условием примера 8.1. Заменим в текстовом описании табл. 8.2 строку T1 следующими двумя строками

O1 1 0 2 0 T1

.MODEL T1 LTRA(R=0 G=0 L=2.78u C=4p LEN=100)

Расчет с данным описанием линии дает результаты, совпадающие табл. 8.2 до 4-х значащих цифр. Отметим, что в данном примере использование модели линии с потерями LTRA удобнее, поскольку не требуется предварительный расчет волнового сопротивления и времени задержки, как в случае модели типа TXXXXXX.

8.4.1.2. Линия с потерями

ПРИМЕР 8.2. Длинная линия с продольными потерями (см. рис. 8.7) длиной 81 км питается от идеального источника синусоидального напряжения u_s с действующим значением $U_s = 100$ В и частотой 900 Гц. К концу линии подключен пассивный двухполюсник с параметрами $R_H = 2515$ Ом, $C_H = 492,7$ нФ. Погонные параметры линии: $R_0 = 19,2$ Ом/км, $G_0 = 0$, $L_0 = 10,8$ мГн/км, $C_0 = 7,4$ нФ/км. Определить входное сопротивление \underline{Z}_{IN} , входной и выходной токи, выходное напряжение.

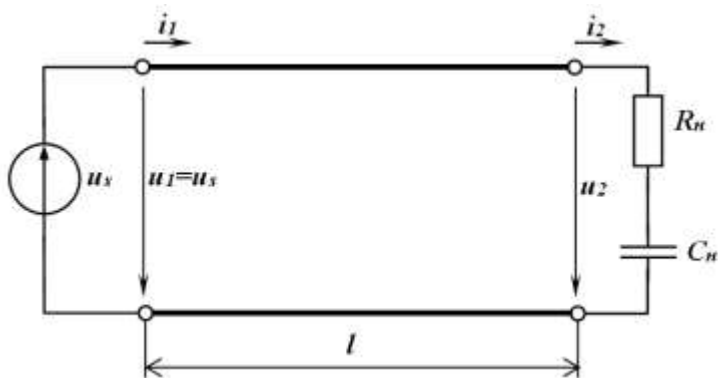


Рис. 8.7. Линия с потерями, нагруженная на пассивный двухполюсник

Схема в Spice-обозначениях представлена на рис. 8.8.

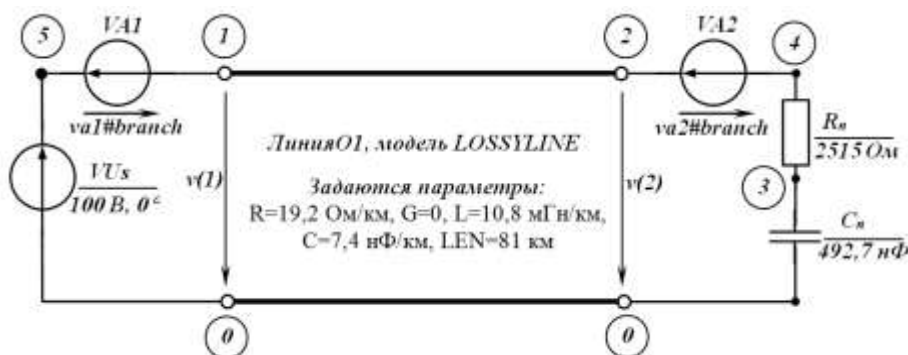


Рис. 8.8. Схема линии с потерями в Spice-обозначениях

Для определения входного и выходного токов в схему включены «амперметры» VA1 и VA2 соответственно. Текстовое описание схемы и полученные результаты приведены в табл. 8.3

Результаты показательной форме:
 $\underline{Z}_{IN} = 1144 e^{-j18,83^\circ} \text{ Ом}; \quad \dot{I}_1 = 87,44 e^{j18,83^\circ} \text{ мА}; \quad \dot{I}_2 = 29,06 e^{j136,1^\circ} \text{ мА}; \quad \dot{U}_2 = 73,82 e^{j128,0^\circ} \text{ В}.$

Проверка осуществлялась по известным соотношениям, вытекающим из (8,8), (8.9):

$$\underline{Z}_{IN} = \underline{Z}_B \frac{\underline{Z}_H + \underline{Z}_B \text{th}(\underline{\gamma}l)}{\underline{Z}_B + \underline{Z}_H \text{th}(\underline{\gamma}l)}; \quad \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_S}{\underline{Z}_{IN}}; \quad \dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_S}{\text{ch}(\underline{\gamma}l) + \underline{Z}_B \underline{Z}_H^{-1} \text{sh}(\underline{\gamma}l)}; \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_H}$$

Результаты расчетов по данным формулам практически совпали с данными из табл. 8.3.

Таблица 8.3

Текстовое описание	Результаты расчета
PRIMER 8.2 (STYLE SPICE3) VUs 5 0 AC 100 0 DC 0 VA1 5 1 DC 0 VA2 2 4 DC 0 Rn 4 3 2515 Cn 3 0 492.7n O1 1 0 2 0 LOSSYLINE .MODEL LOSSYLINE LTRA(R=19.2 G=0 +L=10.8m C=7.4n LEN=81) .control destroy all set units=degrees ac lin 1 900 900 echo ***VHOD**** print mag(v(1)) ph(v(1)) print mag(va1#branch) ph(va1#branch)	***VHOD**** mag(v(1)) = 1.000000e+02 ph(v(1)) = 0.000000e+00 mag(va1#branch)=8.744051e-02 ph(va1#branch) = 1.883434e+01 ***VYHOD*** mag(v(2)) = 7.382431e+01 ph(v(2)) = 1.280210e+02 mag(va2#branch)=2.905918e-02 ph(va2#branch) = 1.361429e+02 ***VHODNOYE SOPROTVLENIE*** mag(zin) = 1.143635e+03 ph(zin) = -1.88343e+01

```

echo ***VYHOD***
print mag(v(2)) ph(v(2))
print mag(va2#branch) ph(va2#branch)
echo ***VHODNOYE SOPROTIVLENIE***
let zin=v(1)/(va1#branch)
print mag(zin) ph(zin)
.endc
.end

```

ПРИМЕР 8.3. Рассчитать распределение действующего значения напряжения вдоль линии в условии предыдущей задачи. Выяснить, как изменится это распределение, если в линии имеются поперечные потери $G_0=0,72$ мкСм/км.

Из описания модели линии с потерями (см. пп. 8.2.2) следует, что возможность определения напряжения или тока в произвольной точке линии отсутствует. Для расчетов доступны только начало и конец линии. Для решения поставленной задачи нахождения распределения напряжения можно представить линию в виде каскадного соединения ее отрезков. В местах соединения образуются узлы, в которых можно определить электрические величины. В рассматриваемом случае возьмем 10 равных отрезков длиной $81/10=8,1$ км.

Каждый отрезок обладает эквивалентной поперечной проводимостью $0,72 \cdot 8,1=5,832$ мкСм, что соответствует сопротивлению $(5,832 \cdot 10^{-6})^{-1}=171,5$ кОм. Резистор R_p с таким сопротивлением можно включить, например, параллельно выходу каждого отрезка. В результате получим схему из 10 отрезков $L1 \dots L10$, показанную на рис. 8.9.

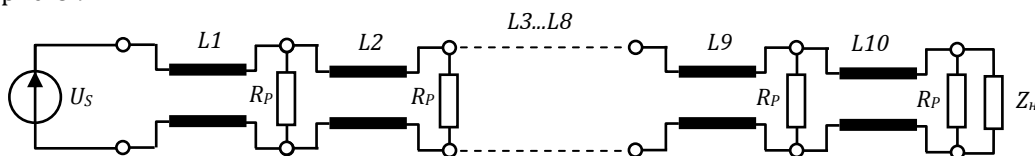


Рис. 8.9. Представление длинной линии с помощью каскадного соединения ее отрезков

Отдельный отрезок линии представим в виде подсхемы с именем DLINE, показанной на рис. 8.10.

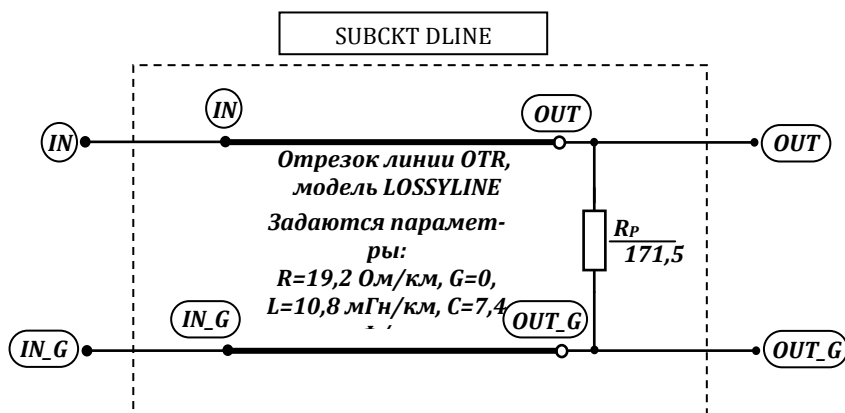


Рис. 8.10. Подсхема, замещающая отрезок линии с поперечными потерями

Данная подсхема описывается следующими предложениями:

```
.SUBCKT DLINE IN IN_G OUT OUT_G
OTR IN IN_G OUT OUT_G LOSSYLINE
RP OUT OUT_G 171.5k
.MODEL LOSSYLINE LTRA(R=19.2 G=0
+L=10.8m C=7.4n LEN=8.1)
.ENDS
```

Полная цепь, состоящей из 10 отрезков, в Spice-обозначениях приведена на рис. 8.11.

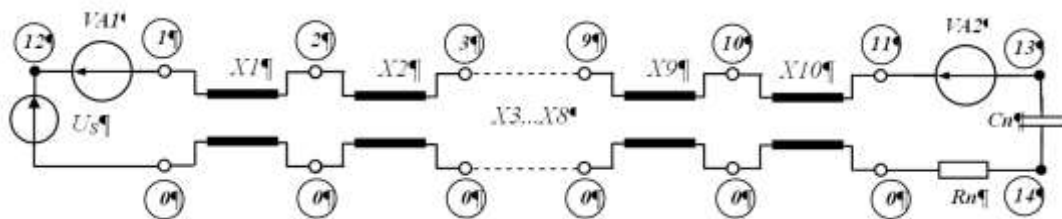


Рис. 8.11. Схема линии, состоящей из 10 отрезков

Элементы X1...X10 на схеме — это экземпляры подсхемы DLINE. Текстовое описание и результаты расчетов приведены в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Текстовое описание	Результаты расчета
PRIMER 8_3 (STYLE SPICE3) *** OTREZOK LINII 8,1 km *** .SUBCKT DLINE IN IN_G OUT OUT_G OTR IN IN_G OUT OUT_G LOSSYLINE RP OUT OUT_G 171.5k .MODEL LOSSYLINE LTRA(R=19.2 G=0 +L=10.8m C=7.4n LEN=8.1) .ENDS * VUs 12 0 AC 100 0 DC 0 VA1 12 1 DC 0 VA2 11 13 DC 0 Rn 14 0 2515 Cn 13 14 492.7n *** LINIYA IS 10 OTREZKOV *** X1 1 0 2 0 DLINE X2 2 0 3 0 DLINE X3 3 0 4 0 DLINE X4 4 0 5 0 DLINE X5 5 0 6 0 DLINE X6 6 0 7 0 DLINE X7 7 0 8 0 DLINE X8 8 0 9 0 DLINE X9 9 0 10 0 DLINE X10 10 0 11 0 DLINE .control destroy all set units=degrees	(с попер.потерями (RP=171,5кОм)) ***VHOD**** mag(v(1)) = 1.000000e+02 ph(v(1)) = 0.000000e+00 mag(va1#branch) = 8.663690e-02 ph(va1#branch) = 1.765407e+01 ***VYHOD*** mag(v(11)) = 7.088210e+01 ph(v(11)) = 1.277770e+02 mag(va2#branch) = 2.790105e-02 ph(va2#branch) = 1.358989e+02 ***VHODNOYE SOPROTIIVLENIE*** mag(zin) = 1.154243e+03 ph(zin) = -1.76541e+01 ***RASPRED. DEISTV. ZNACHENIY** mag(v(1)) = 1.000000e+02 mag(v(2)) = 1.010102e+02 mag(v(3)) = 1.004288e+02 mag(v(4)) = 9.461712e+01 mag(v(5)) = 8.284494e+01 mag(v(6)) = 6.771240e+01 mag(v(7)) = 5.552525e+01 mag(v(8)) = 5.374510e+01 mag(v(9)) = 6.120745e+01 mag(v(10)) = 6.909046e+01 mag(v(11)) = 7.088210e+01 (без попер. потерь (RP=1 ГОм))

<pre> ac lin 1 900 900 * echo ***VHOD***** print mag(v(1)) ph(v(1)) print mag(va1#branch) ph(va1#branch) * echo ***VYHOD*** print mag(v(11)) ph(v(11)) print mag(va2#branch) ph(va2#branch) * echo ***VHODNOYE SOPROTIVLENIE*** let zin=v(1)/(va1#branch) print mag(zin) ph(zin) * echo *** RASPRD.DEISTV.ZNACHENIY print mag(v(1)) mag(v(2)) mag(v(3)) +mag(v(4)) mag(v(5)) mag(v(6)) +mag(v(7)) mag(v(8)) mag(v(9)) +mag(v(10)) mag(v(11)) .endc .end </pre>	<pre> ***VHOD***** mag(v(1)) = 1.000000e+02 ph(v(1)) = 0.000000e+00 mag(va1#branch) = 8.744037e-02 ph(va1#branch) = 1.883413e+01 ***VYHOD*** mag(v(11)) = 7.382379e+01 ph(v(11)) = 1.280210e+02 mag(va2#branch) = 2.905897e-02 ph(va2#branch) = 1.361429e+02 ***VHODNOYE SOPROTIVLENIE*** mag(zin) = 1.143637e+03 ph(zin) = -1.88341e+01 **RASPRD. DEISTV.ZNACHENIY *** mag(v(1)) = 1.000000e+02 mag(v(2)) = 1.020004e+02 mag(v(3)) = 1.021174e+02 mag(v(4)) = 9.651438e+01 mag(v(5)) = 8.448095e+01 mag(v(6)) = 6.882570e+01 mag(v(7)) = 5.633167e+01 mag(v(8)) = 5.500239e+01 mag(v(9)) = 6.332959e+01 mag(v(10)) = 7.184868e+01 mag(v(11)) = 7.382379e+01 </pre>
--	---

Если положить R_p равным очень большому значению, например 1 ГОм, то получим линию без поперечных потерь, рассмотренную в примере 8.2. Результаты при $R_p = 1$ ГОм приведены в табл. 8.4 и практически совпадают с значениями табл. 8.3. На рис. 8.12 приведены зависимости распределения действующих значений напряжения вдоль линии с учетом поперечных потерь (2) и без них (1). Видно, что поперечные потери приводят к уменьшению напряжения.

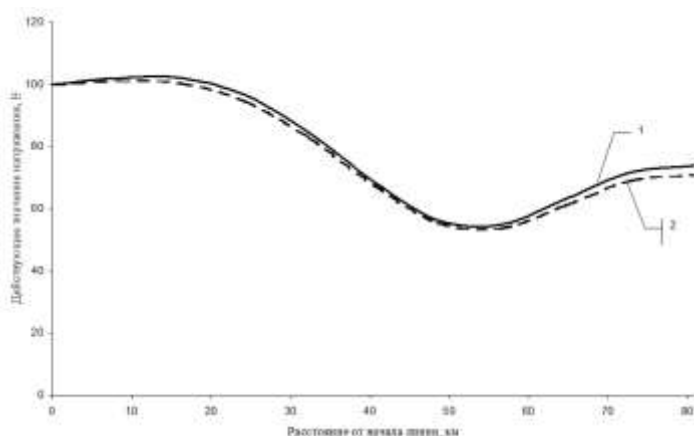


Рис. 8.12. Зависимости распределения действующих значений напряжения вдоль линии:
1 — без поперечных потерь; 2 — с поперечными потерями

8.4.2. Переходные процессы в длинной линии

8.4.2.1. Линия без потерь

ПРИМЕР 8.4. Линия без потерь рис. 8.13, состоящая из двух отрезков, подключается к идеальному источнику постоянного напряжения $E=100$ В ключом S . Длина входного отрезка $W1$ в два раза меньше длины выходного отрезка $W2$. Время задержки отрезка $W1$ составляет 180 мкс, отрезка $W2$ — 360 мкс. Волновые сопротивления Z_B обоих отрезков одинаковы и равны 1500 Ом. Рассчитать переходные процессы напряжения u_0 и тока i_0 в месте соединения отрезков при нулевых начальных условиях при холостом ходе и для трех значений нагрузки: 750, 1500, 3000 Ом.

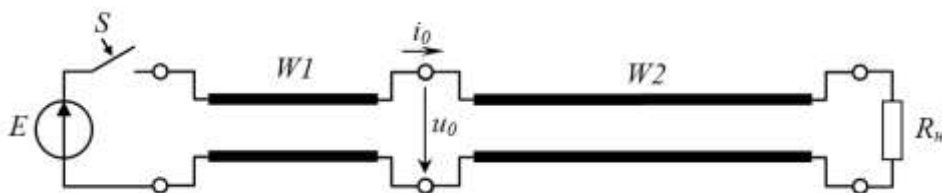


Рис. 8.13. Представление длинной линии с помощью каскадного соединения ее отрезков

На рис. 8.14 приведена схема в SPICE-обозначениях.

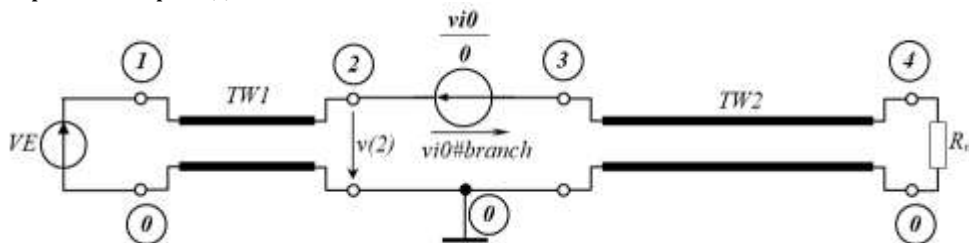


Рис. 8.14. Схема линии без потерь из двух отрезков в Spice-обозначениях

Источник постоянного напряжения E и ключ S в данной схеме замещены скачком напряжения от нуля до 100 В. Согласно п. 7.4.1 скачок описывается сигнальным импульсным источником VE предложением

```
VE 1 0 PULSE(0 100 0 10u) DC 0
```

Источник $vi0$ с нулевой ЭДС, включенный между отрезками линии, используется в качестве амперметра. Его ток $vi0\#branch$ является искомым током i_0 . Текстовое описание схемы рис. 8.14 имеет вид

```
PRIMER 8_4 (STYLE SPICE3)
VE 1 0 PULSE(0 100 0 10u) DC 0
TW1 1 0 2 0 ZO=1500 TD=180u
VI0 2 3 DC 0
TW2 3 0 4 0 ZO=1500 TD=360u
R_N 4 0 1G
.control
destroy all
save all
```

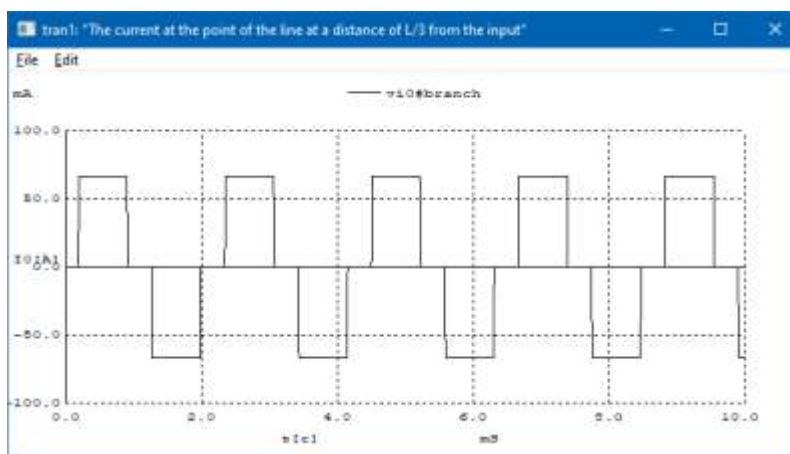
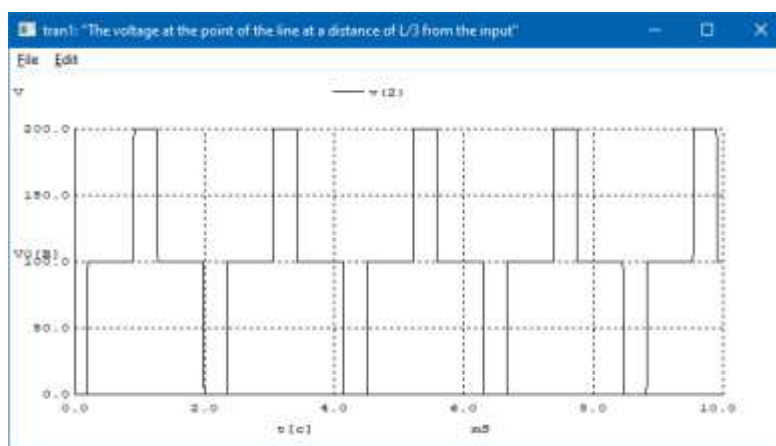
```

tran 2e-6 0.01
set color2=black
plot v(2) xlabel t ylabel V0
+ title "The voltage at the point of the line at a distance of L/3 from the input"
plot vi0#branch xlabel t ylabel I0
+ title "The current at the point of the line at a distance of L/3 from the input"
.endc
.end

```

Расчетный интервал установлен директивой tran равным 0,01 с, а максимальный шаг интегрирования 2 мкс. Импульсный источник напряжения VE типа PULSE (см. пп. 7.4.1) за 10 мкс достигает 100 В и остается постоянным до конца расчетного интервала. задан. Отрезки линии заданы моделью типа T: входной W1 — TW1, выходной W2 — TW2. Нагрузка R_N задана очень большим сопротивлением 1 ГОм (холостой ход на конце линии).

Результаты расчета напряжения и тока при холостом ходе в месте соединения отрезков линии приведены на рис. 8.15, а и б соответственно.



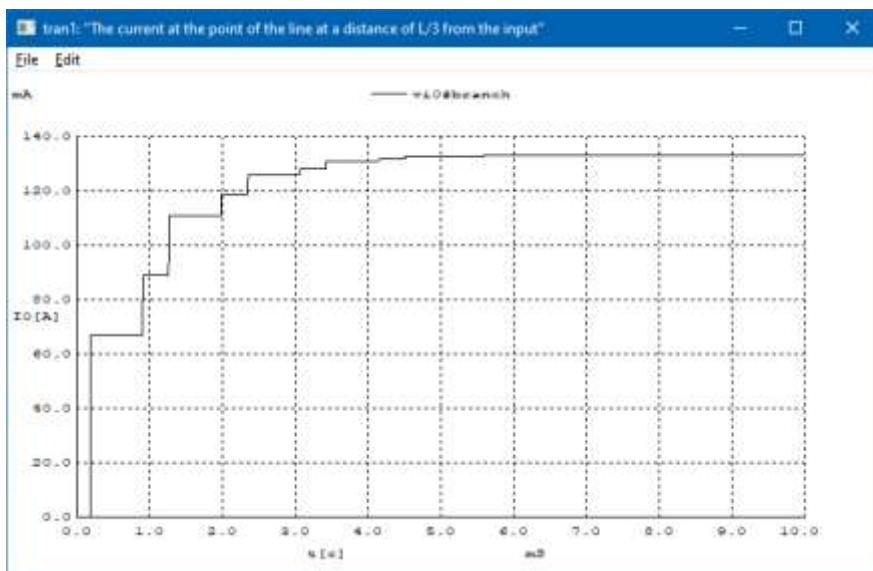
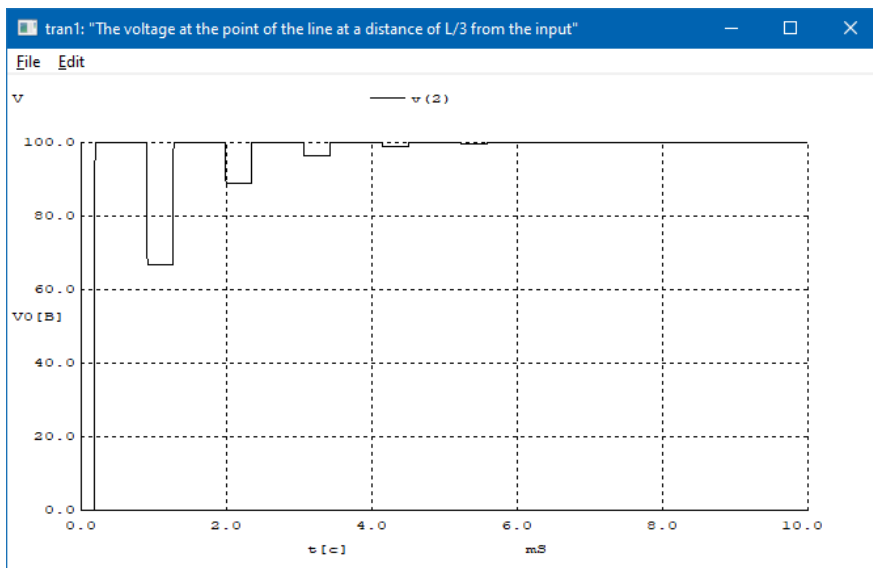
а)

б)

Рис. 8.15. Незатухающие колебания напряжения (а) и тока (б) в месте соединения отрезков линии при холостом ходе

Полученные результаты полностью соответствуют известному решению [3, с.322]. Наблюдаются незатухающие колебания с периодом $T = 4l\sqrt{LC} = 2,16$ мс, где l — суммарная длина отрезков. На начальной стадии процесса наблюдается задержка 180 мкс, обусловленная входным отрезком линии

При нагрузке $R_N = 750 \text{ Ом} < Z_B$ переходные процессы (рис. 8.16) начинаются с задержкой 180 мкс и стремятся к установившимся значениям без колебаний относительно этих значений.

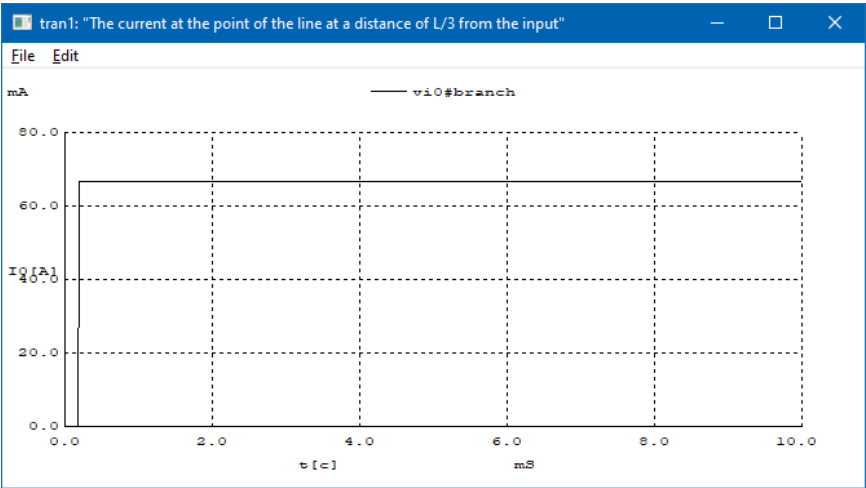
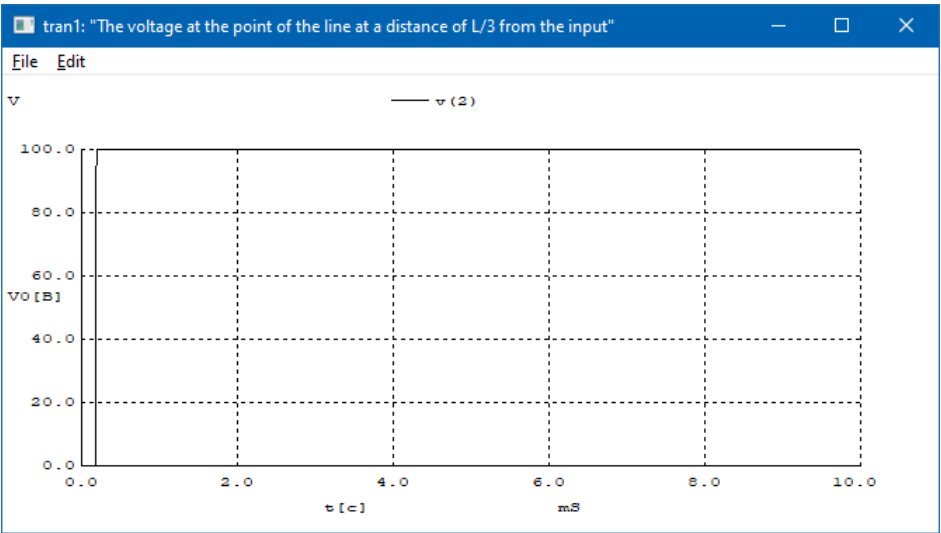


а)

б)

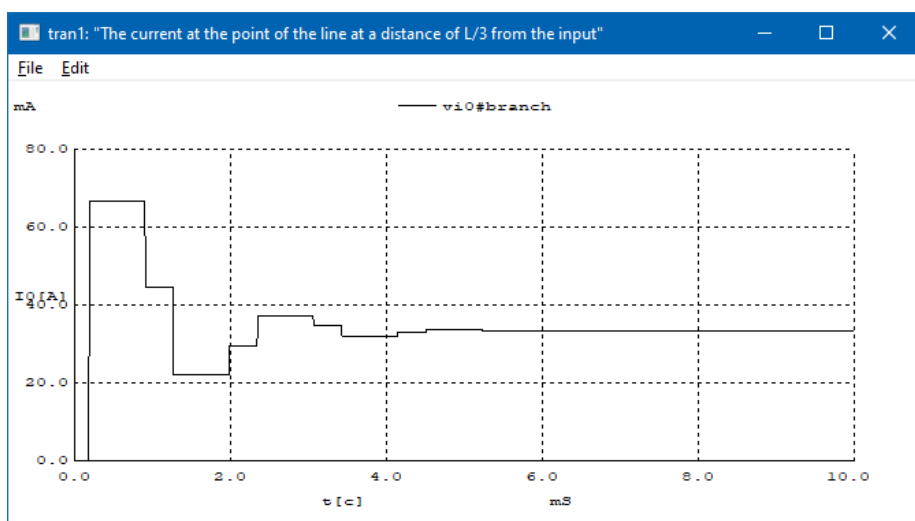
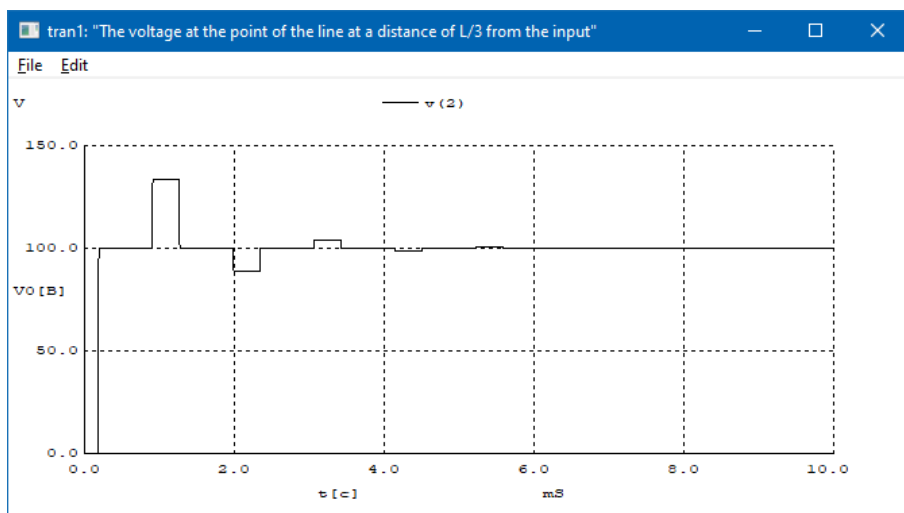
Рис. 8.16. Переходные процессы напряжения (а) и тока (б) в месте соединения отрезков линии при нагрузке $R_H = 750 \text{ Ом}$

При согласованном режиме ($R_N=1500\text{ Ом} = Z_B$) переходные процессы отсутствуют и в линии сразу наступает установившийся режим (рис. 8.17). Как и ранее, задержка составляет 180 мкс.



а) б)
Рис. 8.17. Переходные процессы напряжения (а) и тока (б) в месте соединения отрезков линии при согласованном режиме $R_H = Z_B = 1500\text{ Ом}$

При нагрузке $R_N=3000\text{ Ом} > Z_B$ переходные процессы (рис. 8.18) начинаются с задержкой 180 мкс и стремятся к установившимся значениям в течение интервала затухания колебаний относительно этих значений.



a)

б)

Рис. 8.18. Переходные процессы напряжения (а) и тока (б) в месте соединения отрезков линии при нагрузке $R_H=3000 \text{ Ом}$

Из проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что при согласованном режиме переходные процессы отсутствуют, что весьма желательно при передаче информации с помощью импульсных сигналов.

ПРИМЕР 8.5. К входу линии без потерь подключен источник прямоугольных однопольярных импульсов с амплитудой 5 В, длительностью 0.5 мкс и периодом 1 мкс. Внутреннее сопротивление источника равно 5 Ом. Линия характеризуется волновым сопротивлением 75 Ом и задержкой 25 нс. К ее выходу подключена нагрузка, состоящая из параллельно включенных резистивного $R_H=300 \text{ Ом}$ и емкостного $C_H=30 \text{ пФ}$ элементов. Рассчитать переходные процессы напряжений и токов на входе и выходе линии.

Схема в Spice-обозначениях показана на рис. 8.19. Интервал нарастания импульса напряжения источника (длительность фронта) принят равным 10 нс. Интервал спада импульса (длительность среза) также принят равным 10 нс.

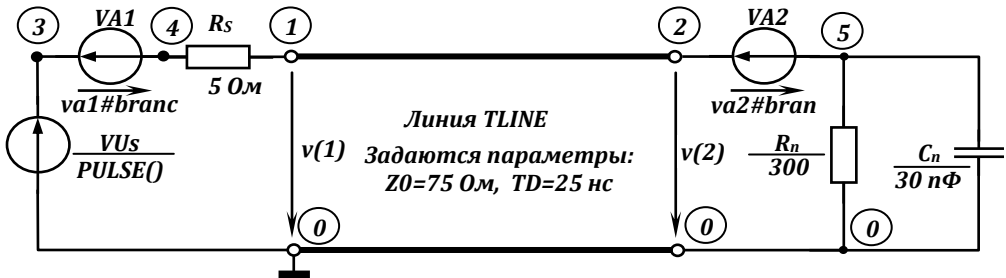


Рис. 8.19. Схема линии без потерь в Spice-обозначениях

Описание, соответствующее рис. 8.19 приведено ниже.

PRIMER 8_5 (STYLE SPICE3)

VUS 3 0 PULSE(0 5 0 10n 10n 0.5u 1u)

RS 4 1 5

VA1 3 4 DC 0

VA2 2 5 DC 0

TLINE 1 0 2 0 Z0=75 TD=25N

RN 5 0 300

CN 5 0 30p

.control

destroy all

save all

tran 0.2n 2u

set color2=black

plot v(1) xlabel t ylabel V(1) title "VHODNOE NAPR.LYNII"

plot va1#branch xlabel t ylabel I(1) title "VHODNOY TOK LYNII"

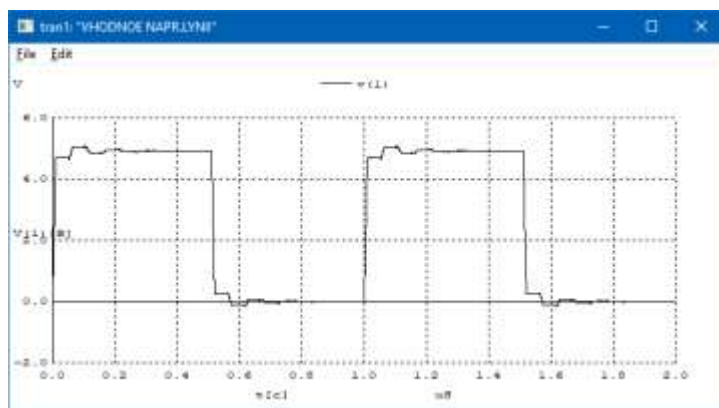
plot v(5) xlabel t ylabel V(2) title "VYHODNOE NAPR.LYNII"

plot va2#branch xlabel t ylabel I(1) title "VYHODNOY TOK LYNII"

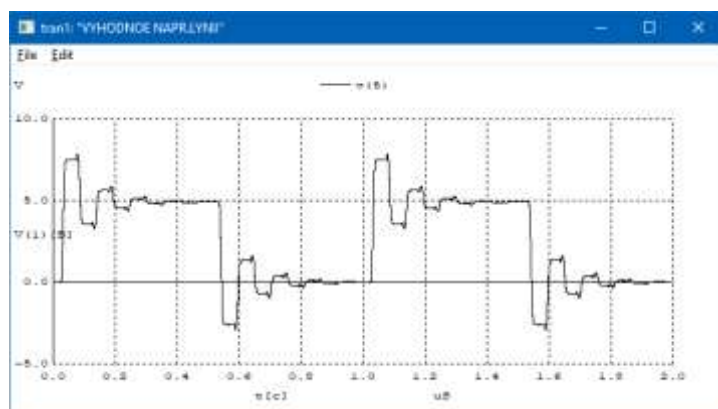
.endc

.end

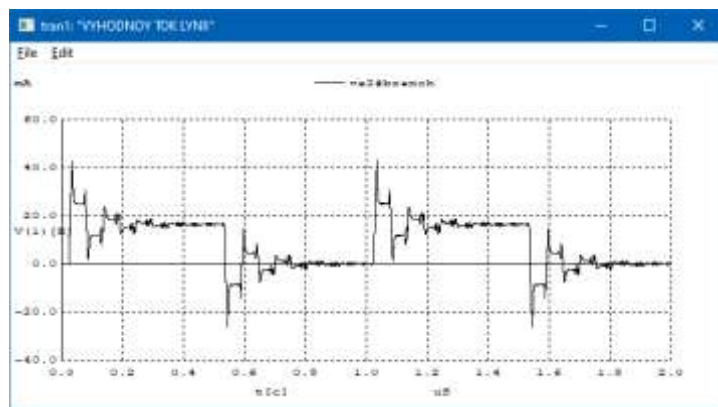
Как и в примерах 8.1, 8.2, для определения входного и выходного токов в схему включены «амперметры» VA1 и VA2 соответственно. Расчетный интервал установлен директивой tran равным 2 мкс, а максимальный шаг интегрирования 0,2 нс. Результаты расчетов приведены на рис. 8.20.



а)



б)



в)

Рис. 8.20. Переходные процессы входного напряжения (а), выходного напряжения (б) и выходного тока (в)

Из анализа полученных результатов следует, что переходные процессы имеют колебательный характер относительно установившихся значений, обусловленный многократными отражениями. На начальной стадии процесса наблюдаются существенные превышения выходных величин по отношению к их установившимся значениям. Входное напряжение линии $v(1)$ на рис. 8.20, а отличается от напряжения источника из-за влияния внутреннего сопротивления $R_S=5$ Ом.

Если линия в условии задачи была бы задана, например, нормализованной длиной 0,3 на частоте 12 МГц, то линию следовало бы описать согласно пп. 8.3.1

TLINE 1 0 2 0 Z0=75 F=12meg NL=0.3

Результаты расчета с использованием данного описания полностью совпадают с полученными ранее значениями.

ПРИМЕР 8.6. Источник G (обведен пунктиром на рис. 8.21) подключается к входу воздушной линии без потерь с помощью ключа S . Напряжение источника $E=20$ В, внутреннее сопротивление $R_{вн}=50$ Ом, внутренняя индуктивность $L_{вн}=1$ мГн. Параллельно входу линии подключен резистор $R_1=100$ Ом. Линия характеризуется волновым сопротивлением 100 Ом. Рассчитать падающую волну тока на входе и построить ее распределение вдоль линии в момент времени $t_1=30$ мкс.

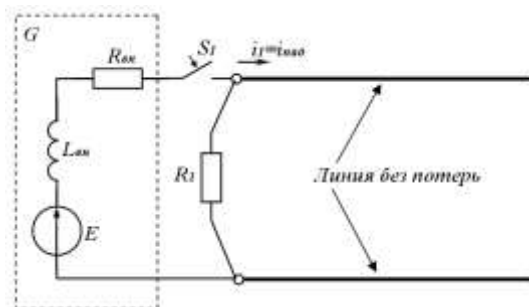


Рис. 8.21. Схема подключения источника G к линии без потерь

Схема в Spice-обозначениях показана на рис. 8.22. В качестве модели ключа используется ключ S1, управляемый напряжением (пп. 7.7.2.1) с именем модели SWITCH1. Безгистерезисный ключ имеет нулевое пороговое напряжение и сопротивление в замкнутом состоянии 1 мОм. Ключ управляется скачком напряжения 1 В, генерируемым источником Vstart. Для замыкания цепи к Vstart подключен резистор RL2=1 ГОм. Последовательно с входом присоединен «амперметр» VA для измерения искомой падающей волны тока.

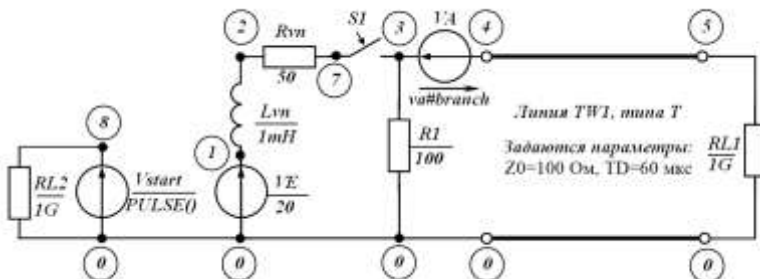


Рис. 8.22. Схема линии без потерь в Spice-обозначениях

Линия TW1 задается описанием типа Т (пп.8.3.1), так как по условию задано волновое сопротивление Z0. Однако задержка распространения TD не оговаривается. Установим ее из следующих соображений: поскольку по условию требуется определить падающую волну, то отражение от конца линии не рассматривается, т.е. TD должно быть больше $t_1=30$ мкс. Зададим TD=60 мкс. Для замыкания выхода линии к нему подключен резистор RL1=1 ГОм. Расчетный интервал установлен директивой tran равным 60 мкс, а максимальный шаг интегрирования 0,1 мкс. Текстовое описание схемы имеет вид

<pre>PRIMER 8_6 (STYLE SPICE3) VE 1 0 20 Lvn 2 1 1m Rvn 2 7 50 ***Switch description begin*** Vstart 8 0 PULSE(0 1 0 0.1u) DC 0 RL2 8 0 1G S1 3 7 8 0 SWITCH1 .MODEL SWITCH1 SW(VT=0 VH=0 RON=1m) ***Switch description end**** R1 3 0 100 RL1 5 0 1G VA 3 4 DC 0 TW1 4 0 5 0 Z0=100 TD=60u .control destroy all save all</pre>	<pre>tran 0.1u 60u set color2=black plot va#branch xlabel time +ylabel i1 + title "The input current" let t1=30u *Transfer time into distance let time=(t1-time)*c plot va#branch xlimit 0 20000 + xlabel x_km ylabel i1 + title "The current +distribution along +the line at time t1=30uS" display .endc .end</pre>
---	---

Результаты расчетов приведены на рис. 8.23 а, б.

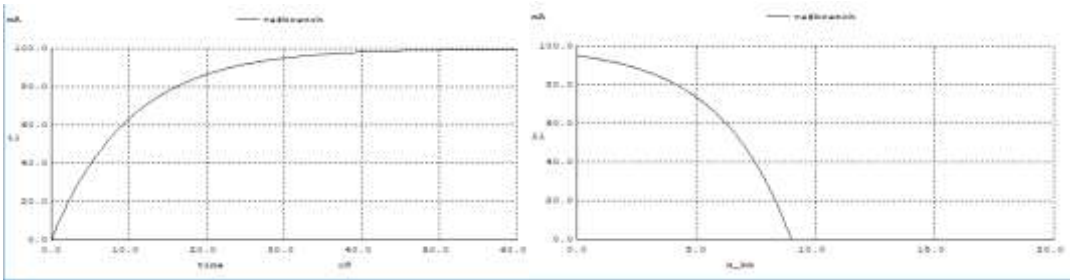


Рис. 8.23. Падающая волна тока:

а — временная зависимость на входе; б — распределение вдоль линии в момент $t_1=30$ мкс

Падающая волна тока на входе (рис. 8.23, а) совпадает с точным решением данной задачи [9, стр. 159] $i_{nao} = 0,1(1 - e^{-100000t})$ А.

Для определения распределения падающей волны в момент времени $t_1=30$ мкс заметим, что волна пройдет расстояние $x_1=c \cdot t_1=9$ км, где c — скорость света. Координата падающей волны x' в данном случае принимает вид $x' = x_1 - ct = (t_1 - t)c$. Данному выражению в Spice-описании соответствует оператор

let time=(t1-time)*c,

который присваивает элементам вектора time соответствующие значения координаты x' . Вектор time автоматически генерируется директивой tran. Команда display выводит для каждого вектора его имя и число элементов. В рассматриваемом примере вектор time содержит 612 элементов. Такой же размер имеет искомый вектор тока va#branch.

На рис. 8.23, б показано искомое распределение падающей волны тока в момент времени $t_1=30$ мкс. Видно, что волна переместилась вдоль линии на 9 км.

ПРИМЕР 8.7. Падающая волна с прямоугольным фронтом $u_{\text{пад}} = U_0=100$ В движется по воздушной линии с $Z_{B1}=400$ Ом. В месте соединения линии с кабелем ($Z_{B2}=50$ Ом; $\varepsilon_r = 4$; $\mu_r = 1$) включен RC-четыреполюсник, состоящий из конденсатора $C=50$ мкФ и резистора $R=50$ Ом (рис. 8.24). Найти волны напряжения и тока в линиях (u_1, i_1, u_2, i_2). Построить диаграммы распределения напряжения и тока вдоль обеих линий для момента времени t_1 , когда отраженная от входа четырехполюсника волна пройдет расстояние $x_1=4500$ км по направлению к началу воздушной линии.

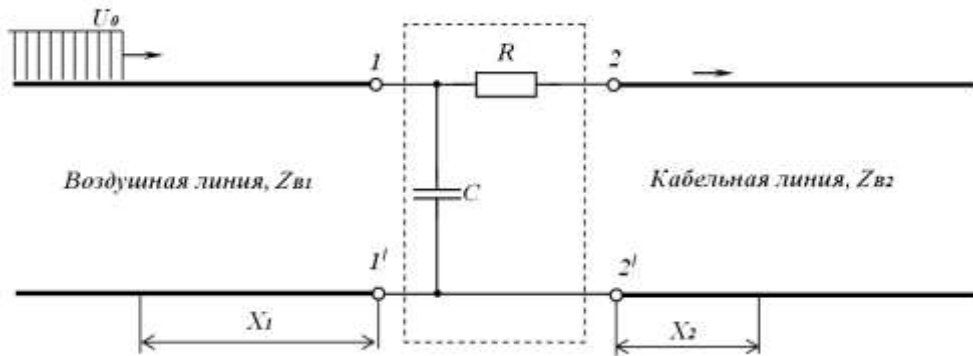


Рис. 8.24. Схема соединения воздушной и кабельной линий через RC-четыреполюсник

При движении падающей волны по воздушной линии без потерь форма волны не изменяется и остается прямоугольной. Когда волна достигнет конца линии (т. е. четырехполюсника), возникнут две новые волны: отраженная в воздушной линии и проходящая в кабельной линии. По условию задачи отраженная волна не достигает начала воздушной линии, а проходящая — конца кабельной линии. Следовательно, будут отсутствовать отражения от начала воздушной линии и от конца кабельной линии. Поэтому реально существующие в воздушной линии волны напряжения (u_1) и тока (i_1) представляют собой суммы падающей и отраженной от конца волн. Реально существующие в кабельной линии волны u_2, i_2 содержат только падающую составляющую.

В воздушной линии фазовая скорость распространения электромагнитных волн близка к скорости света. Поэтому $t_1 = x_1/c = 0,015$ с = 15 мс. В кабельной линии фазовая скорость в два раза меньше, так как по условию $\varepsilon_r = 4, \mu_r = 1$:

$$v_{\phi 2} = c(\varepsilon_r \mu_r)^{-0,5} = 0,5c.$$

Следовательно, за время $t_1 = 15$ мс проходящая волна переместится по кабельной линии на расстояние $x_2 = t_1 v_{\phi 2} = 2250$ км. При составлении модели необходимо задать значения задержек для линий. Очевидно, что задержки должны быть больше t_1 ,

чтобы не возникали отражения от начала воздушной линии и от конца кабельной линии. Примем задержки равными по 20 мс для обеих линий (т. е. $TD=20\text{ мс}$). Схема в Spice-обозначениях показана на рис. 8.25.

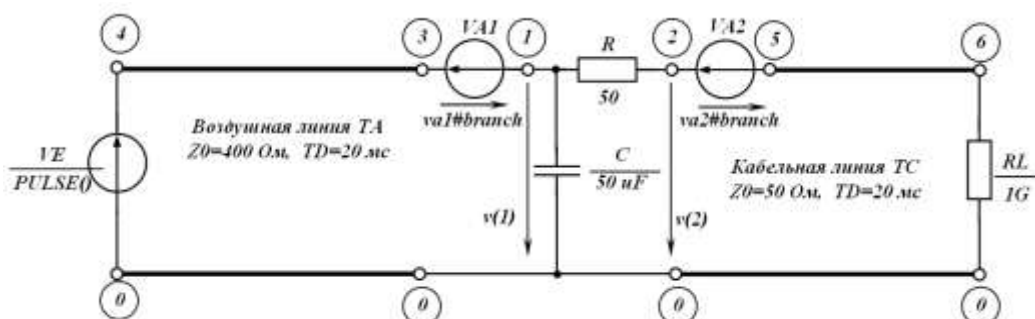


Рис. 8.25. Схема в Spice-обозначениях

Линии TA и TC заданы описаниями типа T (пп.8.3.1). Для замыкания выхода линии к нему подключен резистор $RL=1\text{ ГОм}$. Расчетный интервал установлен директивой tran равным 40 мс, а максимальный шаг интегрирования 0,1 мс. Текстовое описание схемы имеет вид

```
PRIMER 8_7 (STYLE SPICE3)
VE 4 0 PULSE(0 100 0 10u) DC 0
TA 4 0 3 0 Z0=400 TD=20m
TC 5 0 6 0 Z0=50 TD=20m
VA1 3 1 DC 0
VA2 2 5 DC 0
R 1 2 50
C 1 0 50u
RL 6 0 1G
.control
destroy all
save all
tran 0.1ms 40mS
set color2=black
*** v1
plot v(1) xlabel time
+ylabel v1 title "Input v1"
let t1=15mS
let td=20mS
let x1=time
settype notype x1
* x1, km (/1000-air)
let x1=(x1-t1)*c/1000
plot v(1) vs x1 xlimit 1500 6000
+xlabel x1_1000km ylabel v1
+title "v1 distribution along
+air line at time t1=15mS"
```

```
*** i1
plot va1#branch vs x1
+xlabel x1_1000km ylabel i1
+title "i1 distribution along
+air line at time t1=15mS"
*** v2
plot v(2) xlabel time
+ylabel v1 title "Output v2"
let x2=time
settype notype x2
* x2, km (/2000-cable, er=4)
* 15mS+20mS(TD of air line)=35mS
let x2=(t1+td-x2)*c/2000
plot v(2) vs x2 xlimit 0 2250
+xlabel x2_1000km ylabel v2
+title "v2 distribution along
+cable line at time t1=15mS"
*** i2
plot va2#branch vs x2
+xlabel x2_1000km ylabel i2
+title "i2 distribution along
+cable line at time t1=15mS"
.endc
.end
```


Для построения распределений волн вдоль линий вводятся новые векторы x_1 и x_2 с помощью операторов присвоения

```
let x1=time
settype notype x1
* x1, km (/1000-air)
let x1=(x1-t1)*c/1000
.....
.....
let x2=time
settype notype x2
* x2, km (/2000-cable, er=4)
* 15mS+20mS(TD of air line)=35mS
let x2=(t1+td-x2)*c/2000
```

Изначально векторам x_1 и x_2 присваивается вектор `time`. Затем оператором `settype` устанавливается тип `notype`. Это необходимо, чтобы в обозначении единиц измерения координат x_1 и x_2 не указывались «секунды». Единицы измерения типа `notype` обозначаются в Spice как `Units`. К сожалению, в Spice тип «длина» отсутствует. Далее выполняются преобразования координат по формулам

$$x_1 = (x_1 - t_1)c/1000; \quad x_2 = (t_1 + TD - x_2)c/2000.$$

При вычислении x_2 к t_1 добавляется задержка `TD`, что дает возможность отсчитывать координату x_2 от нуля. В рассматриваемом случае под `Units` следует понимать километры (деление на 1000). Деление на 2000 обусловлено тем, что скорость распространения волн в кабельной линии в 2 раза меньше скорости света.

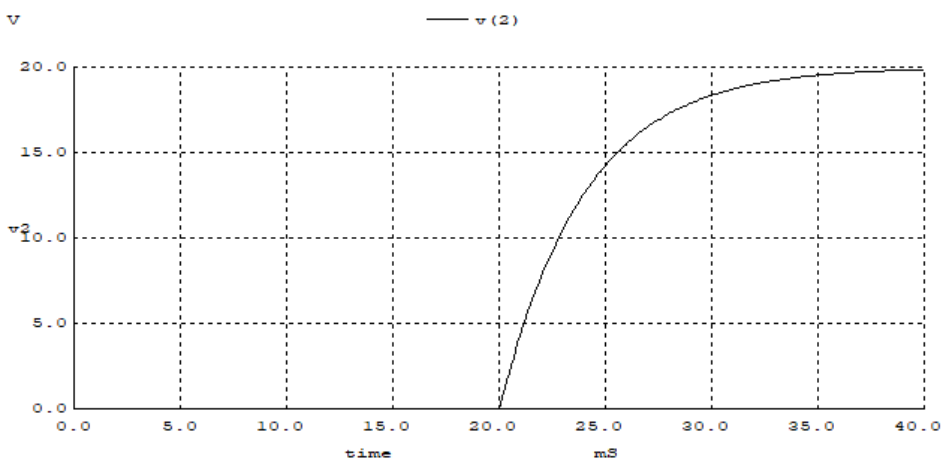
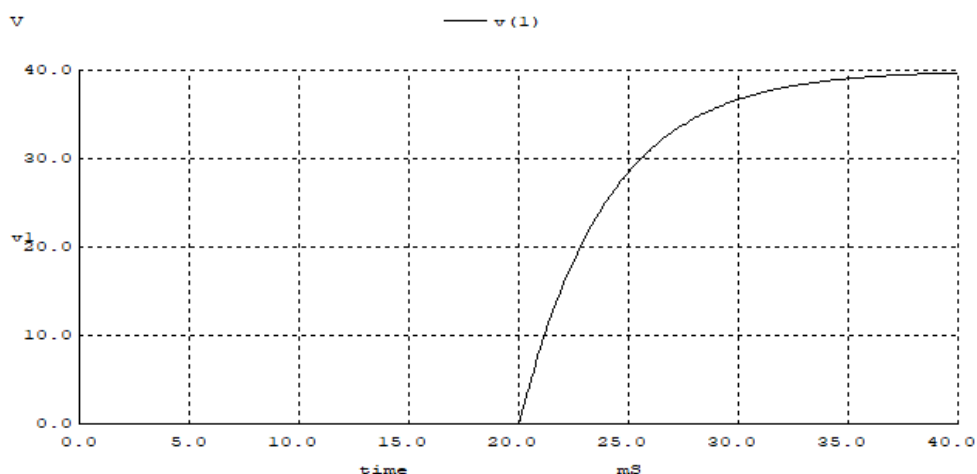
Определим диапазон значений координаты x_1 для вывода графиков v_1 и i_1 ($x_{1\min}$ и $x_{1\max}$). Отражение происходит от конца воздушной линии, длина которой при выбранной ранее задержке `TD=20` мс составляет `TD*c=6000` км. Отраженная волна движется от конца к началу, и за время $t_1=15$ мс проходит 4500 км. Следовательно, $x_{1\min} = 6000 - 4500 = 1500$ км, $x_{1\max} = 6000$ км. Эти пределы заданы в операторах вывода волн напряжения (v_1) и тока (i_1) в воздушной линии:

```
plot v(1) vs x1 xlimit 1500 6000 ....
plot va1#branch vs x1 xlimit 1500 6000
```

Проходящая волна движется от начала кабельной линии к ее концу со скоростью в 2 раза меньшей скорости света. Следовательно, $x_{2\min} = 0$, $x_{2\max} = 2250$ км. Эти пределы заданы в операторах вывода волн напряжения (v_2) и тока (i_2) в кабельной линии:

```
plot v(2) vs x2 xlimit 0 2250 ...
plot va2#branch vs x2 xlimit 0 2250 ...
```

На рис. 8.26 приведены графики переходных процессов напряжений на входе и выходе четырехполюсника.



а)

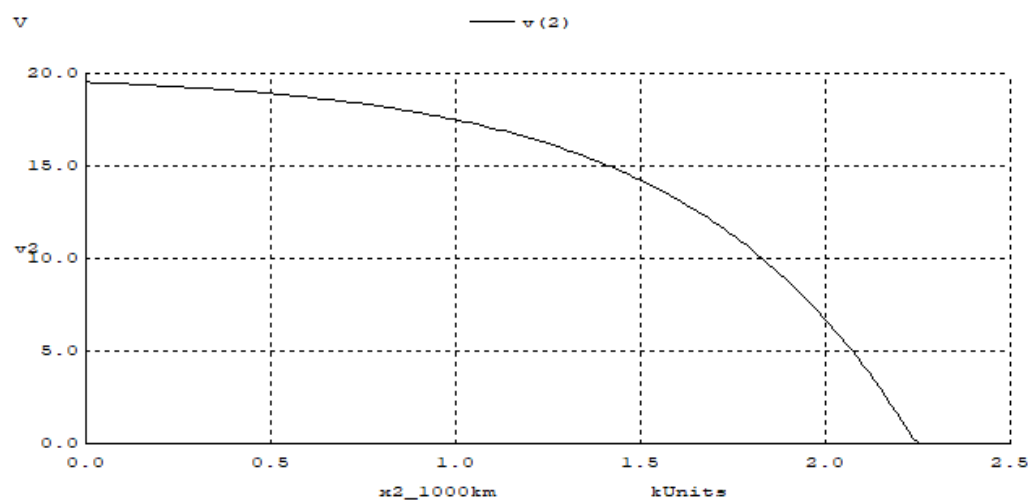
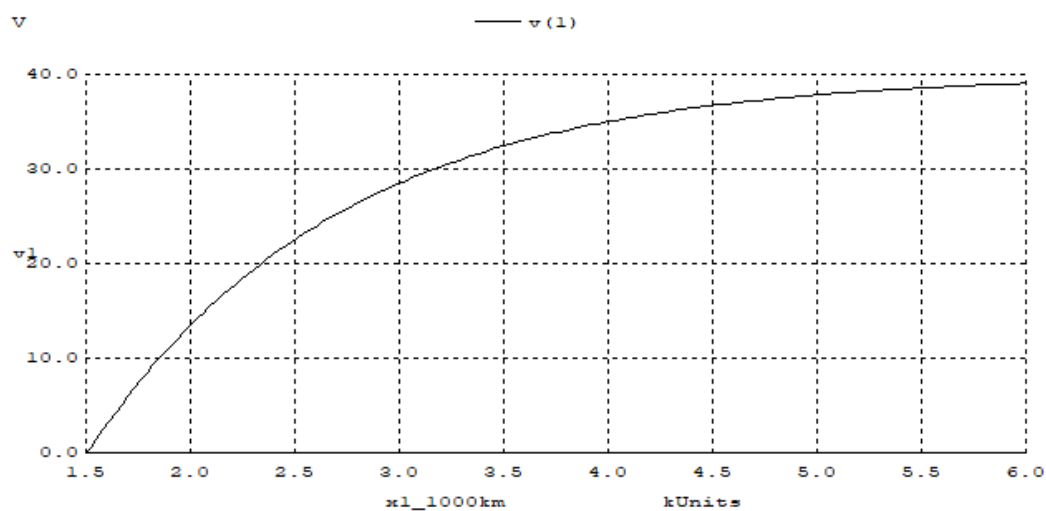
б)

Рис. 8.26. Переходные процессы напряжений на входе (а) и выходе четырехполюсника (б)

Напомним, что вход четырехполюсника соответствует концу воздушной линии, а выход — началу кабельной линии. Из рис. 8.26, а следует, что переходный процесс входного напряжения v_1 начинается с задержкой $TD = 20$ мс и экспоненциально нарастает, стремясь к установившемуся значению 40 В. Выходное напряжение изменяется подобным образом, но стремится к установившемуся значению 20 В. Полученные результаты соответствуют аналитическому решению, приведенному в [9, стр. 163].

$$v_1 = 40 - 40e^{-250(t-TD)} \text{ В; } v_2 = 20 - 20e^{-250(t-TD)} \text{ В, при } t \geq TD.$$

На рис. 8.27 приведены распределения волн напряжений в диапазонах координат, определенных выше. Видно, что отраженная волна за время $t_1 = 15$ мс достигла точки $x_1 = 1500$ км от начала воздушной линии (рис. 8.27, а), а проходящая волна за то же время переместилась на 2250 км.

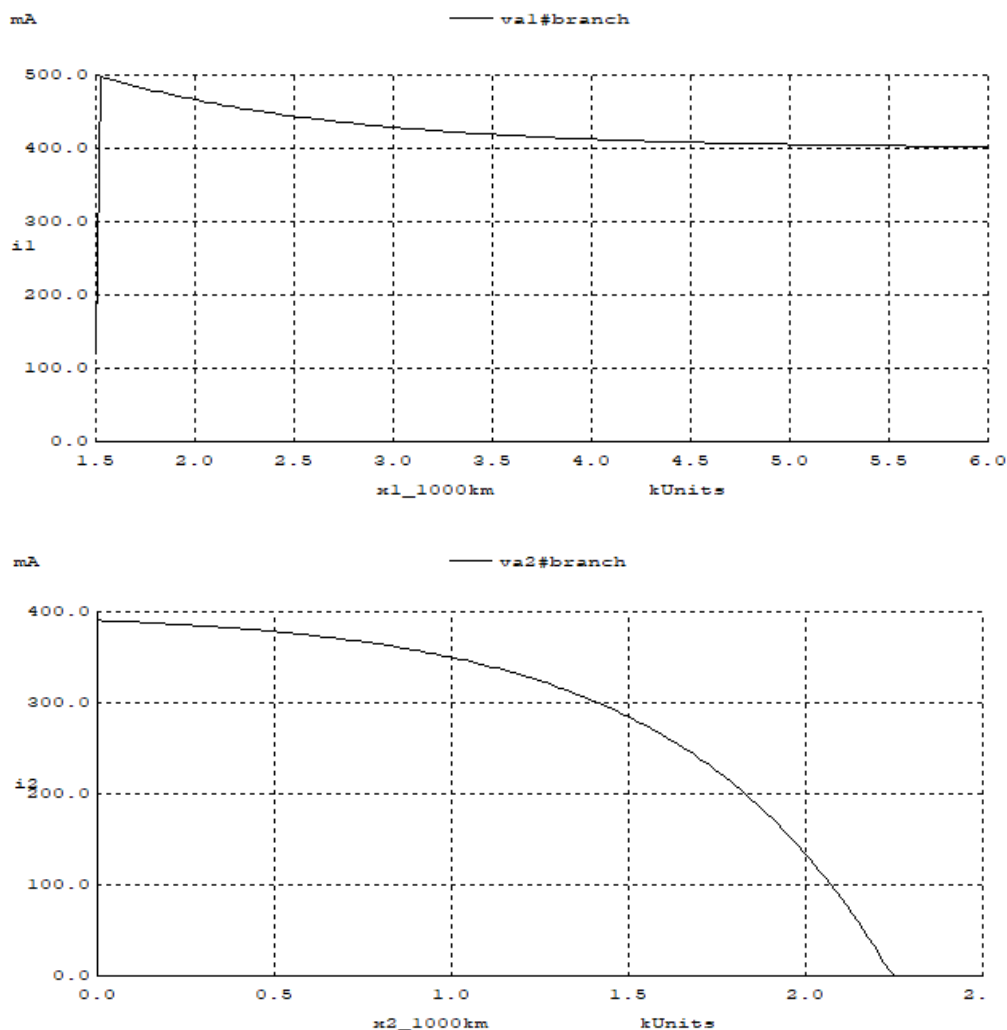


а)

б)

Рис. 8.27. Распределение волн напряжений v_1 (а) и v_2 (б) вдоль линии

На рис. 8.28 приведены распределения волн токов в диапазонах координат, определенных выше.



а) б)
Рис. 8.28. Распределение волн токов i_1 (а) и i_2 (б) вдоль линии

Данные результаты также полностью соответствуют [9, стр. 163].

8.4.2.2. Линия с потерями

ПРИМЕР 8.8. Линия, параметры которой заданы выше в примере 8.2, подключается к идеальному источнику постоянного напряжения $U_S=100$ В. К концу линии подключен конденсатор $C_H=492,7$ нФ. Рассчитать переходные процессы тока и напряжения в начале, середине и конце линии. Оценить влияние поперечные потерь $G_0=0,72$ мкСм/км. Предусмотреть возможность определения переходных процессов в точках линии, равномерно распределенных с шагом $1/10$ длины линии.

По аналогии с примером 8.3 линию можно представить каскадным соединением 10 отрезков (см. рис. 8.9). Каждый отрезок описывается как подсхема (рис. 8.10) и в результате общая Spice-схема имеет вид рис. 8.11. По условию нагрузка чисто емкостная, поэтому R_H полагаем равным нулю. Текстовое описание схемы, составленное на основе примера 8.3, приведено ниже.

<pre> PRIMER 8_8 (STYLE SPICE3) *** PER. PROC. V LINII S POTER*** * .SUBCKT DLINE IN IN_G OUT OUT_G ***** Otrezok linii 8,1 km *** OTR IN IN_G OUT OUT_G LOSSYLINE RP OUT OUT_G 10G *RP OUT OUT_G 171.5k .MODEL LOSSYLINE LTRA(R=19.2 G=0 +L=10.8m C=7.4n LEN=8.1) .ENDS ***** * VUs 12 0 PULSE(0 100 0 1u) DC 0 VA1 12 1 DC 0 VA2 11 13 DC 0 VA6 6 6s DC 0 Cn 13 14 30n Rn 14 0 1u *** LINIYA IS 10 OTREZKOV *** X1 1 0 2 0 DLINE X2 2 0 3 0 DLINE X3 3 0 4 0 DLINE X4 4 0 5 0 DLINE X5 5 0 6 0 DLINE X6 6s 0 7 0 DLINE X7 7 0 8 0 DLINE X8 8 0 9 0 DLINE X9 9 0 10 0 DLINE X10 10 0 11 0 DLINE .control </pre>	<pre> destroy all save all tran 20us 6ms set color2=black * plot v(1) ylimit 0 120 +xlabel t ylabel Us + title "INPUT VOLTAGE" * plot va1#branch +xlabel t ylabel i1 + title "INPUT CURRENT" * plot v(6) +xlabel t ylabel v(6) + title "CENTRE VOLTAGE" * plot va6#branch +xlabel t ylabel i6 + title "CENTRE CURRENT" * plot v(11) +xlabel t ylabel v(11) + title "OUTPUT VOLTAGE" * plot va2#branch +xlabel t ylabel i2 + title "OUTPUT CURRENT" .endc .end </pre>
--	--

В отличие от примера 8.3 сопротивление резистора RP, учитывающего поперечные потери, задано очень большим значением 10 ГОм, т. е. поперечные потери не учитываются. Этому соответствует строка

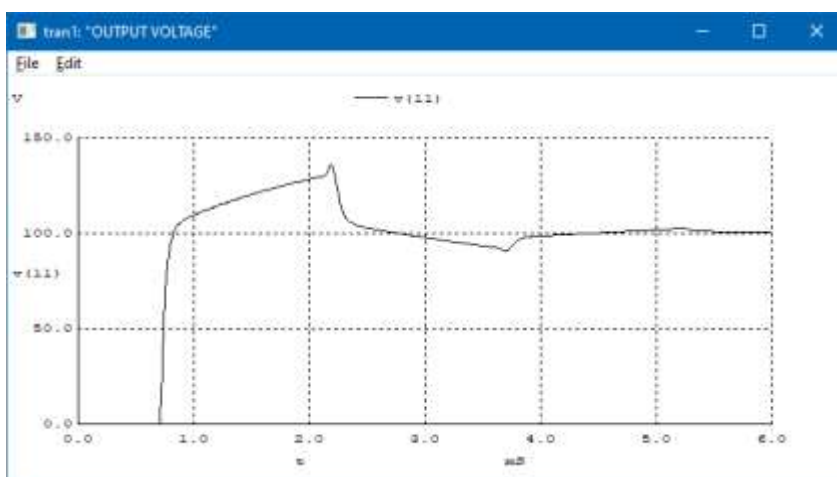
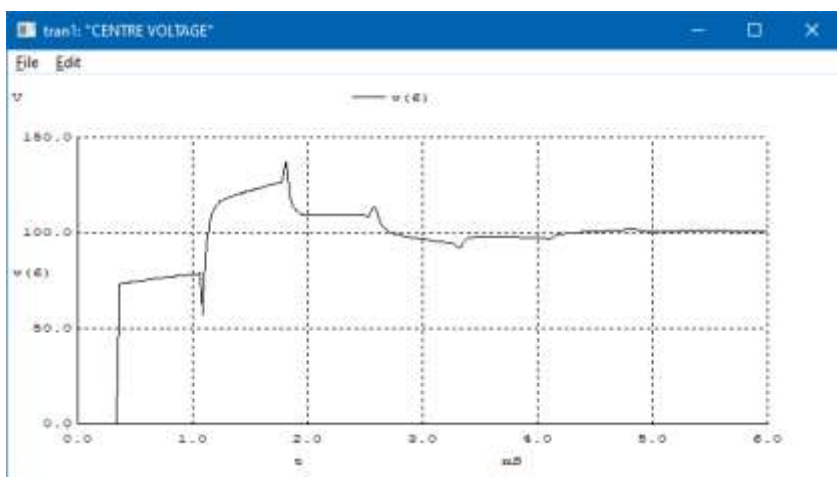
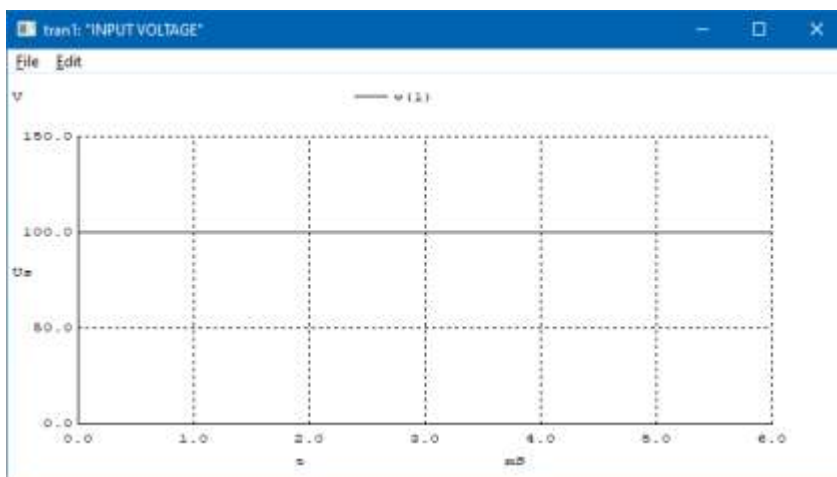
```
RP OUT OUT_G 10G
```

Для учета поперечных потерь добавлена строка, которая оформлена в виде комментария (первый символ-«звездочка»)

```
*RP OUT OUT_G 171.5k
```

Для учета поперечных потерь следует переместить «звездочку» в начало строки, описывающий резистор 10 ГОм. Между пятым (X5) и шестым (X6) отрезками включен «амперметр» VA6 для измерения тока в середине линии.

Источник VUs задан в виде скачка напряжения амплитудой 100 В и фронтом 1 мкс. Сопротивление резистора Rn задано близким к нулю значением 1 мКОм. В директиве tran, находящейся в блоке управления, задан расчетный интервал 6 мс с шагом 20 мкс, т. е. расчетных точек будет более трехсот. Результаты расчета напряжений приведены на рис. 8.29

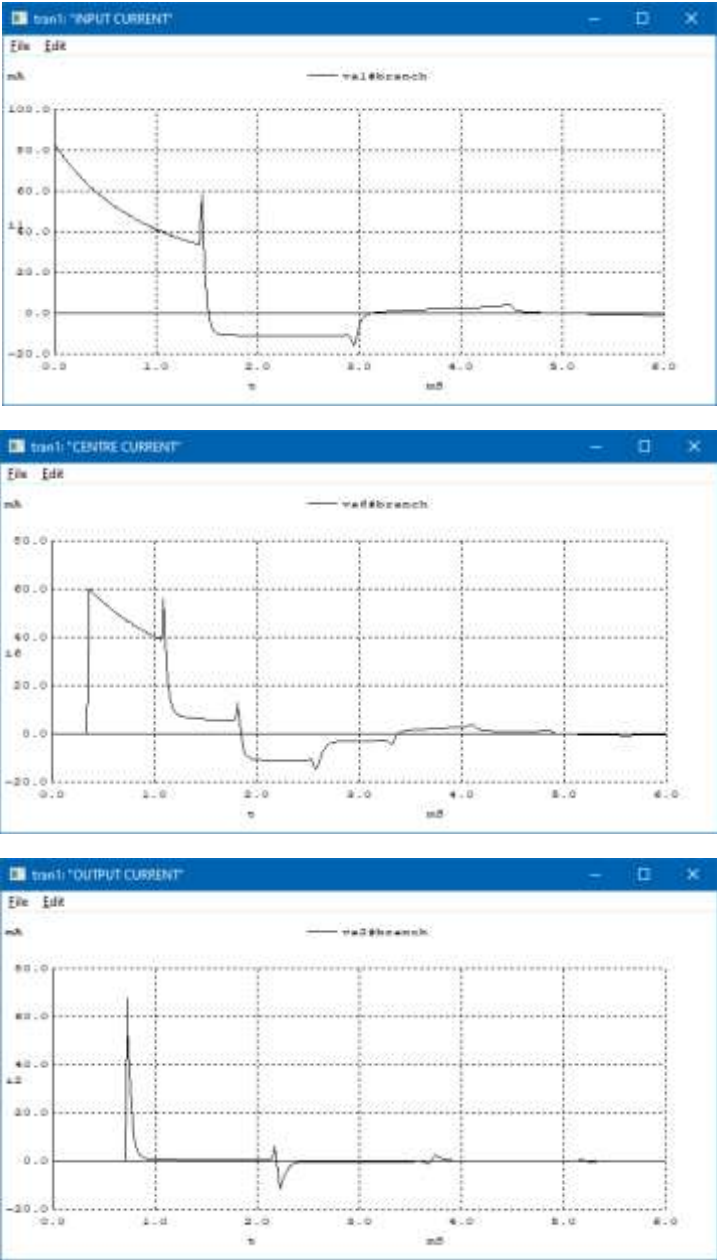


а) б) в)

Рис. 8.29. Переходные процессы напряжений в начале (а), середине (б) и конце (в) линии

Переходные процессы рис. 8.29 а, б демонстрируют сходство: начинаются с запаздыванием, достигают максимума, а затем стабилизируются на уровне ≈ 100 В. Форма кривых обусловлена многократными отражениями от начала и конца линии, а также затуханием из-за наличия продольных потерь.

На рис. 8.30 представлены переходные процессы токов в начале, середине и конце линии (т. е. в емкостной нагрузке).



а) б) в)

Рис. 8.30. Переходные процессы токов в начале (а), середине (б) и конце (в) линии

В начале линии (рис. 8.30, а) и в ее середине (рис. 8.30, б) токи сначала быстро нарастают, а затем уменьшаются до нуля с колебаниями. Ток в нагрузке (рис. 8.30, в) имеет вид затухающих коротких «игольчатых» импульсов, характерных для процесса зарядки конденсатора.

Графики напряжений в других узлах линии можно получить в интерактивном режиме, как обычно, с помощью команды plot. Например, для узла 8 вводится команда plot v(8). Для получения диаграмм токов включать «амперметры» не обязательно. Команда display выводит имена всех векторов, сохраненных по умолчанию. Среди них есть имена векторов входных и выходных токов подсхем отрезков. Например, выходной ток отрезка №8 имеет вид o:x8:otr#i2 и соответствующая команда имеет вид plot o:x8:otr#i2. Следует также помнить, что условно-положительные направления токов подсхем предполагаются втекающими.

Учет поперечных потерь (RP OUT OUT_G 171.5k) показывает их слабое влияние на переходный процесс: напряжение на нагрузке стремится к 96 В (вместо 100 В), а ток выходного отрезка вместо нуля стремится к 0,5 мА (вместо нуля).

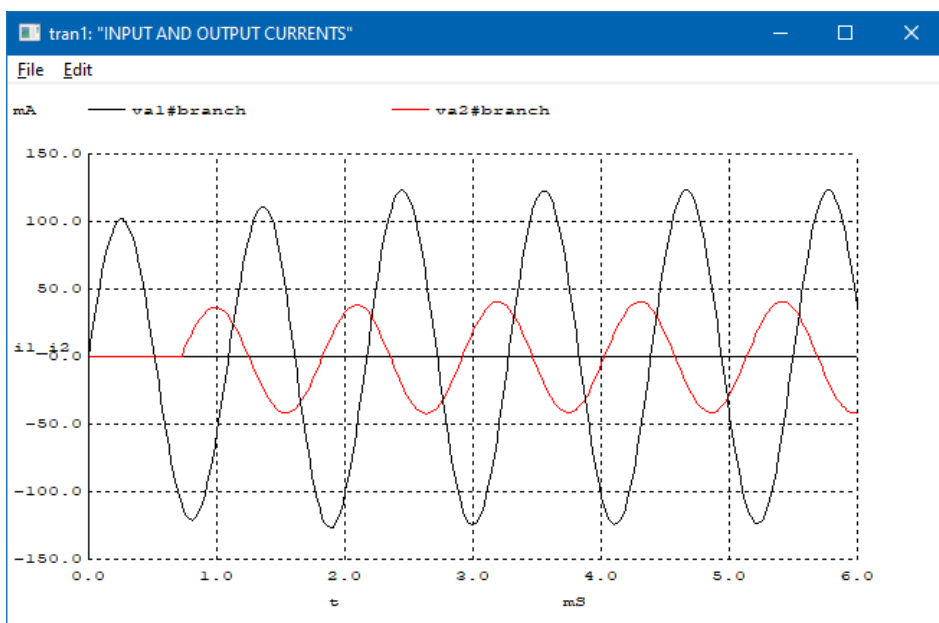
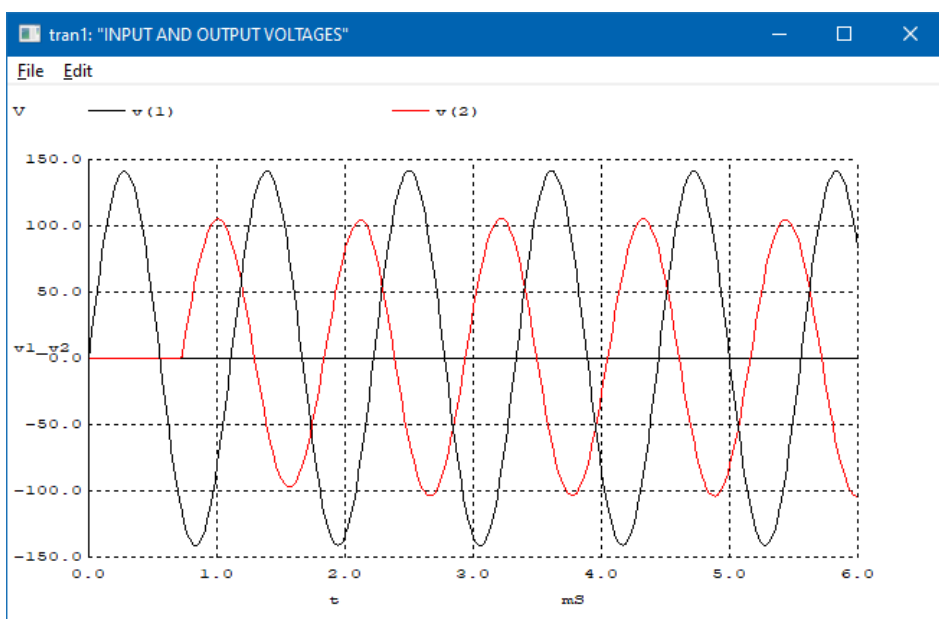
ПРИМЕР 8.9. Рассчитать переходные процессы токов и напряжений на входе и выходе линии из примера 8.2. Начальную фазу входного напряжения принять равной нулю.

Схема приведена на рис. 8.7, расчетная схема — на рис. 8.8. В данном случае источник VUs следует описать как сигнальный синусоидальный (см п.7.4.2) предложением

```
VUs 5 0 SIN(0 141.4 900 0 0)
```

Здесь 141,4 — это амплитуда напряжения, 900 — частота в герцах, нули — задержка и коэффициент затухания. Полное текстовое описание приведено ниже. Для сравнения диаграммы переходных процессов напряжений и токов выводятся в отдельные системы координат, показанные на рис. 31.

PRIMER 8.9 (STYLE SPICE3) VUs 5 0 SIN(0 141.4 900 0 0) VA1 5 1 DC 0 VA2 2 4 DC 0 Rn 4 3 2515 Cn 3 0 492.7n O1 1 0 2 0 LOSSYLINE .MODEL LOSSYLINE LTRA(R=19.2 G=0 +L=10.8m C=7.4n LEN=81) .control destroy all tran 20us 6m	set color2=black set color3=lt_red plot v(1) v(2) +xlabel t ylabel v1_v2 + title "INPUT AND OUTPUT VOLTAGES" * plot va1#branch va2#branch +xlabel t ylabel i1_i2 + title "INPUT AND OUTPUT CURRENTS" .endc .end
---	---



а)
б)

Рис. 8.31. Переходные процессы напряжений (а) и токов (б) линии

Из рис. 8.31, а следует, что напряжение на выходе появляется с задержкой 725 мкс и практически сразу достигает установившегося амплитудного значения 105 В. Это близко к результату примера 8.2 (действующее значение 73,82 В). Амплитуда входного тока увеличивается в течение двух первых периодов и достигает установившегося значения 123 мА. Ток нагрузки запаздывает и достигает установившегося

амплитудного значения 41 мА. Полученные значения токов и напряжений, а также их фазовые сдвиги в установившемся режиме соответствуют результатам примера 8.2, что подтверждает правильность расчетов.

ПРИМЕР 8.10. Определить переходный процесс входного тока, возникающий при подключении бесконечной линии к источнику постоянного напряжения $U=100$ В. Погонные параметры линии: $R_0=19,2$ Ом/км, $G_0=0$, $L_0=0$, $C_0=7,4$ нФ/км.

Отметим, что в данной задаче R_0 и L_0 равны нулю, т. е. фактически задана RC -линия. Как отмечено в подразделе 8.3, этот случай можно рассматривать как частный для линии с потерями. Схема представлена на рис. 8.32.

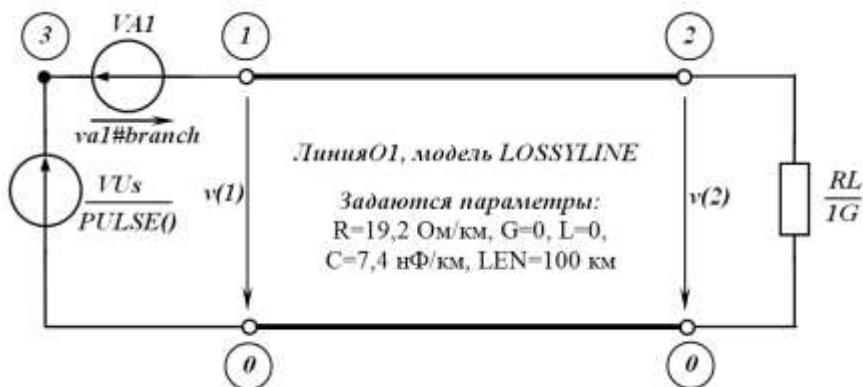


Рис. 8.32. Схема для расчета переходного процесса в «бесконечной» RC -линии

Поскольку модель линии с потерями требует указания ее длины, выбрано значение $LEN=100$ км. По условию задачи линия бесконечна, поэтому ее длина должна быть достаточной, чтобы на расчетном интервале времени не произошло отражения от конца линии. При $LEN=100$ км отражение произойдет примерно через 330 мкс. Следовательно, расчетный интервал, задаваемый директивой `tran`, должен быть меньше 330 мкс. Выберем его значение равным 25 мкс. Предположим также, что на конце линии имеет место холостой ход ($RL=1$ ГОм). Текстовое описание схемы рис. 8.32 имеет вид

```
PRIMER 8_10 (STYLE SPICE3)
VU 3 0 PULSE(0 100 0 0.05u) DC 0
VA1 3 1 DC 0
RL 2 0 1G
O1 1 0 2 0 LOSSYLINE
.MODEL LOSSYLINE LTRA(R=19.2 G=0
+L=0 C=7.4n LEN=100)
.control
destroy all
save all
tran 0.01u 25u
plot v(1)
plot va1#branch
.endc
.end
```

На рис. 8.33 приведен искомый переходный процесс входного тока линии.

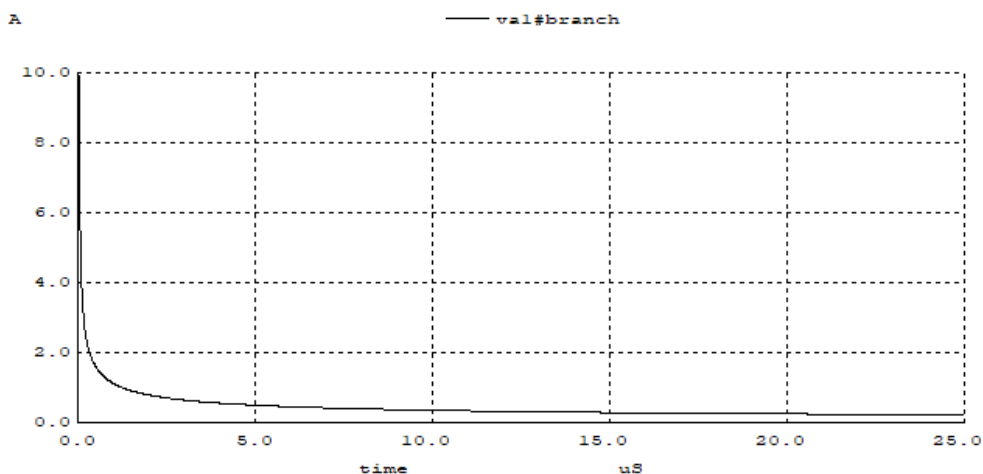


Рис. 8.33. Переходный процесс входного тока линии

Аналитическое решение данной задачи, полученное операторным методом, имеет вид [1, с. 406]

$$i(x, t) = U \sqrt{\frac{C_0}{\pi R_0}} \frac{e^{-z^2}}{\sqrt{t}},$$

$$\text{где } z = \frac{x \sqrt{R_0 C_0}}{2\sqrt{t}}; x — \text{расстояние от начала линии.}$$

В рассматриваемом примере $x=0$. Тогда при $t>0$ для входного тока получаем выражение $i_1(t) = \frac{1,108 \times 10^{-3}}{\sqrt{t}}$ А,

которое достаточно близко к результатам, приведенным на рис. 8.33.

Выводы

1. Обычно термин «длинная линия» используется на практике, когда длина линии больше 5% от длины волны. На частоте 50 Гц эта величина (5%) составляет 300 км. Если линия предназначена для передачи диапазона частот, то под длиной волны следует понимать ее значение, соответствующие *наибольшей* частоте диапазона.

2. Длинные линии характеризуются непрерывно распределенными по длине параметрами. Если распределение равномерно, то линия называется однородной и характеризуется величинами, отнесенными к единице длины. Эти величины называются *погонными* или *первичными* параметрами и подразделяются на *продольные* (R_0 - сопротивление, L_0 - индуктивность) и *поперечные* (G_0 - проводимость, C_0 - емкость).

3. Токи и напряжения в длинной линии являются функциями двух переменных: времени и расстояния. Эти функции определяются решением телеграфных уравнений (8.3), (8.4), которое в общем случае имеет весьма сложный вид и состоит из затухающих бегущих волн. Они распространяются по линии, претерпевая отражения, от начала к концу и в противоположном направлении. Если линия состоит из нескольких нагруженных отрезков, то отражения будут происходить в местах их соединения (стыках). Наложение этих волн может создавать достаточно сложные результирующие

формы. Как и в цепях с сосредоточенными параметрами, при коммутации (т. е. включении, отключении, переключении) источника или нагрузки в длинных линиях возникают переходные процессы. Их причиной могут также являться грозовые разряды.

4. Практически важным частным случаем работы длинных линий является установившийся гармонический режим. Линии электропередач переменного тока работают на фиксированной частоте. В линиях автоматики, телемеханики и связи передача сигналов реализуется с помощью несущих частот. Так же, как и в цепях с сосредоточенными параметрами, значительный интерес представляют частотные характеристики. В данном случае телеграфные уравнения решаются символическим методом (8.8), (8.9)

5. В SPICE3 поддерживаются описания линий трех типов:

- линия без потерь (TXXXXXXX) — см. п.8.3.1;
- линия с потерями (OXXXXXXX) — см. п.8.3.2;
- *RC*-линия на базе цепной схемы из *RC*-звеньев (UXXXXXXX) — может быть задано как частный случай линии с потерями, поэтому описание UXXXXXXX не приводится.

6. Для расчета распределения токов и напряжений вдоль линии целесообразно представить её в виде каскадного соединения отрезков. В местах соединения отрезков образуются узлы, в которых можно определить искомые токи и напряжения. Если все отрезки имеют одинаковую длину, то рационально описать отрезок в виде подсхемы (.SUBCKT). Это особенно эффективно для линий с потерями, т.к. кроме описания собственно самого отрезка, надо задать отдельным предложением его модель. Кроме этого, в подсхему можно включить дополнительные элементы, например, резистор для учета поперечных потерь (см. примеры 8.3, 8.8).

7. При расчете переходных процессов можно использовать все доступные функции сигнальных источников (см. подраздел 7.4 и примеры 8.1–8.5, 8.7–8.10), ключей (см. подраздел 7.7 и пример 8.6). Если установившийся процесс в длинной линии имеет периодический несинусоидальный, то можно определить его спектр с помощью директивы .FOUR или команды SPEC (см. подраздел 7.6).

Загрузка и установка программы WinSpice3

Программа загружается с сайта разработчика <http://winspice.com/> после регистрации. Необходимо ввести свое имя и адрес электронной почты (дважды), как показано на рис. П1.

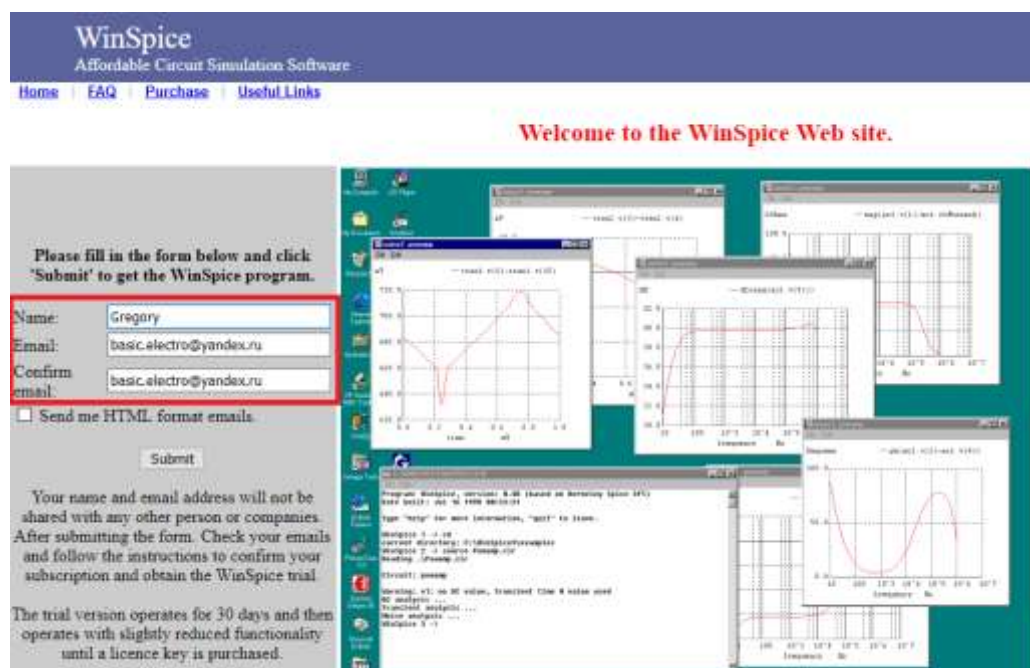


Рис. П1. Заполнение регистрационных данных

После нажатия на кнопку **Submit** открывается страница с благодарностью за подписку на рассылку новостей. Также сообщается о письме, направленном по адресу, указанному при регистрации. В письме есть ссылка, щелчок по которой подтверждает реальность почтового адреса и согласие на получение новостей по теме использования WinSpice3. После этого приходит *второе письмо* со ссылкой, щелчок на которой приводит к появлению окна с вопросом о сохранении файла. Нажатие кнопки **«Сохранить файл»** приводит к загрузке на компьютер файла **WinSpice1.06.00.exe** размером примерно 7 Мб. Файл будет находиться в папке для загрузок, указанной в настройках используемого браузера.

Можно также загрузить данный файл с сайта **Softpedia** по ссылке <https://www.softpedia.com/get/Science-CAD/WinSpice.shtml>

Для установки программы выполняется двойной щелчок по загруженному файлу, что приводит в **Windows 10** к появлению окна контроля учетных записей с вопросом «Разрешить этому приложению от неизвестного издателя вносить изменения на вашем устройстве?». Следует нажать кнопку **«Да»**, после чего появляется окно рис. П2, где необходимо нажать кнопку **Setup**.

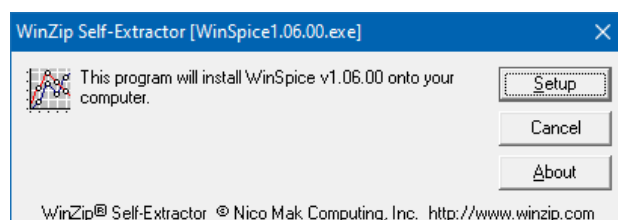


Рис. П2. Начальное окно установки

В следующем окне нажимаем кнопку **Next**, что вызывает появление окна лицензионного соглашения³⁰, показанного на рис. П3.

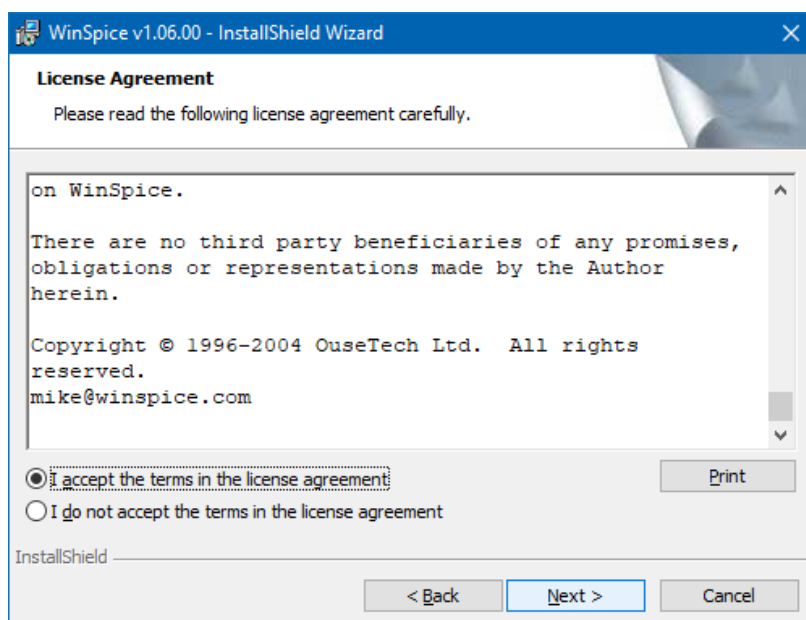


Рис. П3. Окно лицензионного соглашения

Необходимо ознакомиться с соглашением и, в случае его принятия, установить переключатель в положение «**I accept the terms in the license agreement**», а затем нажать кнопку **Next**.

В появившемся окне **Destination Folder**, предназначенном для выбора установочной папки, желательно нажать кнопку **Next** для установки по умолчанию в папку **WinSpice**. Папка будет создана автоматически (путь к папке **C:\Program Files (x86)\OuseTech\WinSpice**)³¹.

В следующем окне (рис. П4) следует проверить правильность пути установки и нажать кнопку **Install**.

³⁰ По окончании установки файл лицензионного соглашения **license.txt** будет находиться в папке **C:\Program Files (x86)\OuseTech\WinSpice**

³¹ При желании можно установить программу в любую другую, созданную ранее, папку. Для этого надо воспользоваться кнопкой **Change...**, выбрать желаемую папку и нажать кнопку **Next**.

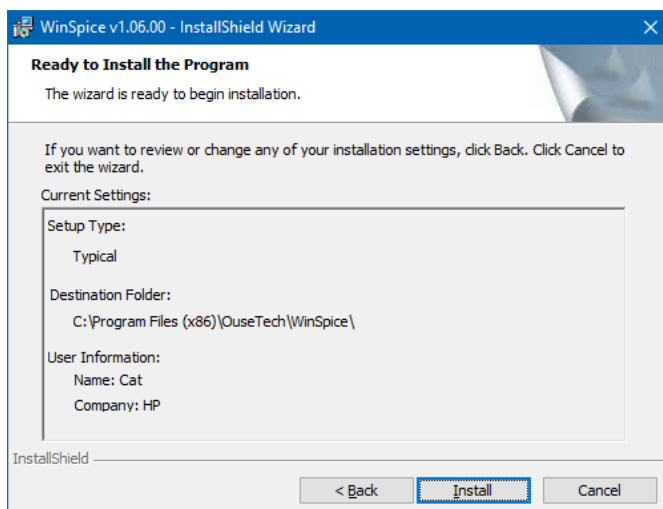


Рис. П4. Окно для запуска процесса инсталляции

По завершении процесса появляется окно с сообщением об успешной инсталляции, после чего надо нажать кнопку **Finish**.

В результате описанного процесса инсталляции на рабочем столе появляется ярлык для запуска программы (рис. П5)

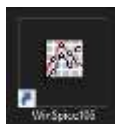


Рис. П5. Ярлык для запуска программы на рабочем столе

В Главном меню/Программы создается папка WinSpice, содержащая ярлыки (см. рис. П6)

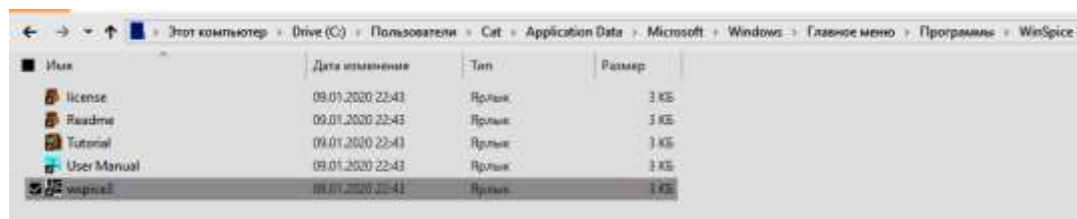


Рис. П6. Ярлыки в папке Главное меню/Программы/WinSpice

На диске C: создается папка WinSpice, полный путь к содержимому которой имеет вид **C:\Program Files (x86)\OuseTech\WinSpice**. Папка содержит следующие вложенные папки и файлы:

- папка **DOC** (руководство пользователя **spiceman.pdf** на английском языке и папка **tutorial** с руководством для начального ознакомления);
- папка **EXAMPLES** (папка со схемными файлами примеров, разработанных автором программы WinSpice3);

- папка **LIB** (модели электронных приборов - в данной книге не используются);
- файл **readme.txt** (текстовый файл с пояснениями автора программы и историей версий);
- файл **help.exe** (исполнимый файл помощи, представляющий собой сокращенный консольный вариант руководства пользователя **spiceman.pdf** - используется программой WinSpice3 при вводе команды **tutorial** в интерактивном режиме).
- файл **license.txt** (текст лицензионного соглашения для оценочной версии);
- файл **reg_license.txt** (текст лицензионного соглашения для зарегистрированной версии);
- файл **wspice3.exe** (исполнимый файл программы WinSpice3).

При необходимости можно перенести программу на флеш-накопитель. Для этого надо скопировать папку **WinSpice** из папки **C:\Program Files (x86)\OuseTech** на флеш-накопитель.

WinSpice3 является условно-бесплатной программой (shareware). Поэтому при ее запуске появляется окно, информирующее о 30-дневном пробном периоде, по истечении которого предлагается приобрести лицензию. После завершения пробного периода при запуске будет возникать окно (рис. П7) с соответствующим напоминанием.

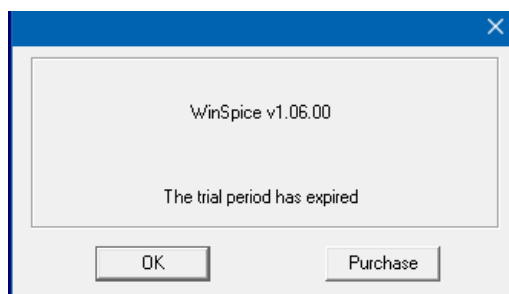


Рис. П7. Сообщение об окончании пробного периода

В этом случае при нажатии кнопки **OK** программа продолжит работу в стандарте Spice3, но без некоторых расширений, которые в данной книге не рассматриваются.

Кроме этого, изредка в окне программы будет появляться напоминание о том, что программа не зарегистрирована и следует приобрести лицензию.

***** Unregistered Program *****

*

*

* To get rid of this message, please purchase a license. *

*

*

***** Go to <http://www.winspice.com> to register *****

Press a key to continue ...

После нажатия любой клавиши можно продолжить работу.

Приобретение лицензии устраняет отмеченные проблемы, возобновляется функционирование расширений, а также существенно пополняется библиотека моделей электронных приборов (папка **LIB**). Для выполнения примеров из данной книги приобретение лицензии не обязательно.

Программа также должна запускаться при двойном щелчке в Проводнике Windows по схемным файлам, имеющим расширение **cir**. Если этого не происходит, то надо

назначить тип **сиг** программе **WinSpice3**. В Windows 10 эта операция выполняется следующим образом:

1) открыть окно «**Параметры Windows**» и в нем щелкнуть по объекту «**Приложения**»;

2) в полосе выбора слева щелкнуть объект «**Приложения по умолчанию**»;

3) в открывшемся окне щелкнуть ссылку внизу страницы «**Выбор стандартных приложений для типов файлов**»;

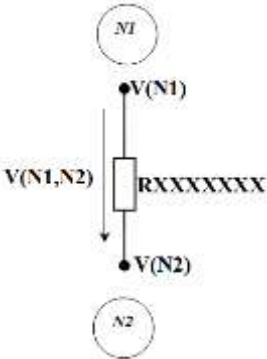
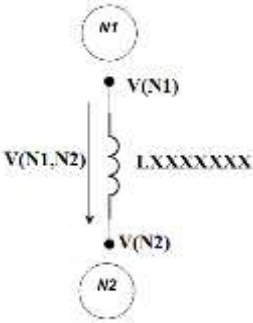
4) на странице «**Выбор стандартных приложений для типов файлов**» отображается список всевозможных типов файлов, для которых можно установить программу по умолчанию, чтобы открывать данный тип файла двойным щелчком. Чтобы установить программу **Wspice3.exe** по умолчанию для открытия файлов типа **сиг**, найдите этот тип файла в списке и нажмите рядом с ним на квадратную кнопку со знаком «плюс» — «**Выбор значения по умолчанию**». В открывшемся окне выберите программу **Wspice3.exe**;

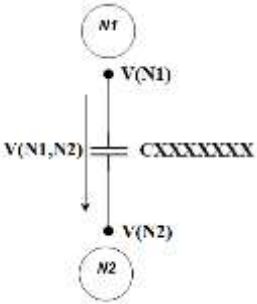
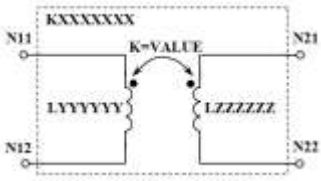
5) если для файлов типа **сиг** уже установлена какая-то программа, то ее нужно заменить на **Wspice3.exe**. Для этого щелкните по названию установленной программы и выберите вместо нее **Wspice3.exe**. Закройте окно.

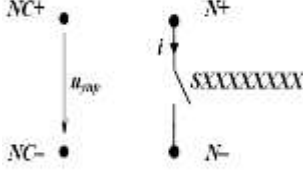
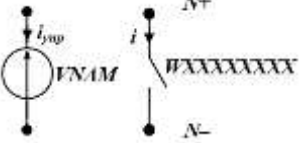
Описания основных элементов
и директив WinSpice3

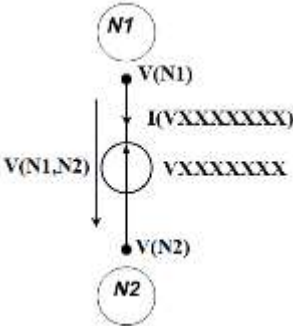
Текстовые описания основных идеализированных элементов линейных электрических цепей

Таблица П2.1

Наименование элемента	Условное графическое изображение	Шаблон и пример текстового описания в формате SPICE3	Описание в данной книге	Номера характерных примеров в данной книге
ПАССИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ				
Резистивный элемент		RXXXXXXX N1 N2 VALUE Пример: R10 27 17 4.62K описывает <i>R</i> -элемент с именем R10 и сопротивлением 4,62 кОм, подключенный между узлами 27 и 17, причем условно-положительные направления тока и напряжения ориентированы от узла 27 к узлу 17	пп.1.1.1 пп.4.3.1	1 3.1 3.8 3.14 3.18 3.20 5.1 7.5
Индуктивный элемент		LXXXXXXX N1 N2 VALUE <IC=INCOND> Пример: LPAR A 5 46.3U IC=30M описывает <i>L</i> -элемент с именем LPAR и индуктивностью 46,3 мкГн, подключенный между узлами A и 5, причем условно-положительные направления тока и напряжения ориентированы от узла A к узлу 5. Начальный ток равен 30 мА и будет учитываться, если предполагается расчет переходных процессов (директива .tran при заданном ключе UIC)	пп.1.1.2 пп.4.3.1	3.1 4.1 4.2 4.3 4.12a 5.1 7.2 7.4

Наименование элемента	Условное графическое изображение	Шаблон и пример текстового описания в формате SPICE3	Описание в данной книге	Номера характерных примеров в данной книге
Емкостной элемент		<p>CXXXXXXX N1 N2 VALUE <IC=INCOND> Пример: CVHOD_15 17 TEST3 4.8U IC=2.5</p> <p>описывает C-элемент с именем CVHOD_15 и емкостью 4,8 мкФ, подключенный между узлами 17 и TEST3, причем условно-положительные направления тока и напряжения ориентированы от узла 17 к узлу TEST3. Начальное напряжение равно 2,5 В и будет учитываться, если предполагается расчет переходных процессов (директива .tran при заданном ключе UIC).</p>	<p>пп.1.1.3 пп.4.3.1</p>	<p>3.1 4.1 4.2 4.3 4.12b 5.1 7.1 7.3 7.4</p>
Элемент взаимной индуктивности (М-элемент)		<p>LYYYYYYY N11 N12 VALY LZZZZZZ N21 N22 VALZ KXXXXXXX LYYYYYYY LZZZZZZ VALUE Пример: L1 1 2 2M L2 2 0 2M K L1 L2 0.25</p> <p>описывает М-элемент с именем K, состоящий из индуктивно связанных L-элементов L1 и L2 с индуктивностями 2 мГн и коэффициентом индуктивной связи 0,25. Одноименными зажимами являются узлы 1 и 2 (или 2 и 0).</p>	<p>пп.4.4.3</p>	<p>4.7 — 4.11 4.15 6.5 7.14</p>

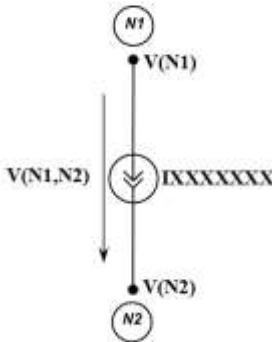
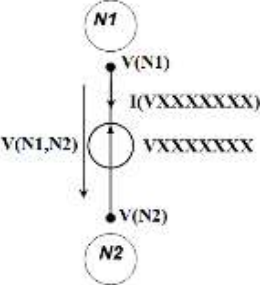
Наименование элемента	Условное графическое изображение	Шаблон и пример текстового описания в формате SPICE3	Описание в данной книге	Номера характерных примеров в данной книге
Ключ, управляемый напряжением (КУН)		<p>SXXXXXXX N+ N- NC+ NC- MNAME <ON><OFF> Пример: SINT1 5 12 13 184 SWITCH1 ON КУН с именем SINT1 включен между узлами 5 и 12 и управляется напряжением между узлами 13 (плюс) и 184 (минус). Параметры ключа описываются моделью с именем SWITCH1. Начальное состояние ключа — замкнут</p>	<p>пп. 7.7.1 пп. 7.7.2</p>	<p>7.16 7.17 8.6</p>
Ключ, управляемый током (КУТ)		<p>WXXXXXXX N+ N- VNAME MNAME <ON><OFF> Пример: WAP 0 3 V14 AVAR OFF КУТ с именем WAP включен между узлами 0 и 3 и управляется током $i_{упр}$ источника напряжения V14. Параметры ключа описываются моделью с именем AVAR. Начальное состояние ключа — разомкнут.</p>	<p>пп. 7.7.1 пп. 7.7.2</p>	
Длинная линия без потерь	Рис. 8.4	<p>TXXXXXXX N1 N2 N3 N4 Z0=VALUE <TD=VALUE> +<F=FREQ <NL=NRMLEN>> <IC=V1, I1, V2, I2> Примеры: 1) T1 1 0 2 0 Z0=50 TD=10N линия без потерь с именем T1, характеризующаяся волновым сопротивлением 50 Ом и временем задержки 10 нс. Начало линии подключено к узлам 1 (плюс) и 0 (минус). Конец линии — к узлам 2 (плюс) и 0 (минус);</p>	<p>пп. 8.3.1</p>	<p>8.1 8.4 8.5 8.6 8.7</p>

Наименование элемента	Условное графическое изображение	Шаблон и пример текстового описания в формате SPICE3	Описание в данной книге	Номера характерных примеров в данной книге
		2) TDELAY 10 5 LOAD 5 Z0=75 F=12MEG NL=0.3 линия без потерь с именем TDELAY, характеризующаяся волновым сопротивлением 75 Ом, с нормализованной длиной 0,3 на частоте 12 МГц. Начало линии подключено к узлам 10 (плюс) и 5 (минус). Конец линии — к узлам LOAD (плюс) и 5 (минус).		
Длинная линия с потерями	Рис. 8.8	ОXXXXXXX N1 N2 N3 N4 MNAME Пример: O1 1 0 2 0 LOSSYLINE линия с потерями, с именем O1, характеризующая моделью LOSSYLINE. Начало линии подключено к узлам 1 (плюс) и 0 (минус). Конец линии — к узлам 2 (плюс) и 0 (минус);	пп. 8.3.2	8.1 8.2 8.3 8.8 8.9 8.10
АКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ				
Наименование элемента	Условное графическое изображение	Шаблон и пример текстового описания в формате SPICE3	Описание в данной книге	Номера характерных примеров в данной книге
Идеализированный независимый источник постоянного напряжения		VXXXXXXX N1 N2 <DC> VALUE Пример: V5 1 0 DC 5 описывает источник постоянного напряжения с именем V5 и ЭДС 5 В, подключенный между узлами 1 и 0 (земля), причем «плюс» источника подключен к узлу 1, а «минус» — к узлу 0.	пп.1.2.1	1 3.1 3.8 3.14 3.18 3.20

Наименование элемента	Условное графическое изображение	Шаблон и пример текстового описания в формате SPICE3	Описание в данной книге	Номера характерных примеров в данной книге
Идеализированный независимый источник постоянного тока		IXXXXXXX N1 N2 <DC> VALUE Пример: I_E8 V6T V7U DC 2.2K описывает источник постоянного тока с именем I_E8 и током 2,2 кА=2200 А, подключенный между узлами V6T и V7U, ток которого протекает внутри источника в направлении от узла V6T к узлу V7U.	пп.1.2.2	2.1 3.8 3.14 3.18 3.20
Идеализированный независимый источник гармонического (синусоидально-ного)напряжения		VXXXXXXX N1 N2 <AC ACMAG <ACPHASE>> Пример: VE8 15 2 AC 115 -25 описывает источник гармонического напряжения с именем VE8, амплитудой (или действующим значением) 115 В и начальной фазой (-25) град., подключенный между узлами 15 и 2, «Плюс» источника подключен к узлу 15, а «минус» — к узлу 2. Диапазон частот задается директивой .AC	пп.4.3.1	4.1 4.2 4.4 4.5 5.1
Идеализированный независимый источник гармонического (синусоидального)тока		IXXXXXXX N1 N2 <AC ACMAG <ACPHASE>> Пример: Ijgen 6 21 AC 7.8M 48.6 описывает источник гармонического тока с именем Ijgen, амплитудой (или действующим значением) 7,8 мА и начальной фазой 48,6 град., подключенный между узлами 6 и 21, ток которого протекает внутри источника в направлении от узла 6 к узлу 21. Диапазон частот задается директивой .AC	пп.4.3.1	4.3 4.5

Наименование элемента	Условное графическое изображение	Шаблон и пример текстового описания в формате SPICE3	Описание в данной книге	Номера характерных примеров в данной книге
Идеализированные независимые сигнальные импульсные источники напряжения и тока		<p>VXXXXXXX N1 N2 PULSE(Y1 Y2 TD TR TF PW PER) IXXXXXXXX N1 N2 PULSE(Y1 Y2 TD TR TF PW PER)</p> <p>Временная диаграмма с обозначениями параметров представлена на рис. 7.20</p> <p>Примеры:</p> <p>1) V5 7 15 PULSE(0 5.2 5m 0.1n 0.1n 1u 2u) Источник периодических импульсов напряжения V5, включенный между узлами 7 (плюс) и 15 (минус). Напряжение изменяется, начиная с момента времени 5 мс (задержка), от нуля до 5,2 В с периодом 2 мкс. Длительности переднего и заднего фронтов равны 0,1 нс, а ширина вершины импульса составляет 1 мкс;</p> <p>2) IS2 25 IN PULSE(-1.2 2.54 1m 0.1m 0.1m 9m) Источник одиночного импульса тока IS2, ток которого протекает внутри источника в направлении от узла 25 к узлу IN. Импульс начинается с задержкой 1 мс, изменяясь от (-1,2) А до 2,54 А. Длительности переднего и заднего фронтов равны 0,1 мс, а ширина вершины импульса составляет 9 мс. Поскольку период PER не указан, то его значение принимается равным по умолчанию параметру TSTOP, заданному директивой .TRAN</p>	п.7.4 пп. 7.4.1	7.6 7.7

Наименование элемента	Условное графическое изображение	Шаблон и пример текстового описания в формате SPICE3	Описание в данной книге	Номера характерных примеров в данной книге
Идеализированные независимые сигнальные источники синусоидального напряжения и тока		<p>VXXXXXXX N1 N2 SIN(Y0 YA FREQ TD THETA) IXXXXXXX N1 N2 SIN(Y0 YA FREQ TD THETA)</p> <p>Временная диаграмма с обозначениями параметров представлена на рис. 7.22</p> <p>Примеры:</p> <p>1) V_SUPPL3 53 5 SIN (1.5 3 10k 0.5m) Источник синусоидального напряжения V_SUPPL3 частотой 10 кГц, амплитудой 3 В и постоянной составляющей 1,5 В, включенный между узлами 53 (плюс) и 5 (минус). Задержка составляет 0,5 мс;</p> <p>2) IZ NN 5 SIN (0 30m 1meg 20u 50000) Источник затухающего синусоидального тока IZ частотой 1 МГц, амплитудой 30 мА без постоянной составляющей, ток которого протекает внутри источника в направлении от узла NN к узлу 5. Задержка составляет 20 мкс, коэффициент затухания равен 50000 с⁻¹.</p>	п.7.4 пп. 7.4.2	7.8 7.9
Идеализированные независимые сигнальные источники экспоненциального напряжения и тока		<p>VXXXXXXX N1 N2 EXP(Y1 Y2 T1 TAU1 T2 TAU2) IXXXXXXX N1 N2 EXP(Y1 Y2 T1 TAU1 T2 TAU2)</p> <p>Временная диаграмма с обозначениями параметров представлена на рис. 7.31</p> <p>Примеры:</p> <p>1) VI 1 0 EXP(3 12 1.5m 0.5m 5m 1m) Источник экспоненциального напряжения VI,</p>	п.7.4 пп. 7.4.3	7.10 7.11

Наименование элемента	Условное графическое изображение	Шаблон и пример текстового описания в формате SPICE3	Описание в данной книге	Номера характерных примеров в данной книге
		<p>включенный между узлами 1 (плюс) и 0 (минус). с начальным значением 3 В и максимальным значением 12 В, началом переднего фронта в момент времени 1,5 мс, началом заднего фронта в момент времени 5 мс. Постоянные времени переднего и заднего фронтов равны 0,5 мс и 1 мс соответственно;</p> <p>2) IS_2 ND12 6 EXP(0 60m 0 100u 1m 200u)</p> <p>Источник экспоненциального тока IS_2, ток которого протекает внутри источника в направлении от узла ND12 к узлу 6, с нулевым начальным значением и максимальным значением 60 мА. Начало переднего фронта соответствует нулевому моменту времени, начало заднего фронта соответствует моменту времени 1 мс. Постоянные времени переднего и заднего фронтов равны 100 мкс и 200 мкс соответственно</p>		
Идеализированные независимые сигнальные источники кусочно-линейного напряжения и тока		<p>VXXXXXXX N1 N2 PWL(T1 Y1 T2 Y2 ...TN YN) IXXXXXXX N1 N2 PWL(T1 Y1 T2 Y2 ...TN YN)</p> <p>Временная диаграмма с обозначениями параметров представлена на рис. 7.35</p> <p>Примеры:</p> <p>1) V1 5 9 PWL(1m 0 2m 5.0 5m 0)</p> <p>Источник одиночного треугольного импульса напряжения V1 подключен к узлам 5 (плюс) и 9 (минус). Импульс начинается в момент времени 1 мс с нулевого значения, достигает максимума 5 В при 2 мс и спадает до нуля при 5 мс</p>	п.7.4 пп. 7.4.4	7.12

Наименование элемента	Условное графическое изображение	Шаблон и пример текстового описания в формате SPICE3	Описание в данной книге	Номера характерных примеров в данной книге
		<p>2)IPULS ST1 BTA PWL(1 0 2 2 5 2 7 0)</p> <p>Источник IPLUS трапецидального импульса тока, протекающего внутри источника от узла ST1 к узлу BTA. Импульс начинается с нуля в момент времени 1 с и достигает 2 А при 2 с. Ток 2 А сохраняется до момента времени 5 с, а затем спадает до нуля при 7 с</p>		
Идеализированные независимые сигнальные источники частотно-модулированного напряжения и тока		<p>VXXXXXXX N1 N2 SFFM(Y0 YA FC MDI FS)</p> <p>IXXXXXXX N1 N2 SFFM(Y0 YA FC MDI FS)</p> <p>Временная диаграмма представлена на рис. 7.40</p> <p>Примеры:</p> <p>1) VS 25 19 SFFM(0 1 19.5MEG 3.0 2MEG)</p> <p>Источник частотно-модулированного напряжения VS подключен к узлам 25 (плюс) и 19 (минус). Постоянная составляющая равна нулю. Максимальное напряжение 1 В, частота несущей 19,5 МГц, индекс частотной модуляции 3, частота модулирующего сигнала 2 МГц;</p>	п.7.4 пп.7.4.5	7.13
		<p>2)IMOD 8 G17 SFFM(5m 10m 150k 2.5 30k)</p> <p>Источник IMOD частотно-модулированного тока, протекающего внутри источника от узла 8 к узлу G17. Постоянная составляющая равна 5 мА. Максимальный ток 10 мА, частота несущей 150 кГц, индекс частотной модуляции 2,5, частота модулирующего сигнала 30 кГц.</p>	п.7.4 пп.7.4.5	

Наименование элемента	Условное графическое изображение	Шаблон и пример текстового описания в формате SPICE3	Описание в данной книге	Номера характерных примеров в данной книге
Идеализированный источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН)	<p style="text-align: center;">$V(N1,N2)=VALUE \cdot V(NC1,NC2)$</p>	EXXXXXXX N1 N2 NC1 NC2 VALUE Пример: EPRAV 17 8 42 18 24 описывает ИНУН с именем EPRAV и коэффициентом передачи 24, подключенный «плюсом» к узлу 17, а «минусом» к узлу 8. Управляющая ветвь подключена «плюсом» к узлу 42, а «минусом» к узлу 18	пп.3.3.3	3.22 3.24 3.25 4.5 4.16 6.7 7.12
Идеализированный источник тока, управляемый напряжением (ИТУН)	<p style="text-align: center;">$J=VALUE \cdot V(NC1,NC2)$</p>	GXXXXXX N1 N2 NC1 NC2 VALUE Пример: GRAD 19 40 6 99 0.65 ИТУН с именем GRAD и передаточной проводимостью 0,65 См, ток которого протекает внутри источника в направлении от узла 19 к узлу 40. Управляющая ветвь подключена «плюсом» к узлу 6, а «минусом» к узлу 99	пп.3.3.3	3.23 3.24 6.6
Идеализированный источник напряжения, управляемый током (ИНУТ)	<p style="text-align: center;">$V(N1,N2)=VALUE \cdot I(VNAME)$</p>	HXXXXXX N1 N2 VNAME VALUE VNAME NC1 NC2 DC 0 Пример: HX 5 J17 VZ 0.5K VZ ONE TWO DC 0 ИНУТ с именем HX и передаточным сопротивлением 0,5 кОм=500 Ом, подключенный «плюсом» к узлу 5, а «минусом» к узлу J17. Управляющая ветвь содержит источник напряжения VZ с нулевой ЭДС («амперметр»), подключенный «плюсом» к узлу ONE, а «минусом» к узлу TWO.	пп.3.3.3	3.23 6.6

Наименование элемента	Условное графическое изображение	Шаблон и пример текстового описания в формате SPICE3	Описание в данной книге	Номера характерных примеров в данной книге
Идеализированный источник тока, управляемый током (ИТУТ)	<p style="text-align: center;">$J = \text{VALUE} \cdot I(VNAM)$</p>	FXXXXXXX N1 N2 VNAM VALUE VNAM NC1 NC2 DC 0 Пример: FJ11 3PIN 26 VCONTR 158 VCONTR 15 6E DC 0 ИТУТ с именем FJ11 и коэффициентом передачи 158, ток которого протекает внутри источника в направлении от узла 3PIN к узлу 26. Управляющая ветвь содержит источник напряжения VCONTR с нулевой ЭДС («амперметр»), подключенный «плюсом» к узлу 15, а «минусом» к узлу 6E	пп.3.3.3	3.22 3.25 4.5 6.7

Таблица П2.2

Директивы моделирования

(директивы «с точкой», соответствующие стилю SPICE2, можно использовать без точки в стиле SPICE3, кроме .IC и .FOUR)

Вид расчета	Код директивы	Краткий формат текстового описания	Полное описание формата в данной книге	Номера характерных примеров в данной книге
Расчет по постоянному току	.OP	.OP	введение	1; 3.1; 3.2; 3.8; 3.14; 3.17; 3.19; 3.22
Расчет системных функций цепи по постоянному току	.TF	.TF OUTVAR INSRC	пп.3.1.2	3.3 — 3.7; 3.16
Расчет по постоянному току при вариации независимых источников	.DC	.DC SRCNAM VSTART VSTOP VINCR	пп.3.2.4	3.9; 3.10; 3.20; 3.21; 3.23
Расчет чувствительности тока или напряжения цепи постоянного тока к изменению ее параметров.	.SENS	.SENS OUTVAR	пп.3.2.7	3.16; 3.25
Расчет цепей синусоидального тока символическим методом в диапазоне частот (частотные характеристики) или на одной частоте	.AC	1) .AC LIN NP FSTART FSTOP 2) .AC DEC ND FSTART FSTOP 3) .AC OCT NO FSTART FSTOP	пп.4.3.2	4.1 — 4.11; 4.12a; 4.12b; 4.14 — 4.16; 5.2; 5.3; 6.7; 8.1; 8.2

Вид расчета	Код директивы	Краткий формат текстового описания	Полное описание формата в данной книге	Номера характерных примеров в данной книге
Расчет переходных процессов	.TRAN	.TRAN TSTEP TSTOP <TSTART <TMAX>><UIC>	п.7.2	7.1 — 7.15; 8.4; 8.8;
Задание начальных условий	.IC	.IC V(NODNUM)=VAL V(NODNUM)=VAL ...	п.7.2	7.1.1; 7.3.1; 7.16; 7.17
Фурье-анализ периодического установившегося режима переходных процессов	.FOUR (fourier) (spec)	.FOUR FREQ OV1 <OV2 OV3 ...> fourier freq exp1 <exp2 exp3 ...> spec startf stopf stepf ov1 <ov2, ov3 ... >	пп.7.6.1 пп.7.6.1 пп.7.6.2	7.15; 7.15.1 7.15.2 7.15.3; 7.15.4

Использование программы WinSpice3 в качестве калькулятора комплексных чисел и выражений

Основным назначением программы WinSpice3 является расчет электрических и электронных цепей. Однако ее можно использовать и в качестве калькулятора действительных и комплексных чисел и выражений. Работа с WinSpice3 в режиме калькулятора подобна MATLAB, MAPLE, MAXIMA и другим математическим программам с вводом в командную строку. После подсказки, имеющей вид для N-й строки

WinSpice N ->

вводится команда и ее аргументы и нажимается клавиша ENTER. Прописные и строчные буквы не различаются. В режиме калькулятора наиболее часто используются команды:

let <переменная>=<выражение> — присвоение переменной значения выражения;

print <список переменных> — печать значений переменных в окне программы.

Числа выводятся в экспоненциальной форме <мантисса>e<порядок> по основанию 10, причем мантисса находится в диапазоне от 1 до 10 и имеет 7 значащих цифр. Например, число 25,6428 выводится в виде 2.564286e+01. Обратите внимание, что разделителем между целой и дробной частями числа является ТОЧКА! Комплексные числа всегда выводятся в алгебраической форме, независимо от формы их ввода, в виде <переменная>=<действительная часть>,<мнимая часть>.

Например, число $z1 = -11,1251 + i \cdot 5,668525$ будет выведено командой print z1 в виде

$z6 = -1.11251e+01,5.668525e+00$

Имена переменных могут иметь произвольную длину и состоять из латинских букв, цифр и символа подчеркивания. Прописные и строчные буквы не различаются. Некоторые имена зарезервированы под физические и математические константы и не могут быть изменены (табл. ПЗ.1)

Таблица ПЗ.1

boltz — постоянная Больцмана, Дж/К	no — логическая константа «ложь» сопоставлена с нулем
c — скорость света, м/с	i — мнимая единица
e — основание натуральных логарифмов	pi — число «пи»
echarge — заряд электрона, Кл	planck — постоянная Планка, кг·м ² ·с ⁻¹
false — логическая константа «ложь» сопоставлена с нулем	true — логическая константа «истина» сопоставлена с единицей
kelvin — абсолютный нуль температуры по шкале Цельсия	yes — логическая константа «истина» сопоставлена с единицей

При записи комплексных чисел используется обозначение i для мнимой единицы. Например, комплексное число z_1 с действительной частью 2,536 и мнимой частью 5,567 в алгебраической форме вводится командой

```
let z1=2.536+i*5.567
```

При желании можно присвоить переменной j значение i и в дальнейшем использовать j , как это принято в электротехнике. Присвоение выполняется командой $let\ j=i$, после чего предыдущий пример примет вид

```
let z1=2.536+j*5.567
```

При записи выражений используются общепринятые коды арифметических операций

$+$ $-$ $*$ $/$ $^$

При расчетах с комплексными числами используются следующие функции:

$\text{mag}(z_1)$ или $\text{abs}(z_1)$ - модуль комплексного числа z_1 ;

$\text{ph}(z_1)$ - аргумент комплексного числа z_1 (по умолчанию в радианах);

$\text{deg}(r)$ - перевод угла r из радиан в градусы;

$\text{rad}(d)$ - перевод угла d из градусов в радианы;

$\text{real}(z_1)$ - действительная часть комплексного числа z_1 (сокращенно re);

$\text{imag}(z_1)$ - мнимая часть комплексного числа z_1 (сокращенно im);

$\text{exp}(z_1)$ - экспонента с комплексным показателем степени z_1 ;

$\text{sqrt}(z_1)$ - квадратный корень из комплексного числа z_1 .

Запишем комплексное число y_{12} с модулем 46,892 и аргументом (-137) градусов в показательной форме:

```
let y12=46.892*exp(i*rad(-137))
```

Возможен другой вариант записи того же числа в показательной форме:

```
let y12=46.892*e^(i*rad(-137))
```

В обоих примерах градусы преобразуются в радианы функцией $\text{rad}()$.

Ниже приведено содержание окна программы WinSpice3 при выполнении примеров. Для ясности добавлены комментарии (помечены =====). Предлагается самостоятельно выполнить данные примеры.

Для этого запустите программу WinSpice3, в открывшемся окне вводите примеры и нажимайте клавишу ENTER.

```
*** Reading include files ...
```

```
*** Completed reading include files.
```

```
*****
```

```
WinSpice © Copyright 1996-2007 OuseTech Ltd. All Rights Reserved.
```

```
Version: 1.06.00
```

Built : Feb 24 2007 17:17:51

Shareware version of WinSpice. For non-commercial use only.

Please read the file 'license.txt' for conditions of use.

Type "help" for more information, "quit" to leave.

WinSpice 1 ->

===== Ввод комплексного числа z1

WinSpice 1 -> let z1=5+i*6

===== Вывод комплексного числа z1

WinSpice 2 -> print z1

z1 = 5.000000e+00,6.000000e+00

===== Ввод комплексного числа z2

WinSpice 3 -> let z2=-5-i*6.56

===== Вывод комплексного числа z2

WinSpice 4 -> print z2

z2 = -5.000000e+00,-6.560000e+00

===== Вычисление комплексного выражения z3

WinSpice 5 -> let z3=z1*z2/(z1+z2)

===== Вывод значения выражения z3

WinSpice 6 -> print z3

z3 = 1.121429e+02,2.564286e+01

===== Вычисления модуля z3mod компл. числа z3

WinSpice 7 -> let z3mod=mag(z3)

===== Вывод значения z3mod

WinSpice 8 -> print z3mod

z3mod = 1.150373e+02

===== Вычисления аргумента z3arg компл. числа z3 (в радианах!!!)

WinSpice 9-> let z3arg=ph(z3)

===== Вывод значения z3arg (в радианах!!!)

WinSpice 10-> print z3arg

z3arg = 2.247976e-01

===== Вывод значения z3arg в градусах

WinSpice 11-> print deg(z3arg)

deg(z3arg) = 1.287996e+01

===== Ввод комплексного числа z4=z3 в показательной форме с помощью функции возведения в степень exp()


```
WinSpice 12-> let z4=z3mod*exp(i*z3arg)
```

```
===== Вывод комплексного числа z4=z3
```

```
WinSpice 13-> print z4
```

```
z4 = 1.121429e+02,2.564286e+01
```

```
===== Ввод комплексного числа z5=z3 в показательной форме с помощью операции возведения в степень e^()
```

```
WinSpice 14 -> let z5=z3mod*e^(i*z3arg)
```

```
WinSpice 15 -> print z5
```

```
z5 = 1.121429e+02,2.564286e+01
```

```
===== Ввод комплексного числа z6 (модуль=12,486, аргумент=-153 градуса) в показательной форме. Градусы преобразуются в радианы функцией rad()
```

```
WinSpice 16 -> let z6=12.486*exp(i*rad(-153))
```

```
WinSpice 17 -> print z6
```

```
z6 = -1.11251e+01,-5.668525e+00
```

```
===== Вычисление и вывод действительной части компл. числа z3
```

```
WinSpice 18 -> let R3=real(z3)
```

```
WinSpice 19 -> print R3
```

```
r3 = 1.121429e+02
```

```
===== Вычисление и вывод мнимой части компл. числа z3
```

```
WinSpice 20 -> let X3=imag(z3)
```

```
WinSpice 21 -> print X3
```

```
x3 = 2.564286e+01
```

Итак, с помощью WinSpice3 в интерактивном режиме можно выполнять арифметические действия с комплексными числами и вычислять выражения с комплексными переменными. Но, если выражений достаточно много, и некоторые из них могут изменяться, то при каждом запуске программы придется повторять ручной ввод всех величин, их значений и выражений. Поэтому в данном случае целесообразно поместить все необходимые для расчетов данные в управляющий блок схемного файла, соответствующего стилю Spice3. Напомним, что управляющий блок ограничен директивами .control и .endc.

В общем виде такой текстовый файл будет иметь структуру, показанную на рис. П3.1. Под «Простейшей цепью» понимается текстовое описание некоторой цепи, которое нужно для работы WinSpice. Без него программа выдает ошибку, и управляющий блок не выполняется. Можно, например, использовать описание соединения источника напряжения 1 В и резистора 1 Ом, имеющее вид

```
V 1 0 1
```

```
R 1 0 1
```



Рис. ПЗ.1. Структура текстового файла калькулятора

В качестве примера создадим с помощью программы Блокнот текстовый файл calc.cir, в управляющий блок которого поместим шесть первых строк, выполненных выше в интерактивном режиме (от z1 до z3). Содержимое файла calc.cir имеет вид

```

test_primer
V 1 0 1
R 1 0 1
.control
*vvod z1
let z1=5+i*6
*vyvod z1
print z1
*vvod z2
let z2=-5-i*6.56
*vyvod z2
print z2
*vychisleniye vyraseniya z3
let z3=z1*z2/(z1+z2)
*vyvod vyraseniya z3
print z3
.endc
.end
  
```

Звездочками, как всегда, помечены строки комментариев. Открытие данного файла в WinSpice3 приводит к результатам, совпадающим с расчетами, проведенными в интерактивном режиме

```

Executing commands ...
z1 = 5.000000e+00,6.000000e+00
z2 = -5.00000e+00,-6.56000e+00
z3 = 1.121429e+02,2.564286e+01
Command execution done.
  
```

В заключение рассмотрим проверку результатов расчета примера 4.1. с помощью метода эквивалентных преобразований. Соответствующие выражения для иско-
мых величин занесены текстовый файл, приведенный ниже.

<pre> proverka 4.1 V 1 0 1 R 1 0 1 .control set units=degrees * * ISHODNYE DANNYE let U=380 let R1=6 let R3=10 let omeg=2*Pi*1600 let L1=1.194m let L3=795.8u let C1=24.87u let C2=16.58u * * SOPROTIVLENIYA let XL1=omeg*L1 let XL3=omeg*L3 let XC1=1/(omeg*C1) let XC2=1/(omeg*C2) let Z1=R1+i*(XL1-XC1) let Z2=-i*XC2 let Z3=R3+i*XL3 let Z=Z1+Z2*Z3/(Z2+Z3) * echo **** TOKI **** let I1=U/Z let I2=I1*Z3/(Z2+Z3) </pre>	<pre> (ПРОДОЛЖЕНИЕ) let I3=I1*Z2/(Z2+Z3) print I1 I2 I3 print mag(I1) ph(I1) print mag(I2) ph(I2) print mag(I3) ph(I3) * echo ***POTENTIALS*** let V2=R1*I1 let V3=V2+I1*i*XL1 let V4=V3-I1*i*XC1 let V5=V4+I3*i*XL3 print V2 V3 V4 V5 * echo ****VHODNOE SOPROTIVLENIE **** let Zvx=U/I1 print mag(Zvx) ph(Zvx) * echo **** MOSHNOST **** let Sc=Zvx*mag(I1)^2 let P=re(Sc) let Q=im(Sc) let S=mag(Sc) let PHI=ph(Sc) print Sc print P Q S PHI .endc .end </pre>
--	---

Читателю предлагается разобраться со смыслом выражений, закодированных в данном файле, и убедиться самостоятельно, что результаты, полученные в примере 4.1. верны.

Заключение

Расчет и анализ линейных электрических цепей является одной из основных тем дисциплин «Теоретические основы электротехники», «Основы теории цепей», «Линейные электрические цепи». Автор надеется, что в данной книге удалось продемонстрировать применение SPICE3 на примерах, которые подходят, как минимум, для решения типовых задач. На этой основе возможно развитие приведенных методик и приемов для более сложных случаев. Читатель, проделавший все примеры параллельно с изучением теоретического материала, получил некоторые навыки применения современного инструментального средства, предназначенного для численного моделирования электрических схем. На основе SPICE можно создавать обобщенные описания широких классов электрических цепей, что было продемонстрировано на примерах трехфазных цепей и четырехполюсников.

Знание основ языка SPICE значительно облегчает работу в системах схемотехнического моделирования с развитым графическим интерфейсом (например, Multisim). Большинство этих систем позволяют импортировать и экспортировать файлы в формате SPICE, подключать блоки текстовых SPICE-описаний, задавать директивы моделирования и т. д. Иными словами, если пользователь «заглянет» за красивый интерфейс, то столкнется с теми или иными SPICE-конструкциями. Например, довольно часто возникает необходимость изменения какого-либо параметра компонента или подключение новой внешней модели.

Гораздо более обширной и сложной областью является анализ нелинейных цепей, который в данной книге не рассматривался. Однако приведенный материал является достаточным «начальным условием» для освоения расчетов нелинейных цепей на основе SPICE. Не будем забывать, что SPICE изначально разрабатывался для анализа электронных цепей, которые являются в общем случае нелинейными. Поэтому в SPICE имеются встроенные модели электронных приборов (диодов и транзисторов), нелинейных управляемых источников. На основе последних можно создавать модели других нелинейных элементов (варисторов, нелинейных катушек и трансформаторов и др.). Некоторые примеры электронных схем в формате SPICE содержатся в папке **EXAMPLES** программы WinSpice3, а также в книгах [4, 5]. Однако для полноценного освещения SPICE-моделирования нелинейных электрических цепей необходима отдельная книга, в которой бы рассматривались соответствующие базовые темы изучаемых дисциплин.

Список литературы

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. — 11-е изд. — М.: Гардарики, 2007. — 701 с.
2. Володин В. Я. LTspice: компьютерное моделирование электронных схем. — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 400 с.
3. Каплянский А. Е., Лысенко А. П., Полотовский Л. С. Теоретические основы электротехники. Изд. 2-е: учеб. пособие для электротехнических и энергетических специальностей вузов. — М.: Высшая школа, 1972. — 448 с.
4. Кеун Дж. OrCAD Pspice. Анализ электрических цепей (+DVD). — М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. — 640 с.
5. Разевиг В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. — М.: Солон, 1999. — 698 с.
6. Сборник задач по теоретическим основам электротехники: учеб. пособие для энерг. и приборост. спец. вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. / Л. А. Бессонов, И. Г. Демидова, М. Е. Заруди и др.; под ред. Л. А. Бессонова. — М.: Высш. шк., 2003. — 528 с.
7. Хайнеман Р. PSpICE. Моделирование работы электронных схем. — М.: ДМК Пресс, 2005. — 336 с.
8. Шестеркин А. Н. Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10. — М.: ДМК Пресс, 2012. — 360 с.
9. Электротехнический справочник. В 3-х т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. проф. МЭИ В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, Л. А. Жукова и др. — 6-е изд., испр. и доп. — М.: Энергия, 1980. — 520 с.
10. List of free electronics circuit simulators // Wikipedia: URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_free_electronics_circuit_simulators
11. Intusoft. IsSpice4: [сайт]. URL: <http://www.intusoft.com/>
12. LTspice: [сайт]. URL: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators.html#LTspice>
13. Multisim™ for Education: [сайт]. URL: <https://www.ni.com/ru-ru/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/what-is-multisim/multisim-education.html>
14. Spice // Wikipedia: URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/SPICE>
15. SPICE 3 User's Manual. Introduction // URL: http://bwrcs.eecs.berkeley.edu/Classes/IcBook/SPICE/UserGuide/overview_fr.html
16. SPICE Simulation Fundamentals // URL: <https://www.ni.com/ru-ru/innovations/white-papers/06/spice-simulation-fundamentals.html>
17. SpiceOpus: [сайт]. URL: <http://www.spiceopus.si/>
18. The Spice Page : [сайт]. URL: <http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Classes/IcBook/SPICE/>
19. WinSpice3 User's Manual/ Mike Smith, 2007. — 183 с. URL: https://www.academia.edu/2735311/WinSpice3_Users_Manual
20. WinSpice. Affordable Circuit Simulation Software: [сайт]. URL: <http://winspice.com>

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ	5
Общие сведения о SPICE.....	5
Выбор SPICE-программы для обучения	6
Программа схемотехнического моделирования WinSpice3.....	7
Пример использования WinSpice3 для расчета цепи постоянного тока.....	8
Выводы.....	13
Глава 1. ИДЕАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ (ЛЭЦ).....	15
1.1. Простейшие пассивные идеализированные элементы ЛЭЦ	16
1.1.1. Резистивный элемент	17
1.1.2. Индуктивный элемент.....	20
1.1.3. Емкостной элемент.....	23
1.2. Простейшие активные идеализированные элементы ЛЭЦ	25
1.2.1. Идеализированный независимый источник напряжения	26
1.2.2. Идеализированный независимый источник тока.....	28
1.3. Выводы	30
Глава 2. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ, ЗАКОНЫ КИРХГОФА.....	31
2.1. Схемы электрических цепей	31
2.2. Основные топологические понятия.....	31
2.3. Составление текстового SPICE-описания. Подсхемы	33
2.4. Законы Кирхгофа.....	38
2.5. Теорема Телледжена, баланс мощности	40
Выводы.....	41
Глава 3. ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	42
3.1. Цепи с одним источником электрической энергии, системные функции цепи.....	44
3.1.1. SPICE-модель эксперимента по определению системных функций цепи	46
3.1.2. Применение специализированного spice-анализа системных функций цепи (директива .TF)	50
3.2. Основные принципы и теоремы.....	57
3.2.1. Принцип наложения и метод наложения	57
3.2.2. Принцип взаимности	62
3.2.3. Принцип компенсации.....	64
3.2.4. Линейные соотношения	66
3.2.5. Теорема об активном двухполюснике.....	79
3.2.6. Передача энергии от активного двухполюсника к приемнику	82
3.2.7. Теорема вариаций	85
3.3. Цепи с несколькими источниками электрической энергии	90
3.3.1. Метод узловых потенциалов и SPICE-алгоритм	91
3.3.2. Сравнение различных SPICE-стилей текстового описания	95

3.3.3. Цепи с управляемыми источниками	105
Выводы.....	116
Глава 4. ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	118
4.1. Основные параметры синусоидальных величин	118
4.2. Изображение гармонических величин комплексными числами. Символический метод.....	119
4.3. SPICE-описание схем в установившемся гармоническом режиме.....	122
4.3.1. Описание элементов	122
4.3.2. Директивы в стиле SPICE2.....	123
4.3.3. Особенности стиля SPICE3.....	126
4.4. Примеры расчетов установившихся синусоидальных процессов на фиксированной частоте	129
4.4.1. Цепи с одним источником электрической энергии	129
4.4.2. Цепи несколькими источниками электрической энергии.....	141
4.4.3. Цепи с взаимной индукцией.....	151
4.5. Частотные характеристики.....	164
4.5.1. Частотные характеристики простейших цепей.....	166
4.5.2. Частотные характеристики фильтров	170
4.6. Периодические несинусоидальные токи и напряжения в линейных электрических цепях.....	182
Выводы.....	187
Глава 5. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ	190
5.1. Трехфазный источник	190
5.2. Трехфазный приемник.....	195
5.3. Трехфазная линия	197
5.4. Обобщенное SPICE-описание трехфазной цепи.....	198
5.5. Четырехпроводная система	201
5.6. Трехпроводная система с источником, соединенным звездой	207
Выводы.....	213
Глава 6. ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКИ	215
6.1. Уравнения четырехполюсника	216
6.2. Определение а-параметров по опытам холостого хода и короткого замыкания на выходе	217
6.3. Обобщенное описание для определения частотных характеристик параметров взаимных четырехполюсников.....	222
6.4. Обобщенное описание для определения частотных характеристик параметров невзаимных четырехполюсников	229
6.5. SPICE-описание четырехполюсников, заданных параметрами	236
Выводы.....	237
Глава 7. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ.....	238
7.1. Обзор методов анализа переходных процессов	238
7.2. Спецификация режима анализа переходных процессов в WinSpice3.....	239
7.3. Переходные процессы в цепях с источниками постоянного тока	241

7.4. Переходные процессы в цепях с изменяющимися во времени источниками	260
7.4.1. Источник импульсного сигнала PULSE()	260
7.4.2. Источник синусоидального сигнала SIN()	264
7.4.3. Источник экспоненциального сигнала EXP()	272
7.4.4. Источник кусочно-линейного сигнала PWL()	277
7.4.5. Источник частотно-модулированного сигнала SFFM()	280
7.5. Комбинирование расчета переходных процессов с другими видами анализа	282
7.6. Определение гармонического состава установившегося процесса при периодическом несинусоидальном воздействии	286
7.6.1. Фурье-анализ результатов расчета переходных процессов (директива .four)	288
7.6.2. Вычисление спектров сигналов с помощью команды SPEC	292
7.7. Использование моделей ключей для расчета переходных процессов в коммутируемых цепях	299
7.7.1. Описание ключей	300
7.7.2. Модели ключей	301
7.7.3. Примеры использования ключей	305
Выводы	311
Глава 8. ЦЕПИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ	313
8.1. Телеграфные уравнения	314
8.2. Установившийся гармонический процесс в однородной линии	316
8.3. Описание длинных линий в WinSpice3	319
8.3.1. Линия без потерь	319
8.3.2. Линия с потерями	321
8.4. Примеры расчетов длинных линий	322
8.4.1. Установившийся гармонический режим длинной линии	322
8.4.2. Переходные процессы в длинной линии	329
Выводы	350
Приложение 1. Загрузка и установка программы WinSpice3	352
Приложение 2. Описания основных элементов и директив WinSpice3	357
Приложение 3. Использование программы WinSpice3 в качестве калькулятора комплексных чисел и выражений	369
Заключение	375
Список литературы	376