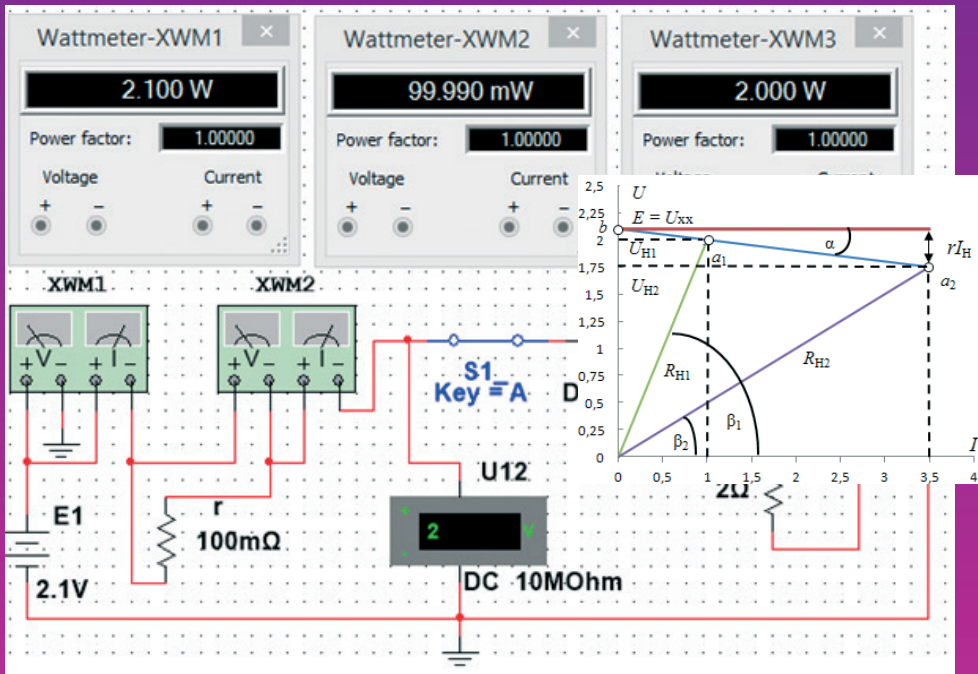




Э. П. МАКАРОВ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Учебное пособие



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Э. П. Макаров

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Учебное пособие

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
для студентов вуза, обучающихся
по направлению подготовки
14.05.02 «Атомные станции: проектирование,
эксплуатация и инжиниринг»

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2021

УДК 621.3.011.7(075.8)

ББК 31.211.51я73

М15

Рецензенты:

кафедра математики и информатики ФГБОУ ВО «Уральский институт государственной противопожарной службы МЧС России» (профессор, д-р физ.-мат. наук *И. А. Кайбичев*);
ведущий научный сотрудник Института математики и механики УрО РАН д-р физ.-мат. наук, проф. *А. Н. Сесекин*

Научный редактор — д-р техн. наук, проф. *С. Е. Щеклеин*

Макаров, Э. П.

М15 Компьютерное моделирование линейных электрических цепей постоянного тока : учебное пособие / Э. П. Макаров ; М-во науки и высш. обр. РФ. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2021. — 242 с.

ISBN 978-5-7996-3329-5

Пособие включает теоретические сведения, алгоритмы и примеры для освоения процедур решения задач анализа электрических цепей постоянного тока на основе новых информационных технологий математического моделирования и схемотехнического проектирования. Дидактический материал в пособии достаточно структурирован и иллюстрирован, содержит необходимую справочную информацию по актуальным версиям пакетов программ.

Работа предназначена для студентов всех форм обучения по дисциплине «Электротехника».

Библиогр.: 5 назв. Рис. 69. Табл. 3. Прил. 1.

УДК 621.3.011.7(075.8)

ББК 31.211.51я73

ISBN 978-5-7996-3329-5

© Уральский федеральный университет, 2021

Введение

Новые информационно-коммуникационные технологии становятся эффективным инструментом интенсификации учебного процесса, достижения студентами некоторого уровня профессиональной компетенции в области компьютерного моделирования электротехнических устройств. В учебном пособии изложен дидактический материал для формирования у студента необходимых знаний основных принципов и законов, а также методов анализа линейных электрических цепей постоянного тока (ЭЦ) в процессе обучения в учебной аудитории, а также дистанционно с использованием персональной ЭВМ. Для текущего самоконтроля студентом достигнутого уровня знаний в пособие включены контрольные вопросы по математическому описанию процессов и методам анализа ЭЦ, на которые даны ответы со ссылками на страницы пособия.

Эффективность применения ЭВМ в учебном процессе не может быть достигнута на основе только компьютеризации расчетов ЭЦ с помощью методов и средств «электротехнического калькулятора». Современные информационные технологии на основе программных средств математического моделирования и схмотехнического проектирования как инструментов учебного процесса создали технологическую основу для перехода к использованию в учебном процессе методов компьютерного информационного моделирования (ИМ). Технология компьютерного ИМ — системный метод создания и использования компьютерных информационных моделей в учебном процессе.

В учебном пособии рассматриваются вопросы компьютерного ИМ объектов и процессов ЭЦ постоянного тока как метод решения задачи анализа в курсе «Электротехника» по программе неэлектрического профиля подготовки специалистов. Все методы анализа основаны на понятиях о компонентных и топологических матрицах и уравнениях, обобщенном законе Ома и законах Кирхгофа в матричной форме.

В формулах определения численного значения величин сопротивления, напряжения, тока, мощности все переменные имеют размерность.

Моделями в курсе «Электротехника» являются эквивалентные схемы замещения ЭЦ постоянного тока и ее элементы: источники электрической энергии (напряжения, тока), резисторы.

Учебное пособие ориентировано на применение пакетов прикладных программ Mathcad 15 и NI Multisim 14.0 для проведения компьютерного ИМ. Математическое моделирование эквивалентной схемы замещения ЭЦ выполняется в пакете Mathcad 15, а в пакете NI Multisim 14.0 — экспериментальная проверка правильности расчетов на собранной схеме модели ЭЦ (виртуальный лабораторный практикум).

В состав Mathcad 15 (Mathcad) входит несколько интегрированных между собой программных компонентов, сочетание которых создает удобную среду для компьютерного математического моделирования:

- мощный текстовый редактор для ввода математических выражений, правки как формул, так и текста;
- вычислительный процессор для проведения математических расчетов с использованием встроенных численных методов;
- графический редактор для визуализации результатов математического моделирования в виде встроенных в документы графиков и диаграмм различных типов с возможностями форматирования, не уступающий по многим параметрам специализированным программам;
- подготовка отчетов работы в виде печатных документов.

В пакете NI Multisim 14.0 (Multisim) предоставляется инструмент для виртуального лабораторного практикума и проверки на практике правильности результатов анализа ЭЦ, полученных методом математического моделирования в среде Mathcad. В виртуальном лабораторном практикуме выполняется следующая последовательность операций:

- осуществляется сборка электрической схемы замещения в виртуальном наборном поле на основе принципиальной схемы моделируемого устройства с помощью встроенного редактора (нужные компоненты копируются с инструментальных панелей компонентов на наборное поле и соединяются проводниками);
- устанавливаются значения параметров компонентов электрической схемы (резисторов, источников энергии);

-
- подключаются пиктограммы измерительных инструментов (индикаторов, виртуальных приборов), на лицевых панелях которых отображаются результаты измерений;
 - программа Multisim запускается в режиме моделирования;
 - регистрируются результаты анализа ЭЦ по показаниям виртуальных измерительных индикаторов и приборов, графикам вольтамперных характеристик элементов цепи, которые можно сохранить для документирования.

Программные продукты Mathcad и Multisim доступны для свободного скачивания на срок до 30 дней для студентов и преподавателей университетов на сайтах фирм (www.PTS.com и www.ni.com).

Учебное пособие написано автором на основании опыта преподавания учебной дисциплины «Электротехника и электроника» в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б. Н. Ельцина.

Учебное пособие предназначено для студентов всех форм обучения по направлениям подготовки специалитета 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг» специализации «Проектирование и эксплуатация атомных станций»; бакалавриата 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и может быть использовано для самостоятельной работы в программных средах Mathcad 15 и Multisim 14.0 в учебной аудитории, а также на персональном компьютере студента в процессе дистанционного обучения.

Автор выражает глубокую благодарность научному редактору профессору С. Е. Щеклеину за ряд полезных замечаний, которые были учтены.

Глава 1

Элементы и параметры линейных электрических цепей

1.1. Основные понятия и определения

1.1.1. Электрическая цепь. Схема электрической цепи

Электрическая цепь (ЭЦ) — это совокупность соединенных друг с другом устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе, электрическом токе и электрическом напряжении [2, с. 15]. Термины и определения основных понятий в области электротехники установлены ГОСТ Р 52002–2003 и являются обязательными для всех видов документации по электротехнике*.

Электрическая цепь предназначена для передачи, преобразования и использования электрического тока в электрических и информационных системах. ЭЦ состоит из двух составных элементов: источника электрической энергии и приемника, которые выполняют определенные функции. Источники энергии (*активные* элементы), например, аккумуляторы, гальванические элементы и др. преобразуют различные виды энергии в электрическую.

Преобразование электрической энергии в другие виды: тепловую (нагрев элементов), механическую (электрические двигатели) происходит в приемниках электрической энергии (*пассивные* элементы). Совместная работа источника и приемника электрической энергии

* ГОСТ Р 52002-2003¹ «Электротехника. Термины и определения основных понятий». — М. : Госстандарт России, 2003.

возможна при наличии движения заряда между ними в соединительных проводах.

Для подключения к остальной части цепи каждый элемент цепи имеет два внешних вывода (зажимы, полюса). *Двухполюсник* — это участок электрической цепи, состоящий из одного или нескольких элементов и подключенный к остальной части цепи двумя проводами [1, с. 61]. ЭЦ содержит разнообразные двухполюсные элементы: источники питания (генерирующие электромагнитную энергию); резистивные элементы (приемники, преобразующие электромагнитную энергию в другие формы), измерительные приборы. Двухполюсник, который не содержит источников электрической энергии, относится к *пассивным* источникам. Если на участке ЭЦ имеется источник электрической энергии, то такой двухполюсник относится к *активным*. Каждый элемент ЭЦ полностью характеризуется зависимостью напряжения от тока на его зажимах (вольтамперной характеристикой).

Электрические цепи принято изображать в виде *электрических схем*. *Схема ЭЦ* — это ее графическое изображение, содержащее условные обозначения элементов цепи и показывающее соединение этих элементов (рис. 1.1) [2, с. 19].

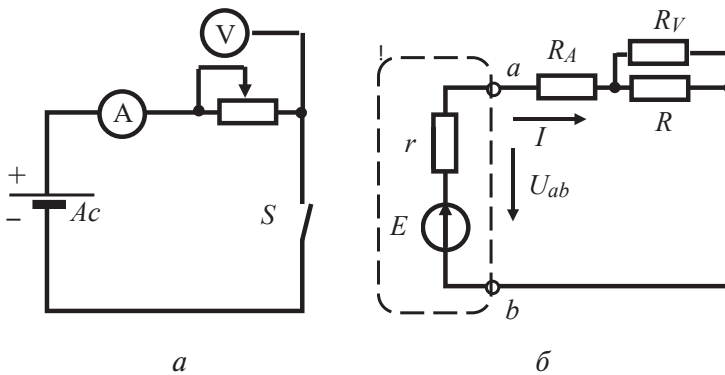


Рис. 1.1. Схемы электрической цепи постоянного тока

Принципиальная схема ЭЦ (виртуальная схема) — это графическое изображение реальной электрической цепи, на котором с помощью условных изображений показаны все электрические элементы, измерительные устройства и их соединения, как изображено на рис. 1.1, а. Элементы на схеме изображаются в виде условных графических обозначений, установленных в стандартах ЕСКД, и имеют буквенно-циф-

ровые позиционные обозначения. В учебном пособии виртуальные схемы используются в *компьютерном схемотехническом моделировании* и анализе ЭЦ в программной среде Multisim.

При анализе ЭЦ ее заменяют *схемой замещения* (рис. 1.1, б). *Схема замещения* ЭЦ — это графическое изображение, в котором реальные элементы ЭЦ заменены в рамках решаемой задачи *расчетно-математическими моделями* и исключены все вспомогательные элементы, не влияющие на результаты расчета (измерительные приборы, выключатели, разъемы, предохранители и т. п.). При этом реальные элементы заменяются их упрощенными моделями (идеализированными элементами). Процессы, которые имеют место внутри идеализированных элементов, не рассматриваются [2, с. 19].

Схема замещения (см. рис. 1.1, б) содержит *идеализированные активные* элементы (источники напряжения (ИН) и источники тока (ИТ)) и *пассивные* (резистивные (R)). Схема замещения ЭЦ непосредственно рассматривается как *информационная модель*. Если параметры всех элементов схемы замещения известны, то, применив законы электротехники, можно использовать *математическое моделирование и информационные технологии* для анализа электромагнитных процессов на ЭВМ. В учебном пособии расчетно-математические модели ЭЦ используются в компьютерном математическом моделировании ЭЦ в программной среде Mathcad.

Резистивной цепью называется ЭЦ, которая содержит источники постоянного напряжения и тока. Рассматриваются различные варианты соединения элементов ЭЦ: *последовательное, параллельное, смешанное*. При этом в структуре схемы замещения ЭЦ образуются *узловые точки (узлы)* и *замкнутые контуры*. Токи и напряжения резистивной цепи с источниками постоянного напряжения и тока будем обозначать прописными латинскими буквами I и U .

1.1.2. Величины, характеризующие состояние ЭЦ постоянного тока

Электрический ток проводимости (ток переноса) представляет направленное движение свободных носителей электрических зарядов под действием электрического поля. Прохождение электрического тока в цепи обусловлено потреблением энергии источника электрической энергии, которая передается движущимся зарядам [2, с. 15–16].

Постоянный электрический ток (принято обозначать I) это неизменное и однонаправленное движение заряженных частиц (зарядов) в соединительных проводниках и внешних выводах (зажимах) элементов ЭЦ. При постоянном токе в течение каждого одинакового промежутка времени Δt под действием электрического поля через какую-то поверхность (поперечное сечение проводника) при неизменных параметрах ЭЦ переносится одинаковое количество заряда Δq . Количество ток равен *отношению суммарного заряда*, перенесенного за промежуток времени длительности t через поперечное сечение участка ЭЦ: $I = q/t$. В системе единиц (СИ) единица измерения тока — *ампер (А)*.

Электрический ток является *скалярной алгебраической величиной*, каждое значение которой может быть выражено одним числом (действительным или комплексным). Знак величины тока зависит от *направления движения условно принятого положительного заряда* (противоположно направлению движения электронов). Если такое направление неизвестно, то для однозначного определения тока в любой ветви во внешней от источника электрической энергии цепи достаточно *произвольно* выбрать одно из двух возможных направлений, считать его положительным направлением и отметить стрелкой на схеме замещения ЭЦ (см. рис. 1.1, б). Токи в некоторых ветвях могут получиться отрицательными после расчета цепи по постоянному току. Это означает, что действительное направление тока в ветви противоположно выбранному произвольно.

Электродвижущая сила (ЭДС) — это характеристика источника электрической энергии. ЭДС может быть определена как *работа сторонних сил*, которая затрачивается на перемещение *единичного положительного заряда* внутри источника от зажима с меньшим потенциалом к зажиму с большим потенциалом. При этом сторонними силами создается электрическое поле с напряженностью E , которое действует на заряженные частицы, разделяя их таким образом, что на одном зажиме (положительном, обозначаемом знаком «+») источника скапливаются положительные заряды, а на другом (отрицательном, обозначаемом знаком «-») — отрицательные. Источником энергии для получения ЭДС могут быть различные физические явления, обусловленные неэлектромагнитными при макроскопическом рассмотрении процессами, например электрохимическими в гальванических элементах. Энергия процессов, вызывающих эти сторонние силы, преобразуется в электрическую энергию. Носители положительного заряда через

источник энергии перемещаются в направлении противоположном направлению действия сил электрического поля — от зажима источника с более низким потенциалом к зажиму с более высоким потенциалом.

ЭДС (обозначаемая E) — скалярная величина, направление которой совпадает с направлением перемещения положительных зарядов внутри источника, т. е. с направлением тока. Это направление указывают стрелкой в условном изображении источника энергии на схеме замещения (см. рис. 1.1, б).

ЭДС численно равна работе (энергии) W в джоулях (Дж), которая затрачивается электрическим полем на перемещение единичного заряда (1 Кл) из одной точки поля в другую. В системе единиц (СИ) единица измерения ЭДС — В (вольт):

$$[E] = [W]/[q] = \text{Дж/Кл} = (\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с})/(\text{А} \cdot \text{с}) = \text{В}.$$

Независимо от природы сторонних сил ЭДС источника энергии численно равна электрическому напряжению между зажимами источника при отсутствии в нем тока (режим *холостого хода*) [2, с. 18].

Потенциал электрический (φ_a) отдельной точки (a) равен работе по перемещению единичного положительного заряда (1 Кл) из данной точки в бесконечность, где нет электрического поля.

Напряженность (вектор) электрического поля (E), численно равна отношению силы, действующей на заряженную частицу к значению ее заряда. Из этого определения получают единицу напряженности в системе единиц (СИ):

$$[H]/[\text{Кл}] = (\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с/м})/(\text{А} \cdot \text{с}) = \text{В/м}.$$

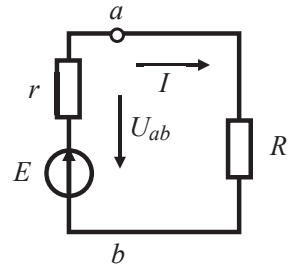
Разность потенциалов (электрическое напряжение) между двумя точками a и b всегда можно определить, если принять потенциал одной из точек (b) за точку отсчета, т. е. нуль.

Для характеристики электрического напряжения вдоль некоторого участка ЭЦ употребляют термин *падение напряжения*. Единицей напряжения U потенциала φ_a в системе единиц (СИ) является вольт (В) [2, с. 17].

Электрическое напряжение — это работа, затрачиваемая на то, чтобы перенести единицу заряда (1 Кл) из данной точки a в точку b поля с напряженностью E по произвольному пути ab ($\int_a^b E dl$).

Электрическое напряжение — это разность потенциалов точек a и b : $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ на участке ЭЦ между произвольными точками a и b , где отсутствует источник ЭДС.

Напряжение представляет собой скалярную величину. Положительное направление напряжения на участке U_{ab} где отсутствует источник ЭДС, совпадает с положительным направлением тока (I), как показано на схеме.



1.1.3. Электрическая энергия и мощность. Баланс мощности

Электрическую энергию источника можно определить, пользуясь понятием ЭДС. Для перемещения заряда q между полюсами источника требуется затратить энергию $W_{\text{н}} = Eq = EIt$.

Электрическую энергию, которая преобразуется (рассеивается) в нагрузке, можно определить, пользуясь понятием электрического напряжения на участке ЭЦ: $W_{\text{н}} = Uq = UIt$. Единицей измерения энергии в системе единиц (СИ) является джоуль (Дж).

Электрическая мощность численно равна энергии, преобразуемой в ЭЦ в единицу времени. Для ЭЦ постоянного тока мощность источника энергии $P_{\text{н}} = W_{\text{н}} / t = EI$, а для нагрузки — $P_{\text{н}} = W_{\text{н}} / t = UI$ [1, с. 37]. Мощность, развиваемая источником, зависит от взаимной направленности ЭДС и тока, протекающего через источник. Единицей измерения мощности в системе единиц (СИ) является ватт (Вт).

Баланс мощности. На основании закона сохранения энергии мощность, рассеиваемая источниками электрической энергии в электрической цепи, должна быть равна мощности, преобразуемой в другие виды энергии в нагрузке:

$$\sum \pm EI = \sum UI. \quad (1)$$

При составлении баланса мощности учитывается реальное направление тока в ЭЦ, полученное в результате расчета, а не условно положительное, принятое в начале решения. Мощность $P_{\text{н}}$ в ЭЦ постоянного тока всегда положительна.

При составлении баланса учитывают, что направление тока в источнике, полученное в результате расчета ЭЦ, может не совпадать с направлением действия ЭДС. Мощность, развиваемая источником электрической энергии в ЭЦ, в балансе мощности не учитывает потери мощности (тепловые) в источнике [1, с. 37].

1.1.4. Топологические понятия теории электрических цепей

При анализе электрических схем замещения пользуются следующими *топологическими элементами* [2, с. 21].

- а) *Ветвь* — участок ЭЦ, по всем связанным элементам которого протекает одинаковый электрический ток. Ветвь может состоять из одного или нескольких идеализированных элементов, включенных последовательно.
- б) *Соединение* — место соединения двух ветвей.
- в) *Узел* — место соединения трех и более ветвей ЭЦ между собой.
- г) *Контур* — любой замкнутый путь, проходящий по последовательности ветвей ЭЦ так, что ни одна ветвь и ни один узел не встречаются дважды. Один из узлов (соединений) одновременно является началом и концом пути, а остальные встречаются только один раз. Линейно-независимые контуры отличаются друг от друга хотя бы одной ветвью.

Сложность исследования процессов в ЭЦ во многом определяется количеством топологических элементов. В зависимости от их количества различают простые (одноконтурные, двух узловые) и сложные ЭЦ.

Упражнение 1. Провести топологический анализ схемы ЭЦ (рис. 1.2). Определить количество ветвей, узлов, соединений и независимых контуров.

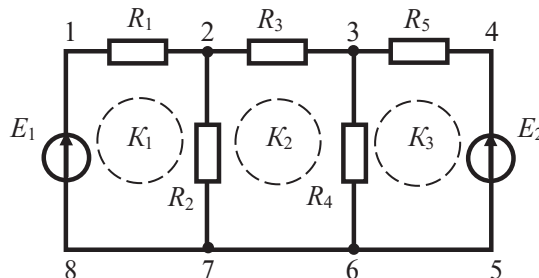


Рис. 1.2. Топологический анализ схемы ЭЦ

Решение

Количество ветвей	Количество узлов	Количество соединений	Количество контуров	Количество независимых контуров
$V = 5$	$Y = 3$	2	$K = 6$	$K_n = 3$

На схеме ЭЦ 5 ветвей (V): 1) точки 7–8–1–2; 2) точки 2–3; 3) точки 3–4–5–6; 4) точки 3–6; 5) точки 2–7.

На схеме ЭЦ 3 узла (Y): 1) точка 2; 2) точка 3; 3) точки 5, 6, 7, 8 имеют одинаковый электрический потенциал, поэтому их следует геометрически объединить в одну общую точку — узел.

Точки 1 и 4 — точки *соединений*, которые соединяют по два элемента.

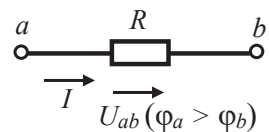
На схеме ЭЦ 6 контуров (K) (пунктиром показаны только три контура): 1) точки 1–2–7–8; 2) точки 2–3–6–7; 3) точки 3–4–5–6; 4) точки 1–2–3–6–7–8; 5) точки 2–3–4–5–6–7; 6) 1–2–3–4–5–6–7–8.

Количество независимых контуров K_n зависит от количества ветвей V и узлов Y в ЭЦ: $K_n = V - (Y - 1) = 5 - (3 - 1) = 3$. На рис. 1.2 показан один из наборов независимых контуров. Всего можно составить 20 вариантов сочетаний при выборе трех независимых контуров из шести. Вычисление данного соотношения используется в упражнении для проверки правильности определения количества *ветвей* и *узлов*.

1.2. Идеализированные элементы ЭЦ постоянного тока

1.2.1. Резистивный элемент

Резистивным элементом ЭЦ или *идеальным резистором* называют идеализированный *пассивный* элемент, в котором энергия электрического тока (электромагнитного поля), затрачиваемая на преодоление противодействия перемещению зарядов, преобразуется в другие виды энергии, например, в тепло [2, с. 22]. Идеальный резистор не может накапливать электрическую энергию. Резистор используется для ограничения тока в ЭЦ. Условное графическое изображение линейного резистора приведено на схеме замещения ЭЦ. В виде



стрелок указывают условно-положительные направления напряжения и тока. Рядом ставится условное буквенное изображение резистивного элемента — R .

Основной параметр резистора, который определяет меру преобразования электрической энергии в тепловую — его *электрическое сопротивление постоянному току* или просто *сопротивление* R . Скалярная величина R равна отношению постоянного напряжения между выводами ab пассивного двухполюсника к постоянному электрическому току в нем:

$$R = \frac{U_{ab}}{I}. \quad (2)$$

Единица электрического сопротивления в системе СИ — *ом* (Ом),

$$[R] = [U_R] / [I] = \text{В/А} = \text{Ом}.$$

Компонентное уравнение резистивного элемента — это зависимость электрического напряжения на выводах элемента от электрического тока в нем [5, с. 20]. Зависимость между напряжением на выводах элемента ЭЦ и током для линейного сопротивления подчиняется *закону Ома*, который может иметь вид

$$I_R = \frac{U_R}{R} \text{ или } U_R = RI_R. \quad (3)$$

В ряде случаев при исследовании ЭЦ удобно рассматривать в качестве отдельного идеализированного двухполюсного элемента *проводимость резистора*, имеющего такие же свойства и условное графическое изображение, как сопротивление и буквенное обозначение G . Закон Ома (3) для проводимости G примет вид

$$I_R = GU_R \text{ или } U_R = \frac{I_R}{G}, \text{ где } G = \frac{1}{R} \text{ (проводимость резистора)}. \quad (4)$$

Единица проводимости в системе СИ — *сиенс* (См):

$$[G] = \text{См}.$$

Мощность преобразования энергии в резистивном элементе при выбранных направлениях тока и напряжения может быть выражена через сопротивление R и проводимость G :

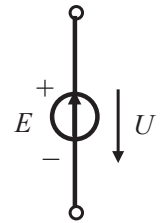
$$P_R = RI_R^2 = U_R I_R = GU_R^2. \quad (5)$$

В любой момент времени резистивный элемент может только потреблять энергию от источников и ни в какие моменты времени он не может отдавать электрическую энергию другим элементам цепи. Электрическая энергия, поступающая в резистивный элемент, и мощность ее преобразования в другие виды энергии (например, в тепловую) всегда положительны. В системе СИ единица мощности — *ватт* (Вт) ($[P] = \text{Вт}$).

1.2.2. Источник электрического напряжения ЭЦ постоянного тока

Источник электрического напряжения (ИН) — это источник электрической энергии, который характеризуется электродвижущей силой E и внутренним электрическим сопротивлением r [2, с. 28].

Идеальный источник напряжения (источник ЭДС) представляет собой активный элемент ЭЦ, напряжение на зажимах (на выходе) которого характеризуется ЭДС E и не зависит от тока через эти зажимы. Внутреннее сопротивление источника ЭДС полагается равным нулю: $r_{\text{и}} = 0$. Это имеет место, если внутренне сопротивление ИН $r_{\text{и}}$



много меньше сопротивления внешней цепи и им можно пренебречь. На схеме замещения элемент ЭЦ источник ЭДС изображается в виде кружка со стрелкой, указывающей направление действия ЭДС E , т. е. направление возрастания электрического потенциала как показано на рис. 1.3. Иногда к стрелке добавляют знаки $\langle + \rangle$ и $\langle - \rangle$ или только $\langle + \rangle$. Напряжение U на внешних зажимах направлено от зажима с более высоким потенциалом $\langle + \rangle$ к зажиму с меньшим потенциалом $\langle - \rangle$. При этом выполняется равенство $U = E$.

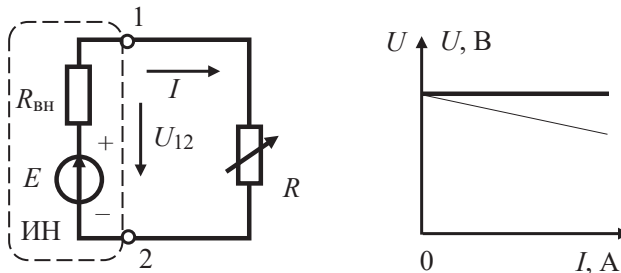


Рис. 1.3. Источник постоянного напряжения

Ток I , который может протекать в источнике ЭДС, определяется внешней цепью и зависит как от действия самого источника, так и от действия других источников энергии, которые действуют во внешней цепи. Направление тока в источнике ЭДС должно совпадать с направлением действия ЭДС, т. е. противоположно напряжению на зажимах.

Принцип работы ИН постоянного тока рассмотрим на примере простейшей ЭЦ, состоящей из ИН с ЭДС E и резистивного элемента приемника (нагрузки) R_H (сопротивлением проводов пренебрегаем). На схеме замещения (рис. 1.4, а) ИН представлен в виде двух элементов: источника ЭДС E , внутреннее сопротивление r которого равно нулю, и последовательно соединенного с ним резистора, сопротивление которого равно r .

Внешней характеристикой источника энергии называется вольт-амперная характеристика (ВАХ) напряжения на его зажимах от тока через источник, т. е. $U_{12} = f(I)$ [2, с. 29]. Внешняя характеристика источника ЭДС представляет собой горизонтальную линию, параллельную оси токов, т. к. внутренне сопротивление r источника ЭДС равно нулю (линия 3 на рис. 1.4, б). Электродвижущая сила E численно равна напряжению U_{12} между положительным 1 и отрицательным 2 выводами источника энергии при отсутствии в нем тока ($R_H = \infty$, $I_H = 0$), т. е. в режиме холостого хода (ХХ): $E = U_{12}$ (точка b на рис. 1.4, б).

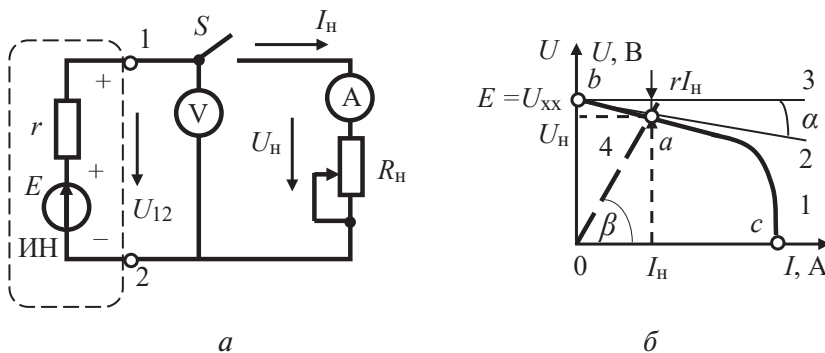


Рис. 1.4. Схема замещения ИН (а) и его внешние характеристики (б)

При подключении к выводам 1 и 2 нагрузки в замкнутом контуре ЭЦ возникает ток I_H , при этом напряжение U_{12} уже не будет равно

ЭДС E вследствие падения напряжения на внутреннем сопротивлении r ИН. Уравнение внешней характеристики ИН имеет вид

$$U_{12} = U_n = E - rI_n. \quad (6)$$

Согласно (6) при увеличении тока в ЭЦ от нуля до номинального значения $I = I_n$ напряжение на выводах ИН убывает по линейному закону под углом наклона α (кривая 2, рис. 1.4, б). Тангенс угла наклона ВАХ ($\operatorname{tg} \alpha$) соответствует внутреннему сопротивлению r ИН. При дальнейшем увеличении тока (при уменьшении сопротивления R_n) эта пропорциональность нарушается (кривая 1, на рис. 1.4, б).

Падение напряжения U_n на сопротивлении нагрузки R_n под действием тока I_n подчиняется закону Ома (3): $U_n = R_n I_n$. Решая совместно уравнение нагрузки (3) и уравнение внешней характеристики реального ИН (6) получим выражение для определения тока в ЭЦ при заданном значении сопротивления нагрузки R_n :

$$I_n = \frac{E}{(r + R_n)}. \quad (7)$$

Графически это решение соответствует точке a пересечения внешней характеристики ИН (линия 2, рис. 1.4, б) с ВАХ нагрузки (линия 4, рис. 1.4, б). При изменении сопротивления нагрузки R_n будет изменяться угол β ВАХ и точка a будет скользить по внешней характеристике ИН, определяя режим работы ЭЦ.

При значении величины сопротивления R_n , равном нулю, напряжение на выводах ИН U_{12} равно нулю (рабочая точка c на рис. 1.4, б) — это *режим короткого замыкания*. В режиме короткого замыкания ток в ЭЦ стремится к значению $I_k = E / r$ и ограничивается только внутренним сопротивлением r ИН. Такой режим работы ИН называют *аварийным* вследствие значительного возрастания тока в ЭЦ. Этот режим является недопустимым.

Если режим работы ЭЦ $r \ll R_n$ и $U_r = Ir \ll U_{12}$, т. е. ИН работает в режиме, близком к режиму ХХ, то такой ИН называют *источником* ЭДС с внешней характеристикой $U_{12} = E$ прямой, параллельной оси абсцисс (кривая 3, рис. 1.4, б).

На всем множестве точек внешней характеристики ИН выделяют два режима работы ЭЦ: *номинальный* и *согласованный*. При *номинальном*

режиме работы элементы ЭЦ работают в условиях, при которых параметры ЭЦ (ток, напряжение и мощность) соответствуют проектным.

Согласованный режим — это режим, при котором ИН отдает в нагрузку максимальную мощность. Максимум мощности достигается при $R_{\text{н}} = r$, что соответствует току нагрузки, равном половине тока короткого замыкания $I_{\text{н}} = I_{\text{к}} / 2$. В маломощных (радиоэлектронных) устройствах согласованный режим работы является основным, т. к. обеспечивает в приемнике сигнал максимальной мощности. КПД ЭЦ, равное отношению мощности, рассеиваемой в нагрузке, к мощности, рассеиваемой во всей цепи в согласованном режиме, составляет 0,5. Столь низкий КПД недопустим для силовых ЭЦ.

Упражнение 2. Дана ЭЦ, в которой к ИН с ЭДС E и с внутренним сопротивлением r через ключ S подключается переменное сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$, как показано на рис. 1.5, *а*. При разомкнутом ключе S показание вольтметра (V) равно $U_{12} = 2,1$ В. Сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = 2$ Ом. При замкнутом ключе S показание амперметра (A) равно $I_{\text{н1}} = 1$ А.

1. Определить ЭДС E и внутреннее сопротивление r источника напряжения.
2. Рассчитать значения $U_{\text{н}}$ для следующих значений сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$: 40; 20; 10; 5; 2; 1; 0,5 Ом.
3. Построить график внешней характеристики ИН $U_{12} = f(I_{\text{н}})$ при изменении сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$ от 40 до 0,5 Ом (рис. 1.5, *б*).
4. Проанализировать влияние внутреннего сопротивления источника r на наклон его внешней характеристики.
5. Определить значения номинальных параметров (тока $I_{\text{н}}$, напряжения $U_{\text{н}}$ и мощности $P_{\text{н}}$) для двух *номинальных режимов* работы ЭЦ: $R_{\text{н1}} = 2$ Ом (рабочая точка a_1 , рис. 1.5, *б*); $R_{\text{н2}} = 2$ Ом (рабочая точка a_2 , рис. 1.5, *б*).
6. Определить значения параметров (тока $I_{\text{н}}$, напряжения $U_{\text{н}}$, тока короткого замыкания $I_{\text{к}}$ и мощности $P_{\text{н}}$ для *согласованного режима* работы ЭЦ.
7. Определить потери мощности в источнике и КПД ЭЦ для режимов работы ЭЦ: номинальных (п. 5) и согласованного (п. 6).
8. Составить баланс мощностей.

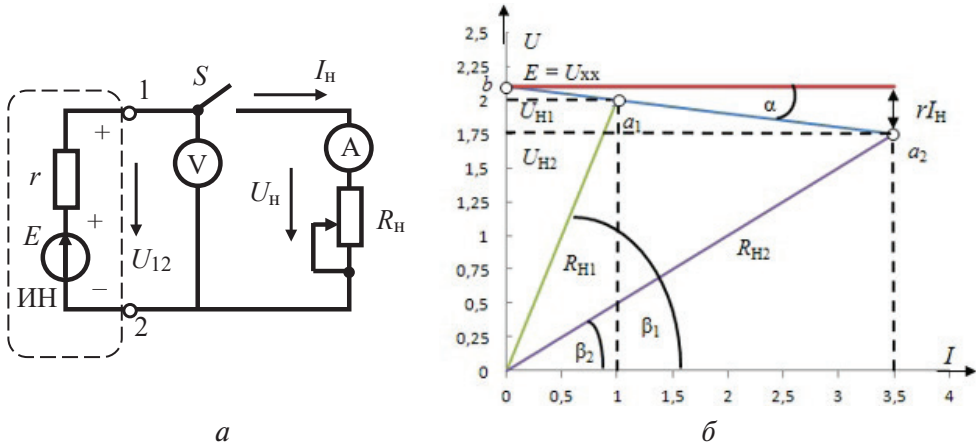


Рис. 1.5. Внешние характеристики идеализированного источника напряжения

Упражнение 2 предназначено для закрепления на практике теоретических сведений по разделу 1.2.2 «Источник электрического напряжения ЭЦ постоянного тока». В дальнейшем вычисления будут выполнены в среде пакета Mathcad (см. пример 2.8).

1.2.3. Идеальный источник постоянного тока

Идеальный источник тока — это такой источник, электрическая энергия, электрический ток которого не зависят от напряжения на его выводах [2, с. 32]. Идеальный источник тока (ИТ) обеспечивает постоянное значение тока J , отдаваемого им в цепь независимо от величины и направления приложенного к нему напряжения (рис. 1.6). Это направление определяется только после решения задачи по расчету всех токов и напряжений элементов ЭЦ.

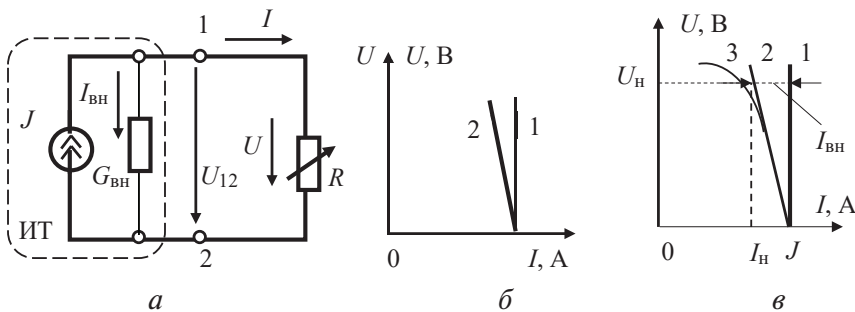


Рис. 1.6. Источник постоянного тока

ИТ изображают на схеме в виде кружка с разорванной двойной стрелкой (рис. 1.6). Разрыв условно указывает на то, что внутреннее сопротивление ИТ следует полагать бесконечно большим $r_j = \infty$. Это условие обеспечивается, если сопротивление элементов внешней ЭЦ много меньше, чем внутреннее сопротивление ИТ. Стрелка внутри ИТ указывает на направление движения положительных зарядов (тока) в данный момент времени, как и для ИН.

Мощность, которую отдает (или получает) ИТ, определяется формулой $p = \pm Ju_j$, где u_j — напряжение на источнике тока.

Реальный источник тока имеет некоторые внутренние потери, которые учитываются в цепи. Реальный источник тока может быть представлен ИТ с бесконечно большим сопротивлением с заданным током и параллельно с ним соединенного резистора с внутренней проводимостью $G_{\text{вн}}$, равной $1/R_{\text{вн}}$ (рис. 1.6, б). К зажимам ИТ подключается приемник. Проводимость приемника $G = 1/R$, причем $G_{\text{вн}} \ll G$, т. е. $R_{\text{вн}} \gg R$ (обратно по отношению к ИН). Пренебрегая сопротивлением проводов и принимая, что $U_{12} = U$ можно записать выражение $J = I_{\text{вн}} + I = G_{\text{вн}} U + I$, где $U = RI$ — напряжение на зажимах приемника. Преобразовав выражение, получим уравнение *внешней характеристики реального ИТ*, $I = f(U)$ имеет вид

$$I = J - I_{\text{вн}} = J - G_{\text{вн}} U.$$

При подключении к зажимам ИТ сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$ в замкнутом контуре возникает ток I . При увеличении сопротивления $R_{\text{вн}}$, начиная от *режима короткого замыкания* ($R_{\text{вн}} = 0, I = J$), ток I изменяется незначительно практически по линейному закону от значения J до номинального значения $I_{\text{н}}$ (кривая 2, рис. 1.6, в). При этом напряжение на зажимах ИТ ($U = IR_{\text{вн}}$) изменяется в широких пределах (от нулевого до номинального значения $U_{\text{н}}$).

Если $G_{\text{вн}} \ll G$, т. е. $R_{\text{вн}} \gg R$, то при одном и том же напряжении $U = U_{12}$ ток $I_{\text{вн}} \ll J$. При этом источник тока находится в режиме, близком к *режиму короткого замыкания*. Значением тока $I_{\text{вн}}$ можно пренебречь и ветвь с элементом $G_{\text{вн}}$ можно из схемы исключить (использовать идеальный ИТ, кривая 1).

Если $G_{\text{вн}} \gg G$, т. е. $R_{\text{вн}} \ll R$, то падение напряжения на $R_{\text{вн}}$ возрастает. При этом ток I изменяется по закону, значительно отличающемуся от линейного (кривая 3, рис. 1.6, в). Для идеального ИТ исключается режим холостого хода ($I = 0$).

1.2.4. Взаимные преобразования источников тока и напряжения

В зависимости от выбранного метода расчета ЭЦ источник электрической энергии может быть представлен в схеме замещения в виде источника напряжения (ИН) или в виде реального ИТ, причем в ходе расчета возникает необходимость эквивалентной замены ИТ источником напряжения и обратно. По отношению к внешней нагрузке реальный источник тока и источник напряжения действуют одинаково и это делает возможным их эквивалентную замену. При этом ток в приемнике и напряжение на его зажимах должны остаться неизменными [2, с. 34].

Уравнение внешней характеристики ИТ $I = J - UG_{\text{вн}}$ преобразуется в уравнение внешней характеристики источника напряжения $U = E - IR_{\text{вн}}$. Поделить все члены внешней характеристики ИТ на проводимость $G_{\text{вн}}$: $I / G_{\text{вн}} = J / G_{\text{вн}} - U$. В результате преобразования получим

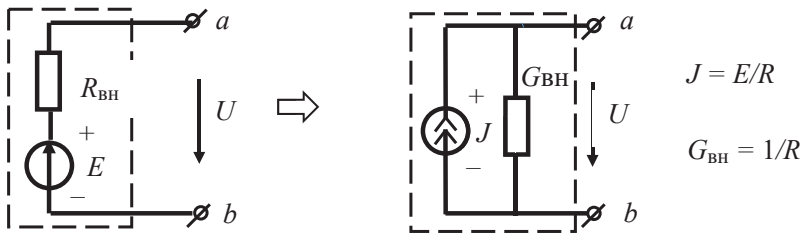
$$U = \frac{J}{G_{\text{вн}}} - \frac{I}{G_{\text{вн}}}.$$

Сравнивая последнее соотношение с внешней характеристикой ИН и учитывая, что ток и напряжение в нагрузке должны быть одинаковы для обеих схем, получим связь параметров ИН с ИТ:

$$R_{\text{вн}} = \frac{1}{G_{\text{вн}}}; \quad E = \frac{J}{G_{\text{вн}}}.$$

Таким образом, зная параметры J и $G_{\text{вн}}$ источника тока, можно найти внутреннее сопротивление $R_{\text{вн}}$ и ЭДС E источника напряжения. Предлагается самостоятельно получить соотношения для перехода от ИН к ИТ.

При замене ИН на ИТ источники эквивалентны, если выполняются условия, как показано ниже.



Упражнение 3. Дана схема замещения ЭЦ, вид которой представлен на схеме. Преобразовать ИН с параметрами $E = 50$ В, $R_{\text{BH}} = 0,5$ Ом в ИТ (найти J и G_{BH}). Определить напряжение U на зажимах приемника с сопротивлением $R = 9,5$ Ом.

Решение: $G_{\text{BH}} = 1 / R_{\text{BH}} = 2$ См; $J = E / G_{\text{BH}} = 100$ А;

$R_{\text{экв}} = R_{\text{BH}} + R = 10$ Ом; $I = E / R_{\text{экв}} = 5$ А; $U = IR = 47,5$ В.

Внешняя характеристика ИН:

$$U = E - IR_{\text{BH}} = 50 - 0,5 \cdot 5 = 47,5 \text{ В};$$

Внешняя характеристика ИТ:

$$U = J / G_{\text{BH}} - I / G_{\text{BH}} = 100/2 - 5/2 = 47,5.$$

Глава 2

Моделирование характеристик и параметров ЭЦ

2.1. Моделирование характеристик и параметров ЭЦ в среде программы Mathcad

2.1.1. Интерфейс пользователя. Инструментальные средства для моделирования

На компьютере пользователя необходимо установить приложение Mathcad 15 (Mathcad). После запуска программы на экране дисплея появится основное окно (рис. 2.1), вид которого сходен с другими приложениями Windows.

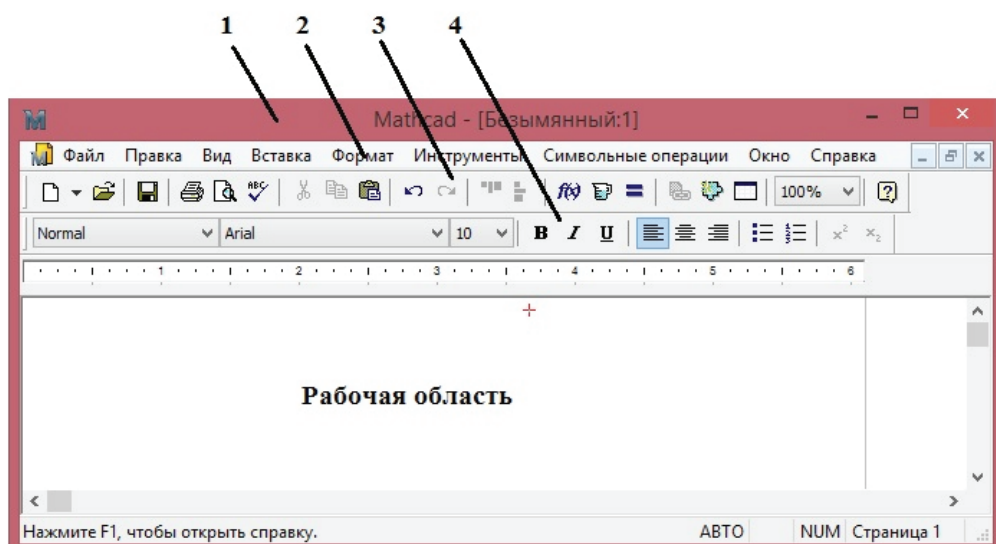
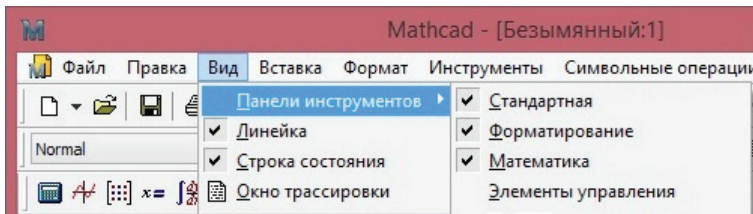


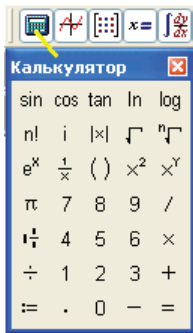
Рис. 2.1. Окно приложения Mathcad

В окне приложения расположены: заголовок окна (1), строка меню (2), панели инструментов (стандартная (3) и форматирования (4)), рабочий лист или рабочая область документа (worksheet). В нижней части окна находится строка состояния. При запуске программы Mathcad автоматически загружается новый документ «Безымянный 1».

В строке меню рабочего окна программы выбрать меню **Вид**, подменю **Панель инструментов**, установить курсор в начале строки **Математика**, как показано ниже. Наличие «птички» в строке **Математика** вызывает появление панели инструментов с кнопками-пиктограммами панелей **Калькулятор**, **График**, **Вектор и матрица**, **Вычисление**, **Математический анализ** и др. Панель **Математика** следует расположить в рабочем окне постоянно, как показано ниже.



Чтобы вызвать панель инструментов (например, **Калькулятор**), нужно щелкнуть по одноименной кнопке-пиктограмме на панели **Математика**.



В рабочей области окна программы Mathcad вводят информацию: исходные данные, формулы вычислений и текстовые комментарии.

Документ Mathcad имеет отличительные особенности: должны соблюдаться определенный порядок, размещение, символика и стиль математических выражений. Mathcad читает алгоритмы в рабочей области *слева направо и сверху вниз*.

2.1.2. Создание нового документа

При запуске Mathcad автоматически загружается *Пустой документ* (Безымянный). Чтобы открыть еще один пустой лист в ходе работы, можно воспользоваться кнопкой **Создать** панели **Стандартные**

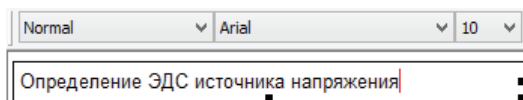
и система предложит выбрать наиболее подходящий *встроенный шаблон* из раскрывающегося списка, Если предполагается создавать рабочий документ Mathcad в обычном режиме, то можно выделить строку **Normal** (Обычный) или **Пустой документ** (оба варианта идентичны). Если нажать кнопку **Создать**, не обращаясь к раскрывающемуся списку, или команду **Создать** из меню **Файл**, то документ будет создан в стандартном шаблоне **Normal**.

Шаблон — это заготовка документа с сохраненными настройками, элементами интерфейса и способами записи выражений. Создав однажды шаблон оформления отчета по лабораторной работе, в дальнейшем при выполнении аналогичных отчетов можно будет сэкономить время.

Создаваемый документ необходимо сохранить в папке на жестком диске в файле с расширением **.xmcd**. Для хранения файла рекомендуется использовать флэш-память USB. Создать папку с номером группы (например, ЭН190018). Открыть меню **Файл** и выбрать команду **Сохранить**. В диалоговом окне **Сохранение документа** в текстовом поле **Имя файла** ввести имя «Упр№_NNN», где *NNN* — три последних цифры студенческого билета. В поле необходимо указать расположение файла (путь к файлу) на жестком диске.

2.1.3. Ввод и форматирование текстовых комментариев и заголовков

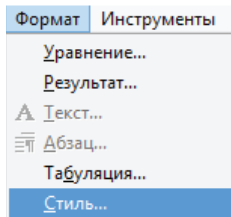
В документе листинга программы Mathcad будет содержаться много комментариев и заголовков, поэтому более эффективен способ их ввода в заранее созданную «текстовую область» с определенным используемым стилем (форматированием) и ее границами. Текстовая область может быть создана сочетанием клавиш <Shift>+<”> или командой **Регион текста** меню **Вставка**.



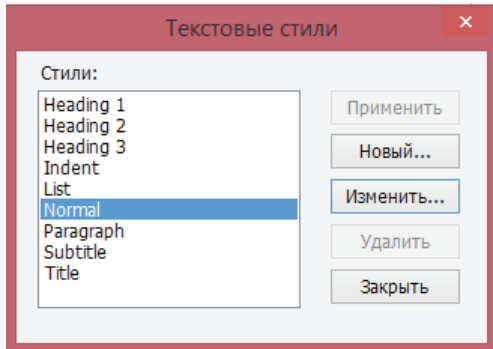
По умолчанию текст в **Текстовой области** набирается в Mathcad в стиле **Обычный (Normal)**. Этот стиль характеризуется использовани-

ем шрифта **Arial** размера 10 пт., отсутствием отступов и абзацев, выравниванием слева.

Используемый размер шрифта оказывается слишком мал, чтобы использовать его при распечатке документов. Поэтому шрифт текстовых комментариев и заголовков стремятся увеличить до 12 или 14 пунктов.



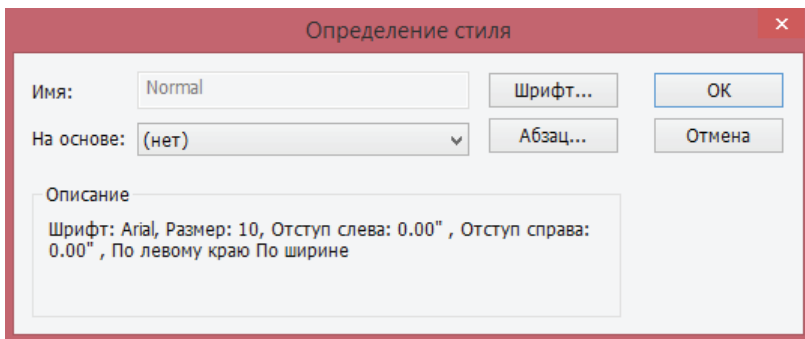
Для оформления текстовых комментариев изменить настройки стиля **Обычный** по умолчанию и установить **Размер шрифта 12 пт., Шрифт Arial Unicode MS**. Для изменения настроек стиля **Normal (Обычный)** нужно открыть список меню **Формат** и выбрать строку **Стиль**. В диалоговом окне **Текстовые стили** размещен список встроенных стилей.



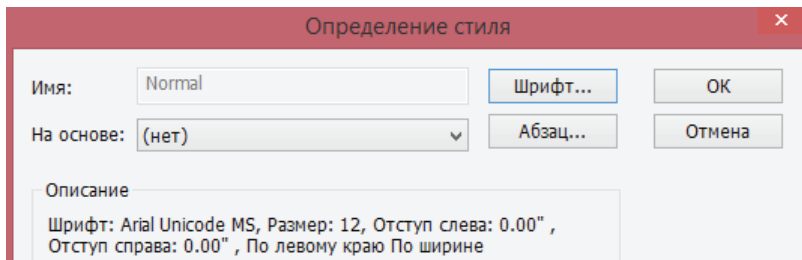
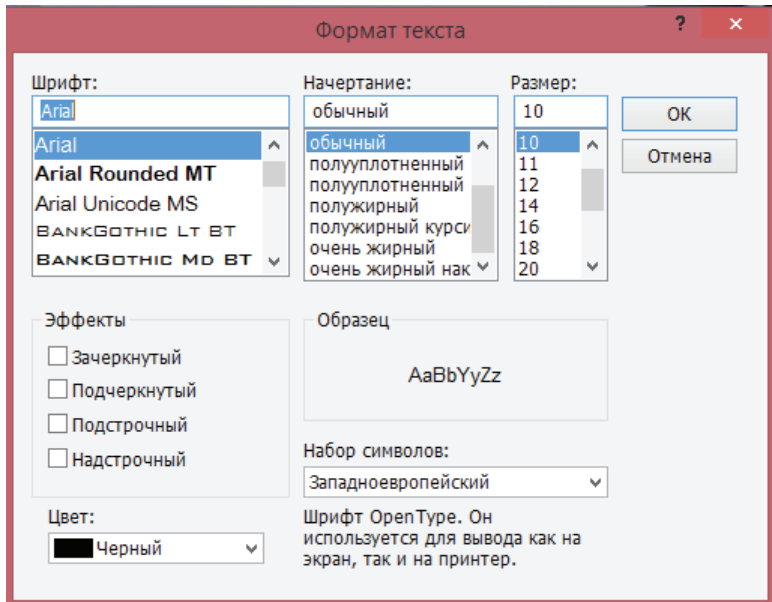
Установить курсор на стиле **Normal**. и щелкнуть на кнопке **Изменить**.

Откроется окно **Определение стиля**. В поле **Имя** указано **Normal**. Описание параметров стиля **Normal** по умолчанию приводится в нижней части окна.

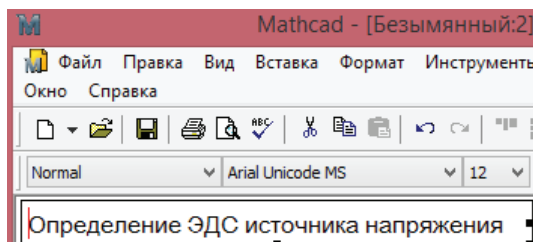
Щелкнуть на кнопке **Шрифт**. Откроется окно **Формат текста**.



В окне **Формат текста** установить **Размер 12** и **Шрифт** (гарнитуру) **Arial Unicode MS**. Параметр «начертание **обычный**», установленный в стиле **Normal** «по умолчанию», оставить без изменения. Щелкнуть на кнопке «ОК».



Вновь откроется окно **Определение стиля**. В разделе **Описание** будут отражены измененные параметры стиля **Normal**.

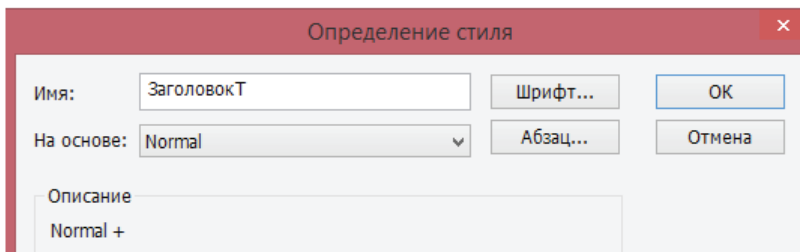


Щелкнуть на кнопке «OK». Панель **Форматирование**, отвечающая за форматирование текста, будет отображать измененные настройки стиля **Normal**.

Форматирование заголовков

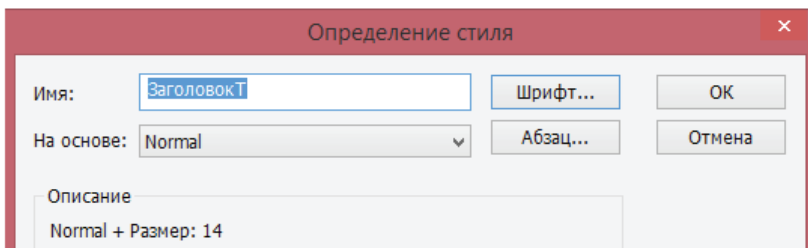
Для форматирования заголовков в тексте комментариев создадим на основе стиля **Normal** пользовательский стиль **ЗаголовокТ** с настройками параметров шрифта: **Шрифт: Arial Unicode MS, Размер: 14** пт. Следует учитывать, что параметры шрифта стиля **Normal** ранее были изменены (**Шрифт: Arial Unicode MS, Размер: 12** пт.). Стиль **ЗаголовокТ** наследует параметры шрифта стиля **Normal**, так как создается на его основе, и требуется лишь изменить размер шрифта (**ЗаголовокТ: Normal + Размер 14**).

Для создания пользовательского стиля **ЗаголовокТ** нужно открыть список меню **Формат** и выбрать строку **Стиль**. В диалоговом окне **Текстовые стили** установить курсор на стиле **Normal** и щелкнуть на кнопке **Новый**. В открывшемся окне **Определение стиля** в поле **Имя** ввести **ЗаголовокТ**, а в поле **На основе** открыть список стилей, щелкнув на стрелке, и выбрать стиль **Normal**.



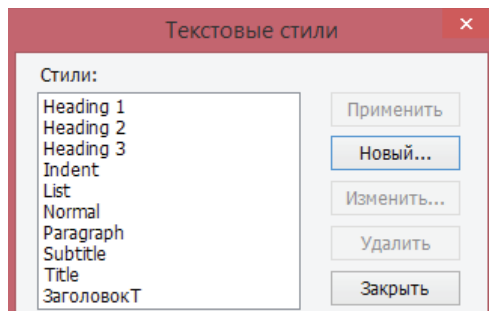
Щелкнуть на кнопке **Шрифт**. В открывшемся окне **Формат текста** установить **Размер 14**. **Шрифт** (гарнитуру) **Arial Unicode MS** и начертание **Обычный**, установленные в стиле **Normal**, оставить без изменения.

Закреть окно **Формат текста**, щелкнув на кнопке «ОК». Откроется окно **Определение стиля**, вид которого приведен ниже.



Щелкнуть на кнопке «ОК». Откроется окно **Текстовые стили**, в списке стилей которого появился новый пользовательский стиль **ЗаголовокТ**. Щелкнуть на кнопке **Заккрыть**.

Действия при назначении стиля **ЗаголовокТ** для вновь создаваемой текстовой области заголовка:



1. Создать текстовую область для заголовка текста совместным нажатием клавиш $\langle \text{Shift} \rangle + \langle \text{<} \rangle$ или командой **Регион текста** меню **Вставка**.
2. Командой **Стиль** меню **Формат** открыть окно **Текстовые стили** и в списке **Стили** выбрать предопределенный стиль **ЗаголовокТ**. Щелкнуть на кнопке **Заккрыть**.
3. Панель **Форматирование** будет отображать настройки стиля **ЗаголовокТ**.

Вставка объектов MS Word в Mathcad

Средства форматирования текста, встроенные в Mathcad, не так совершенны, как возможности текстового процессора MS Word:

- Не поддерживается *выравнивание по ширине* (строки имеют равную длину) — только по левому и правому краю, а также по центру.
- Невозможно полноценно вставить рисунки в документ Mathcad.
- Не поддерживается проверка орфографии русского текста.

В тех случаях, когда необходимо ввести большой по объему качественно отформатированный текст, рекомендуется отказаться от его набора в Mathcad, а использовать реализованную в MS Windows технологию OLE (*Связывание и внедрение объектов*). Данная технология позволяет вставить фрагмент текста MS Word, скопированный в буфер обмена Windows, в Рабочий лист Mathcad или, наоборот, вставить скопированный фрагмент документа Mathcad в MS Word (рис. 2.2).

С объектами MS Word можно работать в окне MS Word, открытом непосредственно среде Mathcad. При этом будут сохранены все настройки параметров форматирования текста в среде MS Word.

Текст объектов MS Word не может содержать вычисляемых формул.

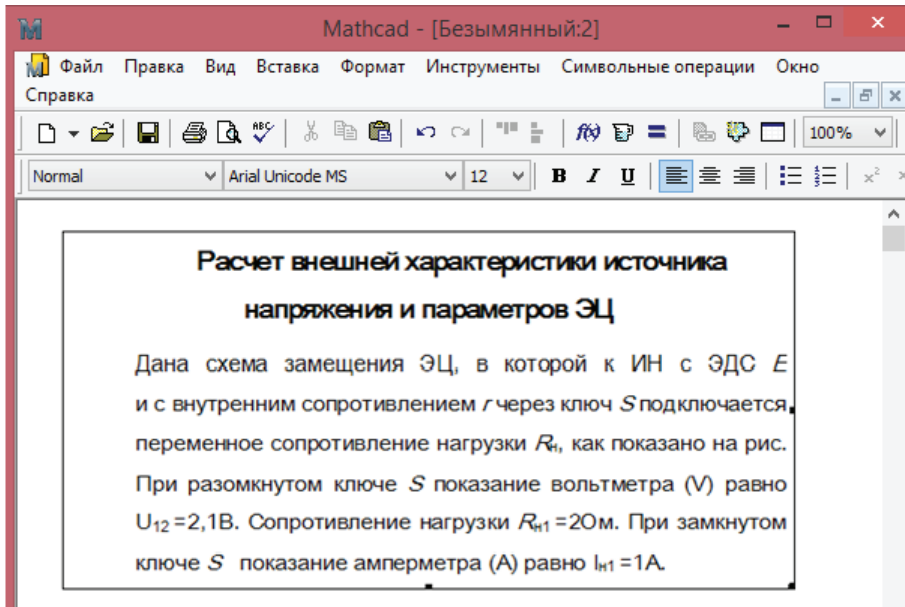


Рис. 2.2. Открытие документа MS Word в среде программы Mathcad

Чтобы вставить изменения в текст объекта Word, достаточно дважды щелкнуть на нем мышью. Непосредственно в окне Mathcad откроется Рабочее окно MS Word, как и при открытии файла (*.docx).

2.1.4. Определение переменных

Эффективность применения Mathcad при многовариантных вычислениях выражения с различными значениями величин связана с возможностью определения переменных. Переменная может быть определена как число, матрица либо строка.

Определение переменной

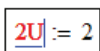
как численное значение с единицей измерения

Чтобы некоторой переменной присвоить определенное численное значение, нужно выполнить следующие действия.

$$E := 2.1$$

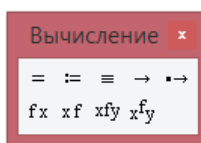
1. Набрать на клавиатуре имя переменной E . Имя может состоять из любых символов, включая строчные и прописные буквы, цифры от 0 до 9. Имя переменной может содержать нижний текстовый индекс. Имена переменных задаются с учетом следующих основных ограничений.

- Имя переменной может начинаться с символов «подчеркивание», «процент», но не может начинаться с цифры.



Здесь необходимо указать имя.

- Имя переменной не должно совпадать с именами функций. Это приведет к переопределению функции.
- Все буквы должны иметь одинаковый шрифт.



2. Ввести оператор присваивания «:=» одним из следующих способов: нажатием клавиши «:=» или нажатием кнопки **Определение** на одной из двух панелей: **Калькулятор** или **Вычисление**. Справа от оператора присваивания появится пустой местозаполнитель (черный маркер) с линией ввода.




3. Ввести численное значение переменной (2.1). В формате десятичного числа целая часть отделяется от дробной части символом «десятичная точка».

Задание имен переменных с нижним текстовым индексом

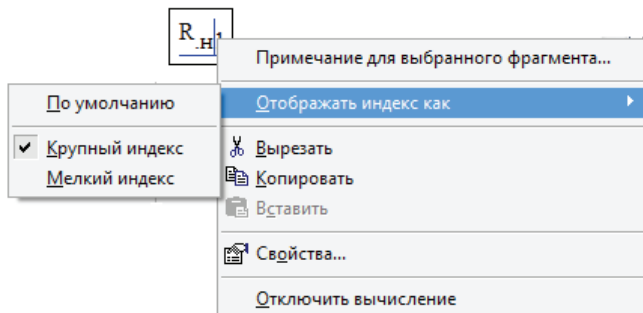
В Mathcad существуют два типа индексов *текстовые* и *матричные*, которые отличаются по своим функциям.

В алгоритме «Моделирование внешней характеристики источника напряжения» (п. 2.1.9) используются имена переменных с нижним индексом ($R_{н1}, I_{н1}, U_{12}$) и имена массивов ($R_{н}, I_{н}, U_{н}, U_{xx}$).

Для задания переменных величины с нижним индексом используются *текстовые индексы*, которые являются частью имени переменной и не несут математического смысла элемента некоторого массива в этих именах. Для задания текстового индекса следует установить *курсор ввода* в конце слова и нажать на клавиатуре клавишу <.> («точ-

ка»). Курсор ввода опустится на полстроки вниз , появится «точка» в изображении переменной и можно продолжить набирать текст индекса. После завершения набора индекса R_{H1} символ «точка» исчезнет.

Существуют два варианта отображения текстового индекса *крупный* и *мелкий*. Чтобы выбрать один из вариантов, следует поместить курсор мыши на тексте индекса и щелкнуть правой кнопкой мыши.

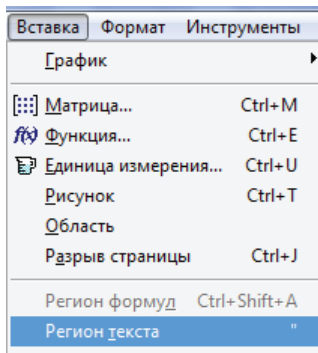


В контекстном меню выбрать команду **Отобразить индекс как**. В появившемся списке нужно определиться между двумя типами отображения: **Крупный** индекс и **Мелкий** индекс. Параметр **Крупный** индекс определен по умолчанию. Положение строчных букв и цифр индекса определяется уровнем нижней границы текста переменной, к которой он относится.

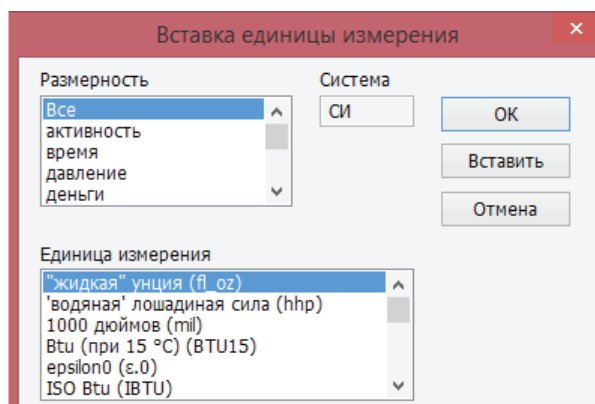
Вставка единицы измерения

В формулах определения численного значения величин сопротивления, тока, напряжения, мощности все переменные имеют размерность. Mathcad не воспринимает единицы измерения, введенные с клавиатуры. Для того чтобы присвоить переменной какое-либо значение с соответствующей единицей измерения, следует после записи значения открыть диалоговое окно **Вставка единицы измерения**, нажав комбинацию клавиш $\langle \text{Ctrl} \rangle + \langle U \rangle$, или с помощью команды **Единица измерения** меню **Вставка**.

В окне **Вставка единицы измерения** в меню **Размерность** и **Единица измерения** выбрать



строки, соответствующие размерности и единице измерения значения переменной.



Например, чтобы вставить единицу измерения «ом (Ω)» в выражение в меню **Размерность**, следует выбрать строку «*электрическое сопротивление*», а в меню **Единица измерения** — строку «ом (Ω)» $R_{H1} := 2\Omega$. Нажать кнопку **Вставить**. В результате оператор присваивания примет вид (значение 2) и единица измерения Ω разделены символом «точка» $R_{H1} := 2.\Omega$ (знак умножения «*»). Нажать на кнопку **Закреть**. Завершить задание размерности, щелкнув мышью на Рабочем поле, символ «точка» исчезнет.

2.1.5. Ввод и редактирование математических выражений

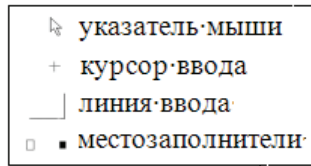
Переменная может быть определена через численное значение некоторого алгебраического выражения.

Математические выражения и текст вводятся в Mathcad с помощью *формульного редактора*. Интерфейс формульного редактора включает следующие *элементы редактирования формул*.

Указатель мыши — следует за движением мыши и играет обычную для приложений Windows роль.

Курсор — находится внутри документа Mathcad в одном из трех видов:

- *курсор ввода* — крестик красного цвета, который отмечает пустое место в документе, куда можно вводить текст или математическое выражение;



- *линия ввода* — горизонтальная и вертикальная линии синего цвета, выделяющая определенную часть в формуле;
- *линия ввода текста* — красная вертикальная линия, аналог линии ввода для текстовых областей.

Местозаполнители — появляются внутри незавершенных формул в местах, которые должны быть заполнены символом или оператором:

- местозаполнитель оператора — прямоугольная рамка;
- местозаполнитель символа — черный прямоугольник.

Ввести математическое выражение можно в любое незаполненное место рабочей области документа Mathcad. Продемонстрируем последовательность действий на примере ввода выражения (рис. 2.3).

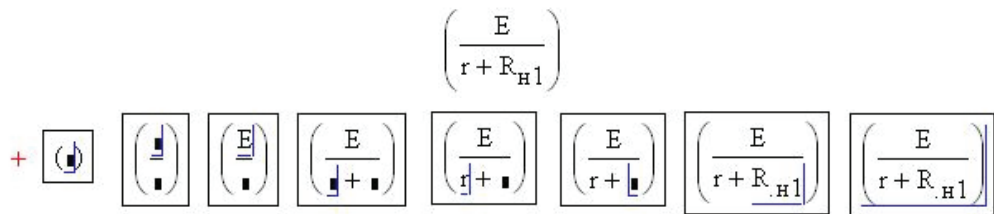


Рис. 2.3. Последовательность действий при вводе математического выражения

Для ввода нужно щелкнуть мышью в соответствующей точке документа, чтобы установить курсор ввода («крестик») и начать вводить формулу, последовательно нажимая клавиши на клавиатуре или кнопки на панели **Калькулятор**

1. Нажать кнопку «()» на панели **Калькулятор** — в этом месте появится область, содержащая символы «открывающая и закрывающая круглые скобки», между которыми расположен пустой местозаполнитель — черный маркер, который выделен линией ввода (см. рис. 2.3).

2. Ввести оператор **Деление**, нажав кнопку «/» на панели **Калькулятор** — в формуле появятся два пустых местозаполнителя для введения числителя и знаменателя дроби. Местозаполнитель числителя выделен линией ввода.

3. После ввода символа E в числителе переместить линию ввода на местозаполнитель знаменателя и ввести оператор **Сложение** — в формуле появятся два местозаполнителя для введения слагаемых r и $R_{н1}$.




4. Последовательно вводить остальные символы, перемещая линию ввода внутри формулы нажатием на клавиатуре клавиш: «стрелка» и «пробел».

5. В документе создается *математическая область*, которая предназначена для хранения формул, интерпретируемых процессором Mathcad.

Основные действия по *редактированию формул* включают:

- вставку оператора;
- выделение части формулы;
- удаление части формулы.

Операторы в Mathcad могут быть *унарными* и *бинарными* (действующими на один или два операнда). Примеры унарных операторов:

- оператор «смена знака числа» (нажатие клавиши «-» («минус») или кнопки **Вычитание** «-» на панели **Калькулятор**); 
- оператор «возведение в степень» операнда (нажатие клавиши «^» или кнопки **Возведение в степень** « x^y » на панели **Калькулятор**); 
- оператор «возведение во вторую степень» (нажатие кнопки **Квадрат** « x^2 » на панели **Калькулятор**). 

При вставке унарного оператора в формуле появится один местозаполнитель, а линия ввода выделит этот местозаполнитель.

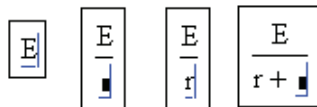
Примеры бинарных операторов (деление «/» и сложение «+») приведены на рис. 2.3.

При вставке бинарного оператора может отсутствовать один или оба операнда. Выра-

жение, которое выделено линией ввода на момент вставки бинарного оператора, становится его первым операндом и рядом с оператором помещается только один местозаполнитель, как показано. Mathcad автоматически помещает рядом с оператором один или два местозаполнителя.

Процедура вставки оператора для унарных и бинарных операторов.

1. Поместить линию ввода на часть формулы, которая должна стать первым операндом, или на местозаполнитель. Mathcad автоматически



расставляет скобки, если необходимо, чтобы отмеченная часть формулы стала первым операндом.

2. Ввести оператор нажатием кнопки на панели **Калькулятор** или сочетанием клавиш.

Для редактирования формул в Mathcad (изменение и удаление) необходимо выделить части формулы обращением цвета. Способы выделения основаны на позиционировании *линии вставки* в выражении. Линия вставки может быть помещена с помощью нажатия клавиш со стрелками или мыши перед, после и внутри следующих фрагментов формулы:

- имя переменной;
- формула, содержащая один оператор (унарный или бинарный);
- часть формулы произвольной длины.

Чтобы выделить *имя переменной*, содержащей один символ, достаточно поместить линию ввода перед или после символа и, удерживая клавишу <Shift>, нажать клавишу со стрелкой <←> или <→>.

$$\left(\underline{r} + R_{H1} \right) \cdot I_{H1} \quad \left(\underline{r} + R_{H1} \right) \cdot I_{H1}$$

Имя переменной (r) будет выделено обращением цвета, как показано.

Чтобы выделить *имя переменной*, содержащей несколько символов (например, R_{H1}), достаточно поместить линию ввода перед, внутри или после имени и, удерживая клавишу <Shift>, нажать клавишу со стрелкой <←> или <→>. Имя переменной будет выделено обращением цвета, как показано.

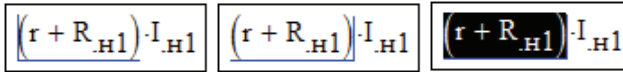
$$\left(r + \underline{R_{H1}} \right) \cdot I_{H1} \quad \left(r + R_{\underline{H1}} \right) \cdot I_{H1} \quad \left(r + R_{H1} \right) \cdot I_{H1} \quad \left(r + \underline{R_{H1}} \right) \cdot I_{H1}$$

Чтобы выделить часть формулы, содержащую один оператор (унарный или бинарный), достаточно поместить линию ввода перед или после оператора и, удерживая клавишу <Shift> нажать клавишу со стрелкой <←> или <→>. Часть формулы будет выделена обращением цвета, как показано:

- унарный оператор

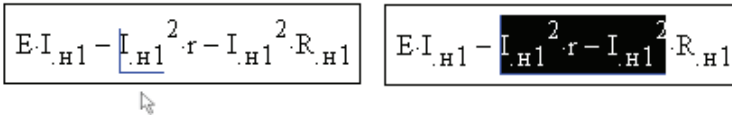


- бинарный оператор



Чтобы выделить часть формулы произвольной длины в математической области, достаточно выполнить следующую последовательность действий.

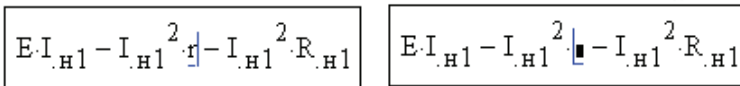
1. Поместить линию ввода в начале или в конце части формулы и поместить указатель мыши на вертикальную линию ввода, как показано.



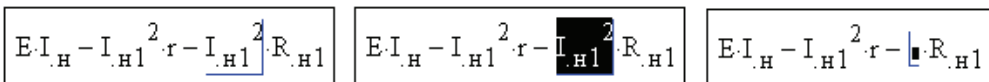
2. Нажимать клавишу со стрелкой <-> при удерживаемой клавише <Shift> до достижения конца выделяемой части формулы. Часть формулы будет выделена обращением цвета.

Чтобы *удалить часть формулы* достаточно выполнить следующие действия.

1. Поместить вертикальную линию ввода после удаляемой части формулы и нажать клавишу <BackSpace>:



2. Отметить удаляемую часть формулы линией ввода и нажать клавишу <BackSpace>. Часть формулы будет выделена (отмечена обращением цвета). При повторном нажатии на клавишу <BackSpace> часть формулы будет удалена, как показано:



3. Выделить часть формулы (см. п. 2), а затем вырезать ее и поместить в буфер обмена, нажав комбинацию клавиш <Ctrl>+<X>.

Определение переменной через выражение, имеющее численный результат

Определим переменную $I_{н1}$ через выражение, имеющее численный результат: $\frac{E}{r + R_{н1}}$.

Численные значения величин переменных заданы.

1. Определить переменные E , r и $R_{н1}$ как численные значения с единицей измерения. Переменные должны быть определены левее или выше оператора, определяющего переменную $I_{н1}$ (рис. 2.4).

2. Ввести имя переменной, например, $I_{н1}$ (рис. 2.4, а).

3. Ввести оператор присваивания «:=» нажатием клавиши <:=> («двоеточие») на клавиатуре или кнопки **Определение** на одной из двух панелей: **Калькулятор** и **Вычисление**. Справа от оператора присваивания появится пустой местозаполнитель с линией ввода (рис. 2.4, а).

4. Ввести выражение, имеющее численный результат (рис. 2.4, б).

$$E := 2.1V \quad r := 0.1\Omega \quad R_{н1} := 2\Omega$$

а
б
в
г

Рис. 2.4. Определение переменной и вычисление результата

5. Вычислить численное значение переменной $I_{н1}$ при помощи оператора численного вывода «=» (рис. 2.4, в). Знак оператора «=» можно ввести с клавиатуры или нажатием кнопки **Рассчитать численно** на панелях **Калькулятор** и **Вычисление**.

В Mathcad допускается связывать определение переменной и численный вывод результата вычисления выражения в одной строке (см. рис. 2.4, г).

Форматирование вывода численного результата

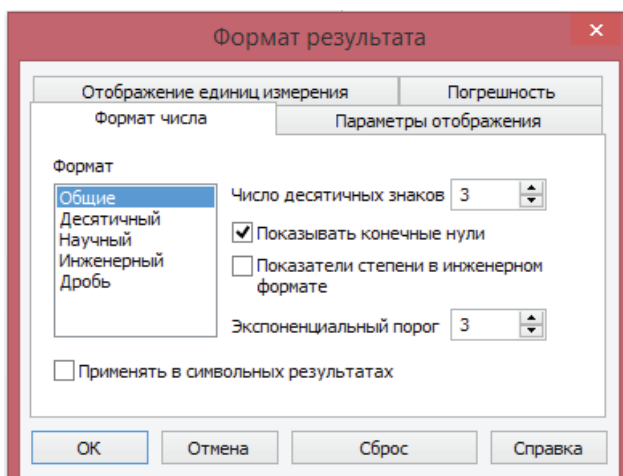
Точность численного расчета в Mathcad ограничена 15 знаками после запятой. При стандартных установках формата вывода **Общий** чис-

ленный результат отображается до 3-го знака после запятой. По умолчанию незначащие десятичные нули в численном результате ($= 0.1$) не отображаются, как показано.

$$\frac{E}{I_{.н1}} - R_{.н1} = 0.1 \cdot \Omega$$

$$\frac{E}{I_{.н1}} - R_{.н1} = 0.100 \cdot \Omega$$

Для более точного значения переменной или функции можно изменить стандартные настройки Mathcad в диалоговом окне **Формат результата**. Для этого нужно выполнить двойной щелчок мышью на результате. На вкладке **Формат числа** окна **Формат результата** выбрать в группе **Формат**, по умолчанию выбран формат **Общий**.



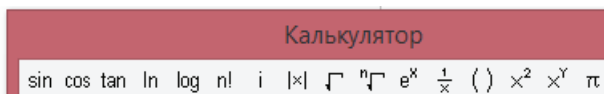
В окошке параметра **Число десятичных знаков** определить, что результат должен быть отображен с точностью до 3-го знака после запятой. Установить флажок для параметра **Показывать конечные нули**, численный результат будет выводиться с отображением незначащих нулей ($= 0.100$).

В дальнейшем будет рассмотрено представление больших чисел в формате **Научный** в виде числа с порядком (степень числа 10). По умолчанию в таком формате отображается любое число, модуль порядка которого превышает 3.

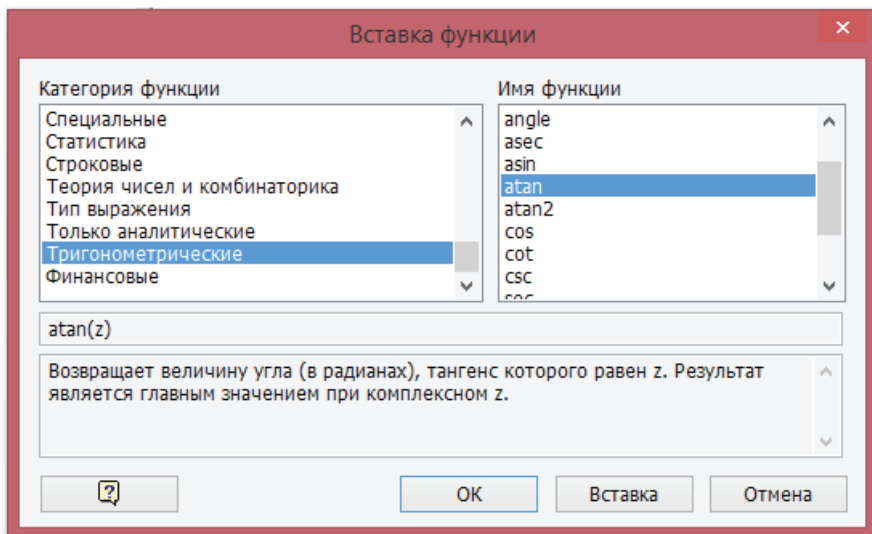
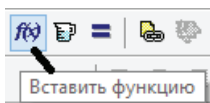
2.1.6. Определение функций пользователя

Функции в программе Mathcad делятся на две группы: функции пользователя и встроенные функции.

Встроенные функции поставляются с программой Mathcad. Чтобы использовать их в выражениях, достаточно ввести имя функции. Имена наиболее распространенных функций приведены на панели **Калькулятор**:



Чтобы получить доступ к списку всех встроенных функций, можно использовать команду **Вставить функцию**, нажав одноименную кнопку стандартного меню (см. рис. 2.1). Появится диалоговое окно **Вставить функцию** для просмотра всех доступных функций. Для выбора нужной функции достаточно приблизительно знать ее название.



Функция пользователя представляет собой заранее заданную формулу, выполняющую определенные операции над данными, которые передаются в функцию в виде ее аргументов. Аргументы функ-

ции — переменные величины (*параметры*), которые изменяются при обращении к функции. Функция может иметь один и более аргументов. Аргументы функции задаются в круглых скобках через запятую. Определение функции пользователя в Mathcad совпадает с принятыми в математике правилами.

Для определения функции пользователя нужно выполнить следующие действия (рис. 2.5).

1. Ввести имя функции, например, I (рис. 2.5, *a*). После имени ввести круглые скобки « $()$ », используя клавиатуру или кнопку на панели **Калькулятор**. В круглых скобках задать имя параметра функции, например R .

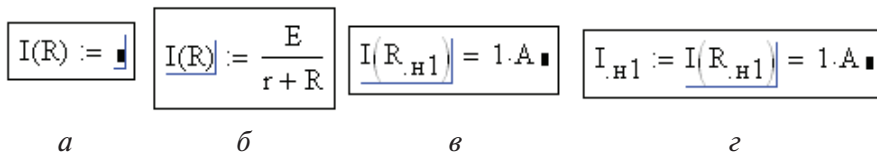


Рис. 2.5. Определение функции пользователя

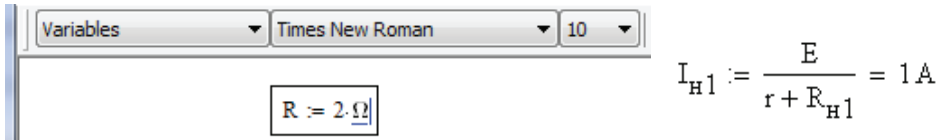
2. Ввести оператор присваивания «:=». Появится местозаполнитель (рис. 2.5, *a*), на место которого нужно задать вычисляемое выражение (рис. 2.5, *б*). В выражение определяемой функции могут входить параметры функции. Все величины, которые входят в выражение определяемой функции, но не являются ее параметрами (например, r и E) являются константами. Значения констант должны быть заданы численно левее или выше функции пользователя (см. рис. 2.4).

3. Функция пользователя не вычисляется Mathcad. Для вычисления функции следует ввести имя функции и задать все переменные через запятую в круглых скобках — параметры функции (например, $R_{н1}$), ввести оператор численного вывода «= \Rightarrow » (рис. 2.5, *в*). Параметру функции надо присвоить конкретное числовое значение параметров до записи оператора обращения к функции. Иначе программа выдаст сообщение об ошибке «Переменная или функция не определена выше».

4. Определение функции пользователя и численный вывод значения результата вычисления выражения могут быть связаны в одной строке (рис. 11, *г*).

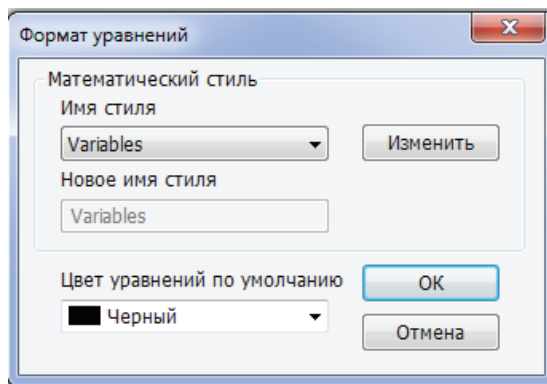
2.1.7. Форматирование математических выражений

В Mathcad используются разные стили для математических выражений и текстовых комментариев (см. п. 2.1.3), учитывая их принципиальные различия. В Mathcad при создании математических выражений автоматически используется шаблон **Normal (Обычный)**. Математические выражения включают: имена переменных или функций, для задания которых используется стиль **Variable (Переменные)**; константы и числовые значения, для задания которых используется стиль **Constants (Постоянные)**. По умолчанию эти стили используют при записи математических выражений: **Шрифт: Times New Roman, Размер: 10 пт.**



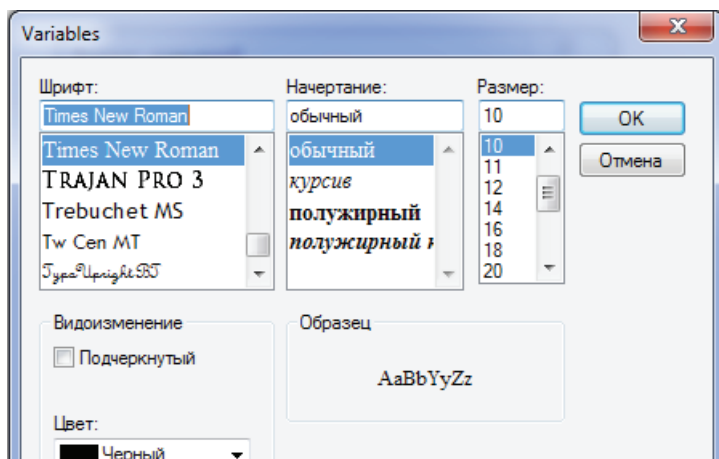
Переменные или функции, имена которых определены одними и теми же символами в математическом выражении, но разными стилями (шрифт другого размера), рассматриваются в Mathcad как различные. Система выдаст сообщение об ошибке: **This variable is undefined (Переменная не определена)**.

Используемый по умолчанию шрифт размера 10 пт. в стилях **Variable (Переменные)** и **Constants (Постоянные)** оказывается слишком мал при распечатке документа. Настройки шрифта этих стилей можно изменять. Достаточно открыть диалоговое окно **Формат уравнений** командой **Уравнение...** меню **Формат**.

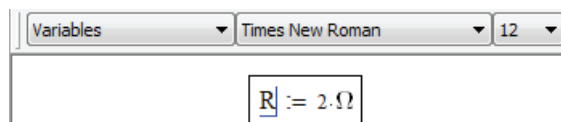


По умолчанию в окошке **Имя стиля** определен стиль **Variable**. Щелкнуть на кнопке **Изменить**.

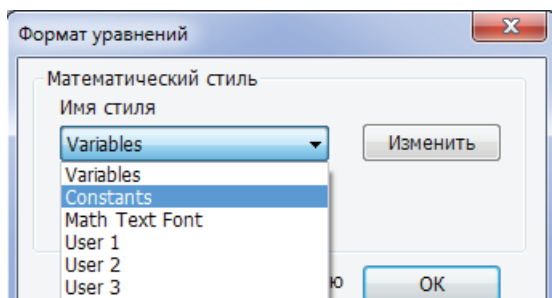
В диалоговом окне **Variable** в группе **Размер** установить значение 12. Параметры **Шрифт: Times New Roman**; **Начертание: обычный** оставить без изменения.



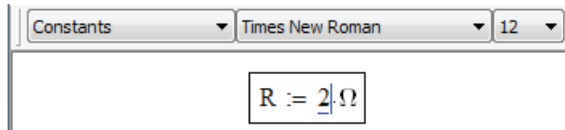
Размер шрифта в записи имени переменной R и единицы измерения Ω в математическом выражении примет значение 12 пт.



Размер шрифта в записи числовой константы остался прежним (10 пт.) Чтобы изменить размер шрифта числовой константы в открытом диалоговом окне **Формат уравнений** в списке **Имя стиля** выбрать имя **Constants** и щелкнуть на кнопке **Изменить**.



Откроется диалоговое окно **Constants**, аналогичное окну **Variables**. В группе **Размер** установить значение 12. После настройки параметров шрифта стилей **Variables** и **Constants** введенное математическое выражение примет вид



2.1.8. Сохранение документа Mathcad

Чтобы использовать настройки стиля **Normal**, при повторной загрузке документа Mathcad достаточно сохранить документ при помощи команды **Сохранить** меню **Файл** в формате XML-документа Mathcad (*.xmcd). Этот формат на основе XML-разметки используется по умолчанию. При повторной загрузке файла при помощи команды **Открыть** меню **Файл** и при создании нового документа при помощи команды **Создать** меню **Файл** готовый документ Mathcad (*.xmcd) может использоваться в качестве своеобразного шаблона с сохраненными настройками стилей.

2.1.9. Моделирование внешней характеристики источника напряжения

Моделирование электрических цепей в среде программы Mathcad рассмотрим на примере расчета внешней характеристики (ВХ) источника напряжения (ИН) и параметров схемы замещения ЭЦ, приведенной на рис. 1.5.

Алгоритм моделирования электрических цепей в среде программы Mathcad

Процесс моделирования ЭЦ в среде программы Mathcad включает следующие действия.

1. Создать новый **Пустой документ** на основе шаблона **Normal** (см. п. 2.1.2).

2. Настроить параметры стилей форматирования шрифта текстовых областей: изменить встроенный стиль **Normal** для форматирования текстовых комментариев; создать новый пользовательский стиль **ЗаголовокТ** для форматирования заголовков (см. п. 2.1.3).

3. Настроить параметры измененных стилей **Variable** и **Constants** шаблона **Normal** для форматирования математических выражений. Изменить встроенный стиль для форматирования имен переменных, функций и единиц измерения. Изменить встроенный стиль для форматирования числовых констант (см. п. 2.1.7).

4. Создать Word-документ (*.docx), в который ввести текст задания на моделирование внешней характеристики ИН и параметров схемы замещения ЭЦ (упражнение 2), Отформатировать текст задания с помощью инструментальных средств Word. Скопировать текст в буфер обмена Windows и вставить в документ Mathcad в виде OLE-объекта (см. рис. 2.2).

5. Переменным U_{12} , R_{H1} и I_{H1} присвоить значения (см. п. 2.1.5).

6. Определить значение переменным E и r (ЭДС ИН и его внутреннее сопротивление).

7. Создать массив для вектора-столбца значений сопротивления нагрузки R_H : 40; 20; 10; 5; 2; 1; 0,5 Ом.

8. Создать массив значений тока в нагрузке I_H , элементы которого вычислить по значениям элементов массива R_H по формуле

$$I_H = \frac{E}{(r + R_H)}.$$

9. Ряд элементов массива I_H (п. 8) дополнить значением тока холостого хода $I_H = 0$ (при $R_H = \infty$) и сформировать новый массив тока нагрузки I_H .

10. Создать массив значений напряжения в нагрузке U_H , элементы которого вычислить по значениям элементов массива I_H (п. 9) по формуле (6)

$$U_H = E - I_H r.$$

11. Создать таблицы вывода значений внешней характеристики ИН:

$$U_H = f(I_H).$$

12. Создать массив значений напряжения холостого хода:

$$U_{xx} = E.$$

13. Оформить вывод результатов моделирования в виде таблиц и графиков. Для графического представления массивов U_H и U_{xx} по оси ординат относительно одного массива I_H по оси абсцисс нужно использовать тип двухмерного графика X-Y в декартовой системе координат (декартовый).

14. Переформатировать графическое отображение X-Y зависимостей (линии на графике): установить *тип*, *толщину* и *цвет* линий (см. рис. 1.5).

Листинг программы моделирования внешней характеристики ИН и параметров схемы замещения ЭЦ приведен далее (см. пример 2.8).

2.1.10. Массивы чисел

Массив в Mathcad — это любая упорядоченная последовательность однотипных элементов. В данной работе рассматриваются лишь некоторые начальные сведения по работе с массивами, элементами которых являются числа. Одиночное число в Mathcad называется *скаляром*. Скаляр можно представить символически в виде буквы или выражения.

Массив — это общий термин для обозначения двух типов структур данных — *вектора* и *матрицы*:

- *вектор (Vector)* — массив, содержащий столбец чисел (матрица-столбец).
- *матрица (Matrices)* — двумерный массив, содержащий прямоугольную таблицу чисел.

Массив в Mathcad задается именем. Элементы массива имеют одинаковое имя и отличаются друг от друга нижними (*матричными*) индексами (номераами элементов в упорядоченной последовательности).

Нумерация элементов массива может начинаться с 0, 1 или любого другого числа (положительного или отрицательного). Нижняя граница индекса определяется системной переменной ORIGIN. По умолчанию массивы Mathcad нумеруются с нулевого элемента. Чтобы нумерация элементов массива начиналась, как принято в математике, с 1, достаточно задать глобальное определение для переменной (в начале рабочего листа документа) `ORIGIN := 1`.

В листинге программы Mathcad (см. пример 2.8) векторы значений R_n , I_n , U_n и U_{xx} представлены массивами чисел.

Задание массивов

В Mathcad существует несколько способов задания массивов.

1. Задание всех элементов вектора или матрицы вручную при помощи специальной панели **Вставка матрицы**.

2. Задание элементов массива с использованием *ранжированных переменных* и *таблицы ввода*.

Наиболее простым способом задания массива (вектора или матрицы) является использование специальной панели **Вставка матрицы** (рис. 2.6).

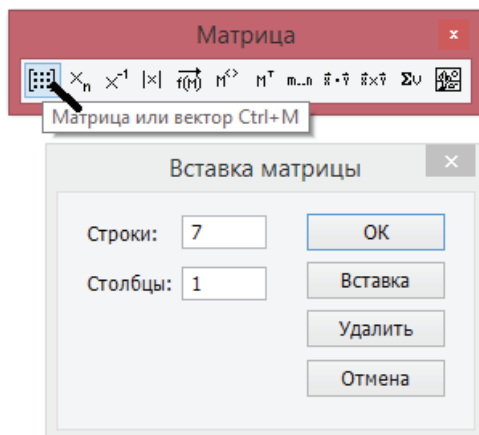
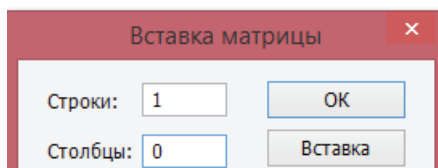


Рис. 2.6. Задание массива с использованием панели Вставка матрицы

Для ее вызова можно нажать на панели **Матрица** кнопку с изображением *квадратной матрицы* или сочетание «горячих клавиш» $\langle \text{Ctrl} \rangle + \langle \text{M} \rangle$.

Параметры создаваемого массива (вектора или матрицы) определяются в окошках **Строки** и **Столбцы**. В документ будет вставлен шаблон массива с черными маркерами вместо элементов.



Чтобы создать массив вектора значений сопротивления R_n (пример 2.1), следует ввести имя массива R_n и символ присваивания. Вызвать панель **Вставка матрицы**, в окошках которой указать **Строки** (7) и **Столбцы** (1) (рис. 2.6). Шаблон массива, вставленного в документ, будет иметь вид, представленный в примере 2.1. Последовательно перемещая курсор с помощью мыши или нажатием клавиши $\langle \downarrow \rangle$, ввести в местозаполнители нужные значения сопротивления вектора R_n .

Пример 2.1. Создание массива R_H с помощью панели Вставка матрицы

Создать массив значений R_H типа вектор (7 строк) с помощью панели Вставка матрицы

Чтобы добавить к уже созданному и заполненному вектору I_H строку (рис. 2.7, а), установить курсор рядом с элементом, ниже которого должна быть вставлена строка (рис. 2.7, б). Открыть панель **Вставка матрицы**. В окошке **Строки** ввести 1 и в окошке **Столбцы** 0. Щелкнуть на кнопке ОК. Ниже элемента 0.1 появится пустой местозаполнитель (рис. 2.7, в).

Чтобы переместить местозаполнитель на первую строку, вырезать значение 0.1 в первой строке, нажав сочетание клавиш $\langle \text{Ctrl} \rangle + \langle \text{X} \rangle$, и вставить во вторую строку, нажав $\langle \text{Ctrl} \rangle + \langle \text{V} \rangle$ (рис. 13 г). Ввести значение 0 в первую строку (рис. 13, д).

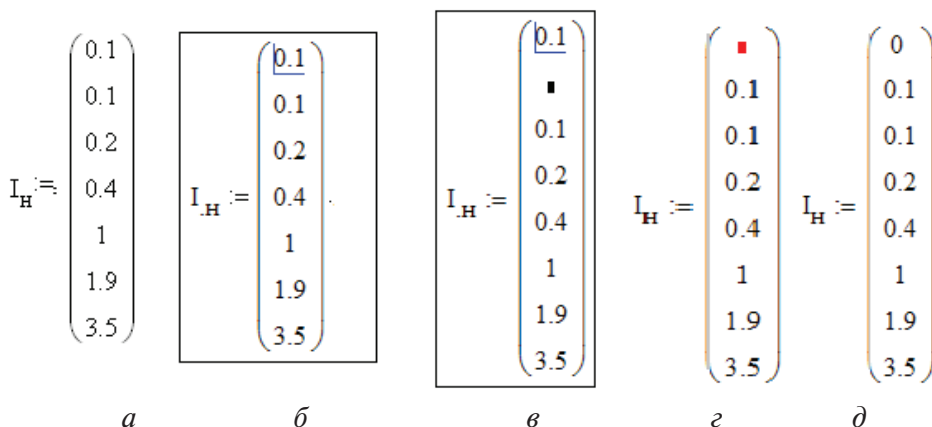


Рис. 2.7. Добавление строки в уже созданный массив (вектор)

Для задания вектора с размерностью больше 10 применяется способ создания массива на основе *ранжированных переменных* и *таблицы ввода*.

2.1.11. Ранжированная переменная

Ранжированная переменная (РП) принимает ряд значений при каждом ее использовании. РП используется в Mathcad для облегчения: ввода ряда числовых значений массива в таблицу ввода; отображения таблицы значений при выводе; построения X-Y графиков.

РП — это разновидность вектора, особенностью которого является непосредственная связь между индексом элемента и его величиной. Простейшим примером РП является вектор, значение элементов которого совпадает с их индексами. Для создания элементов массива вектора R_n способом ввода числовых значений его элементов в *таблицу ввода* создадим *ранжированную переменную* i — массив ряда чисел, лежащих в диапазоне от 1 до 7.

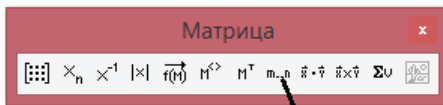
1. Определим переменную ORIGIN (в начале рабочего листа документа).

```
ORIGIN := 1
```

2. Ввести имя ранжированной переменной i и оператор присваивания.

```
i :=
```

3. Установить курсор в местозаполнитель и нажать кнопку **Переменная диапазон** на панели **Матрица** или ввести символ $\langle .. \rangle$ с клавиатуры.



```
i := ..
```

```
ORIGIN := 1  
i := 1..7
```

Mathcad покажет между местопополнителями две точки, что означает диапазон РП.

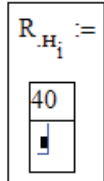
3. В местозаполнители ввести в левую (m) и правую (n) границы диапазона изменения ранжированной переменной числа 1 и 7 соответственно и завершить определение РП, которая может принимать только целочисленные значения 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7. Результат создания РП i (вектор-столбец значений).

```
i =  
1  
2  
3  
4  
5  
6  
7
```

2.1.12. Ввод числовых значений элементов массива в таблицу ввода

Для создания элементов массива R_H с использованием *ранжированных переменных* и *таблицы ввода* выполнить следующие действия.

1. Щелкнуть в другой точке документа и напечатать имя элемента массива с индексом i и символ присваивания. Mathcad перейдет в состояние ожидания ввода значения первого элемента массива R_H .



2. Ввести значение 40 и нажать клавишу \langle , \rangle («запятая»). Mathcad покажет в таблице ввода поле для второго элемента массива R_H .

3. Ввести значение 20 и вновь нажать клавишу «запятая».

4. Продолжить ввод значений элементов массива для $i = 3, 4, 5, 6, 7$.

Пример 2.2. Создание массива R_H с помощью записи таблицы ввода

Создать массив значений R_H
типа вектор (7 строк)
с помощью таблицы ввода

ORIGIN := 1

$i := 1..7$

R_H	i
40	1
20	2
10	3
5	4
2	5
1	6
0.5	7

$R_H := R_H \cdot \Omega$

$$R_H = \begin{pmatrix} 40 \\ 20 \\ 10 \\ 5 \\ 2 \\ 1 \\ 0.5 \end{pmatrix} \Omega$$

Все числовые значения в таблице ввода должны иметь одну размерность или быть безразмерными. Можно ввести размерности в каждую ячейку таблицы ввода или ввести безразмерные значения, а затем переопределить вектор в размерный, напечатав правее таблицы ввода оператор присваивания (пример 2.2). После имени массива в правой части оператора ввести знак умножения и вместо маркера вставить размерность «ом Ω » вышеописанным способом.

$$R_H := R_H \cdot \Omega$$

2.1.13. Скалярные операции над массивами

Любые вычисления над числами (скалярами) Mathcad можно выполнять над массивами (векторами и матрицами) следующими способами (табл. 2.1).

1. Использование массива \mathbf{A} (вектора, матрицы) в качестве операнда в арифметических выражениях между массивом и скаляром v .
2. Использование массива (вектора) в качестве аргумента функции.
3. Использование *оператора векторизации* для выполнения любой скалярной операции или функции поэлементно с массивами (векторами, матрицами).

Например, в формуле вычисления массива значений тока (см. пример 2.1) используются скалярные операции:

$$\mathbf{I}_H := \frac{E}{(\mathbf{r} + \mathbf{R}_H)}$$

- *скалярная сумма* $(\mathbf{r} + \mathbf{R}_H)$, где r — скаляр, \mathbf{R}_H — массив (вектор), результат операции — массив (вектор) значений суммы сопротивлений;
- *деление скаляра на массив* $\frac{E}{(\mathbf{r} + \mathbf{R}_H)}$, где E — скаляр, результат операции — массив (вектор) значений тока \mathbf{I}_H .

В формуле вычисления массива (вектора) значений напряжения (см. пример 2.1) используются скалярные операции:

$$\mathbf{U}_H := E - \mathbf{I}_H \cdot \mathbf{r}$$

- *умножение массива на скаляр* $\mathbf{I}_H \cdot \mathbf{r}$ — результат операции — массив (вектор);
- *скалярное вычитание* $(E - \mathbf{I}_H \cdot \mathbf{r})$ — результат операции — массив (вектор) значений напряжения \mathbf{U}_H .

Массив \mathbf{A} (матрицу) можно использовать в скалярных операциях (табл. 2.1) в точности так же, как массив (вектор) или число. Например, преобразовав массив (вектор) \mathbf{R}_H в массив (матрицу) \mathbf{RM}_H , как показано в примере 2.3, можно вычислить значения элементов массива (матрицы) тока \mathbf{IM}_H .

Таблица 2.1

Скалярные операции между массивом **A** и скаляром **v**

Операция	Обозначение	Клавиша	Описание
Умножение массива на скаляр	$A \cdot v$	*	Умножает поэлементно каждый элемент массива A на скаляр v
Деление массива на скаляр	A/v	*	Делит поэлементно каждый элемент массива A на скаляр v
Скалярная сумма	$A+v$	*	Добавляет v к каждому элементу массива A
Скалярное вычитание	$A-v$	*	Вычитает v из каждого элемента массива A
Возведение массива в степень	A^v	^	Возводит в степень v каждый элемент массива A

Пример 2.3. Использование массива (матрицы) в скалярных операциях

$$RM_H := \begin{pmatrix} 40 & 5 \\ 20 & 2 \\ 10 & 1 \end{pmatrix} \Omega \quad \Pi_M_H := \frac{E}{(r + RM_H)} = \begin{pmatrix} 0.052 & 0.412 \\ 0.104 & 1 \\ 0.208 & 1.909 \end{pmatrix} A$$

В Mathcad существует возможность вычисления значений любой встроенной функции, имеющей смысл для скалярного аргумента, от массива (вектора). При этом в качестве результата скалярной операции будет массив (вектор), элементами которого будут значения функции, вычисленные со значениями соответствующих элементов массива (вектора) (пример 2.4)

Пример 2.4. Использование массива (вектора) в операторах и функциях

$$X := \begin{pmatrix} 1 \\ 1.5 \\ 2 \end{pmatrix} \quad \sqrt{X} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1.225 \\ 1.414 \end{pmatrix} \quad \cos(X) = \begin{pmatrix} 0.54 \\ 0.071 \\ -0.416 \end{pmatrix}$$

2.1.14. Оператор векторизации

Оператор векторизации (Векторизовать) панели **Матрица** предписывает Mathcad выполнять однотипную операцию над каждым элемен-

том массива (вектором или матрицей). Это свойство оператора векторизации позволяет использовать скалярные операторы и функции с массивами.

Пусть значения сопротивлений резисторов и токов в ветвях ЭЦ заданы массивами (векторами) $[R] = (R_1, R_2, \dots, R_k, \dots, R_5)$ и $[I] = (I_1, I_2, \dots, I_k, \dots, I_5)$ (пример 2.5).

Значения всех элементов массива (вектора) напряжений на резисторах $[U] = (U_1, U_2, \dots, U_k, \dots, U_5)$ определяются по закону Ома (3) по формуле

$$U_k = I_k \cdot R_k,$$

где $k = 1, 2, \dots, 5$.

Для определения элементов массива (вектора) напряжений U_k на резисторах ветвей ЭЦ требуется умножить каждый элемент массива (вектора) I_k на соответствующий элемент массива (вектора) R_k .

Непосредственно такой операции поэлементного умножения массивов (векторов) в Mathcad нет. Ее можно осуществить несколькими способами (пример 2.5).

1. Вычислением элементов массива (вектора) U_k многократным поэлементным перемножением соответствующих элементов массивов (векторов) I_k и R_k с использованием *нижних индексов* и ранжированной переменной k (пример 2.5, 1).

$$U := \begin{pmatrix} I_1 \cdot R_1 \\ I_2 \cdot R_2 \\ I_3 \cdot R_3 \\ I_4 \cdot R_4 \\ I_5 \cdot R_5 \end{pmatrix}$$

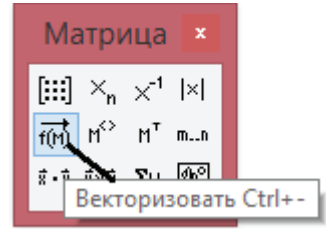
2. «Векторизация» выражения произведения массивов (векторов) с использованием *оператора векторизации* (см. пример 2.5, 2).

$$U := (I \cdot R)$$

Для применения *оператора векторизации* выполнить следующие действия.

- Ввести имя массива U и символ оператора присваивания.
- Установить курсор на место заполнителя и ввести *оператор векторизации*, нажав кнопку **Векторизовать** на панели **Матрица** или сочетание клавиш $\langle \text{Ctrl} \rangle + \langle - \rangle$. Mathcad поместит *стрелку* (символ *оператора векторизации*) сверху место заполнителя.

$$U := \overset{\rightarrow}{\quad}$$



- Ввести выражение произведения векторов I и R (круглые скобки вводятся автоматически).
- Ввести символ « \Rightarrow » с клавиатуры или панели **Калькулятор** для выполнения *оператора векторизации*. Mathcad выполнит поэлементное перемножение массивов (векторов), и в результате будет получен новый массив (вектор) U , в котором k -й элемент U_k получен перемножением соответствующих элементов I_k и R_k (пример 2.5, 2).

Пример 2.5. Вычисление произведения массивов (векторов)

1. Вычисление элементов вектора U поэлементным перемножением соответствующих элементов векторов I и R

$$\begin{array}{l}
 k := 1..5 \\
 k = \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline 2 \\ \hline 3 \\ \hline 4 \\ \hline 5 \\ \hline \end{array} \quad R_k := \begin{array}{|c|} \hline 5 \\ \hline 10 \\ \hline 20 \\ \hline 10 \\ \hline 20 \\ \hline \end{array} \quad I_k := \begin{array}{|c|} \hline 0.78 \\ \hline 0.61 \\ \hline 0.17 \\ \hline 0.28 \\ \hline 0.11 \\ \hline \end{array} \\
 U := \begin{pmatrix} I_1 \cdot R_1 \\ I_2 \cdot R_2 \\ I_3 \cdot R_3 \\ I_4 \cdot R_4 \\ I_5 \cdot R_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.9 \\ 6.1 \\ 3.4 \\ 2.8 \\ 2.2 \end{pmatrix} \quad U_k = \begin{array}{|c|} \hline 3.9 \\ \hline 6.1 \\ \hline 3.4 \\ \hline 2.8 \\ \hline 2.2 \\ \hline \end{array}
 \end{array}$$

2. Векторизация выражения произведения векторов $I \cdot R$

$$\begin{array}{l}
 k := 1..5 \\
 R_k = \begin{array}{|c|} \hline 5 \\ \hline 10 \\ \hline 20 \\ \hline 10 \\ \hline 20 \\ \hline \end{array} \quad I_k = \begin{array}{|c|} \hline 0.78 \\ \hline 0.61 \\ \hline 0.17 \\ \hline 0.28 \\ \hline 0.11 \\ \hline \end{array} \\
 U := (I \cdot R) \Rightarrow \begin{pmatrix} 3.9 \\ 6.1 \\ 3.4 \\ 2.8 \\ 2.2 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

$$R := R \cdot \Omega \quad I := I \cdot A$$

3. Скалярное произведение векторов I и R

$$U := I \cdot R = 18.4 \text{ V}$$

Без символа *оператора векторизации* Mathcad интерпретировал бы выражение $(I \cdot R)$ как *скалярное произведение векторов*. Скалярное произведение векторов $I \cdot R$ определяется как *скаляр*, равный сумме попар-

ных произведений соответствующих элементов векторов (пример 2.5, 3). Векторы должны иметь одинаковую размерность. Оператор **Скалярное произведение** обозначается символом *знак умножения*, который можно ввести нажатием клавиши <*> или нажатием кнопки **Скалярное произведение*** в панели **Матрица**. Символ <x> применяется для обозначения операции **Векторное произведение**.

2.1.15. Отображение значений элементов массивов при выводе

В Mathcad имеется два способа отображать данные (вычисленные значения элементов массива при выводе) в зависимости от того, как задано имя слева от знака **Рассчитать численно =** (пример 2.6):

- 1) в векторной форме;
- 2) в виде таблицы вывода;
- 3) в виде таблицы вывода с полосой прокрутки.

Пример 2.6. Отображение массива в виде вектора и таблицы вывода

$$I_H := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.05 \\ 0.1 \\ 0.21 \\ 0.41 \\ 1 \\ 1.9 \\ 3.5 \end{pmatrix} A$$

$$I_H = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.1 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.4 \\ 1 \\ 1.9 \\ 3.5 \end{pmatrix} A$$

$$I_{H_k} = \begin{matrix} 0 \\ 0.1 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.4 \\ 1 \\ 1.9 \\ 3.5 \end{matrix} A$$

$$I_{H_k} = \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.4 \\ 1 \\ 1.9 \\ 3.5 \end{matrix} A$$

ORIGIN := 1
k := 1..8

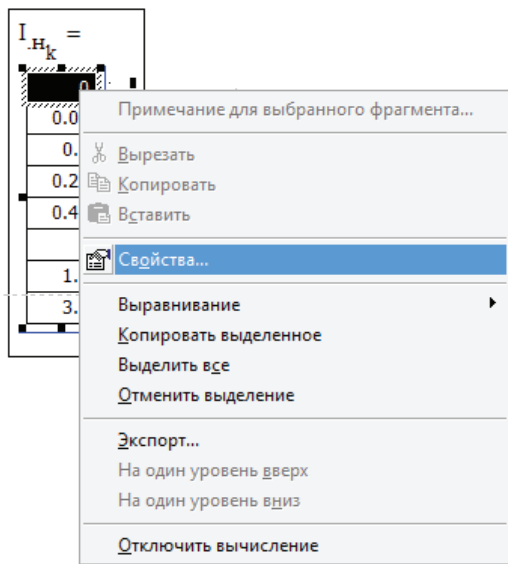
Для отображения вычисленных значений элементов массива при выводе в *виде вектора* следует напечатать имя массива без нижнего индекса и после него численный оператор вывода <=>.

I_{H_k}
0
0.05
0.1
0.21
0.41
1
1.9
3.5

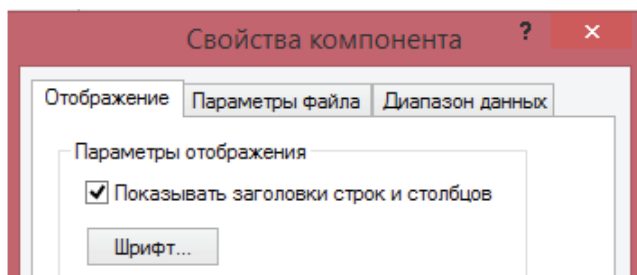
Для отображения вычисленных значений элементов массива при выводе в *виде таблицы вывода* следует напечатать имя массива с нижним индексом и после него численный оператор вывода <=>. (пример 2.6). Использование имени массива с нижним индексом основано на ранжированной переменной k , которая принимает значения в диапазоне от 1 до 8. Предварительно нужно переопределить встроенное значение переменной ORIGIN.

$$I_H = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.1 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.4 \\ 1 \\ 1.9 \\ 3.5 \end{pmatrix} A$$

Если массив имеет не более девяти элементов, то в отображении таблиц вывода массива по умолчанию не будут показаны заголовки строк и столбцов в виде серых меток с номерами строк и столбцов (пример 2.6). Вывод этих элементов отображения *таблицы вывода* настраивается в диалоговом окне **Свойства компонентов**, которое открывается при помощи команды контекстного меню **Свойства** при щелчке правой кнопкой мыши на элементе таблицы вывода.



В открывшемся диалоговом окне надо установить метку на параметре **Показывать заголовки строк и столбцов**.



Если массив (вектор) имеет более девяти элементов, то он может оказаться при отображении громоздкими. В Mathcad такие массивы отображаются в виде *таблиц вывода*, в которых по умолчанию показаны заголовки в виде серых меток с номерами строк и столбцов (пример 2.7).

Пример 2.7. Отображение массивов, имеющих более девяти элементов

$$I_H := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.05 \\ 0.1 \\ 0.21 \\ 0.41 \\ 1 \\ 1.9 \\ 3.5 \\ 4.2 \\ 5.25 \\ 7 \\ 10.5 \end{pmatrix} \quad A$$

$$I_H = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0 \\ 2 & 0.1 \\ 3 & 0.1 \\ 4 & 0.2 \\ 5 & 0.4 \\ 6 & 1 \\ 7 & 1.9 \\ 8 & 3.5 \\ 9 & 4.2 \\ 10 & 5.3 \\ 11 & 7 \\ 12 & 10.5 \end{array} \quad A$$

$$k := 1..12$$

$$I_H = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0 \\ 2 & 0.1 \\ 3 & 0.1 \\ 4 & 0.2 \\ 5 & 0.4 \\ 6 & 1 \\ 7 & 1.9 \\ 8 & 3.5 \\ 9 & 4.2 \\ 10 & 5.3 \end{array} \quad A$$

$$I_{H_k} = \begin{array}{c|c} & 1 \\ \hline 1 & 0 \\ 2 & 0.1 \\ 3 & 0.1 \\ 4 & 0.2 \\ 5 & 0.4 \\ 6 & 1 \\ 7 & \dots \end{array} \quad A$$

В таблице вывода можно отобразить часть массива. Такие таблицы вывода Mathcad отображает с полосами прокрутки для перемещения по таблице, чтобы увидеть скрытые элементы массива. Многоточие в последнем элементе таблицы вывода указывает, что дополнительные строки присутствуют, но не отображаются при выводе (см. пример 2.7).

Изначально свойства шрифта чисел в таблице вывода определяются установками, принятыми в рабочем документе Mathcad по умолчанию. Чтобы изменить свойства шрифта, нужно сначала выделить число в строке таблицы, щелкнув правой кнопкой мыши. Затем в контекстном меню выбрать опцию **Свойства**. В открывшемся диалоговом окне **Свойства компонента** щелкнуть на кнопке **Шрифт**. В открывшемся диалоговом окне **Шрифт** выбрать оптимальный стиль шрифта для всей таблицы.

2.1.16. Графическое представление массивов (векторов). График X-Y

Понятие *график* в Mathcad — *графическая область* с координатными осями, в которой отображается множество точек в виде некоторой зависимости (*диаграммы*). В Mathcad рассматриваются двумерные и трехмерные (пространственные) типы графиков. Для графического представления массива (вектора) используется тип двумерного графика X-Y в декартовой системе координат (декартовый).

Все основные типы графиков и инструменты работы с ними расположены на панели инструментов **График** панели **Математические** (рис. 2.8).

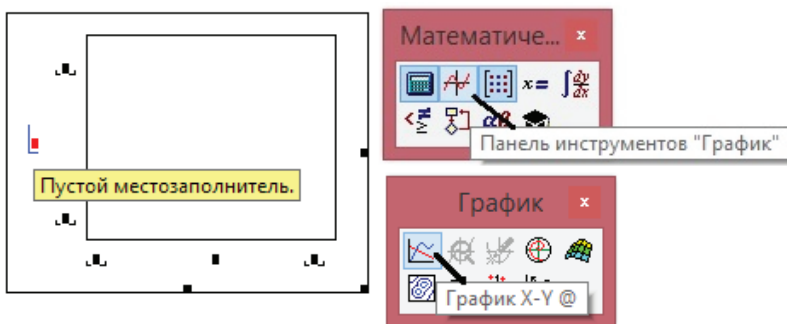


Рис. 2.8. Ввод графической области для X-Y (декартова) графика

2.1.17. Создание двумерного X-Y графика

Создание двумерного X-Y графика начинается с ввода графической области. Процедура ввода графической области включает следующие действия.

1. Установить курсор ввода в то место, где требуется вставить график.

2. На панели **Математические** щелкнуть на кнопке **График**, чтобы вызвать панель инструментов **График** (рис. 2.8).

3. На панели **График** щелкнуть на кнопке **График X-Y** или нажать клавишу $\langle @ \rangle$. Mathcad создаст на месте курсора графическую область, которая представляет собой две вложенные рамки («пустой график»). В пространстве между рамками расположены местозаполнители («пустые поля ввода») по три на каждой из осей X и Y .

4. Размеры графической области можно изменять по горизонтали и вертикали при помощи маркеров, расположенных на ее внешней рамке.

5. Для удаления графической области требуется выделить ее с помощью мыши и нажать клавишу **Delete**.

После создания графической области нужно заполнить «пустые поля ввода».

1. «Пустое поле» в середине оси X предназначено для ввода независимой переменной графика зависимости $Y(X)$. В это поле могут быть введены: имя массива (рис. 2.9, *а*), переменная с индексом (рис. 2.9, *б*), ранжированная переменная k (рис. 2.9, *в*).

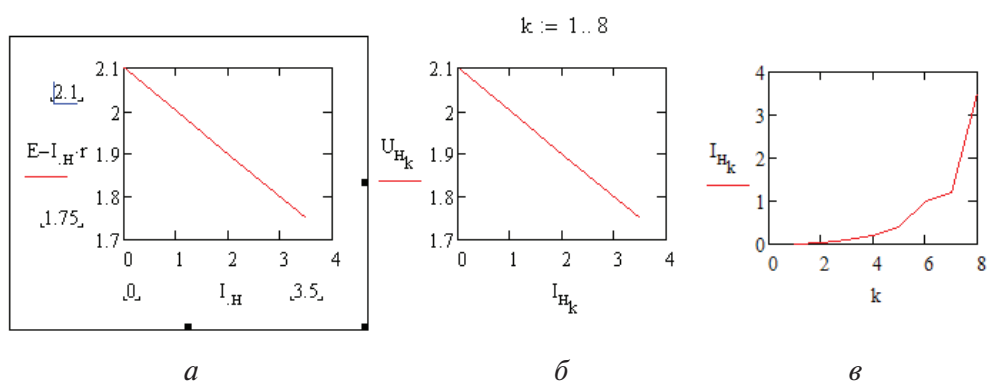


Рис. 2.9. Способы задания имен функции и аргумента на графике

2. «Пустое поле» в середине оси ординат Y предназначено для ввода выражения, график которого нужно построить. В это поле могут быть введены: любое выражение, содержащее независимую переменную, введенную в «пустое поле» на оси абсцисс (рис. 2.9, *а*); переменная с индексом (рис. 2.9, *б*). Все величины, которые входят в выражение функции, но не являются независимой переменной, являются константами. Значения констант должны быть заданы на рабочем листе до графической области.

3. Другие «пустые поля» по осям X и Y предназначены для выбора границ по осям координат.

На рис. 2.9, *а* имя аргумента I_n задано именем массива, а имя функции U_n задано выражением, содержащим независимую переменную I_n . Массивы обязательно должны быть заданы в виде двух соразмерных векторов, по которым будет построен график. На рис. 2.9, *б* имена функции и аргумента заданы переменными с индексами. На рис. 2.9, *в* представлен график элементов вектора I_{nk} . Необходимо определить ранжированную переменную k (диапазон значений), которая является нижним индексом каждого элемента вектора.

Чтобы завершить процедуру построения графика в автоматическом режиме, нужно щелкнуть мышью вне графической области. Линия под именем функции на оси ординат указывает тип траектории и цвет, который используется для отображения зависимости X - Y .

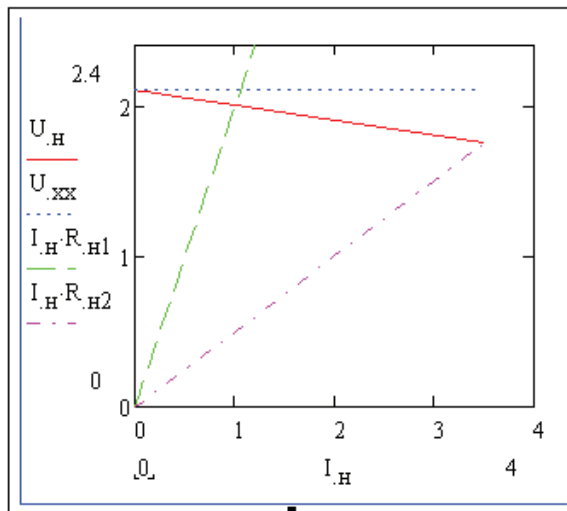


График может содержать несколько функций по оси ординат в зависимости от одного аргумента по оси абсцисс или несколько функций, согласованных с несколькими аргументами.

Для графического представления нескольких массивов (векторов) U_n и U_{xx} по оси ординат относительно одного массива (вектора) I_n по оси абсцисс нужно ввести имена U_n и U_{xx} через запятую. Под именем U_n появится пустое поле, в которое ввести имя U_{xx} , как приведено выше. Массивы (векторы) U_n , U_{xx} и I_n должны использовать одну и ту же ранжированную переменную k , которая определяет диапазон значений нижнего индекса каждого отображаемого элемента массива. Выражения $I_n R_{n1}$ и $I_n R_{n2}$ включают константы R_{n1} и R_{n2} .

2.1.18. Форматирование осей координат X-Y графика

Форматирование осей координат графика включает в себя изменение *диапазонов осей XY* и форматирование *шкал*, которые нанесены на координатную ось. Когда график создается впервые, Mathcad автоматически выбирает диапазон, шкалу и отображение значений для обеих координатных осей при помощи маркеров.

Пусть требуется отобразить совместное графическое представление векторов I_n и U_n . График с автоматическим выбором границ диапазона значений по осям координат приведен на рис. 2.10, а.

$$I_n = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.05 \\ 0.1 \\ 0.21 \\ 0.41 \\ 1 \\ 1.9 \\ 3.5 \end{pmatrix} \text{ A} \quad U_n = \begin{pmatrix} 2.1 \\ 2.095 \\ 2.09 \\ 2.079 \\ 2.059 \\ 2 \\ 1.91 \\ 1.75 \end{pmatrix} \text{ V}$$

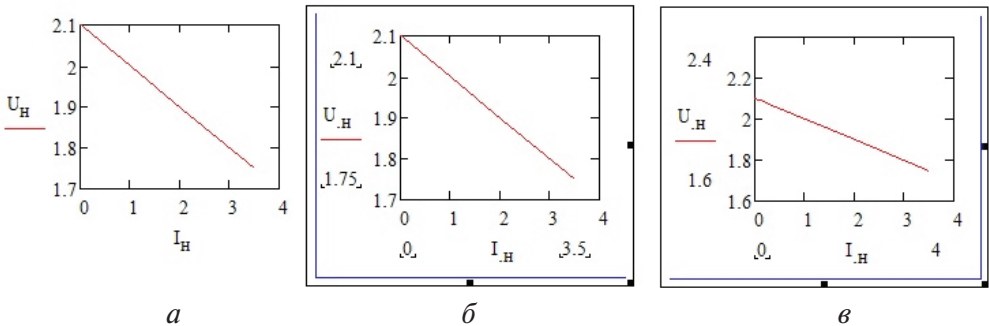


Рис. 2.10. Форматирование осей координат X-Y графика

Чтобы изменить диапазоны значений:

1. Перейти в режим редактирования графической области, щелкнув мышью внутри рамки. Вблизи каждой из осей появятся два поля с числами, обозначающими границы диапазонов (минимальное и максимальное значения по обеим координатным осям), установленные Mathcad автоматически (рис. 2.10, б).

2. Удалить содержимое полей, нажав клавишу , и ввести новые значения диапазонов в каждый из четырех полей вблизи осей (рис. 2.10, в).

3. Щелкнуть мышью за пределами графической области и график будет изменен в новых предельных значениях границ диапазонов. Результаты изменения диапазона оси X на (0,4) и оси Y на (1.6, 2.4) приведены на рис. 2.10, в.

Форматирование шкал графика X-Y

Изменение вида шкал, нанесенных на координатные оси графика, производится с помощью набора опций на вкладке **X-Y Оси** диалогового окна **Форматирование выбранного графика X-Y** (рис. 2.11). Открыть диалоговое окно можно несколькими способами:

1. Двойным щелчком мыши в области графика.
2. Выбором в контекстном меню графика команды **Формат**.
3. Выбором команды **График X-Y** меню **Формат**.

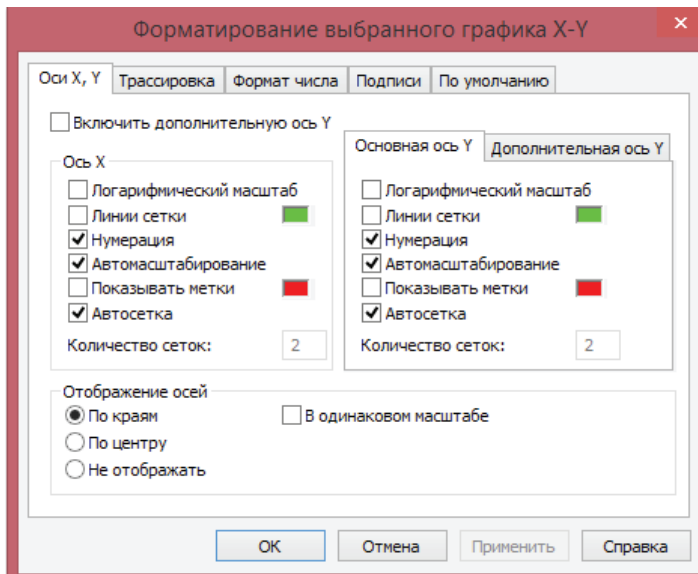


Рис. 2.11. Инструменты для форматирования координатных X-Y осей

На вкладке **X-Y Оси** находится два идентичных набора опций для изменения шкал координатных осей X и Y графика, которые можно выбрать с помощью флажков и переключателей. Отмеченные в диалоговом окне опции установлены системой Mathcad автоматически.

- **Нумерация** — показать числовые значения у делений на шкале;
- **Автомасштабирование** — выбрать диапазон оси (минимальное и максимальное значение);
- **Автосетка** — выбрать числа разбиений шкалы оси метками.

Форматирование линий на графике

Графическое отображение X - Y зависимостей (линии на графике) можно переформатировать: установить *стиль*, *толщину* и *цвет* линий (рис. 2.12).

Чтобы переформатировать линии на графике, можно дважды щелкнуть внутри графической области. Mathcad выделит графическую область синей рамкой и отобразит на экране диалоговое окно **Форматирование выбранного графика X-Y** (рис. 2.12).

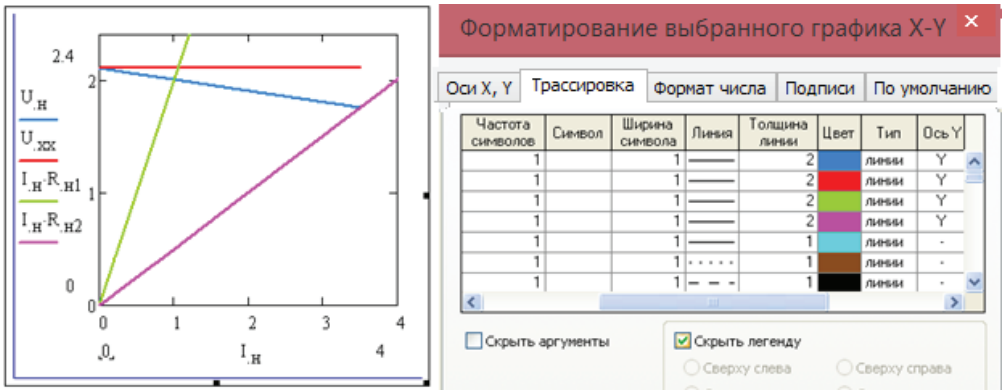
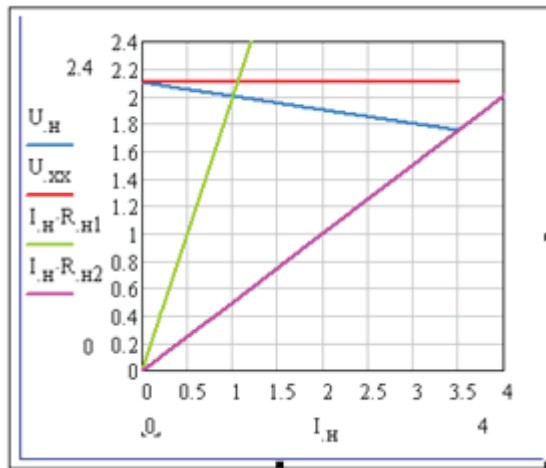


Рис. 2.12. Инструменты форматирования отображения линии графика X-Y

Для форматирования линий графика щелкнуть на закладке **Трассировка**. Каждой линии на графике соответствует строка в прокручиваемом списке **Обозначение в легенде**. Каждая строка содержит поля **Линия**, **Толщина линии**, **Цвет**. Выбрать строку и нажать стрелку около каждого соответствующего поля, чтобы увидеть раскрывающийся список свойств, а затем щелкнуть мышью на нужном свойстве (рис. 2.12). Нажать ОК, чтобы принять изменения и закрыть диалоговое окно. Mathcad отобразит линии на графике с новыми установленными параметрами форматирования.

Отображение линий сетки на графике

Чтобы визуализировать сетку из вспомогательных линий на графике нужно в диалоговом окне **Форматирование выбранного графика X-Y** (см. рис. 2.11) активизировать параметр **Линии сетки**, установив флажки в секциях **Ось X** и **Основная ось Y**. При помощи настройки в окошке **Цвет** можно задать подходящий цвет линий сетки.



Чтобы линии сетки отображались на графике с шагом 0,5 по оси X и с шагом 0,2 по оси Y, нужно снять флажки для параметров **Автосетка** в секциях **Ось X** и **Основная ось Y** и задать значения в окошках **Количество сеток**. На оси X количество сеток задать равным 8, а на оси Y — равным 12.

2.1.19. Трассировка графиков

Для определения значений координат (x, y) некоторой точки графика X-Y, например, значений параметров U_n и $I_n R_{н1}$ в точке пересечения двух кривых (рис. 2.13), можно использовать панель инструмента **Трассировка графика X-Y**.

Для трассировки графика выполнить следующие действия.

1. Включить режим трассировки — щелкнуть правой кнопкой мыши в области графика и выбрать в контекстном меню команду **Трассировка**.

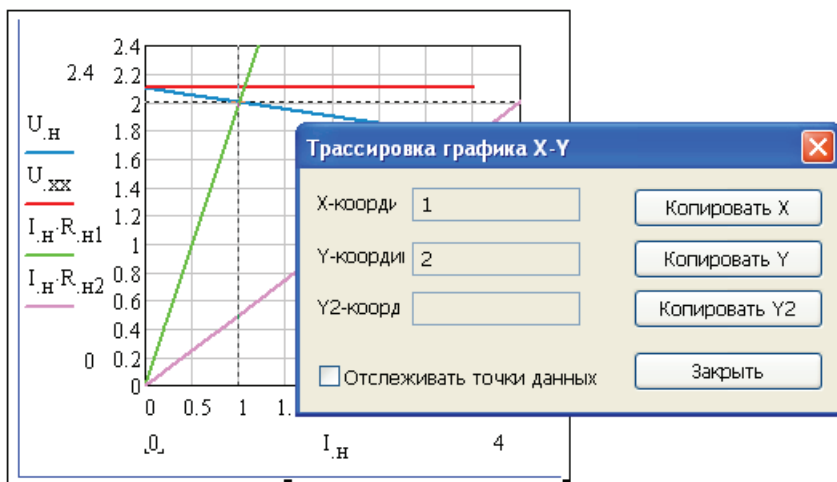


Рис. 2.13. Считывание координат точки на графике

2. Появится инструментальная панель **Трассировка графика X-Y**, а в поле графика — две пересекающиеся пунктирные линии (рис. 2.13). Если установить флажок для параметра **Отслеживать точки данных**, то линии трассировки будут следовать точно вдоль линии графика.

3. Чтобы увидеть координаты точки на кривой зависимости X - Y , нужно нажать кнопку мыши и переместить указатель мыши на данную точку. Mathcad отобразит на графике *перекрестье двух штриховых прямых*, которое будет следовать за указателем мыши (рис. 2.13).

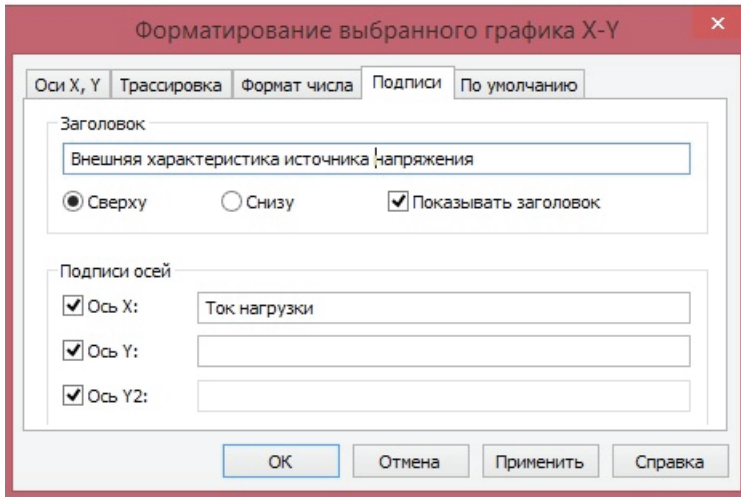
4. Координаты указателя мыши отображаются в окошках **X-координата** и **Y-координата**. Значения координат изменяются непрерывно, отражая текущее значение указателя. На рис. 2.13 приведен пример считывания координат точки $X = 1$ и $Y = 2$.

5. Когда координаты нужной точки найдены, их численные значения можно скопировать в буфер, нажав на кнопку **Копировать X** и/или **Копировать Y**, чтобы вставить их в математическую или текстовую область рабочего окна.

6. *Перекрестье пунктирных прямых* исчезнет, если нажать на кнопке **Закрыть** инструментальной панели **Трассировка графика X-Y**.

2.1.20. Оформление графика

В Mathcad можно выполнить *поясняющие подписи* на графике с помощью инструментов, которые находятся на вкладке **Подписи** диалогового окна **Форматирование выбранного графика X-Y**.



На графике можно добавить: *заголовки, названия осей, имена кривых. Переменные*, определяющие координаты, отображаются по умолчанию.

Для добавления *заголовка* к графику выполнить следующие действия.

1. Дважды щелкнуть левой кнопкой мыши внутри графической области, чтобы выделить графическую область синей рамкой и отобразить на экране диалоговое окно **Форматирование выбранного графика X-Y**.

2. Перейти на вкладку **Подписи**. Напечатать подпись в поле **Заголовок** и выбрать расположение *заголовка* на графике: **Сверху**, **Снизу**. Щелкнуть на кнопке **Снизу**, если *заголовок* нужно поместить внизу графика (кнопки **Сверху** и **Показывать заголовок** установлены по умолчанию).

3. Нажать кнопку «**Применить**» для визуализации *заголовка* на графике и закрыть диалоговое окно. Результат создания *заголовка* «Внешняя характеристика источника напряжения» приведен на рис. 2.14.

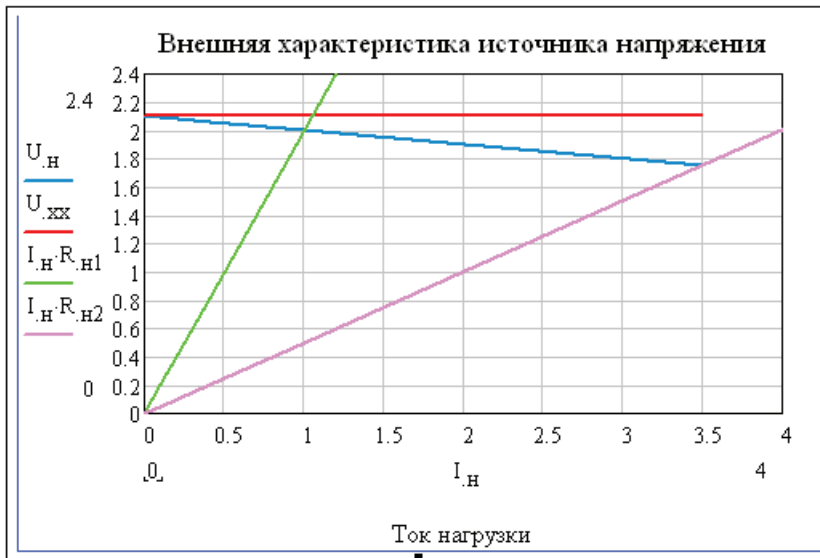


Рис. 2.14. Добавление заголовка и названия осей на график

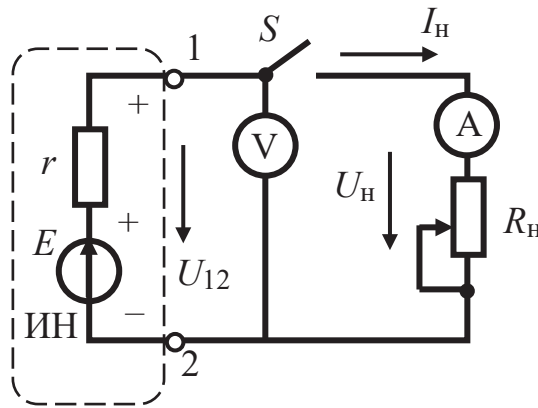
Для добавления *подписи осей* нужно напечатать подписи в соответствующих полях **Ось X** и **Ось Y**.

Чтобы перерисовать график с добавленными *поясняющими подписями*, нужно закрыть окно **Форматирование выбранного графика X-Y**, щелкнув ОК. График, в котором добавлены *поясняющие подписи*, приведен на рис. 2.14.

Пример 2.8. Листинг расчета ВХ ИН и параметров схемы замещения ЭЦ

Расчет внешней характеристики источника напряжения и параметров ЭЦ

Дана схема замещения ЭЦ, в которой к ИН с ЭДС E и с внутренним сопротивлением r через ключ S подключается переменное сопротивление нагрузки R_n , как показано ниже. При разомкнутом ключе S показание вольтметра (V) равно $U_{12}=2,1$ В. Сопротивление нагрузки $R_{n1}=2$ Ом. При замкнутом ключе S показания амперметра (A) равно $I_{n1}=1$ А.

**Исходные данные**

$$U_{12} := 2.1V$$

$$R_{H1} := 2\Omega$$

$$I_{H1} := 1A$$

Алгоритм вычислений

1. Определение ЭДС источника напряжения, его внутреннего сопротивления r

ЭДС источника напряжения

Когда ЭЦ разомкнута, вольтметр V фиксирует значение напряжения U_{12} (напряжение холостого хода U_{xx}), практически равное ЭДС ($E = U_{12}$).

$$E := U_{12} = 2.1V .$$

Внутренне сопротивление источника напряжения

В соответствии с законом Ома для ЭЦ (3) при замкнутом ключе S (см. схему замещения ЭЦ) $I_{H1} = E/(R_{H1} + r)$, из которого следует

$$r := \left(\frac{E}{I_{H1}} \right) - R_{H1} \quad r = 0.1\Omega$$

Продолжение примера 2.8

2. Расчет значений тока I_H для значений сопротивления нагрузки (приемника) R_H : 40; 20; 10; 5; 2; 1; 0.5 Ом

Создадим массив значений R_H
типа вектор (7 строк)

$$R_H := \begin{pmatrix} 40 \\ 20 \\ 10 \\ 5 \\ 2 \\ 1 \\ 0.5 \end{pmatrix} \Omega$$

Расчет значений тока I_H

$$I_H := \frac{E}{(r + R_H)}$$

$$I_H = \begin{pmatrix} 0.05 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.4 \\ 1 \\ 1.9 \\ 3.5 \end{pmatrix} \text{ A}$$

Для построения графика внешней характеристики $U_H = f(I_H)$ ряд значений тока I_H следует дополнить значением тока холостого хода $I_H = 0$ при $R_H = \infty$.

Создадим массив значений I_H
типа вектор (8 строк)

$$I_H := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.05 \\ 0.1 \\ 0.21 \\ 0.41 \\ 1 \\ 1.9 \\ 3.5 \end{pmatrix} \text{ A}$$

Продолжение примера 2.8

3. Расчет значений напряжения U_H на зажимах приемника.

U_H равно напряжению на зажимах
источника U_{12}

$$U_H := E - I_H \cdot r$$

$$U_H = \begin{pmatrix} 2.1 \\ 2.095 \\ 2.09 \\ 2.079 \\ 2.059 \\ 2 \\ 1.909 \\ 1.75 \end{pmatrix} \text{ V}$$

4. Таблицы вывода значений внешней характеристики
источника напряжения $U_H = f(I_H)$.

ORIGIN := 1 k := 1..8

$k =$	$U_{Hk} =$	$I_{Hk} =$																																												
<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>1</td></tr> <tr><td>2</td></tr> <tr><td>3</td></tr> <tr><td>4</td></tr> <tr><td>5</td></tr> <tr><td>6</td></tr> <tr><td>7</td></tr> <tr><td>8</td></tr> </table>	1	2	3	4	5	6	7	8	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td></td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>2.1</td></tr> <tr><td>2</td><td>2.095</td></tr> <tr><td>3</td><td>2.09</td></tr> <tr><td>4</td><td>2.079</td></tr> <tr><td>5</td><td>2.059</td></tr> <tr><td>6</td><td>2</td></tr> <tr><td>7</td><td>1.909</td></tr> <tr><td>8</td><td>1.75</td></tr> </table> V		1	1	2.1	2	2.095	3	2.09	4	2.079	5	2.059	6	2	7	1.909	8	1.75	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td></td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.21</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.41</td></tr> <tr><td>6</td><td>1</td></tr> <tr><td>7</td><td>1.91</td></tr> <tr><td>8</td><td>3.5</td></tr> </table> A		1	1	0	2	0.05	3	0.1	4	0.21	5	0.41	6	1	7	1.91	8	3.5
1																																														
2																																														
3																																														
4																																														
5																																														
6																																														
7																																														
8																																														
	1																																													
1	2.1																																													
2	2.095																																													
3	2.09																																													
4	2.079																																													
5	2.059																																													
6	2																																													
7	1.909																																													
8	1.75																																													
	1																																													
1	0																																													
2	0.05																																													
3	0.1																																													
4	0.21																																													
5	0.41																																													
6	1																																													
7	1.91																																													
8	3.5																																													

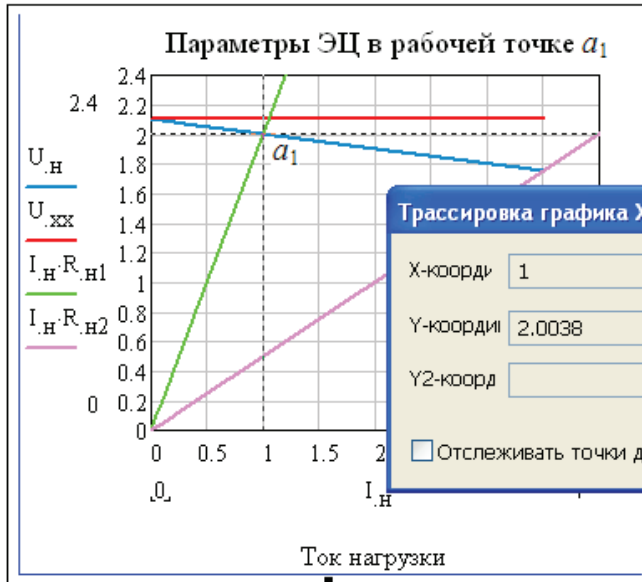
5. Для построения графика внешней
характеристики идеального источника
напряжения следует создать массив
значений напряжения холостого хода
 U_{xx} типа вектор.

Для построения графиков ВАХ нагрузки
 $I_H R_{H1}$ и $I_H R_{H2}$ определим значения
переменных R_{H1} и R_{H2} .

$$R_{H1} := 2 \Omega \quad R_{H2} := 0.5 \Omega$$

$$U_{xx} := \begin{pmatrix} 2.1 \\ 2.1 \\ 2.1 \\ 2.1 \\ 2.1 \\ 2.1 \\ 2.1 \\ 2.1 \end{pmatrix}$$

Окончание примера 2.8



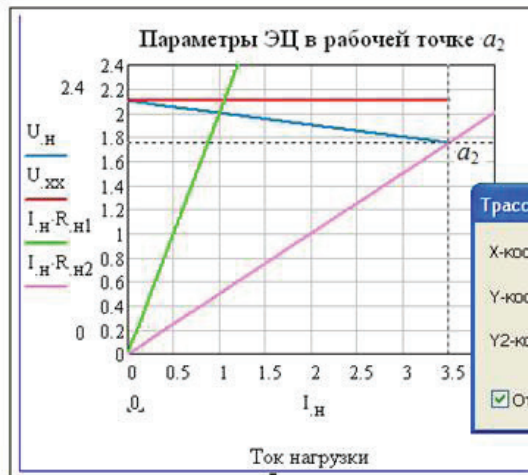
Трассировка графика X-Y

X-коорди:

Y-коорди:

Y2-коорд:

Отслеживать точки данных



Трассировка графика X-Y

X-коорди:

Y-коорди:

Y2-коорд:

Отслеживать точки данных

2.1.21. Анализ параметров ЭЦ в номинальном и согласованном режимах

Приемы анализа параметров ЭЦ в Mathcad рассмотрим на следующих примерах.

1. Расчет параметров ЭЦ.

1.1. Расчет параметров ЭЦ для двух номинальных режимов.

1.2. Расчет параметров ЭЦ для согласованного режима.

2. Расчет потерь мощности в источнике напряжения и КПД ЭЦ.

3. Уравнение энергетического баланса ЭЦ.

4. Определение внутреннего сопротивления источника напряжения графоаналитическим способом.

Листинг программы анализа параметров ЭЦ в двух номинальных и согласованном режимах приведен в примере 2.9.

Расчет параметров ЭЦ

Параметры ЭЦ (см. схему): ток I в цепи и напряжение U на зажимах источника напряжения с ЭДС E и внутренним сопротивлением r , мощность P_R , рассеиваемая в сопротивлении нагрузки R .

Параметры ЭЦ вычисляются по формулам

$$I = \frac{E}{r + R}; \quad U = E - Ir; \quad P_R = RI^2.$$

Вычисление параметров ЭЦ производится в Mathcad для двух номинальных и согласованного режимов с различными значениями сопротивления нагрузки R_{H1} , R_{H2} и R_c соответственно. Для вычисления параметров ЭЦ в документе Mathcad определены функции пользователя:

- функция вычисления тока в ЭЦ $I(R) := \frac{E}{r + R}$;
- функция вычисления напряжения $U(I) := E - r \cdot I$;
- функция вычисления мощности $P_R(R, I) := R \cdot I^2$.

Аргументом (параметром) функции $I(R)$ является переменная величина R , которая изменяется при обращении к функции. Величины E , и r , которые входят в выражение определения функции, являются константами. Значения величин R , E , и r должны быть определены до обращения к функции.

Аргументом функции $U(I)$ является переменная величина I , значение которой должно быть определено при обращении к функции $I(R)$ до обращения к функции $U(I)$. Функция $R_r(R, I)$ имеет два параметра R и I .

Расчет значений параметров ЭЦ для номинальных режимов

Определение значений параметров (ток I_1 , напряжение U_1 и мощность P_{R1}) для двух номинальных режимов работы ЭЦ (рис. 2.15):

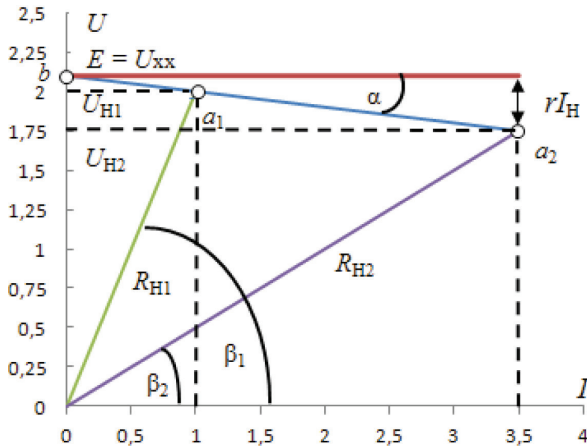


Рис. 2.15. Определение значений параметров для двух номинальных режимов работы

1. $R_{H1} = 2$ Ом (рабочая точка a_1);
2. $R_{H2} = 0,5$ Ом (рабочая точка a_2).

Для рабочей точки a_1 при значении сопротивления нагрузки $R_{H1} = 2$ Ом значение тока I_1 вычисляется в Mathcad по формуле

$$I_{.1} := I(R_{.H1}) = 1 \cdot A \blacksquare$$

Значения величин внутреннего сопротивления источника r и ЭДС источника E заданы в условии задачи («Исходные данные», пример 2.9).

Значение напряжения U_1 вычисляется по формуле

$$U_{.1} := U(I_{.1}) = 2 \cdot V \blacksquare$$

Значение мощности P_{R1} рассеиваемой в нагрузке $R_{н1}$, вычисляется по формуле

$$P_{.R1} := P_{.R}(R_{.н1}, I_{.1}) = 2 \cdot W \blacksquare$$

Для рабочей точки a_2 значения номинальных параметров тока I_2 , напряжения U_2 и мощности P_{R2} при $R_{н2} = 0,5$ Ом вычисляются в Mathcad по формулам

$$U_{.2} := U(I_{.2}) = 1.75 \cdot V \blacksquare$$

$$I_{.2} := I(R_{.н2}) = 3.5 \cdot A \blacksquare$$

$$P_{.R2} := P_{.R}(R_{.н2}, I_{.2}) = 6.125 \cdot W \blacksquare$$

Расчет параметров ЭЦ для согласованного режима

В *согласованном режиме* работы ЭЦ при значении величины сопротивления нагрузки, равном внутреннему сопротивлению источника, значения величин тока I_c , напряжения U_c , тока короткого замыкания I_k и мощности P_{Rc} при r вычисляются в Mathcad по формулам (см. пример 2.9).

В *согласованном режиме* работы ЭЦ источник напряжения отдает в нагрузку максимальную мощность. Максимум мощности $P_{Rc} = 11.025 \text{ W}$ достигается при $R_{нс} = r$, что соответствует току нагрузки, равному половине тока короткого замыкания $I_k = 2I_{нс}$ (см. пример 2.9).

$$I_{.c} := I(R_{.нс}) = 10.5 \cdot A \blacksquare$$

$$U_{.c} := U(I_{.2}) = 1.75 \cdot V \blacksquare$$

$$P_{.Rc} := P_{.R}(R_{.нс}, I_{.c}) = 11.025 \cdot W \blacksquare$$

Расчет потери мощности в источнике напряжения и КПД ЭЦ

Значения мощности P , рассеиваемой источником электрической энергии с ЭДС E и внутренним сопротивлением r в ЭЦ, потери мощ-

ности в источнике энергии P_r и коэффициент полезного действия (КПД) η ЭЦ (см. рис. 1.5, а) вычисляются по следующим формулам:

- мощность, рассеиваемая источником напряжения в ЭЦ $P = EI$;
- потери мощности в источнике напряжения $P_r = I^2 r$;
- КПД $\eta = \frac{(P - P_r)}{P}$.

Расчет потери мощности в источнике напряжения и КПД ЭЦ производится для двух номинальных и согласованного режимов с различными значениями сопротивления нагрузки $R_{н1}$, $R_{н2}$ и $R_{нс}$ соответственно. Для вычисления P , P_r и η в документе Mathcad определены функции пользователя (см. пример 2.9):

- функция вычисления мощности, рассеиваемой источником электрической энергии в ЭЦ;

$$P(I) := E \cdot I$$

- функция вычисления потери мощности в источнике напряжения;

$$P_r(I) := r \cdot I^2$$

- функция вычисления КПД.

$$\eta(P, P_r) := \frac{P - P_r}{P}$$

Аргументами функций $P(I)$ и $P_r(I)$ является переменная величина I , значение которой должно быть определено при обращении к функции $I(R)$ до обращения к функциям $P(I)$ и $P_r(I)$. Функция $\eta(P, P_r)$ имеет два параметра P и P_r , перечисленные через запятую.

Величины E и r , которые входят в выражение определения функций $P(I)$ и $P_r(I)$, являются константами. Их значения должны быть определены до обращения к функциям $P(I)$ и $P_r(I)$.

Значения мощности P , рассеиваемой источником напряжения с ЭДС E и внутренним сопротивлением r в ЭЦ, потери мощности в ис-

точнике напряжения P_r и КПД η ЭЦ для двух номинальных и согласованного режимов работы ЭЦ вычисляются в Mathcad по следующим формулам (см. пример 2.9).

1. Для номинального режима при $R_{н1} = 2$ Ом и $I_{н1} = 1$ А:

- мощность P_1 , рассеиваемая источником напряжения;

$$P_{.1} := P(I_{.н1}) = 2.1 \cdot W \blacksquare$$

- потери мощности в источнике P_{r1} ;

$$P_{.r1} := P_{.r}(I_{.н1}) = 0.1 \cdot W \blacksquare$$

- КПД ЭЦ η_1 .

$$\eta_{.1} := \frac{(P_{.1} - P_{.r1})}{P_{.1}} = 0.952 \blacksquare$$

2. Для номинального режима при $R_{н2} = 0,5$ Ом и $I_{н2} = 3,5$ А:

- мощность P_2 , рассеиваемая источником напряжения;

$$P_{.2} := P(I_{.н2}) = 7.35 \cdot W \blacksquare$$

- потери мощности в источнике P_{r2} ;

$$P_{.r2} := P_{.r}(I_{.н2}) = 1.225 \cdot W \blacksquare$$

- КПД ЭЦ η_2 .

$$\eta_{.2} := \frac{(P_{.2} - P_{.r2})}{P_{.2}} = 0.833 \blacksquare$$

3. Для согласованного режима при $R_{\text{нс}} = r = 0,1 \text{ Ом}$ и $I_{\text{нс}} = 10,5 \text{ А}$:

- мощность P_c , рассеиваемая источником напряжения;

$$P_{.c} := P(I_{.нс}) = 22.05 \cdot \text{W} \blacksquare$$

- потери мощности в источнике P_{rc} ;

$$P_{.rc} := P_{.r}(I_{.нс}) = 11.025 \cdot \text{W} \blacksquare$$

- КПД ЭЦ η_c .

$$\eta_{.c} := \frac{(P_{.c} - P_{.rc})}{P_{.c}} = 0.5 \blacksquare$$

Символы греческого алфавита Δ , η расположены на инструментальной панели **Греческий** меню **Математика**.

При уменьшении нагрузки ($R_{\text{н2}} < R_{\text{н1}}$) возрастает потеря мощности в источнике P_r и падает КПД ЭЦ η . В согласованном режиме КПД ЭЦ η_c составляет 0,5. В маломощных (радиоэлектронных) устройствах согласованный режим работы является основным, так как обеспечивает в приемнике (нагрузке) сигнал максимальной мощности. Для силовых ЭЦ низкий КПД недопустим.

Уравнение энергетического баланса ЭЦ

На основании закона сохранения энергии мощность $P = EI$, рассеиваемая источником электрической энергии в ЭЦ, должна равняться суммарной мощности, преобразуемой в тепловую энергию на внутреннем сопротивлении источника ЭДС $P_r = Ir$ и в сопротивлении нагрузки $P_R = IR$. Уравнение *энергетического баланса* (баланса мощностей) для ЭЦ при питании от одного источника ЭДС с учетом принятых обозначений имеет вид

$$P = P_r + P_R.$$

Составление уравнения баланса мощностей позволит проверить правильность расчета тока I в ЭЦ для режимов работы при различных сопротивлениях нагрузки $R_{н1}$, $R_{н2}$ и $R_{нс}$.

Выражения для вычисления значений мощностей P , P_r и P_R в уравнении энергетического баланса определяют вид функций пользователя $P(I)$, $P_R(I)$ и $P_r(I)$ соответственно.

Для номинальных и согласованного режимов работы ЭЦ баланс мощностей вычисляется в Mathcad по следующим формулам (см. пример 2.9):

1. Для номинального режима при $R_{н1} = 2$ Ом и $I_{н1} = 1$ А:

$$P_{.1} = 2.1 \cdot W \quad P_{.r1} + P_{.R1} = 2.1 \cdot W$$

2. Для номинального режима при $R_{н2} = 0,5$ Ом и $I_{н2} = 3,5$ А:

$$P_{.2} = 7.35 \cdot W \quad P_{.r2} + P_{.R2} = 7.35 \cdot W$$

3. Для согласованного режима при $R_{нс} = r = 0,1$ Ом и $I_{нс} = 10,5$ А:

$$P_{.c} = 22.05 \cdot W \quad P_{.rc} + P_{.Rc} = 22.05 \cdot W$$

Баланс мощностей *сошелся*. Расчет параметров ЭЦ произведен правильно.

2.1.22. Определение внутреннего сопротивления ИН графоаналитическим способом

Режим работы источника напряжения (ИН) определяется прямолинейным участком его ВАХ (рис. 2.16).

Расчет внутреннего сопротивления источника напряжения r на линейном участке ВАХ можно выполнить по формуле. Для расчета r по формуле требуется предварительно определить эксперименталь-

ным путем значения величины тока в ЭЦ I_n при заданном значении сопротивления нагрузки R_n .

$$r := \left(\frac{E}{I_{H1}} \right) - R_{H1} = 0.1 \cdot \Omega$$



Рис. 2.16. Определение внутреннего сопротивления ИН графоаналитическим способом

ВАХ ИН в общем случае может быть задана в виде таблицы значений $U_n = f(I_n)$ и графика, построенного по экспериментальным табличным данным с использованием методов линейной аппроксимации.

Уравнение внешней характеристики ИН, которое записывается на основе обобщенного закона Ома для участка ЭЦ с одним ИН, имеет вид

$$U_{12} = U_n = E - rI_n$$

Согласно уравнению внешней характеристики ИН напряжение на выводах U_{12} ИН на линейном участке ВАХ при увеличении тока I_n в ЭЦ от нуля до номинального значения $I = I_n$ убывает по линейному закону от значения U_{xx} под углом наклона α (см. рис. 2.16). Тангенс угла наклона ВАХ ($\text{tg } \alpha$) соответствует внутреннему сопротивлению r :

$$r = \operatorname{tg} \alpha = \frac{(U_{xx} - U_H)}{I_H}. \quad (*)$$

Для расчета внутреннего сопротивления ИН r с применением графоаналитического метода необходимо выполнить следующие действия:

1. Задать значение тока в ЭЦ $I_H = 3,5$ А (совпадает со значением I_{H1}).
2. Восстановить перпендикуляр к оси абсцисс на графике ВАХ (см. рис. 2.16) в точке $I_H = 3,5$ А и определить ординату U_H точки пересечения перпендикуляра с графиком ВАХ $U_H = f(I_H)$; ($U_H = 1,75$ В).
3. Определить значение разности $(U_{xx} - U_H)$ путем вычитания ординаты U_H из ординаты U_{xx} , равной 2,1, на графике ВАХ ИН.
4. Полученное графическим способом значение разности $(U_{xx} - U_H)$ подставить в формулу (*) и вычислить значение r .

Определенное графоаналитическим способом значение $r = 0,1$ соответствует значению r , вычисленному в Mathcad аналитическим способом (см. пример 2.8).

Пример 2.9. Листинг анализа ЭЦ в номинальном и согласованном режимах

Исходные данные

$$E := 2.1\text{V}, \quad r := 0.1\Omega, \quad R_{H1} := 2\Omega, \quad R_{H2} := 0.5\Omega.$$

1. Расчет параметров ЭЦ

Определение функций пользователя для вычисления параметров ЭЦ:

$$I(R) := \frac{E}{r + R}; \quad U(I) := E - r \cdot I \quad P(R, I) := R \cdot I^2$$

1.1. Расчет параметров ЭЦ для номинальных режимов

Расчет параметров ЭЦ (тока I_{H1} , напряжения U_{H1} и мощности P_{H1}) для номинального режима при R_{H1} (рабочая точка a1):

$$I_{H1} := I(R_{H1}) = 1\text{A}, \quad U_{H1} := U(I_{H1}) = 2\text{V},$$

$$P_{H1} := P(R_{H1}, I_{H1}) = 2\text{W}.$$

Продолжение примера 2.9

Расчет параметров ЭЦ (тока I_{H2} , напряжения U_{H2} и мощности для номинального режима при R_{H2} (рабочая точка a2)

$$I_{H2} := I(R_{H2}) = 3.5 \text{ A} , \quad U_{H2} := U(I_{H2}) = 1.75 \text{ V} ,$$

$$P_{H2} := P(R_{H2}, I_{H2}) = 6.125 \text{ W} .$$

1.2. Расчет параметров ЭЦ для согласованного режима

Расчет параметров ЭЦ (тока I_{HC} , напряжения U_{HC} и мощности P_{HC}).

Сопrotивление нагрузки в согласованном режиме

$$R_{HC} := r .$$

$$I_{HC} := I(R_{HC}) = 10.5 \text{ A} , \quad U_{HC} := U(I_{HC}) = 1.05 \text{ V} .$$

$$P_{HC} := P(R_{HC}, I_{HC}) = 11.025 \text{ W} .$$

3. Расчет потери мощности в источнике и КПД Эц

В номинальном режиме при $R_{HC} = 2 \Omega$:

$$\text{Мощность ЭЦ} \quad P_1 := E \cdot I_{H1} = 2.1 \text{ W} .$$

$$\text{Потери мощности в источнике} \quad \Delta P_1 := r \cdot I_{H1}^2 = 0.1 \text{ W} .$$

$$\text{КПД ЭЦ} \quad \eta_{H1} := \frac{(P_1 - \Delta P_1)}{P_1} = 0.952 .$$

В номинальном режиме при $R_{HC} = 0.5 \Omega$:

$$\text{Мощность ЭЦ} \quad P_2 := E \cdot I_{H2} = 7.35 \text{ W} .$$

$$\text{Потери мощности в источнике} \quad \Delta P_2 := r \cdot I_{H2}^2 = 1.225 \text{ W} .$$

$$\text{КПД ЭЦ} \quad \eta_{H2} := \frac{(P_2 - \Delta P_2)}{P_1} = 2.917 .$$

Окончание примера 2.9

В согласованном режиме при $R_{\text{НС}}$:

$$\text{Мощность ЭЦ } P_c := E \cdot I_{\text{НС}} = 22.05 \text{ W} .$$

$$\text{Потери мощности в источнике } \Delta P_c := r \cdot I_{\text{НС}}^2 = 11.025 \text{ W} .$$

$$\text{КПД ЭЦ } \eta_{\text{НС}} := \frac{(P_c - \Delta P_c)}{P_c} = 0.5 .$$

2.2. Моделирование характеристик элементов ЭЦ постоянного тока в среде программы NI Multisim 14

При изучении электрических цепей (ЭЦ) в курсе «Электротехника» наряду с методами анализа математических моделей характеристик ЭЦ в среде пакета Mathcad применяется схемотехническое моделирование принципиальных схем электротехнических устройств на ЭВМ в среде пакета программ NI Multisim 14.2 (MS14). Схемотехническое моделирование процессов в ЭЦ эффективно использовать для сравнения результатов виртуального эксперимента с расчетами математических моделей, выполненными в пакете Mathcad. В программной среде MS14 можно интерактивно разрабатывать принципиальные схемы электротехнических устройств с использованием эмуляторов моделей компонентов ЭЦ и виртуальных измерительных приборов и исследовать их средствами анализа. Достоинством программной среды MS14 является соответствие используемых информационных моделей электронных компонентов и измерительных приборов и их соединения в виртуальной модели ЭЦ методологии экспериментального исследования ЭЦ на лабораторном стенде.

2.2.1. Запуск программы NI Multisim 14

Установка пакета MS14 на ЭВМ не имеет отличий от установки любых других Windows-приложений. Программу MS14 можно запустить из меню **Пуск** Windows: выбрать пункт **Все программы**; откроется спи-

сок программ; выбрать NI Multisim 14.2. На экране отобразится окно программы MS14 с *интерфейсом пользователя* (рис. 2.17).

При запуске программы MS14 автоматически загружается новый документ **Design1-Multisim (Design1)**. Программа NI Multisim 14.2 не русифицирована. Создаваемый документ необходимо сохранить на жестком диске в файле с расширением **.ms14** с помощью команды **Save as** (Сохранить) меню **File** (Файл). В диалоговом окне **Сохранение документа** в текстовом поле **Имя файла** ввести имя «*Упр_NNN*», где *NNN* — три последних цифры студенческого билета. В поле **Папка** необходимо указать расположение файла на жестком диске. Для хранения файла рекомендуется использовать флэш-память USB-пользователя.

2.2.2. Пользовательский интерфейс MS14

Пользовательский интерфейс программы MS14 выполнен в традиционном для MS Windows стиле (рис. 2.17).

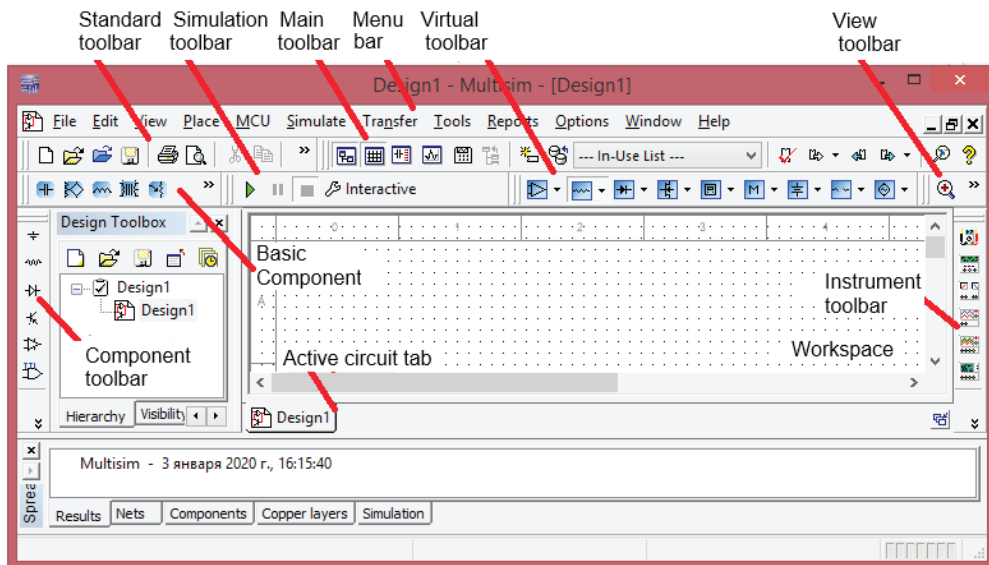


Рис. 2.17. Интерфейс пользователя программной среды MS14

Интерфейс пользователя MS14 содержит следующие основные элементы:

1. **Menu Bar** (Главное меню);

2. **Toolbar** (Инструментальные панели): **Main, Standard, View, Component, Instrument, Simulation, Design**;
3. **Virtual component Family** (Кнопки скрытых панелей виртуальных компонентов): **Place Power Source Family** (Источники энергии), **Place Basic Family** (Компоненты электрической схемы), **Place Measurement Family** (Приборы) и др.;
4. **Basic component** (Панели виртуальных компонентов электрических схем: **Resistor, Variable Resistors** и др.);
5. **Active circuit tab** (Вкладка активной схемы модели);
6. **Workspace** (Рабочая область).

Menu Bar (Главное меню). Строка главного меню содержит команды, в каждой из которых содержится список команд (опций). Часто используемыми при моделировании электрических схем являются команды **File, Edit, View, Place, Simulate, Tools, Option, Windows**.

Меню **File** (Файл) содержит наиболее общие опции работы с документами: **New, Open, Save, Save as, Print** для открытия, сохранения и печати документов — моделей электрических схем.

Меню **Edit** (Редактирование) содержит общие для Windows-программ опции правки документа: **Undo, Cut, Copy, Delete, Select All, Find** для отмены неверного действия, вырезки, копирования, удаления, выделения, поиска.






Наиболее общие опции меню **File** и **Edit** дублируются кнопками на панели инструментов **Standard** и нажатием комбинации клавиш (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Описание кнопок панели инструментов **Standard**

Вид	Название	Назначение
	Кнопка New (Ctrl+N)	Создать новый файл схемы
	Кнопка Open (Ctrl+O)	Открыть существующий файл схемы
	Кнопка Open Sample	Открыть папку с файлами
	Кнопка Save (Ctrl+S)	Сохрани активную схему в файле
	Кнопка Print (Ctrl+P)	Печатать активную схему
	Кнопка Print Preview	Предварительный просмотр схемы при печати






Окончание табл. 2.2

Вид	Название	Назначение
	Кнопка Cut (Ctrl+X)	Удалить выбранные элементы схемы и поместить их в буфер обмена Windows
	Кнопка Copy (Ctrl+C)	Копировать выбранные элементы схемы и поместить их в буфер обмена Windows
	Кнопка Paste — (Ctrl+V)	Вставить фрагменты схемы из буфера обмена Windows на точку установки курсора
	Кнопка Undo (Ctrl+Z)	Отменить последнее выполненное действие
	Кнопка Redo (Ctrl+Y)	Повторить последнее отмененное действие (Undo)

Меню **View** (Вид) содержит опции для отображения и скрытия элементов в рабочем окне схемы моделирования: **Full Screen**, **Zoom In/Out** (масштабирование рабочей области), **Grid** (сетка), **Toolbar** (Панели инструментов), **Page Bounds** (Границы страницы), **Design Toolbox** (Управление элементами на схеме) (рис. 2.18). Опции меню масштабирования рабочей области дублируются кнопками на панели инструментов **View** (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Описание кнопок панели инструментов View

Вид	Название	Назначение
	Кнопка Zoom in (Ctrl+Num+)	Увеличить кратность отображения схемы в окне Workspace
	Кнопка Zoom out (Ctrl+Num-)	Уменьшить кратность отображения схемы в окне Workspace
	Кнопка Zoom area (F10)	Увеличить кратность отображения выделенной компоненты схемы
	Кнопка Zoom sheet (F7)	Отобразить активную схему целиком в рабочем окне Workspace
	Кнопка Full screen (F11)	Показать рабочую область (Workspace) без инструментальных панелей (Toolbars) и панели Меню (Menu Bar)

Подменю команды **Toolbar** содержит следующие опции показа или удаления пиктограмм инструментальных панелей в окне схемы (рис. 2.18):

- **Component** (библиотеки электронных компонентов с номинальными значениями параметров компонентов фирм-производителей);
- **Virtual** (библиотеки виртуальных компонентов, значения параметров которых устанавливаются самим пользователем);
- **Instrument** (библиотека измерительных приборов, по внешнему виду приближенных к их промышленным аналогам).

Меню команды **Simulate** содержит опции для пуска (**Run**), остановки (**Stop**), **Pause** (Паузы), **Analyses** (выбора методов анализа) и других функций моделирования. Наиболее общие опции меню **Simulate** дублируются кнопками на панели инструментов **Simulate** (рис. 2.19).

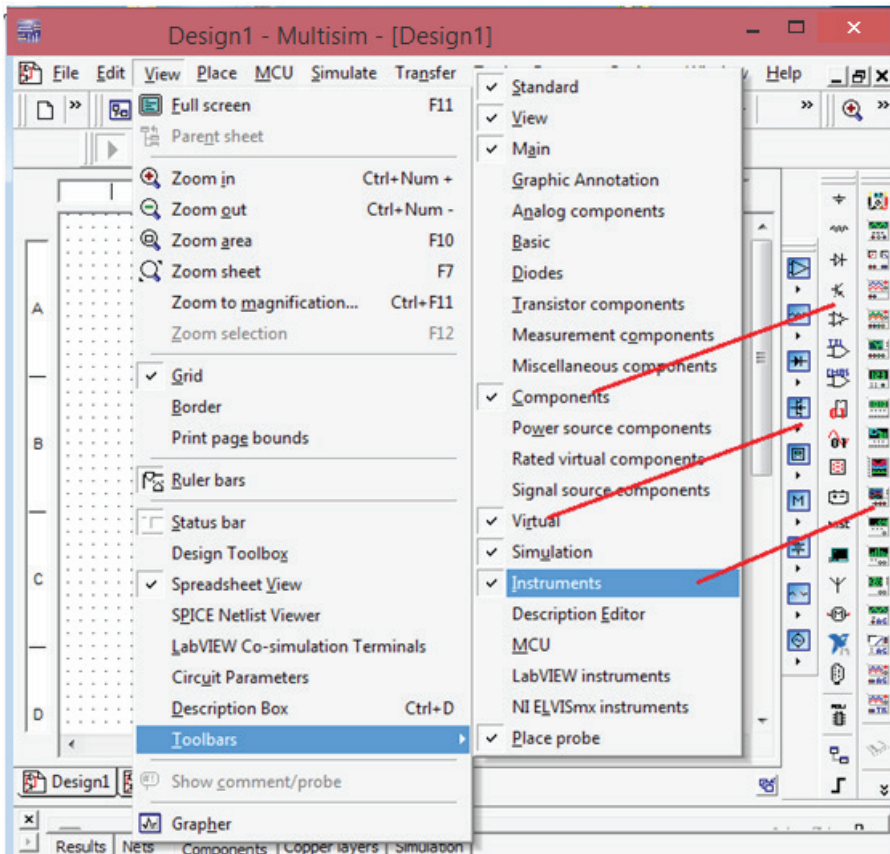


Рис. 2.18. Опции подменю Toolbars команды View меню команд MS14

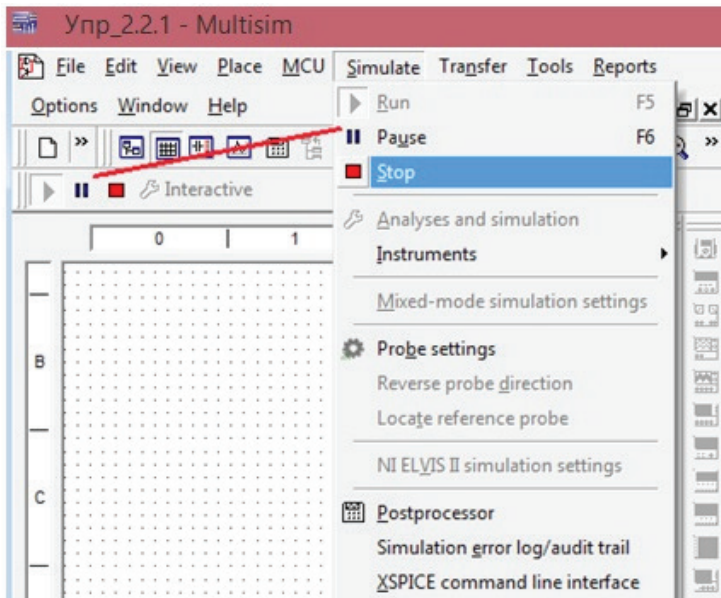
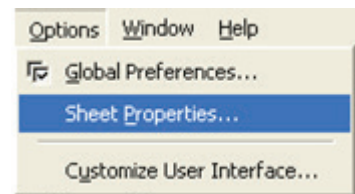


Рис. 2.19. Опции подменю команды Simulation меню команд MS14

2.2.3. Настройки управления свойствами среды MS14

Необходимо провести настройки управления свойствами среды MS14, пользовательского интерфейса и используемых в схеме модели компонентов ЭЦ, виртуальных контрольно-измерительных приборов и инструментария.

Настройка отображения информации около каждого компонента схемы. Выбрать в меню MS14 на вкладке **Option** (Опции) опцию **Sheet Propertise** (Настройка свойств листа), как показано. В открывшемся диалоговом окне на вкладке **Sheet visibility** (Видимость страницы) в разделе **Component** необходимо отключить опцию **Label** и оставить включенными опции **RefDes** (Название компонента) и **Values** (Значение компонента), как показано на рис. 2.20.



Это позволит видеть только названия компонентов на схеме и их значение, к примеру R1 (название) и 1.0 kohm (значение компонента), как показано на встроенной схеме в разделе **Component** на вкладке **Sheet visibility** (см. рис. 2.20).

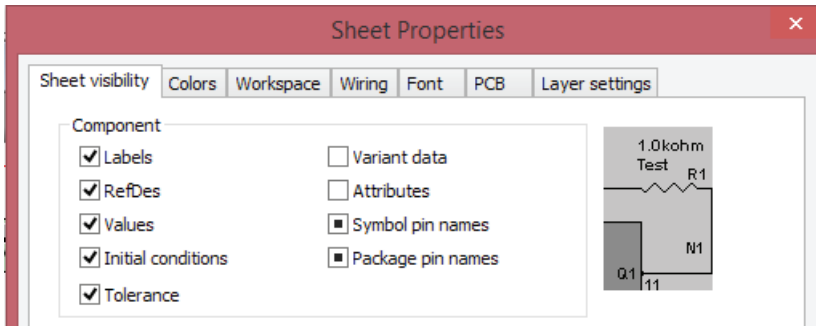


Рис. 2.20. Настройка информации о компонентах схемы

Далее следует сохранить настройки, которые были установлены в диалоговом окне **Sheet Properties**. Чтобы настройки использовались в дальнейшем для всех создаваемых схем, следует не отключать опцию **Save as default** (Использовать по умолчанию).

2.2.4. Компоненты моделей электрических схем в MS14

Компоненты моделей ЭЦ постоянного тока (источников энергии, резисторов, ключей, индикаторов) в программе MS14 могут быть реальные и виртуальные.

Виртуальные компоненты моделей

Виртуальные компоненты — это идеальные модели компонентов электрических схем, в которых не учитываются их реальные характеристики (мощность, физические размеры, фирмы-производители и др.). Для их вызова на рабочее поле используют *панели виртуальных компонентов*. Количество выводимых на экран панелей с соответствующим набором пиктограмм виртуальных компонентов в инструментальной линейке (см. рис. 2.19) зависит от выбора пользователем в диалоговом окне, которое открывается после щелчка мышью на кнопке меню **View** (Вид) и наведения указателя на опцию **Toolbar**. В открывшемся подменю выбрать закладку **Virtual** (Виртуальные компоненты). На экран будет выведена панель инструментов **Virtual** (рис. 2.21), в которой размещены девять пиктограмм библиотек виртуальных компонентов.

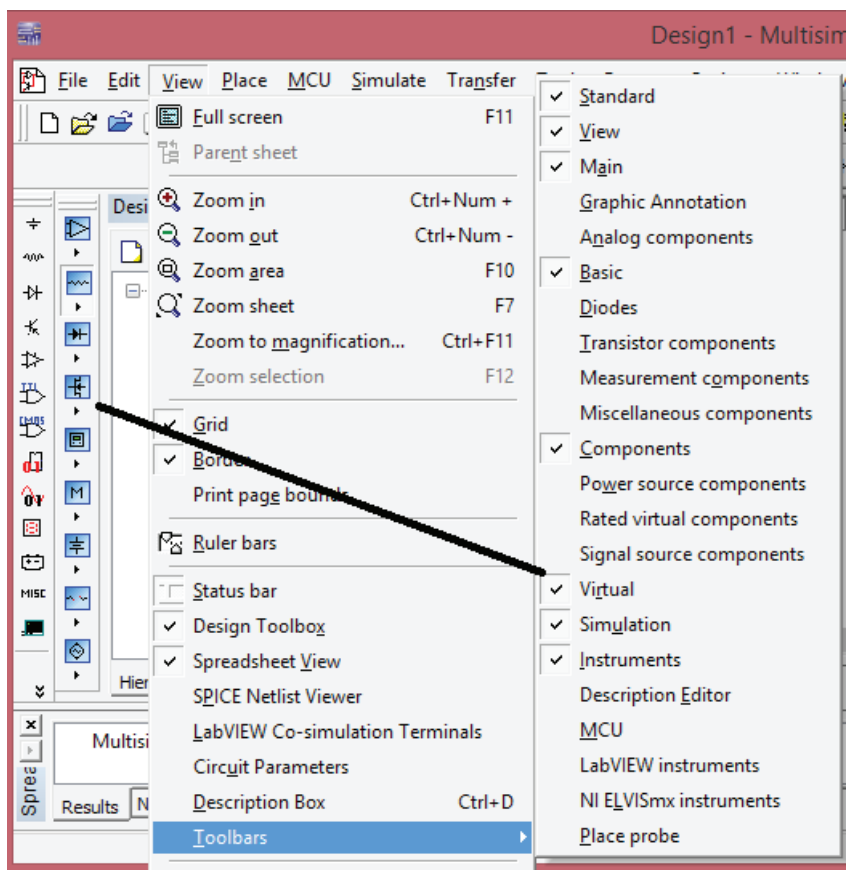
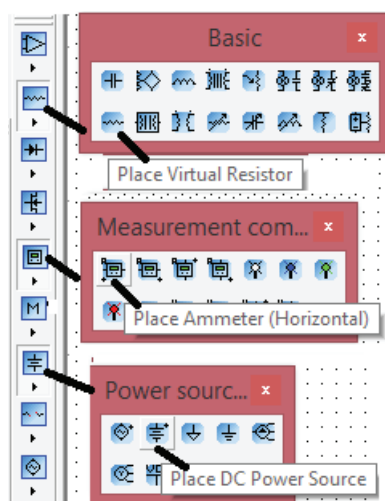


Рис. 2.21. Панель библиотек виртуальных компонентов Virtual

После щелчка на кнопке **Basic Family** (Базовые компоненты) на рабочее поле будет выведена инструментальная панель **Basic**, на которой размещены пиктограммы базовых виртуальных компонентов: конденсатор, индуктивные элементы, резистор, потенциометр и др.


Щелчок на кнопке **Power Source Family** приведет к выводу на рабочее поле инструментальной панели **Power Source**, на которой размещены пиктограммы виртуальных компонентов: источники питания постоянного и переменного напряжения, заземление.



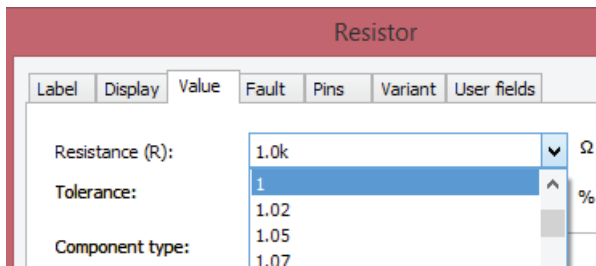
Щелчок на кнопке **Measurement Family** приведет к выводу на рабочее поле инструментальной панели **Measurement Components**, на которой размещены пиктограммы базовых виртуальных компонентов: *измерительных индикаторов* (Амперметры, Вольтметры, Пробники).

Резистор

Чтобы добавить виртуальный компонент *резистор* в схему модели на рабочее поле, нужно щелкнуть на кнопке компонента **Resistor** (Ре-

зистор) на инструментальной панели **Basic** . Иконка Резистора будет «привязана» к курсору мыши. Поместить курсор мыши на рабочее поле и щелкнуть левую кнопку мыши, чтобы добавить иконку Резистора в схему набора. В программе MS14 применяется стандарт США для обозначения Резистора в схеме модели. Сопротивление виртуального компонента измеряется в омах. Резистору на схеме будет присвоено имя RN (N – порядковый номер резистора на схеме) и значение 1.0 kΩ (по умолчанию).

После создания виртуального компонента «Резистор» его нужно настроить на заданный номинал значения, например 0,1 Ом, и изменить его название (*r*).



Чтобы изменить параметры (модифицировать) компонента Резистор, дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по его иконке на рабочем поле модели.

В появившемся окне **Resistor** выбрать вкладку **Value**, установить значение параметра Resistance (R) и единицы измерения. Затем выбрать вкладку **Label**, чтобы изменить название компонента Резистор. Чтобы завершить настройку параметров компонента, нажать на кнопку ОК в окне **Resistor**. Изменения будут отражены на иконке компо-

нента в схеме модели .

Панели виртуальных компонентов **Virtual** модели схемы ЭЦ удобно использовать на *начальном этапе* при сборке моделей MS14 для простых ЭЦ. На *завершающем этапе* разработки схемы модели ЭЦ и виртуального эксперимента целесообразно использование библиотек стандартных компонентов с номинальными значениями параметров компонентов фирм-производителей.

При выборе строки **Component** в меню **Toolbar** в рабочем окне будет выведена панель инструментов **Component** (рис. 2.22, крайняя слева), которая предоставляет доступ к пиктограммам 17 библиотек стандартных компонентов MS14.

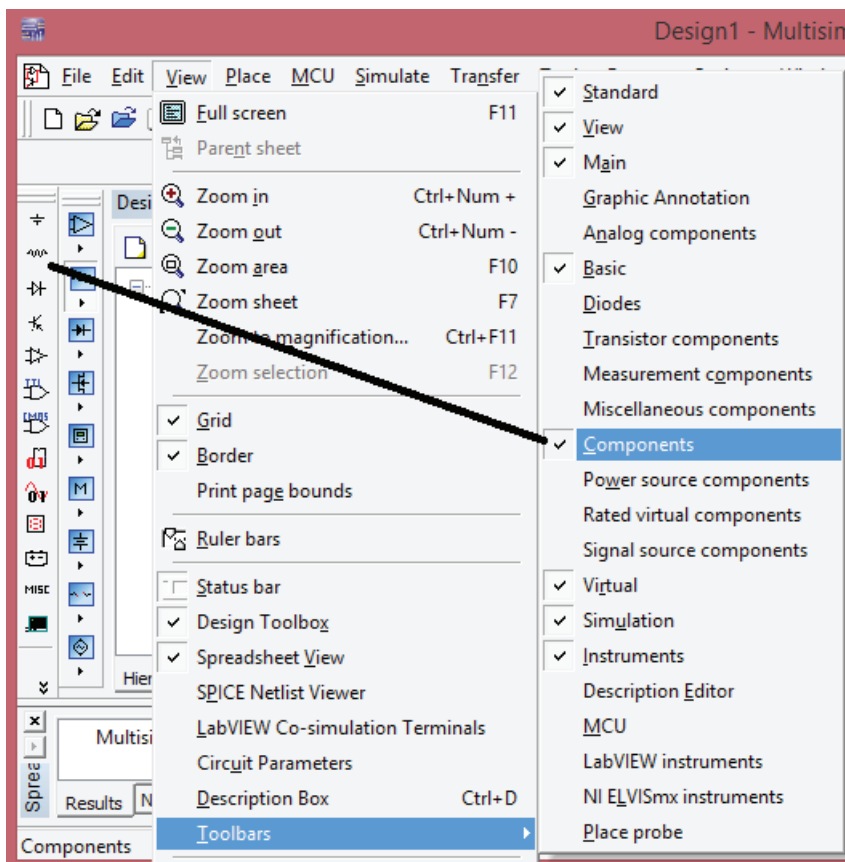
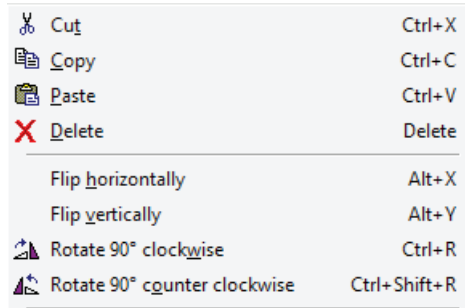
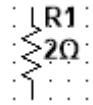


Рис. 2.22. Панель библиотек компонентов закладки Components

Щелкнуть по пункту **Basic** на панели инструментов **Components** (рис. 2.23). В открывшемся окне выбрать в меню **Group** нужную би-

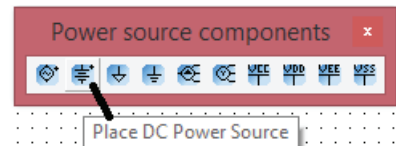


На иконке компонент Резистор располагается «горизонтально». Если требуется расположить компонент Резистор «вертикально», то следует выделить его пиктограмму на схеме модели, щелкнув правой кнопкой мыши. В открывшемся контекстном меню предлагается несколько опций для изменения положения компоненты: **Rotate 90° clockwise** (на 90° по часовой стрелке) и **Rotate 90° counter clockwise** (на 90° против часовой стрелки). Выбрать команду **Rotate 90° clockwise**.



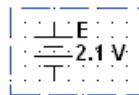
Источник постоянного напряжения

Чтобы добавить виртуальный компонент *источник постоянного напряжения* в схему модели, нужно щелкнуть на кнопке компонента **Place DC Power Source** (Источник напряжения DC) на инструментальной панели **Power Source components**. Иконка Источника напряжения DC будет «привязан» к курсору мыши. Поместить курсор мыши на рабочем поле и щелкнуть



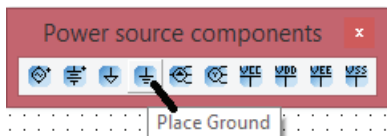
левую кнопку мыши, чтобы добавить компонент Источник напряжения DC в схему набора. В программе MS14 применяется стандарт США для обозначения источника напряжения DC. Длинной чертой в изображении источника напряжения DC обозначается вывод, имеющий положительный потенциал по отношению к другому выводу. ЭДС виртуального компонента Источник напряжения DC измеряется в вольтах и может быть задана кратными значениями (от микровольт до киловольт). Источнику напряжения DC на схеме будет присвоено имя VN (N – порядковый номер Источника напряжения DC на схеме) и значение 12 V (по умолчанию).

Чтобы изменить (модифицировать) параметры Источника напряжения DC, дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по его иконке на рабочем поле. В появившемся окне **DC_POWER** выбрать вкладку **Value** и установить требуемое значение параметра компонента Источник напряжения DC и единицы измерения. Затем выбрать вкладку **Label**, чтобы изменить название компонента. Чтобы завершить настройку параметров Источника напряжения DC, нажать на кнопку ОК в окне **DC_POWER**. Изменения будут отражены в схеме модели компонента.




Заземление

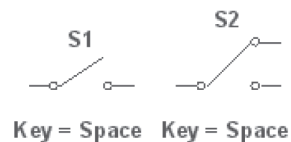
В схеме модели Multisim любая схема должна иметь *заземление*. Компонент модели *заземление* имеет нулевой потенциал.



Чтобы добавить виртуальный компонент Заземление в схему модели следует щелкнуть на кнопке компонента **Place Ground** (Заземление) на инструментальной панели **Power Source components**.

Компонент Заземление будет «привязана» к курсору мыши . Поместить курсор мыши на рабочем поле и щелкнуть левую кнопку мыши, чтобы добавить компонент Заземление в схему набора.

Ключи, управляемые клавишей



Ключи на одно положение S1 (SPST) и на два положения S2 (SPDT), управляемые клавишей на клавиатуре, являются стандартными компонентами модели Multisim и принадлежат семейству **SWITCH**.

Чтобы добавить компонент **SPST** (Ключ на одно положение) в схему модели, следует на панели инструментов **Components** (рис. 2.23) выбрать пункт **Basic**. В открывшемся окне в меню **Group** (рис. 2.24) в семействе библиотек виртуальных компонент (Family) выбрать библиотеку компонентов **SWITCH**. Затем, чтобы добавить в схему модели компонент **SPST** (Ключ S1), необходимо в библиотеке компонент **SWITCH** выбрать компонент **SPST**. Чтобы добавить в схему модели компонент **SPDT** (Ключ S2) необходимо в библиотеке компонент выбрать компонент **SPDT** (рис. 2.24).

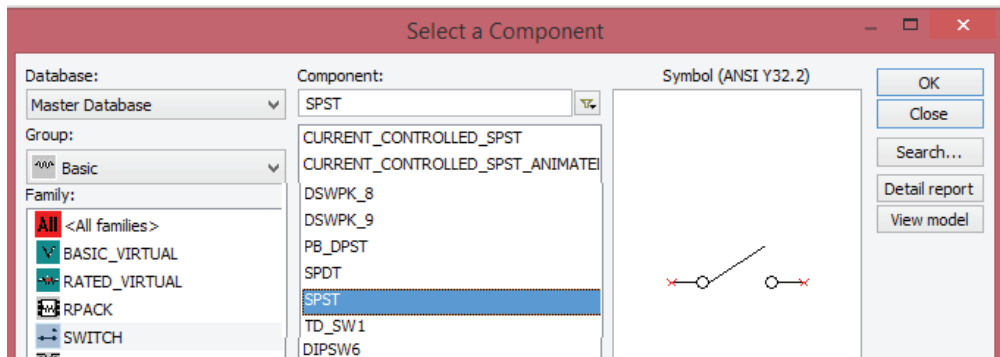
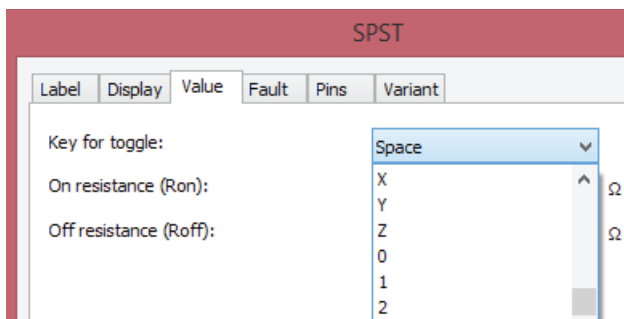


Рис. 2.24. Добавление в схему модели Ключей, управляемых клавишей

Для управления ключами S1 и S2 могут быть использованы клавиши:

- буквы от A до Z;
- цифры от 0 до 9;
- клавиши Enter и Space (пробел).



Имя управляющей клавиши можно ввести в диалоговом окне, которое появляется после двойного щелчка на изображении иконки ключа.

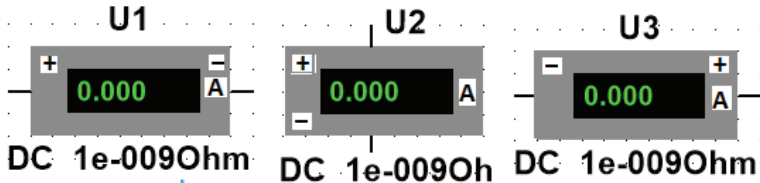
Индикаторы

Для отображения результатов моделирования характеристик ЭЦ в MS14 применяют *компоненты-индикаторы* (Амперметр, Вольтметр, Пробник, Мультиметр). *На начальном этапе* при сборке и моделировании простых схем ЭЦ удобно использовать *панели виртуальных компонентов-индикаторов*. В меню **Toolbars** (Панели инструментов), которое открывается после щелчка мышью на кнопке меню **View** (Вид)

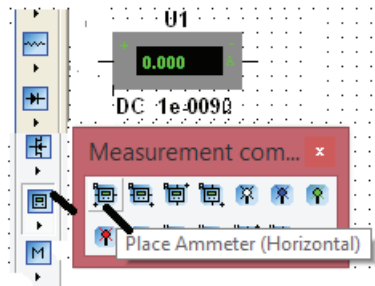
и щелчка на закладке **Virtual** (Виртуальные компоненты), на экране появится панель пиктограмм **Virtual** (см. рис. 2.21).

На панели пиктограмм щелкнуть на кнопке **Measurement Components**. На экране появится инструментальная панель виртуальных компонентов, которая содержит по 4 пиктограммы **Place Ammeter** (Амперметр) и **Place Voltmeter** (Вольтметр), а также 5 пиктограмм **Place Probe** (Пробник).

Ammeter (Амперметр) используется в схеме модели как индикатор (измеритель) тока в ЭЦ. Все пиктограммы на панели **Measurement Components** для индикатора **Ammeter** выполняют одну и ту же функцию, но имеют различное расположение полюсов для подключения к внешней цепи: **Horizontal** ($U1$, горизонтальное расположение полюсов на схеме слева — полюс «+», справа — «-»), **Vertical** ($U2$, вертикальное расположение полюсов на схеме сверху — полюс «+», снизу — «-»), **Rotated** ($U3$, горизонтальное противоположное расположение полюсов на схеме слева — полюс «-», справа — «+»).



Чтобы добавить индикатор **Ammeter** с горизонтальным расположением выводов на рабочее поле, необходимо щелкнуть кнопку-пиктограмму **Place Ammeter (Horizontal)** на инструментальной панели **Measurement Components**. Иконка индикатора **Ammeter** будет «привязана» к курсору мыши.



Переместить курсор мыши на рабочем поле и щелкнуть левую кнопку мыши, чтобы добавить компонент **Ammeter** в схему набора, как показано ниже.

На иконке индикатора **Ammeter** на схеме модели отображены его параметры: **Mode DC** и **Resistance (1e-009Ohm)**.

Индикатор **Ammeter** на схеме настроен на режим измерения постоянного тока

Mode DC, ему присвоено имя UN (N – порядковый номер индикатора на схеме, N=1). В схеме модели ЭЦ **Ammeter** включается последовательно с другими компонентами, по которым протекает измеряемый ток. Значение последовательного сопротивления индикатора **Ammeter** должно быть небольшим. По умолчанию в MS14 используется значение $1e-009$ Ohm (1 нОм). Такое сопротивление очень мало по сравнению с общим сопротивлением схемы ЭЦ, и индикатор **Ammeter** не будет оказывать существенного влияния на схему.

Параметры индикатора **Ammeter**: **Mode** (режим измерения), **Resistance (R)** (последовательное сопротивление) и название можно настроить. Дважды щелкнуть по иконке индикатора **Ammeter** на рабочем поле, откроется диалоговое окно **Ammeter**, вид которого приведен на рис. 2.25.

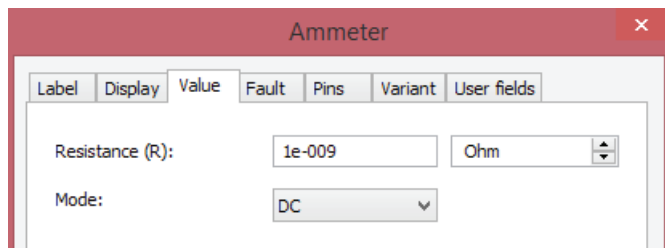
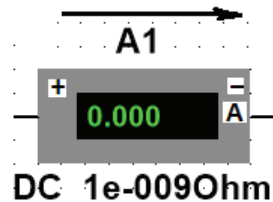
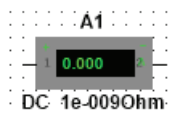


Рис. 2.25. Настройка параметров индикатора тока Ammeter

Чтобы изменить значение **Resistance (R)** индикатора тока или режим измерения, следует выбрать вкладку **Value**. Появится панель настроек параметров индикатора **Ammeter**. В текстовые поля параметров **Resistance (R)** и **Mode** внести соответствующие изменения, как показано на рис. 2.25. Нажать кнопку ОК, чтобы принять изменения, которые отобразятся на схеме модели. Чтобы изменить название компонента-индикатора, следует выбрать вкладку **Label** (Ярлык). В текстовое поле **RefDes** ввести новое название «A1».

На пиктограмме Амперметра имеются символы «+» и «-». При добавлении компонента **Ammeter** в схему модели следует учитывать направление движения измеряемого тока на участке ЭЦ.

При движении тока в направлении, показанном стрелкой, индикатор тока покажет положительное направление (ток входит в полюс



«+», расположенный слева на иконке, и выходит из «—»). Если на панели индикатора тока отображается отрицательное значение, ток в ЭЦ имеет направление, противоположное стрелке.

На завершающем этапе разработки схемы модели ЭЦ целесообразно использование компонентов-индикаторов тока из библиотеки стандартных индикаторов **Ammeter**. При выборе пункта **Component** в меню **Toolbar** в рабочем окне будет выведена панель инструментов **Component** (рис. 2.26, крайняя слева).

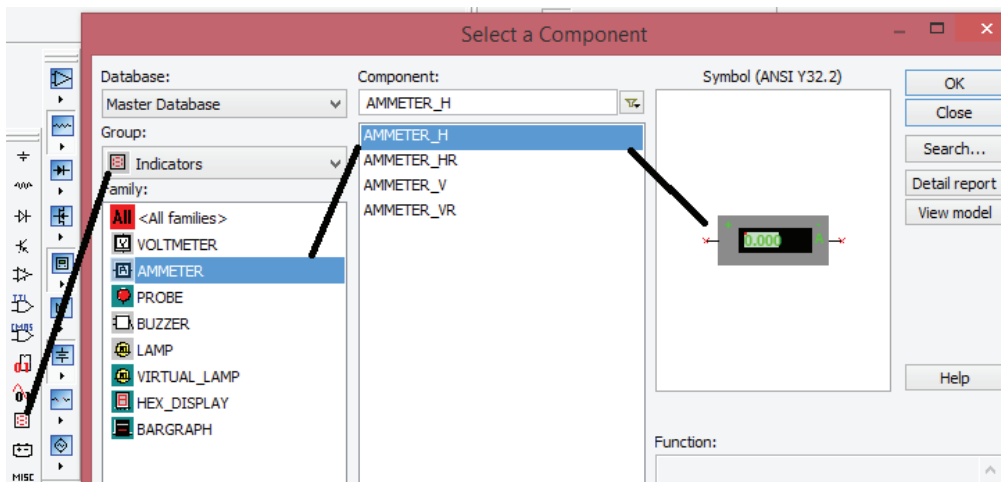



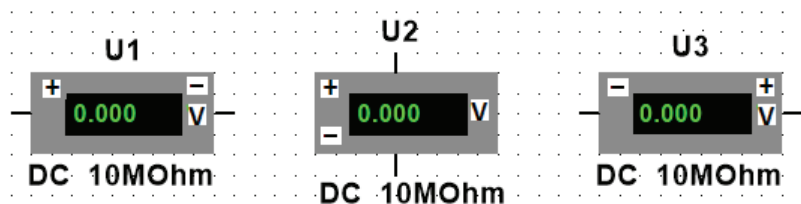
Рис. 2.26. Выбор компонента **Ammeter_H** в окне **Select a Component**

Щелкнуть по пиктограмме **Place Indicator**  на панели инструментов **Components**. В открывшемся окне **Select a Component** выбрать в меню **Group** семейство библиотек виртуальных компонентов-индикаторов **Indicator**.

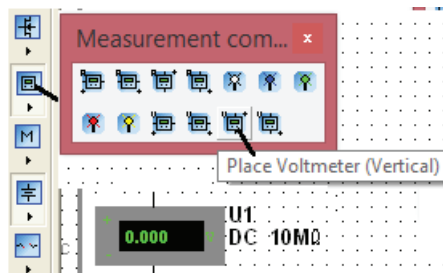
Чтобы выбрать компонент **Ammeter_H** (Амперметр с горизонтальным расположением полюсов), следует выбрать библиотеку **Ammeter** в окне **Select a Component** (рис. 2.26). Затем следует выбрать индикатор **Ammeter_H** и щелкнуть мышью на кнопке **OK**. Иконка индикатора **Ammeter_H** будет «привязана» к мыши. Переместить мышью индикатор на рабочее поле и щелкнуть левой кнопкой мыши. Чтобы завершить операцию добавления компонента-индикатора **Ammeter_H**, щелкнуть на кнопке **Close** в окне **Select a Component**.

Voltmeter (Вольтметр) используется в схеме модели как индикатор (измеритель) напряжения между двумя узлами ЭЦ. Все пикто-

граммы на панели **Measurement Components** для индикатора напряжения **Voltmeter** выполняют одну и ту же функцию, но имеют различное расположение полюсов для подключения к внешней ЭЦ, аналогично индикатору тока **Ammeter**.



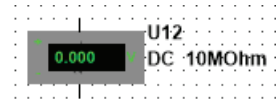
Чтобы добавить компонент индикатора напряжения **Voltmeter** с вертикальным расположением выводов на рабочее поле необходимо щелкнуть кнопку-пиктограмму **Place Voltmeter (Vertical)** на инструментальной панели **Measurement Components**. Иконка индикатора **Voltmeter (Vertical)** будет «привязана» к курсору мыши. Переместить курсор мыши на рабочее поле и щелкнуть левую кнопку мыши, чтобы добавить индикатор **Voltmeter (Vertical)** в схему набора.



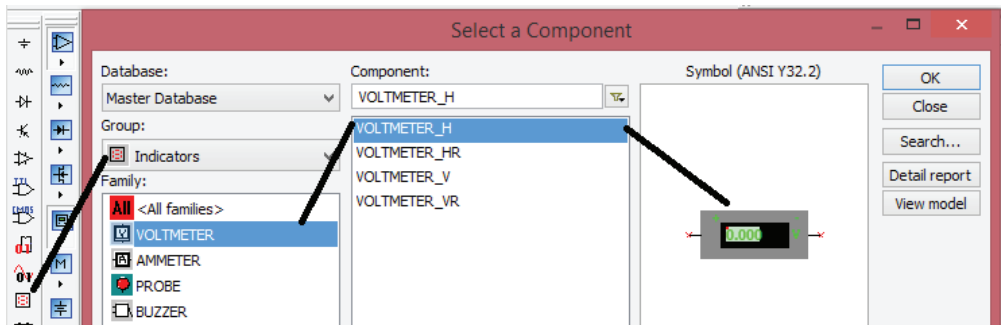
На изображении компонента-индикатора **Voltmeter** на схеме модели отображены его параметры: **Mode DC** (Индикатор напряжения постоянного тока) и параллельное сопротивление **Resistance (10MOhm)**. Индикатор **Voltmeter** настроен по умолчанию на режим измерения **DC**, ему присвоено имя **UN** (**N** – порядковый номер индикатора **Voltmeter** на схеме, **N=1**).

Другим важным параметром индикатора **Voltmeter** является его параллельное сопротивление **Resistance (10MOhm)**. Реальные приборы для измерения напряжения (Вольтметры) подключаются на схеме ЭЦ между двумя узлами параллельно элементам и должны пропускать небольшой ток, который моделируется подключением параллельного сопротивления. По умолчанию в программе MS14 используется сопротивление 10 MOhm ($1e+007$ Ohm). Предполагается, что сопротивление 10 МОм отвлекает ток, который не вносит существенного воздействия на процессы в схеме модели ЭЦ.

Параметры индикатора **Voltmeter** можно настроить в диалоговом окне **Voltmeter**, которое имеет вид, аналогичный окну индикатора тока **Ammeter** (см. рис. 2.25). Чтобы изменить название прибора на **U12**, можно дважды щелкнуть по иконке индикатора, откроется диалоговое окно **Voltmeter**, в котором выбрать вкладку **Label** и ввести новое название в текстовое поле **RefDes**.



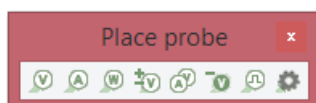
При использовании библиотеки стандартных компонентов-индикаторов напряжения **Voltmeter** для добавления их в схему модели следует в окне **Select a Component** щелкнуть в каталоге семейств компонентов **Indicator** на семействе **VOLTMETER**, как видно ниже.



Затем следует выбрать компонент-индикатор **VOLTMETER_H** и щелкнуть мышью на кнопке **ОК**. Иконка индикатора будет «привязана» к мыши. Переместить мышью индикатор на рабочее поле и щелкнуть левой кнопкой мыши. Чтобы завершить операцию добавления компоненты **VOLTMETER_H**, щелкнуть на кнопке **Close** в окне **Select a Component**.






Измерительный Пробник

Probe (Измерительный Пробник) является виртуальным компонентом программы MS14. Он предназначен для просмотра результатов измерений напряжения, тока и мощности в схеме модели MS14 в режиме **Simulation** (Анализ).

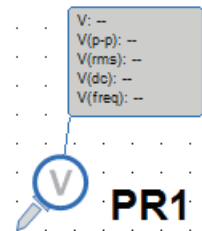


Пиктограммы индикатора **Probe** расположены на инструментальной панели **Place Probe**, которая появляется после щелчка на опции **Place Probe** в меню **Toolbar** (см. рис. 2.18).

На панели **Place Probe** представлены следующие пиктограммы типов индикатора **Probe** для измерения *по постоянно току* и отображения результатов:

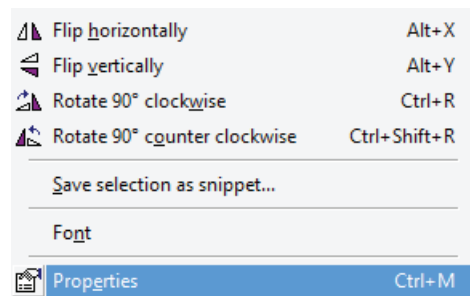
-  напряжения;
-  тока;
-  мощности;
-  напряжения и тока;
-  настройки параметров пробника.

Чтобы добавить компонент-индикатор **Probe** в схему модели, подвести мышку к выбранной пиктограмме на панели **Place Probe** и щелкнуть левой кнопкой мыши. Иконка индикатора **Probe** будет «привязана» к мыши, курсор примет вид окна результатов. Переместить мышью иконку индикатора **Probe** на рабочее поле и щелкнуть левой кнопкой мыши. Компоненту **Probe** присвоено имя **PRN** (N – порядковый номер индикатора **Probe** на схеме, $N=1$), показано добавление в схему модели индикатора **Probe** (*Пробника напряжения*). В «окне результатов» приводится его шаблон для отображения данных измерения по постоянному и переменному току (по умолчанию).



Данные измерений в окне результатов индикатора **Probe** необходимо настроить на режим измерения **DC** (постоянного напряжения) в диалоговом окне **Probe Properties** (Свойства Пробника). Для каждого типа индикатора **Probe** вызывается контекстно зависимое окно **Probe Properties**.

Для вызова диалогового окна следует щелкнуть правой кнопкой мыши на иконке индикатора **Probe** (Измерительный Пробник) в рабочем окне и в контекстном меню выбрать опцию **Properties** (Свойства). Для индикатора **Voltage Probe** (Пробник напряжения) будет вызвано окно **Voltage Probe Properties** (рис. 2.27).



Выбрать вкладку **General** и удостовериться, что отмечен нужный тип индикатора (**Probe type**) **Voltage**. Открыть окно на вкладке **Parameters** и включить опцию **Custom** (Настройки пользователя) и из-

менить настройки по умолчанию, установив **No** для параметров измерения по переменному току.

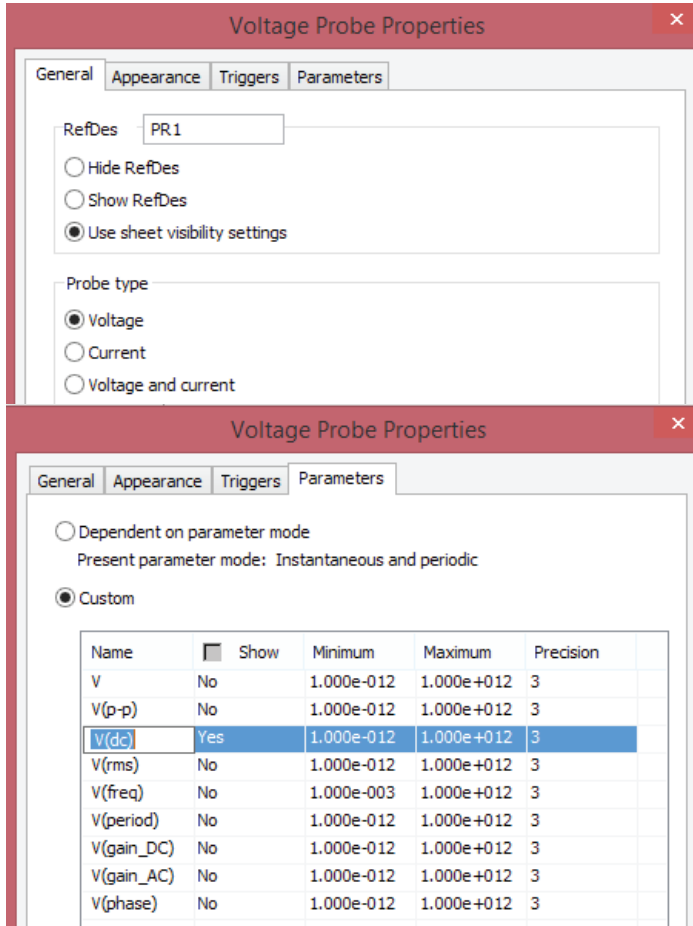


Рис. 2.27. Настройка свойств окна вывода результатов измерений индикатора Voltage Probe

В результате настройки вид иконки индикатора **Voltage Probe** на рабочем поле изменится: в окне результатов будет отображен только вывод напряжения по постоянному току.



Добавление других типов индикатора **Voltage Probe** (тока, мощности) в схему модели и настройка окна вывода результатов измерения по постоянному току в окне **Probe Properties** производится аналогично настройке свойств индикатора **Voltage Probe** (рис. 2.27).

2.2.5. Панель библиотеки индикаторов «Приборы»

В рабочем окне MS14 справа от рабочего поля выведена вертикальная панель кнопок-пиктограмм из библиотеки **Приборы**, на которой расположены приборы для формирования и измерения аналоговых и цифровых сигналов (см. рис. 2.25). Для вывода панели **Приборы** в рабочее окно MS14, щелкнуть мышью на закладке **Instruments** (Приборы) меню **Toolbars**. Назначение кнопок-пиктограмм приведено на рис. 2.28.

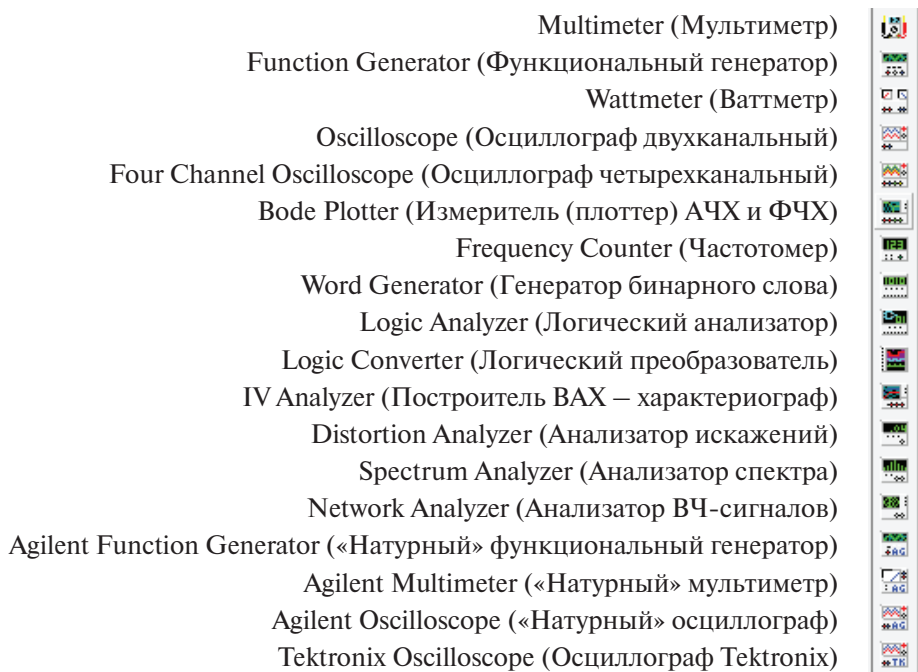


Рис. 2.28. Панель кнопок-пиктограмм библиотеки Instruments меню Toolbars

Мультиметр

Multimeter (Мультиметр) является универсальным виртуальным измерительным прибором, который объединяет в себе функции Амперметра, Вольтметра и Омметра. В схеме модели MS14 с помощью прибора **Multimeter** можно измерить: постоянное и переменное напряжение или ток; сопротивление; уровень затухания напряжения в децибелах между двумя узлами ЭЦ.

На схеме модели компонент-прибор **Multimeter** представлен иконкой **XMM1** и его лицевой панелью (рис. 2.29).

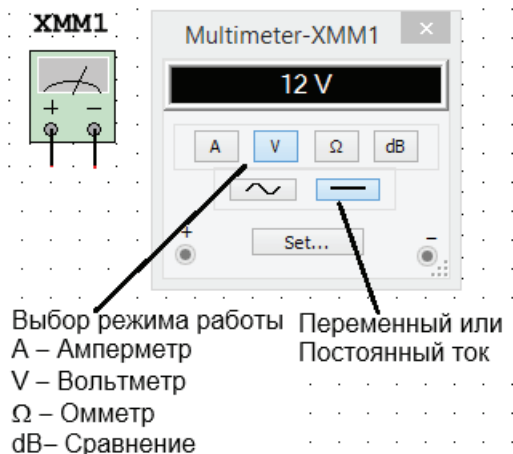



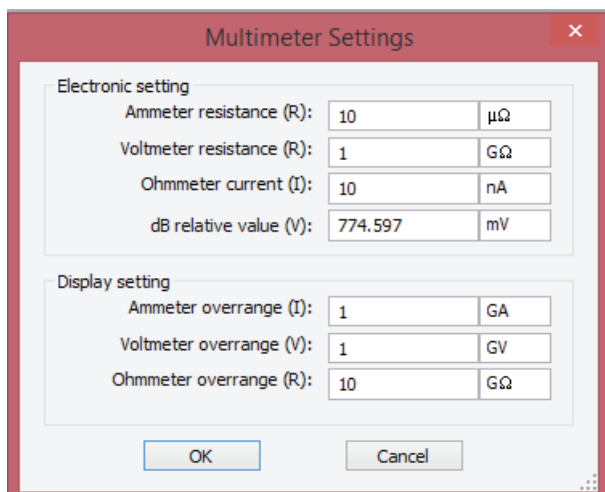
Рис. 2.29. Изображение (иконка) и лицевая панель виртуального прибора Multimeter

Чтобы добавить компонент **Multimeter** на рабочее поле программы MS14 следует нажать кнопку **Multimeter** на панели **Instrument** (Приборы)  (рис. 2.28, первая сверху пиктограмма в линейке). Иконка **Multimeter** будет «привязана» к курсору мыши и может быть помещена в схему модели, как и любой другой виртуальный компонент. Количество добавляемых в схему приборов **Multimeter** зависит от одновременно производимых измерений.

В верхней части лицевой панели **Multimeter** (рис. 2.29) находится табло «Результаты измерений». Ниже табло расположены 4 кнопки опций, которые используются для выбора режима работы прибора **Multimeter** (по единицам измерения): Амперметр (A), Вольтметр (V), Омметр (Ω), уровень децибел (dB). Ниже кнопок опций выбора типа измерений расположены две кнопки выбора вида измеряемого сигнала: «Постоянный ток и напряжение» (—) и «Переменное напряжение» (~).

Диапазон измерений входных величин подбирается автоматически. Параметры прибора **Multimeter** в различных режимах работы установлены по умолчанию, но их можно изменить. В нижней части лицевой панели (рис. 2.29) находится кнопка **Set** (Параметры), нажав

на которую открывается диалоговое окно **Multimeter Setting** (Параметры мультиметра).



В этом окне можно настроить:

- последовательное сопротивление в режиме Амперметра (Ammeter resistance) (R);
- входное сопротивление в режиме Вольтметра (Voltmeter resistance) (R);
- измерительный ток в режиме Омметра (Ohmmeter current) (I);

Чтобы установки вступили в силу, следует нажать на кнопку **OK** в окне **Multimeter Setting**.

Входные клеммы $\langle + \rangle$ и $\langle - \rangle$ на пиктограмме **XMM1** и передней панели **Multimeter** (рис. 2.29) означают, что прибор покажет положительное значение (в режиме работы Амперметр или Вольтметр), если ток входит в $\langle + \rangle$ и выходит в $\langle - \rangle$.

Чтобы отобразить измеренные значения следует дважды щелкнуть по иконке **XMM1**. Откроется лицевая панель прибора (рис. 2.29). Показания прибора изменяются только при включенном режиме моделирования схемы (в меню **Simulate** выбрана опция **Run**) (п. 2.2.7).

Ваттметр

Прибор **Wattmeter** (Ваттметр) является виртуальным прибором в программе MS14. В схеме модели он может применяться для измерения мощности постоянного и переменного тока. На схеме модели

на рабочем поле **Wattmeter** представлен иконкой **XWM1** и его лицевой панелью виртуального прибора (рис. 2.30).

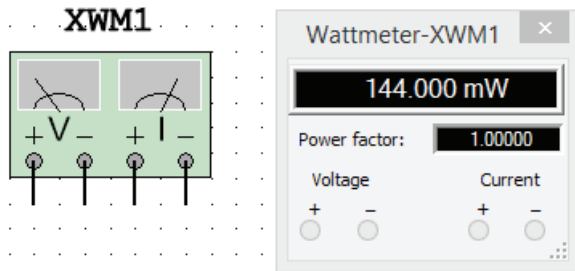



Рис. 2.30. Изображение (иконка) и лицевая панель виртуального прибора **Wattmeter**

Чтобы добавить **Wattmeter** на рабочее поле программы Multisim следует нажать кнопку-пиктограмм **Wattmeter** на панели **Instrument** (Приборы)  (рис. 2.28). Иконка прибора **Wattmeter** будет «привязана» к курсору мыши и может быть помещена в схему модели, как и любой другой компонент. Количество добавляемых в схему модели пиктограмм приборов **Wattmeter** зависит от одновременно производимых измерений мощности.

Чтобы измерить мощность, рассеиваемую резистором, нужно измерить напряжение и ток, который проходит по резистору, как положительные значения. Подключение компонента-прибора **Wattmeter** к резистору в схеме модели и измерение положительного напряжения и тока через резистор выполняются так же, как и с помощью индикаторов тока и напряжения или прибора **Multimeter** (ток входит в полюс <+> и выходит в <->).

Чтобы отобразить результат измерения мощности, следует дважды щелкнуть по пиктограмме **Wattmeter**. Откроется лицевая панель прибора (рис. 2.30). Показания прибора изменяются на табло только в режиме моделирования схемы (в меню **Simulate** выбрана опция **Run**) (п. 2.2.7).

2.2.6. Сборка электротехнических схем в среде MS14

Моделируемая электрическая схема модели собирается на рабочем поле программы MS14 (см. рис. 2.18). При сборке и редактировании схемы модели ЭЦ выполняются следующие операции:


- выбор компонента схемы модели из библиотеки компонентов MS14, перенос его на рабочее поле, настройка его параметров (названия, установка значения);
- выбор измерительного индикатора из библиотеки MS14 и расположение его на рабочем поле;
- выделение компонента (группы компонентов), копирование, удаление, вставка и перемещение компонентов схемы модели на рабочем поле;
- соединение компонентов проводниками, удаление проводников, вставка дополнительных компонентов в электрическую схему модели;
- размещение текста комментариев на рабочем поле.

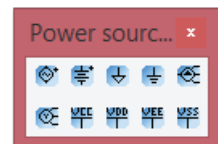
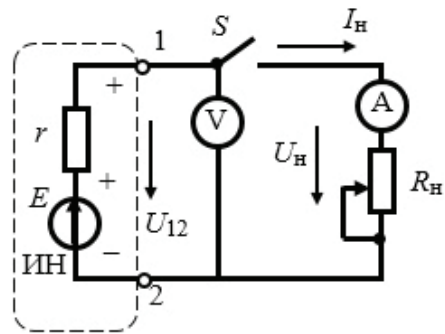
Процесс создания схемы модели ЭЦ в программной среде MS14 начинается с выбора из библиотек программы MS14, переноса и размещения на рабочем поле нужных виртуальных компонентов и соединения их проводниками между собой.

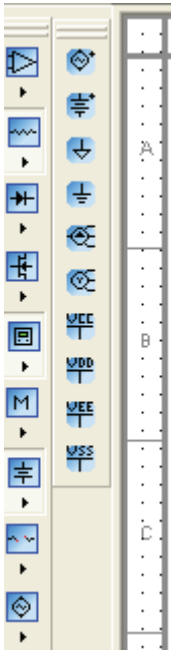
Сборка схемы модели может быть проведена добавлением в схему модели, размещением на рабочем поле и соединением «проводниками» следующих компонент из библиотек компонентов MS14.



1. Источник напряжения DC со значением ЭДС $E = 2,1 \text{ V}$.
2. Резисторы: сопротивление нагрузки $R_H = 2 \text{ ohm}$; внутреннее сопротивление источника напряжения $r = 0,1 \text{ ohm}$.
3. Измерительные индикаторы: **Ammeter**, **Voltmeter**, **Wattmeter**.
4. Заземление.
5. Ключ на одно положение.

Добавление в схему модели источника постоянного напряжения и заземления

На панели библиотек виртуальных компонентов **Virtual** (см. рис. 2.21) щелкнуть на кнопке  **Show Power Source Family**. На экран будет выведена инструментальная панель **Power Source Component**, на которой расположены кнопки-пиктограммы ис-

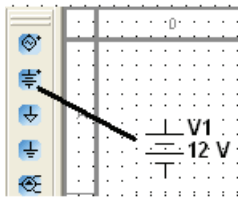




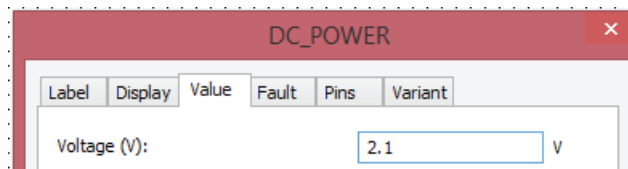
точника напряжения  (**DC Power Source**) и заземления  (**Ground**).

Панель инструментов **Power Source Component** переместить на рабочем поле с помощью мыши в удобное место, чтобы не загромождать схему модели. Для перемещения панели инструментов поместить курсор на заголовке панели, щелкнуть левой кнопкой мыши и, продолжая удерживать нажатой левую кнопку мыши, переместить курсор, как показано на рисунке (панель **Power Source Component** в виде вертикальной линейки расположится с левой стороны на рабочем поле), и опустить кнопку мыши.

Чтобы добавить компонент Источник напряжения DC на рабочее поле, необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши по кнопке **Place DC Power Source** (Добавить Источник питания DC). Иконка Источника питания DC «привяжется» к курсору мыши и будет следовать за его передвижением по рабочему полю. Переместить иконку в нужное место и щелкнуть левой кнопкой мыши, чтобы добавить компонент в схему модели.



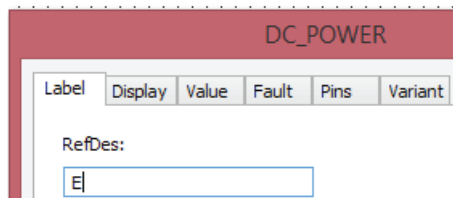
Далее необходимо настроить параметры компонента **DC Power Source**. Дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по иконке **DC Power Source**, чтобы открыть диалоговое окно **DC POWER**. Выбрать вкладку **Value**.



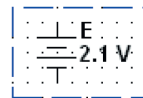
Поместить курсор в текстовое поле **Voltage (V)**. Удалить текущее значение 12 с помощью нажатия клавиши <Backspace> и ввести число 2.1.

Название компонента **DC Power Source V1** установлено по умолчанию. Чтобы изменить название Источника напряжения, выбрать

вкладку **Label** (Ярлык). В текстовое поле **RefDes** ввести новое название «E».



Нажать кнопку ОК, чтобы принять изменения, которые отобразятся на изображении компонента в схеме модели.

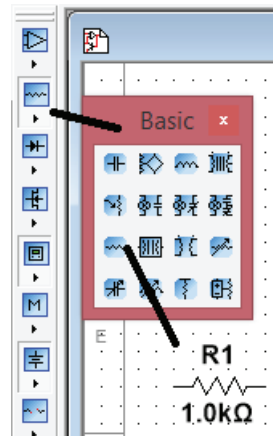


Чтобы добавить компонент Заземление необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши по кнопке **Place Ground** (Добавить Заземление). Иконка компонента Заземление «привяжется» к курсору мыши и будет следовать за его передвижением по рабочему полю. Переместить иконку Заземление в нужное место на рабочем поле и щелкнуть левой кнопкой мыши.



Добавление в схему моделей резисторов

На панели библиотек виртуальных компонентов **Virtual** (см. рис. 2.21) щелкнем на кнопке **Show Basic Family**. На экран будет выведена инструментальная панель **Basic**, на которой расположена кнопка-пиктограмма резистора **Place Virtual Resistor**. Виртуальный резистор не обязательно должен иметь значения из стандартного ряда.

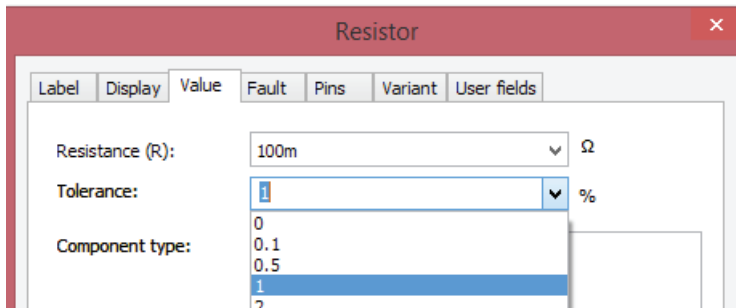


Панель инструментов **Show Basic Family** переместить в удобное место на рабочем поле с помощью мыши, как показано. Для перемещения панели инструментов щелкнуть левой кнопкой мыши, поместив курсор на заголовке панели, и, продолжая удерживать нажатой левую кнопку мыши, переместить курсор и опустить кнопку мыши.

Нажать кнопку **Place Virtual Resistor** (Добавить резистор). Иконка Резистора будет «привязана» к курсору мыши. Переместить иконку Резистора на рабочем поле и щелкнуть левой кнопкой мыши, чтобы

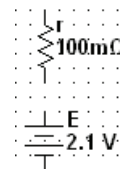
добавить компонент в схему модели. Виртуальный Резистор обозначается на схеме черным цветом.

Далее необходимо настроить параметры компонента **Virtual Resistor** на сопротивление $0,1\text{ohm}$ ($100\text{m}\Omega$) с допуском 1% . Дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по иконке **Virtual Resistor** – откроется диалоговое окно **Resistor**.



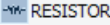
Выбрать вкладку **Value**. В текстовом поле **Resistance (R)** установить «0.1», выбрав из списка значений. Выбрать вкладку **Label** и ввести новое название «г». В текстовое поле **Tolerance** (допуск) установить значение 1 (1%), выбрав из списка значений.

Щелкнуть на иконке **Virtual Resistor** правой кнопкой мыши. Компонент будет выделен синим контуром и отобразится контекстное меню. В меню выбрать опцию (**90 Clockwise**). Резистор будет повернут по часовой стрелке на 90° . На рабочем поле отобразится схема модели с добавленными двумя компонентами E и r .

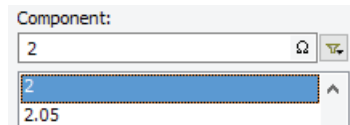


Добавим в схему модели следующий компонент **Virtual Resistor** (Резистор) с сопротивлением 2ohm с использованием библиотеки стандартных компонентов со значениями параметров компонентов фирм-производителей. Щелкнуть на вкладке **View** главного меню и в появившемся меню выбрать пункт **Toolbar**. В открывшемся подменю отметить галочкой чекбокс **Component**. В рабочее окно MS14 будет выведена панель инструментов **Component** (крайняя слева) (см. рис. 2.22), которая предоставляет доступ к каталогу семейств библиотек стандартных компонент MS14.

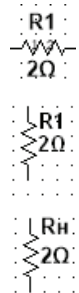
Щелкнуть мышью на кнопке-пиктограмме **Basic Family** каталога семейств библиотек компонентов фирм-производителей (см. рис. 2.23). В открывшемся окне **Select a Component** в каталоге семейства библио-

тек компонентов **Basic** выбрать пиктограмму библиотеки компонента **Resistor** .

В списке **Component** (номиналов резисторов) щелкнуть мышью на значении величины номинала сопротивления резистора 2 (Ом), выбрать модель (**Model manuf**) и щелкнуть мышью на кнопке **ОК**. На рабочем поле иконка компонента Резистор отобразится в горизонтальном положении.



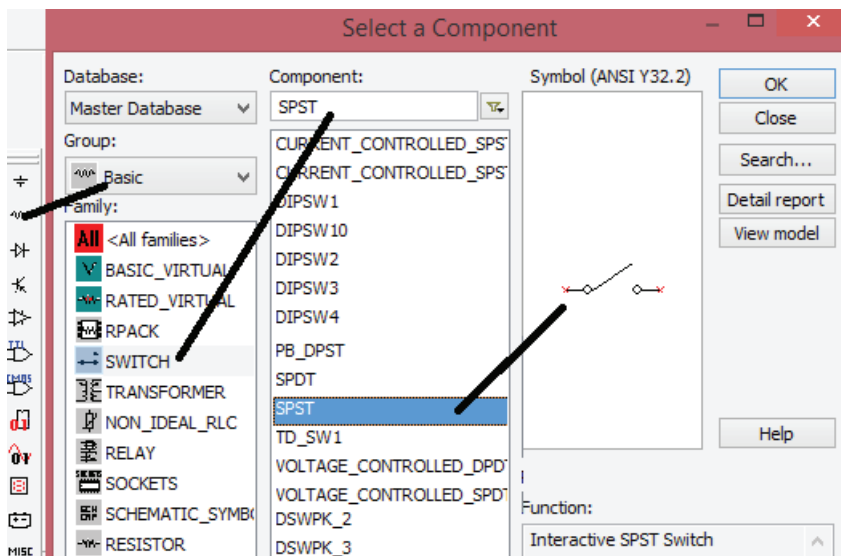
Иконку компонента **Resistor** необходимо повернуть на 90°. Щелкнуть дважды левой кнопкой мыши на иконке и выбрать опцию (**90 Clockwise**) в контекстном меню.



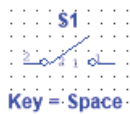
Название компонента Резистор R1 установлено по умолчанию. Чтобы изменить название компонента **Resistor**, выбрать вкладку **Label** (Ярлык). В текстовое поле **RefDes** ввести новое название R_н.

Добавление в схему модели ключа

Щелкнуть мышью на пиктограмме **Basic** панели пиктограмм семейств библиотек компонентов.



В открывшемся окне **Select a Component** в каталоге библиотек **Family** выбрать пиктограмму библиотеки **SWITCH** (Ключи) . Затем

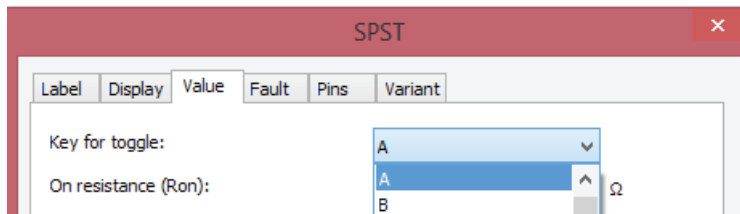


в разделе **Component** в каталоге библиотеки **SWITCH** щелкнуть мышью на компоненте **SPST Switch**. В окне **Symbol (ANSI)** появится отображение иконки компонента **SPST Switch**. Щелкнуть на кнопке **OK** в окне **Select a Component**.

Иконка компонента **SPST Switch** будет «привязана» к курсору мыши. Переместить иконку **SPST Switch** на рабочем поле и щелкнуть левой кнопкой мыши, чтобы добавить компонент в схему модели, а затем на кнопке **Close**, чтобы завершить добавление компоненты **SPST Switch** в схему модели на рабочее поле.

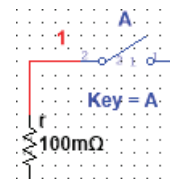
Ключ **Key** является *интерактивным* компонентом, управляемым буквенными или цифровыми клавишами (английский шрифт).

По умолчанию переключение ключа произойдет при нажатии клавиши <Space> (Пробел). Чтобы изменить управляемую клавишу (**Space** на **A**), дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на изображении иконки **SPST Switch** на рабочем поле. На экране появится диалоговое окно **SPST**, в котором на вкладке **Value** в текстовом окне **Key for toggle** ввести значение «A», которое выбрать из раскрывающегося списка, как показано ниже.



Соединение компонентов в схеме модели ЭЦ

Для завершения создания схемы модели в программной среде MS14 между отдельными ее компонентами на рабочем поле необходимо установить соединения проводниками. Соединения проводниками устанавливаются с помощью перемещения указателя мыши (белая стрелка) от выхода одного компонента до входа другого. Например, чтобы установить соединение между сопротивлением r и ключом **Key = A** следует подвести указатель к выходу компонента r , щелкнуть левой кнопкой мыши, переместить указатель мыши до входа компонента (**Key = A**) и снова щелкнуть левой кнопкой мыши. Для изменения направления линии на 90° щелкнуть левой кнопкой мыши. Между



компонентами будет установлена связь на схеме модели, которая отобразится «красной линией». Соединения проводниками между компонентами E (Источник напряжения DC) и резистором r , а также между ключом $\text{Key} = A$ и резистором R_n выполняются аналогично.

Схема компонентов модели в программной среде MS14 обязательно должна иметь компоненту «заземление».

Полученная в результате сборки схема модели приведена на рис. 2.31.

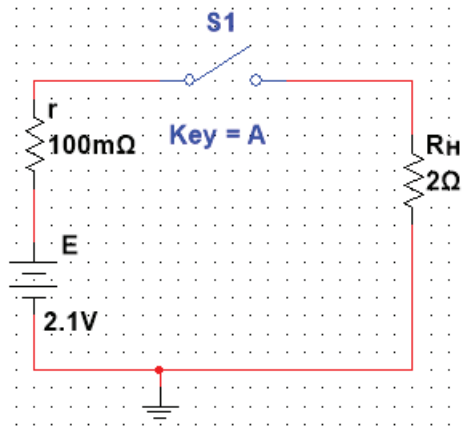


Рис. 2.31. Схема модели ЭЦ в программной среде MS14

2.2.7. Измерения на постоянном токе

Измерения на постоянном токе

В процессе моделирования ЭЦ с источником постоянного напряжения (рис. 2.31) необходимо определить значения токов и напряжений в схеме, а также значение величины мощности, которая рассеивается на внутреннем сопротивлении источника напряжения r и в сопротивлении нагрузки R_n . Отображение результатов измерения тока источника и напряжения на резисторах r и R_n может производиться с помощью виртуальных компонентов: индикатора тока **Ammeter** (амперметр) и индикатора напряжения **Voltmeter** (вольтметр) соответственно, а также универсальным прибором **Multimeter** (мультиметр, измеритель тока и напряжения).

Измерения с помощью индикатора тока Ammeter (Амперметр)

Определить ток, проходящий через сопротивления r и R_n , при замкнутом ключе **Key = A** (ток источника E) (рис. 2.32).

Для измерения тока использовать компонент — виртуальный индикатор тока **Ammeter** (амперметр). Добавить компонент-индикатор тока **Ammeter** в схему модели (рис. 2.32) следующим способом.

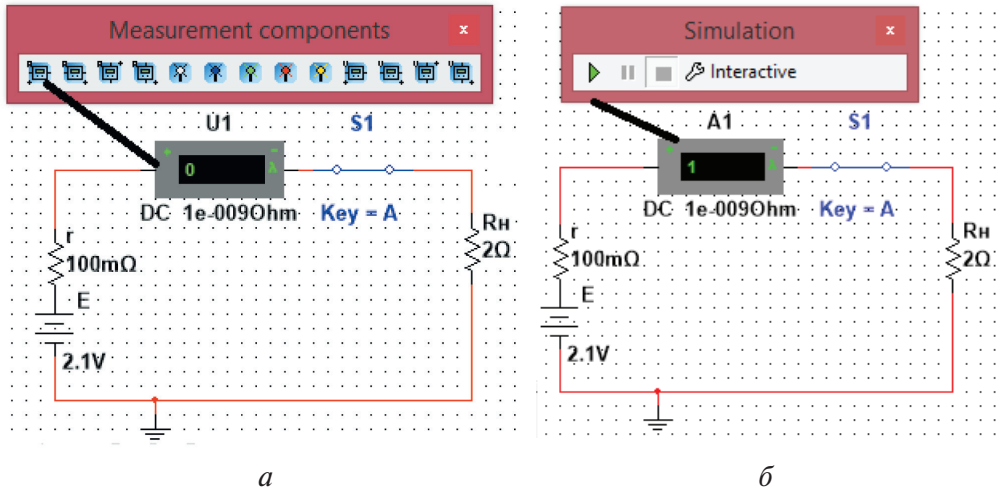
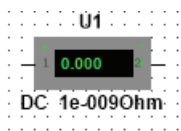


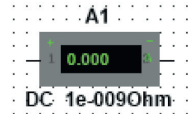
Рис. 2.32. Схема модели MS14 для измерения тока в ЭЦ индикатором тока Ammeter

На панели библиотек виртуальных компонентов **Virtual** (см. рис. 2.21) щелкнуть на кнопке-пиктограмме **Show/Hide Measurement Family**. На экран будет выведена инструментальная панель **Measurement Component**, на которой расположена кнопка-пиктограмма индикатора тока **Place Ammeter (Horizontal)**. Панель инструментов **Measurement Component** переместить, в удобное место на рабочем поле с помощью мыши, чтобы не загромождать схему модели, как показано на рис. 2.32, *a*.

Чтобы добавить индикатор тока **Ammeter Horizontal** с горизонтальным расположением выводов на рабочее поле, следует щелкнуть по кнопке **Place Ammeter (Horizontal)** на инструментальной панели **Measurement Components**. Иконка индикатора **Ammeter** будет «привязана» к курсору мыши. Затем следует переместить курсор мыши на рабочее поле и щелкнуть левой кнопкой мыши. Компонент индикатора **Ammeter Horizontal** будет добавлен на рабочее поле.



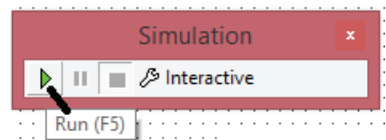
Выбранный индикатор тока **Ammeter Horizontal** автоматически настроен на режим измерения «постоянного тока **DC**», ему присвоено имя $I1$ (1 – порядковый номер индикатора тока **Ammeter** на схеме). Имя индикатора $I1$ заменить на $A1$. Чтобы изменить название индикатора, следует дважды щелкнуть по иконке компоненты, затем в диалоговом окне **Ammeter** выбрать вкладку **Label** (Ярлык). В текстовое поле **RefDes** ввести название индикатора « $A1$ ».



Нажать кнопку **OK**, чтобы принять изменения, которые отразятся на изображении компонента индикатора тока **Ammeter** на схеме модели.

Значение последовательного сопротивления индикатора **Ammeter**, которое отображено на его компоненте в схеме модели, по умолчанию составляет $1e-009\text{Ohm}$ (1 нОм).

Далее компонент индикатора нужно вставить в схему модели. Индикатор тока должен быть включен последовательно с резистором r , через который протекает измеряемый ток, как показано на рис. 2.32, а. Для этого следует подвести мышь к иконке индикатора тока на рабочем поле и, удерживая ее нажатой, переместить мышью на провод соединения резистора r и ключа $\text{Key} = A$ и отпустить кнопку мыши. Схема модели примет вид, показанный на рис. 2.32, б. Компонент Индикатор тока **Ammeter** следует расположить на схеме модели таким образом, чтобы ток в ЭЦ входил в полюс $\langle + \rangle$ и выходил из полюса $\langle - \rangle$. В этом случае на табло индикатора тока будет отображаться положительное значение тока при его движении в направлении от «+» к «-». Индикатор тока **Ammeter** автоматически изменяет диапазон измерений и отображает соответствующее значение на табло во время моделирования. Чтобы включить процесс моделирования, следует выбрать в меню **Toolbars** опцию **Simulation**. Появится панель **Simulation**, на которой выбрать опцию **Run** или нажать клавишу **F5**. Через несколько секунд модель начнет функционировать и на табло индикатора тока **Ammeter** отобразится значение измеряемого тока I (А) (рис. 2.32, б). Каждый сеанс моделирования ЭЦ постоянного тока проводится только для одного значения ЭДС Источника постоянного напряжения **DC** (Direct current). При изменении ЭДС Источника **DC** необходимо выключить процесс моделирования (на панели **Simulation** щелкнуть по кнопке красного цвета **Stop** (рис. 2.32, б).



Измерения с помощью индикатора напряжения Voltmeter (Вольтметр)

Определить падение напряжения на Резисторе (R_H), подключив компонент **Voltmeter (Vertical)** (Индикатор напряжения с вертикальным расположением полюсов) параллельно компоненту Резистору на схеме модели (рис. 2.33).

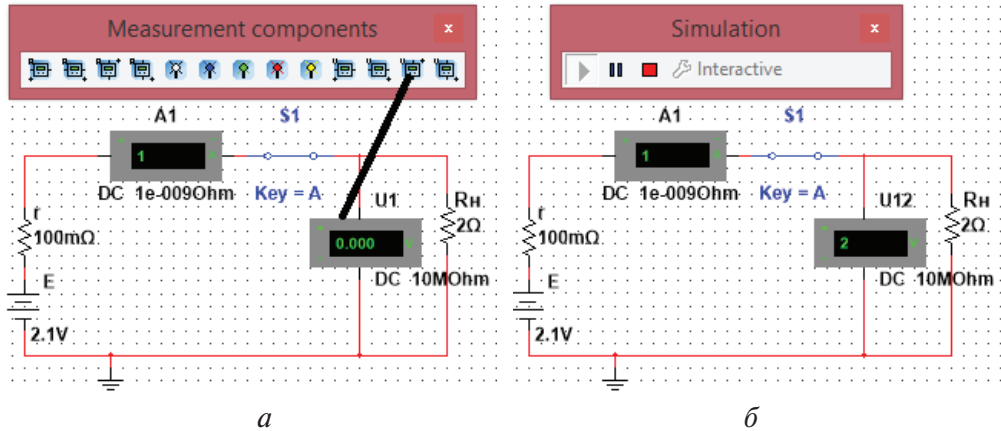
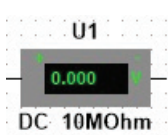


Рис. 2.33. Схема модели для измерения напряжения индикатором напряжения Voltmeter

Добавить компонент **Voltmeter (Vertical)** (индикатор напряжения) в схему модели способом, аналогичным добавлению компонента **Ammeter** (индикатор тока) (рис. 2.32). На панели **Measurement Component** щелкнуть мышью на кнопке-пиктограмме индикатора напряжения **Place Voltmeter (Vertical)** (рис. 2.33, а). Иконка компонента **Voltmeter (Vertical)** будет «привязана» к курсору мыши. Затем следует переместить курсор мыши на рабочее поле и щелкнуть левой кнопкой мыши. Компонент индикатора **Voltmeter (Vertical)** будет добавлен на рабочее поле, как показано на рис. 2.33, а.



Индикатор **Voltmeter (Vertical)** автоматически настроен на режим измерения напряжения постоянного тока **DC**, ему присвоено имя **U1** (1 – порядковый номер компонента индикатора **Voltmeter (Vertical)** на схеме).

Другим важным параметром индикатора **Voltmeter** является его параллельное сопротивление, которое по умолчанию составляет $1e+007$ Ohm, что отображено на компоненте.

Индикатор **Voltmeter (Vertical)** автоматически настроен на режим измерения напряжения постоянного тока **DC**, ему присвоено имя **U1** (1 – порядковый номер компонента индикатора **Voltmeter (Vertical)** на схеме).

Другим важным параметром индикатора **Voltmeter** является его параллельное сопротивление, которое по умолчанию составляет $1e+007$ Ohm, что отображено на компоненте.

Параметры индикатора **Voltmeter** (режим измерения, значение параллельного сопротивления и название индикатора) можно настроить

в диалоговом окне **Voltmeter**, которое имеет вид, аналогичный окну **Ammeter** (см. рис. 2.25). Чтобы вызвать диалоговое окно **Voltmeter**, нужно дважды щелкнуть по изображению иконки индикатора **Voltmeter (Vertical)** на схеме. Чтобы изменить название прибора $U1$, в диалоговом окне **Voltmeter** выбрать вкладку **Label** и ввести новое название « $U12$ » в текстовое поле **RefDes** (рис. 2.33, б).

Далее компонент-индикатор напряжения **Voltmeter (Vertical)** нужно вставить в схему модели параллельно резистору R_n , как показано на рис. 2.33, а. Для этого следует подвести мышь к иконке **Voltmeter (Vertical)** на рабочем поле и, удерживая ее нажатой, переместить компонент **Voltmeter (Vertical)** мышью в схему модели и отпустить кнопку мыши. Схема модели примет вид, показанный на рис. 2.33, а. Компонент **Voltmeter (Vertical)** следует расположить таким образом, чтобы ток в ЭЦ входил в полюс <+> на иконке индикатора и выходил из полюса <->. В этом случае на табло индикатора будет отображаться положительное значение напряжения при движении тока в направлении от «+» к «-». Индикатор напряжения **Voltmeter (Vertical)** автоматически изменяет диапазон измерений.

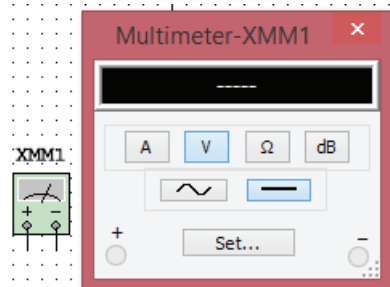
Индикатор напряжения **Voltmeter (Vertical)** автоматически отображает соответствующее значение измеряемого напряжения на табло лицевой панели только во время моделирования. На панели **Simulation** выбрать опцию **Run** или нажать клавишу **F5**, чтобы включить процесс моделирования. Через несколько секунд схема модели начнет функционировать и на табло Индикатора напряжения **Voltmeter (Vertical)** отобразится значение 2 (В) (см. рис. 2.34, б). Для изменения параметров компонента схемы модели **Voltmeter (Vertical)** процесс моделирования необходимо остановить, щелкнув на кнопке **Stop** на панели **Simulation** или нажать клавишу **F5**.

Сравнить значения токов и напряжений по показаниям на табло виртуальных компонент Индикатора тока **Ammeter** и Индикатора напряжения **Voltmeter (Vertical)** с расчетными значениями, полученными в процессе математического моделирования в пакете Mathcad.

Измерение тока и напряжения с помощью прибора **Multimeter**

Применение виртуального прибора **Multimeter** (Мультиметр) для измерения тока и напряжения рассмотрим на примере схемы модели ЭЦ (см. рис. 2.31) [3, с. 12].

Чтобы добавить прибор **Multimeter** (Мультиметр) на рабочее поле, следует нажать кнопку-пиктограмму **Multimeter** на панели **Instrument** (Приборы) (см. рис. 2.28). Иконка прибора **XMM1 (Multimeter)** будет «привязана» к курсору мыши. Затем

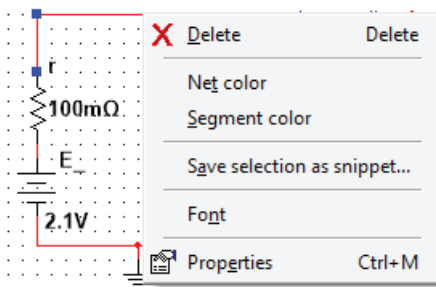


следует переместить курсор мыши на рабочее поле и щелкнуть левой кнопкой мыши. Компонент-прибор **Multimeter** будет добавлен на рабочее поле, как показано. Ему присвоено имя **XMM1** (1 – порядковый номер компонента-прибора на схеме). Чтобы добавить лицевую панель прибора **Multimeter-XMM1**, на которой отображена информация

о функциях прибора, следует дважды щелкнуть по иконке **XMM1**. Для измерения тока источника ЭДС и падения напряжения на сопротивлении R_n в схему модели необходимо добавить два компонента-прибора **Multimeter**. Ток через резистор R_n будет измеряться прибором **Multimeter-XMM1**, а падение напряжения на R_n – прибором **Multimeter-XMM2**.

Далее индикаторы компонент-приборов **XMM1** и **XMM2** нужно вставить в схему модели (см. рис. 2.31).

Пиктограмму прибора **XMM1** следует включить последовательно с компонентом-резистором r , через который протекает измеряемый ток. Для этого следует сначала



удалить «проводник», соединяющий компонент **Resistor** r и ключ $\text{Key} = A$. Чтобы удалить «проводник», необходимо выделить его маркерами, щелкнув по нему правой кнопкой мыши. Появится контекстное меню. Выбрать в меню опцию **Delete**. Затем следует подвести мышью к иконке при-

бора **XMM1** на рабочем поле и, удерживая ее нажатой, переместить мышью, поместив между компонентом **Resistor** r и ключом $\text{Key} = A$ на схеме модели и отпустить кнопку мыши, как приведено на рис. 2.34.

Далее установить соединения на схеме модели между полюсом $\langle + \rangle$ компонента-прибора **XMM1** и компонентом **Resistor** r , а также между полюсом $\langle - \rangle$ компонента-прибора и ключом $\text{Key} = A$. Ком-

понент **XMM1** следует расположить таким образом, чтобы ток в ЭЦ входил в полюс <+> иконки и выходил из полюса <->. В этом случае на табло результата на лицевой панели компонента будет отображаться положительное значение тока при его движении в направлении от «+» к «-».

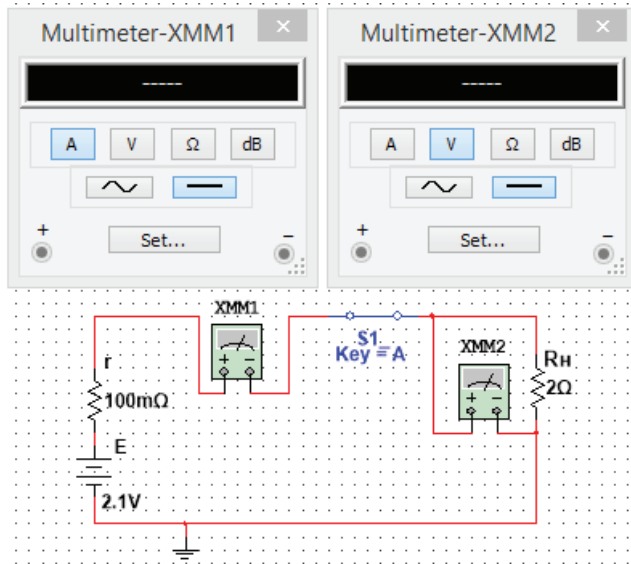


Рис. 2.34. Схема модели для измерения тока и напряжения прибором Multimeter

Дважды щелкнуть по иконке прибора **XMM1**, откроется лицевая панель прибора. Информация, которая отображена на лицевой панели, говорит о том, что прибор по умолчанию настроен на измерение напряжения постоянного тока (утоплены кнопки **V** и **—**). На лицевой панели компонента **Multimeter-XMM1** щелкнуть по кнопке **A**, чтобы настроить его на измерение тока. Схема модели приведена на рис. 2.35.

Значения параметров прибора **XMM1** отображаются в окне **Multimeter Setting** (Настройки мультиметра). Чтобы открыть окно, нажать кнопку **Set** (Настроить) на лицевой панели прибора.

В окне **Multimeter Setting** отображаются установленные по умолчанию в программе MS14 значения параметров: последовательное сопротивление (**Ammeter resistance**) 1 нОм в режиме измерения тока и параллельное сопротивление (**Voltmeter resistance**) 1 Гом в режиме измерения напряжения. Эти параметры аналогичны параметрам виртуальных индикатора тока **Ammeter** и индикатора напряжения **Voltmeter**.

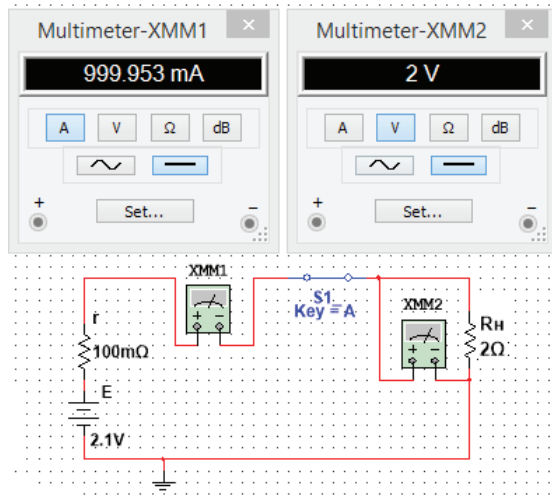
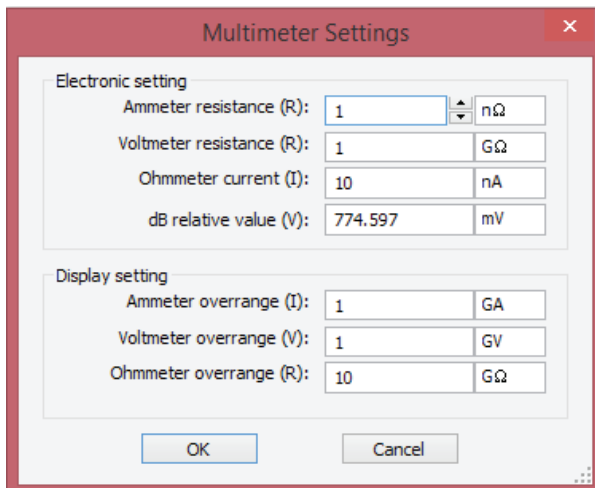


Рис. 2.35. Измерение токов и напряжений в схеме модели прибором Multimeter



Иконку компонента **XMM2** следует вставить в схему модели параллельно компоненту-резистору R_n , на котором будет измеряться падение напряжения (см. рис. 2.34). Для этого установить соединения между полюсом <+> иконки прибора **XMM2** и ключом **Key=A**, а также между полюсом <-> иконки прибора и компонентом **Resistor** R_n . Иконку прибора **XMM2** следует расположить на схеме модели таким образом, чтобы ток в ЭЦ входил в полюс <+> и выходил из полюса <->. В этом случае на табло на лицевой панели прибора будет отображаться положительное значение падения напряжения на резисторе R_n .

Дважды щелкнуть по пиктограмме прибора **XMM2**, откроется лицевая панель прибора. Информация, которая отображена на лицевой панели, говорит о том, что прибор по умолчанию настроен на измерение напряжения постоянного тока (утоплена кнопка **V**) и изменять настройки прибора **XMM2** не требуется. Схема модели примет вид, приведенный на рис. 2.35.

Включить процесс моделирования: выбрать в меню **Simulation** пункт **Run** или нажать клавишу **F5**. Через несколько секунд значения на панелях виртуальных приборов **Multimeter XMM1** и **XMM2** автоматически будут отображать соответствующие значения результата измерения тока 999,953 (mA) и напряжения 2 (V), как приведено на рис. 2.35.

Для изменения параметров компонент схемы модели необходимо остановить процесс моделирования, щелкнув на кнопке **Stop** на панели **Simulation**.

Измерение мощности с помощью прибора **Wattmeter** из библиотеки **Instrument**

Применение компонента-прибора **Wattmeter** (Ваттметр) для измерения мощности рассмотрим на примере схемы модели ЭЦ, приведенной на рис. 2.36.

Требуется измерить:

- мощность, рассеиваемую источником напряжения в ЭЦ ($P = EI$);
- потери мощности в источнике напряжения ($P_1 = I^2 r$);
- мощность, рассеиваемую в нагрузке ($P_2 = I^2 R_H$).

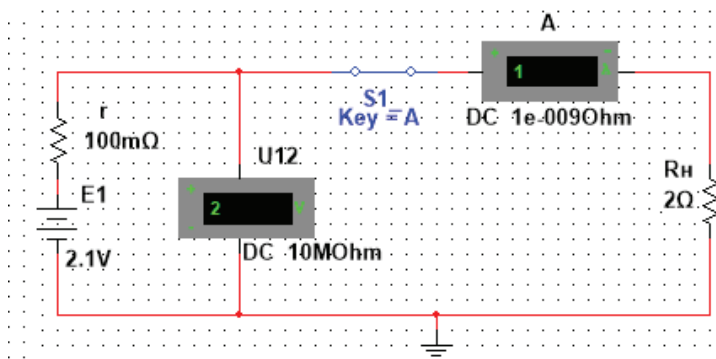
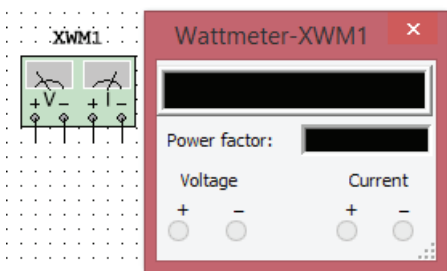


Рис. 2.36. Схема модели ЭЦ для измерения мощности



Чтобы измерить мощность, рассеиваемую источником напряжения в ЭЦ, нужно измерить ЭДС E и ток I в цепи источника ЭДС. Добавим в схему модели виртуальный компонент-прибор **Wattmeter** (Ваттметр) из библиотеки **Instruments** (Приборы) меню **Toolbars** (см. рис. 2.28).

На схеме модели ЭЦ на рабочем поле прибор **Wattmeter** представлен иконкой **XWM1** (1 – порядковый номер компонента-прибора на схеме) и лицевой панелью виртуального прибора **Wattmeter-XWM**, как приведено.

Чтобы добавить пиктограмму **XWM1** на рабочее поле (рис. 2.36) нужно нажать кнопку-пиктограмму **Wattmeter** на линейке меню **Instruments**. Иконка **XWM1** будет «привязана» к курсору мыши. Переместить курсор на рабочем поле и щелкнуть левой кнопкой мыши, чтобы добавить компонент **XWM1** в схему модели на рабочем поле (рис. 2.37).

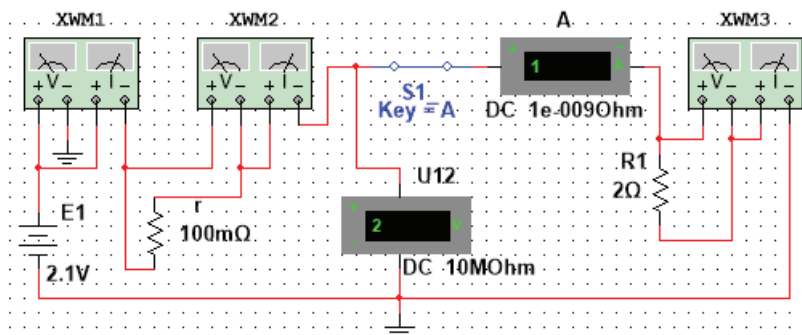


Рис. 2.37. Схема модели для измерения баланса мощностей ЭЦ

Формула определения мощности $P = EI$ применима, если положительный ток I втекает в $\langle + \rangle$ на пиктограмме прибора **XWM1**, а положительное напряжение E с клеммы «плюс» источника ЭДС подается на полюс $\langle + \rangle$ (рис. 2.37). Таким образом, значения тока I и ЭДС E будут положительны и показания результата измерения мощности, рассеиваемой источником ЭДС в ЭЦ на табло лицевой панели прибора **XWM1** в процессе моделирования, должны совпадать с вычисленными по формуле $P = EI$.

Дважды щелкнуть по иконке прибора **XWM1** на схеме модели, чтобы открыть лицевую панель прибора **Wattmeter-XWM1** для отображения значения результата измерения величины мощности P на табло, как показано на рис. 2.38.

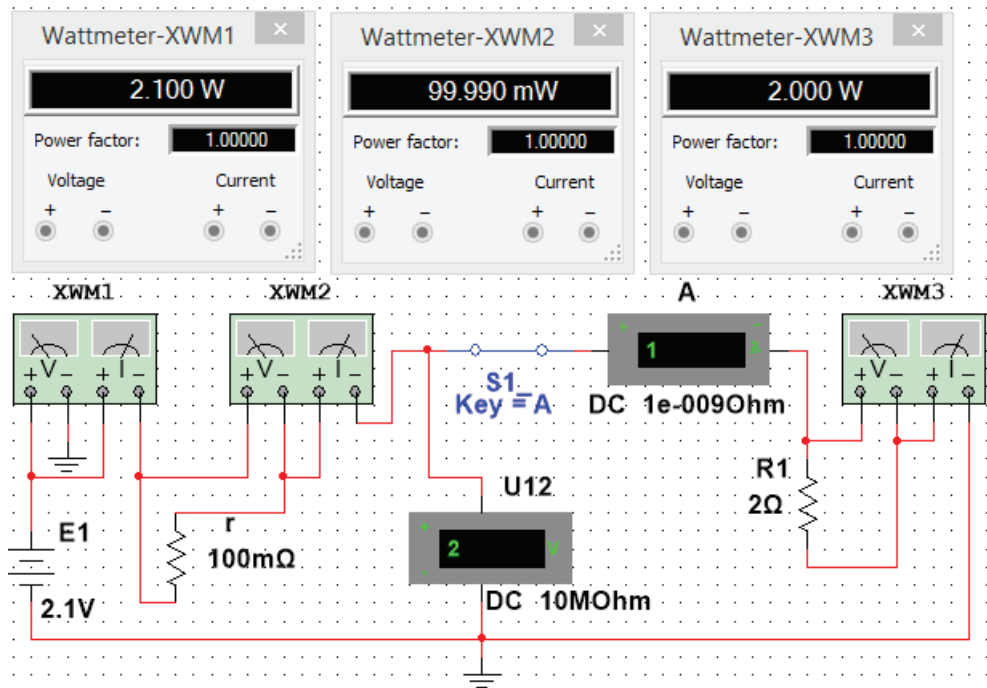


Рис. 2.38. Отображение результатов измерений мощностей на табло приборов Wattmeter

Значение величины мощности, рассеиваемой источником напряжения в ЭЦ ($P = EI$), вычисленное в программе Mathcad (см. п. 2.1.20) методом математического моделирования, и результат измерения прибором **Wattmeter-XWM1** в процессе виртуального эксперимента на схеме модели совпали.

Чтобы измерить потери мощности в источнике электрической энергии ($P_1 = I^2 r$) и мощность, рассеиваемую источником электрической энергии в нагрузке ($P_2 = I^2 R_n$), нужно подключить компоненты виртуальных приборов **XWM2** и **XWM3** к элементам схемы модели, как приведено на рис. 2.37. Дважды щелкнуть по пиктограммам приборов **XWM2** и **XWM3** на схеме модели, чтобы открыть лицевые пане-

ли приборов **Wattmeter-XWM2** и **Wattmeter-XWM2** для отображения результатов измерения величин P_1 и P_2 на табло. Схема модели примет вид, приведенный на рис. 2.38.

Включить процесс моделирования: выбрать в меню **Simulation** пункт **Run** или нажать клавишу **F5**. Через несколько секунд значения на табло панелей приборов **Wattmeter XMM1**, **XMM2** и **XMM3** автоматически будут отображаться соответствующие значения измеряемых мощностей:

- мощность, рассеиваемую источником напряжения в ЭЦ ($P = 2,1 \text{ W}$);
- потери мощности в источнике напряжения ($P_1 = 99,99 \text{ mW}$);
- мощность, рассеиваемую в нагрузке ($P_2 = 2 \text{ W}$).

После регистрации результатов измерения на панелях индикаторов и виртуальных приборов процесс моделирования следует остановить, щелкнув на кнопке **Stop** на панели **Simulation** или нажать клавишу **F5**.

Сравнить значения мощностей P , P_1 и P_2 по показаниям приборов **Wattmeter XMM1**, **XMM2** и **XMM3** в схеме модели в программной среде **Multisim 14** с расчетными значениями, полученными методом математического моделирования в пакете **Mathcad**. Значение величин мощностей, вычисленное в программе **Mathcad** (см. п. 2.1.21) и результат измерения приборами **Wattmeter** в процессе виртуального эксперимента на схеме модели в среде **Multisim 14** совпали.

Глава 3

Анализ линейных электрических цепей постоянного тока

3.1. Задача анализа ЭЦ

Электрическая цепь постоянного тока включает набор элементов: *активных* — источников электрической энергии, *пассивных* — резисторов, которые связаны между собой электрическими проводами.

Задача анализа ЭЦ. Анализ проводится с целью получения данных о режиме работы ЭЦ. Если известны схема замещения ЭЦ, параметры всех источников электрической энергии и параметры пассивных элементов, то встает *прямая задача* — определение токов, напряжений и мощностей на участках или в элементах ЭЦ. Прямая задача имеет *единственное решение*.

ЭДС источников напряжения и токи источников тока называются *входными сигналами (воздействиями)*. Все остальные токи и напряжения на элементах ЭЦ называются *откликами* на эти воздействия, или *реакциями*.

Задача анализа разбивается на две подзадачи.

- Исследование *топологии* ЭЦ-способа соединения ветвей в ЭЦ.
- Определение *собственно токов и напряжений в элементах и ветвях* ЭЦ при заданных источниках и параметрах элементов «схемы замещения» ЭЦ.

Основой для расчета режима работы любой ЭЦ являются *законы Ома* и *законы Кирхгофа*, которые в свою очередь базируются на принципах и теоремах электротехники: принцип непрерывности (замкнутости) электрического тока, принцип наложения, теорема компенсации, теорема об эквивалентном генераторе и др. [1, с. 27, 2, с. 38].

3.2. Принципы и теоремы электротехники

3.2.1. Принцип непрерывности (замкнутости) электрического тока

Полный электрический ток сквозь любую замкнутую поверхность равен нулю. При этом выходящий ток из поверхности считается положительным, а входящий — отрицательным. На принципе непрерывности основан первый закон Кирхгофа (см. п. 3.3.2).

3.2.2. Принцип наложения (суперпозиции)

Для линейной ЭЦ *принцип наложения* выражается в независимости (друг от друга) действия источников энергии:

- ток в любой ветви (контуре) схемы замещения ЭЦ равен алгебраической сумме токов, вызываемых в этой ветви (контуре) каждым источником напряжения (ИН) или тока в отдельности;
- напряжение на любой ветви схемы замещения ЭЦ равно алгебраической сумме напряжений, вызываемых на этой ветви каждым ИН или тока в отдельности.

Принцип наложения положен в основу анализа ЭЦ постоянного тока *методом наложения* (см. п. 4.5).

3.2.3. Теорема компенсации

Токи в схеме замещения ЭЦ не изменятся, если любой выделенный пассивный участок (резистор R) цепи заменить источником напряжения, ЭДС E которого численно равна падению напряжения на выделенном сопротивлении $E = IR$ и направлена встречно току в этом сопротивлении.

3.2.4. Теорема об эквивалентном генераторе

Любую разветвленную *линейную* ЭЦ с произвольным количеством ИН и тока можно заменить простой одноконтурной схемой, которая

может состоять из эквивалентного генератора (ЭГ) с ЭДС $E_{cd} = U_{cd}$ и последовательно соединенного с ним резистора с сопротивлением R_{cd} (рис. 3.1).

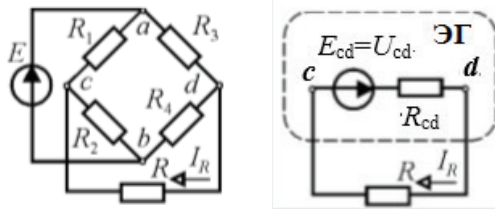


Рис. 3.1. Преобразование схемы ЭЦ на основе теоремы об эквивалентном генераторе

При этом две схемы оказываются идентичными по отношению к выходным полюсам c и d , к которым подключена выделенная ветвь R . Теорема об ЭГ применима только к линейным ЭЦ.

Теорема об ЭГ положена в основу анализа ЭЦ постоянного тока *методом эквивалентного генератора* (см. п. 4.6).

3.2.5. Обобщенная форма закона Ома для ЭЦ постоянного тока

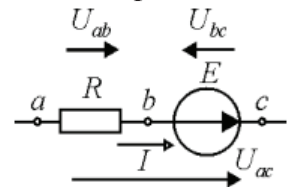
Закон Ома устанавливает связь между током и напряжением на участках ЭЦ. Для любого участка цепи, не содержащего активных элементов (источников электрической энергии), справедливо соотношение

$$I = \frac{U}{R}, \quad (8)$$

где R — сопротивление резистивного элемента участка цепи; I — ток, протекающий через резистивный элемент; U — падение напряжения на элементе.

Закон Ома можно записать для участка ac ЭЦ, содержащего источник ЭДС E и приемник R . Такая ветвь называется *ветвью первого типа* [5, с. 21].

Пусть ток I на участке ac протекает от точки a к точке c . Это означает, что потенциал φ_a выше, чем φ_c и напряжение $U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c > 0$, то есть принимаем, что положительное направление U_{ac} со-



впадает с направлением тока I . Тогда $U_{ac} = \varphi_a - \varphi_b + \varphi_b - \varphi_c = U_{ab} + U_{bc}$. Напряжение U_{ab} на резисторе R всегда совпадает с направлением тока и равно $U_{ab} = RI$ (Закон Ома). Напряжение U_{bc} на выводах источника ЭДС всегда противоположно направлению E , то есть $U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c = -E$. Отсюда $U_{ac} = RI - E$. Если направление действия ЭДС E будет противоположно направлению протекания тока (направлению U_{ac}), то изменится направление и знак напряжения $U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c = E$, а напряжение на участке ac будет $U_{ac} = RI + E$. В общем случае

$$U_{ac} = RI \pm E, \quad (9)$$

а протекающий ток определяется выражением

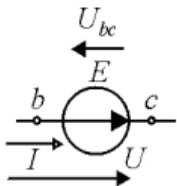
$$I = \frac{U_{ac} \pm E}{R} \text{ или } I = (U_{ac} \pm E)G. \quad (10)$$

В формуле (10) *положительный знак* соответствует *согласному направлению* тока и ЭДС, а *отрицательный* — *встречному*. В формуле (9) наоборот: *положительный знак* соответствует *встречному* направлению тока и ЭДС, а *отрицательный знак* — *согласному* направлению. Эти выражения называют *обобщенной формой закона Ома* [2, с. 63, 5, с. 20].

Если сопротивление ветви R равно 0, то ветвь ac становится *вырожденной* и выражение (9) преобразуется к виду

$$U = -E \quad (11)$$

(напряжение U на участке цепи и ЭДС направлены согласно друг другу).



3.3. Математическое описание процессов в ЭЦ

Математическое описание процессов в ЭЦ основано на уравнениях двух типов: компонентных и топологических.

3.3.1. Понятие о компонентных и топологических уравнениях

Уравнения ветвей (математические модели), составленные на основании закона Ома (8–11) называют *компонентными уравнениями*

[2, с. 22, 5, с. 20]. Компонентные уравнения выражают ток или напряжение каждой ветви через параметры идеализированных двухполюсных элементов этой ветви. Уравнение (8) представляет компонентное уравнение ветви, содержащей один пассивный элемент — сопротивление R . Выражения (9) и (10) — это компонентные уравнения ветви с источником напряжения E . Компонентное уравнение вырожденной ветви (11) задает напряжение ветви, но не позволяет найти ее ток. Количество компонентных уравнений равно количеству ветвей.

Топологические уравнения устанавливают связь между токами или напряжениями различных ветвей, причем вид и количество топологических уравнений зависят от того, какие именно элементы входят в состав ветвей цепи. К топологическим уравнениям относятся уравнения, составленные на основании *первого и второго законов Кирхгофа* [2, с. 67].

3.3.2. Законы Кирхгофа для ЭЦ постоянного тока

Первый закон Кирхгофа устанавливает связь между токами ветвей, объединенных в узел ЭЦ. *Неустранимый узел* — это место соединения трех и более ветвей или элементов. В неустранимом узле ток делится на части, подчиняясь *первому закону Кирхгофа*.

Место соединения двух элементов в ЭЦ рассматривают как *последовательное соединение* двух элементов и называют *простым узлом*. В простом узле ток не делится на части.

В схеме замещения ЭЦ, в которой к k -му узлу подсоединено p -элементов, *алгебраическая сумма токов I_k в узле равна нулю* или сумма токов, направленных к узлу ($+I_k$), равна сумме токов, направленных от узла ($-I_k$). Выбор знаков токов является условным.

В соответствии с первым законом Кирхгофа для каждого узла схемы замещения ЭЦ может быть составлено *уравнение электрического равновесия токов в узле*:

$$\sum_{k=1}^p \pm I_k = 0, \quad (12)$$

где $k = 1, 2, \dots, p$ — номера ветвей, сходящихся в k -м узле.

Второй закон Кирхгофа устанавливает связь между напряжениями ветвей, объединенных в произвольный замкнутый контур ЭЦ. *Замк-*

нутым контуром называют путь по ветвям ЭЦ, который начинается и заканчивается в одном и том же узле. *Электрический потенциал* исходного узла остается неизменным.

Для замкнутого контура ЭЦ, содержащей m резисторов и не содержащей источников электрической энергии, *второй закон Кирхгофа* формулируется следующим образом: *алгебраическая сумма напряжений U_k p ветвей, входящих в замкнутый контур схемы замещения ЭЦ, равна нулю.*

$$\sum_{k=1}^p \pm U_k = 0. \quad (13)$$

Для замкнутого контура ЭЦ, содержащей m -резисторов и n -источников электрической энергии E_q , *второй закон Кирхгофа* формулируется следующим образом: *алгебраическая сумма напряжений m -ветвей U_k , образующих путь в любом замкнутом контуре, равна алгебраической сумме действующих в замкнутом контуре ЭДС E_q с учетом их положительных направлений и выбранного направления обхода контура* (14) [1, с. 33]:

$$\sum_{k=1}^m \pm U_k = \sum_{q=1}^n \pm E_q. \quad (14)$$

Положительные знаки в уравнениях (13) и (14) имеют напряжения и ЭДС, направление которых совпадают с направлениями обхода контура, а отрицательные направлены встречно по отношению к направлению обхода контура.

Уравнения (13, 14), составленные в соответствии со вторым законом Кирхгофа для каждого контура схемы замещения ЭЦ называются *уравнениями электрического равновесия напряжений ветвей в контуре* [2, с. 22].

3.3.3. Определение числа независимых узлов и контуров в ЭЦ

Для определения количества независимых узлов и контуров ЭЦ и, следовательно, количества независимых уравнений равновесия, составленных на основании законов Кирхгофа, достаточно, чтобы каждое из входящих в систему уравнений равновесия ЭЦ (12, 13, 14) отличалось от остальных уравнений хотя бы одной переменной (током или напряжением).

Для линейной независимости уравнений равновесия, составленных на основании *первого закона Кирхгофа*, достаточно, чтобы каждое из уравнений равновесия (12) отличалось от других уравнений хотя бы одним током или каждый из узлов, для которого составляется уравнение равновесия, отличалось бы от других узлов хотя бы одной ветвью. Если в схеме ЭЦ q узлов, то, следовательно, любые $m = q - 1$ узлов образуют систему *независимых узлов*. Один из узлов (обычно узел с номером 0) выбирают в качестве *базисного*. Для базисного узла уравнения равновесия на основании *первого закона Кирхгофа* не составляются.

Для линейной независимости уравнений (13, 14), составленных на основании *второго закона Кирхгофа*, достаточно, чтобы каждое из уравнений равновесия отличалось от остальных хотя бы одним напряжением или каждый контур отличался от остальных хотя бы одной ветвью. Если в схеме ЭЦ p ветвей и $q - 1$ независимых узлов, то в каждой ЭЦ можно выделить $n = p - q + 1$ независимых контуров и составить для них n линейно независимых уравнений равновесия по второму закону Кирхгофа.

3.3.4. Уравнения электрического равновесия

Математически задача анализа ЭЦ постоянного тока сводится к составлению и решению системы линейных алгебраических уравнений равновесия (СЛАУ) на основании законов Кирхгофа и Ома, в которых в качестве неизвестных фигурируют токи и напряжения ветвей ЭЦ. Количество уравнений в СЛАУ, а также количество уравнений электрического равновесия, составленных по законам Кирхгофа, можно заранее определить.

Если в рассматриваемой ЭЦ не содержатся вырожденные ветви (11), то общее количество уравнений электрического равновесия для ЭЦ должно быть равно $2p$ — удвоенному количеству ветвей ЭЦ (для каждой невырожденной ветви неизвестны ее ток и напряжение). Используя законы Кирхгофа, для такой ЭЦ можно составить $p - q + 1$ независимых уравнений ($m = q - 1$ независимых уравнений равновесия для токов (12) и $n = p - q + 1$ независимых уравнений равновесия для напряжений (13, 14)). В сочетании с p -компонентными уравне-

ниями ветвей ЭЦ СЛАУ будет включать $2p$ линейно независимых уравнений.

Если в ЭЦ имеется p_j вырожденных ветвей, в которых содержатся идеальные источники тока (неизвестны только напряжения этих ветвей), то для определения неизвестных токов и напряжений нужно составить СЛАУ, которая включает $2p - p_j$ линейно независимых уравнений, $(m + n = p)$ уравнений равновесия на основании законов Кирхгофа (12, 13, 14) и $p - q$ компонентных уравнений для невырожденных ветвей).

Если в ЭЦ имеется p_u вырожденных ветвей, в которых содержатся идеальные ИН (неизвестны только токи этих ветвей), то для определения неизвестных токов и напряжений нужно составить СЛАУ, которая включает $2p - p_u$ линейно независимых уравнений ($m + n = p$ уравнений на основании законов Кирхгофа и $p - p_u$ компонентных уравнений для невырожденных ветвей).

Если в ЭЦ имеется p_u вырожденных ветвей, в которых содержатся идеальные ИН, и p_j вырожденных ветвей, в которых содержатся идеальные источники тока, то для определения неизвестных токов и напряжений нужно составить $2p - p_u$ линейно независимых уравнений ($m + n = p$ уравнений на основании законов Кирхгофа и $p - p_u - p_j$ компонентных уравнений для невырожденных ветвей).

Таким образом, используя компонентные уравнения невырожденных ветвей и топологические уравнения, составленные на основании законов Кирхгофа, можно сформировать «СЛАУ электрического равновесия», количество уравнений в которой достаточно для определения всех неизвестных токов и напряжений ветвей ЭЦ.

Для анализа ЭЦ используют различные методы составления СЛАУ электрического равновесия: контурных токов, узловых потенциалов и др.

3.3.5. Компонентные и топологические матрицы ЭЦ постоянного тока

Применение матричной алгебры для численного анализа ЭЦ на ЭВМ предполагает использование матричных форм для формирования СЛАУ [2, с. 84].

Граф электрической цепи

Топологическую структуру ЭЦ можно описать с помощью *узловой* и *контурной* матриц, предварительно изобразив *направленный граф* схемы замещения ЭЦ. В направленном графе ветви ЭЦ представляют в виде линий, проведенных между точками-узлами. Ветвям графа приписывают направления, совпадающие с направлениями токов в ветвях схемы и обозначаемые стрелками.

Для ЭЦ (рис. 3.2, а) с количеством ветвей $p = 5$ и узлов $q = 3$ направленный граф изображен на рис. 3.2, б.

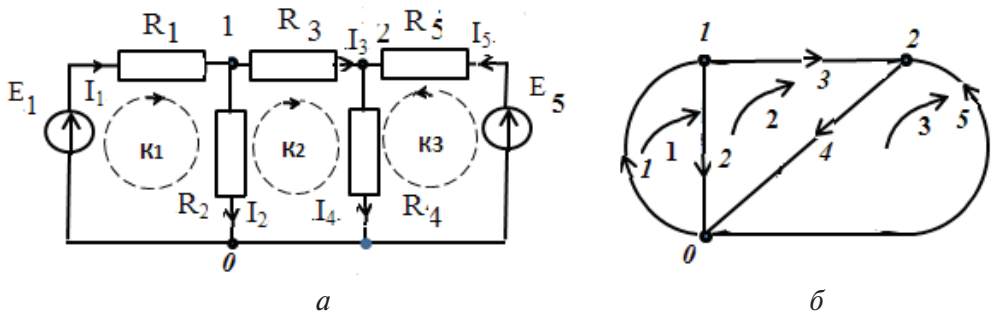


Рис. 3.2. Изображение топологической структуры ЭЦ в виде направленного графа

Узловая матрица

Узловая матрица $[N]$ (рис. 3.3, а) представляет собой матрицу, строки которой соответствуют независимым узлам ($q - 1$) графа, а столбцы — ее p -ветвям. Значения элементов узловой матрицы определяются, как показано на рис. 3.3, а.

<p>Номера ветвей →</p> <p>[A] =</p> $ \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix} $ <p>Номера узлов ↑</p> <p style="text-align: center;">а</p>	<p>Номера ветвей →</p> <p>[B] =</p> $ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} $ <p>Номера контуров ↑</p> <p style="text-align: center;">б</p>
--	---

Рис. 3.3. Узловая (а) и контурная (б) матрицы

Если ветвь j связана с узлом k , то элементу матрицы присваивается значение $+1$, когда ветвь направлена от узла, и -1 , когда ветвь направлена к узлу. Если ветвь j не связана с узлом k , то элементу матри-

цы присваивается нулевое значение. При этом выбранный базисный узел (узел 0 не входит в матрицу).

Контурная матрица

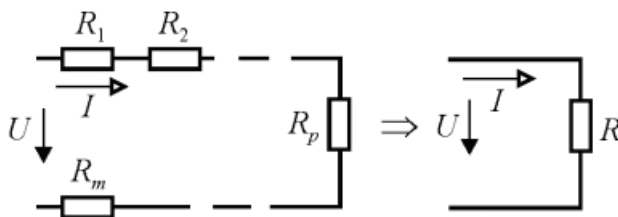
Контурная матрица $[B]$ (рис. 3.3, б) представляет собой матрицу, строки которой соответствуют независимым контурам ($p - q + 1 = n$) графа, а столбцы — ее p -ветвям.

Значения элементов контурной матрицы определяются, как показано на рис. 3.3, б. Если контур j содержит ветвь k , то элементу матрицы присваивается значение $+1$, когда направление обхода контура совпадает с направлением ветви, и -1 , когда противоположно направлению ветви. Если контур j не содержит ветвь k , то элементу матрицы присваивается нулевое значение.

3.4. Преобразование последовательных и параллельных соединений элементов в ЭЦ

3.4.1. Преобразование ЭЦ с резистивными элементами

Последовательное соединение m -резистивных элементов в схеме замещения ЭЦ имеет следующий вид.



При переходе к эквивалентному сопротивлению все *простые узлы* устраняются, остаются только крайние зажимы, посредством которых это соединение подключается к внешней цепи, как показано на схеме [2, с. 47].

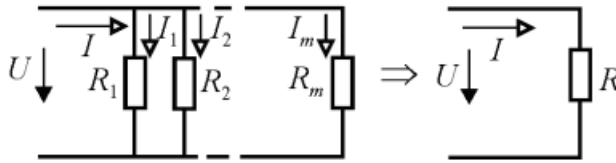
В соответствии со *вторым законом Кирхгофа* и *законом Ома* для ЭЦ имеем $U = U_1 + U_2 + \dots + U_m = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_m = I(R_1 + R_2 + \dots + R_m) = IR$,

где

$$R = \sum_{k=1}^m R_k. \quad (15)$$

Последовательное соединение m -резистивных элементов можно заменить одним эквивалентным сопротивлением R .

Соединение двух и более элементов ЭЦ, которые связаны между собой двумя узловыми точками, называется *параллельным соединением*.



Все элементы в ЭЦ находятся под действием одного и того же напряжения U , равного разности потенциалов этих узлов.

На основании первого закона Кирхгофа и закона Ома для ЭЦ можно записать выражение

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_m = UG_1 + UG_2 + \dots + UG_m = U(G_1 + G_2 + \dots + G_m) = UG.$$

Параллельное соединение резистивных элементов можно заменить эквивалентной проводимостью или эквивалентным сопротивлением.

Для случая параллельного соединения двух и трех резисторов эквивалентное сопротивление определяется по формулам (16):

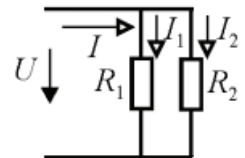
$$R = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}; \quad (16)$$

$$R = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right)} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

3.4.2. Делители тока

Параллельное соединение *двух резисторов*, присоединенных к источнику энергии, называют схемой *делителя тока* [2, с. 52].

С формулой (16) связано *правило делителя тока*, по которому определяют значения токов I_1 и I_2 в каждой из параллельных ветвей:

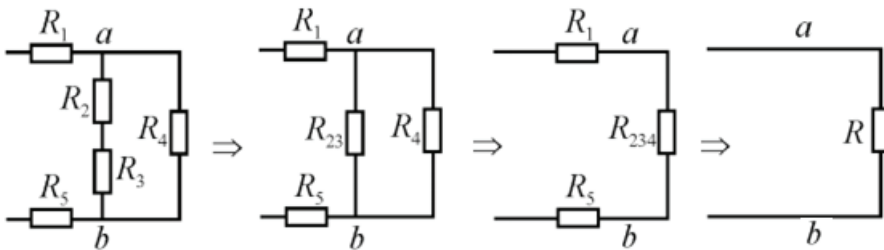


$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2}; \quad I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (17)$$

Ток одной из двух параллельных ветвей равен общему току I , умноженному на сопротивление другой (параллельной) ветви и деленному на сумму сопротивлений обеих ветвей. Токи делятся обратно пропорционально сопротивлениям параллельно соединенных ветвей.

3.4.3. Смешанное соединение сопротивлений

Смешанным соединением называется произвольная комбинация соединений сопротивлений. Последовательность действий определения «эквивалентного сопротивления» для смешанного соединения приведена на следующей схеме.



Для определения «эквивалентного сопротивления» нужно выделить в ЭЦ ветви. Например, на приведенной схеме ЭЦ четыре ветви: 1) R_1 ; 2) R_2 и R_3 (последовательное соединение); 3) R_4 ; 4) R_5 .

Затем выполнить преобразование исходной схемы в следующей последовательности.

1. Определить эквивалентное сопротивление ветви с последовательным соединением сопротивлений R_2 и R_3 (15):

$$R_{23} = R_2 + R_3.$$

2. Определить эквивалентное сопротивление двух параллельных ветвей, состоящих из сопротивлений R_{23} и R_4 (16):

$$R_{234} = \frac{R_{23} R_4}{(R_{23} + R_4)}.$$

3. Определить эквивалентное сопротивление трех последовательных сопротивлений R_1 , R_{234} и R_5 .

$$R = R_1 + R_{234} + R_5.$$

3.4.4. Преобразования трехполюсников

Эквивалентные преобразования смешанных соединений типа *трехлучевой звезды* и *треугольника* этих соединений выполняются при соблюдении условий: *равенство токов, подходящих к узлам a, b и c*, а также *равенство напряжений между узлами* в обеих схемах [2, с. 54].

Сопротивления резисторов *звезды*, эквивалентной *треугольнику*, определяются по формулам (18).

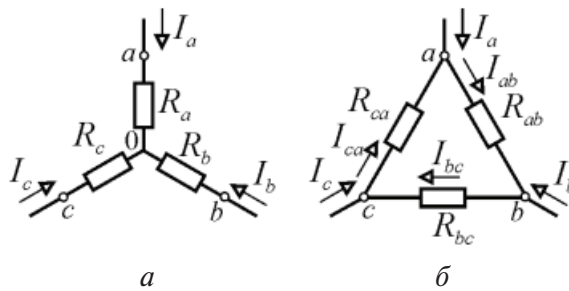


Рис. 3.4. Эквивалентные преобразования смешанных соединений

$$R_a = \frac{R_{ab} R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}; R_b = \frac{R_{ab} R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}; R_c = \frac{R_{bc} R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}. \quad (18)$$

Сопротивления резисторов «треугольника», эквивалентного соединению «звезда», определяются по формулам

$$R_{ab} = \frac{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}{R_c}; R_{bc} = \frac{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}{R_a}; R_{ca} = \frac{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}{R_b}. \quad (19)$$

3.4.5. Мостовая схема

Примером использования преобразований трехполюсников может служить мостовая схема, широко используемая в технике (рис. 3.5). В мостовой схеме можно выделить два соединения *звездой*:

$$R_{ca}, R_{cd}, R_{bc}; R_{ad}, R_{cd}, R_{db}$$

и два соединения *треугольником*:

$$R_{ca}, R_{cd}, R_{ad}; R_{bc}, R_{cd}, R_{db}.$$

В результате преобразования любого из четырех соединений мостовая схема приводится к *смешанному соединению*.

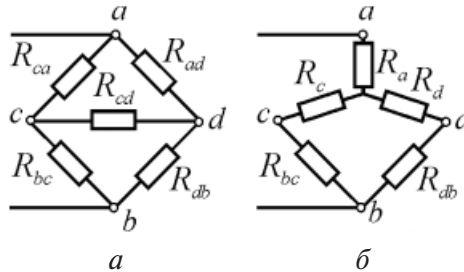
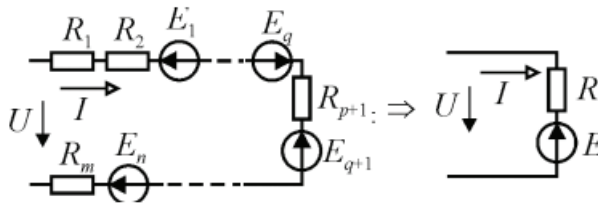


Рис. 3.5. Мостовая схема и ее преобразование к смешанному соединению

Результат преобразования *треугольника* R_{ca}, R_{cd}, R_{ad} (рис. 3.5, а) в *звезду* и получение *смешанного соединения* с сохранением всех узлов мостовой схемы и их потенциалов приведен на рис. 3.5, б.

3.4.6. Последовательное соединение резисторов и источников ЭДС

Участок ЭЦ может содержать *последовательное соединение* m -резисторов и n -источников ЭДС [5, с. 11].



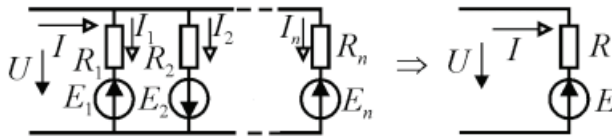
Напряжение на входе цепи можно определить по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned}
 U &= R_1 I + R_2 I + E_1 + \dots - E_q + R_{p+1} I + E_{q+1} + \dots - E_n + R_m I = \\
 &= I \sum_{p=1}^m R_p + \sum_{q=1}^n \pm E_q = RI + E.
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

ЭДС источника напряжения E_q в формуле (20) входит в сумму со знаком $\langle + \rangle$, если направление ЭДС совпадает с направлением тока в цепи.

3.4.7. Параллельное соединение резисторов и источников ЭДС

Участок ЭЦ может содержать *параллельное соединение* n -резисторов и n -источников ЭДС.



По первому закону Кирхгофа входной ток I равен сумме токов в ветвях:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

Ток для участка ЭЦ с источником ЭДС можно определить по закону Ома (10).

$$I_k = (U - E_k)G_k.$$

Подставив выражения для токов I_k в уравнение равновесия, получим

$$I = U \sum_{k=1}^n G_k - \sum_{k=1}^n \pm G_k E_k = \frac{(U - E)}{R}. \quad (21)$$

Положительный знак в сумме ЭДС соответствует согласному направлению ЭДС и тока в ветви. В случае отсутствия источника ЭДС в какой-либо ветви в числителе эквивалентной ЭДС будет отсутствовать соответствующее слагаемое.

Глава 4

Анализ разветвленной ЭЦ постоянного тока

4.1. Метод эквивалентного сопротивления

Расчет токов и напряжений ветвей разветвленной ЭЦ постоянного тока с одним источником напряжения может быть выполнен *методом эквивалентного сопротивления*. Суть метода заключается в пошаговом упрощении схемы замещения путем объединения последовательно и параллельно соединенных элементов или ветвей схемы ЭЦ. В результате преобразований схема ЭЦ должна быть сведена к одному *эквивалентному сопротивлению* ЭЦ. Затем, используя закон Ома, находят ток в источнике напряжения. Далее, по законам Кирхгофа и правилу деления тока на части (см. п. 3.4) находят токи и напряжения во всех ветвях схемы ЭЦ [2, с. 63; 5, с. 56].

Для ЭЦ (рис. 4.1) даны значения параметров элементов схемы замещения ЭЦ: $E = 100$ В; $R_{вн} = 0,5$ Ом; $R_1 = 2,5$ Ом; $R_{21} = 10$ Ом; $R_{22} = 20$ Ом; $R_3 = 20$ Ом.

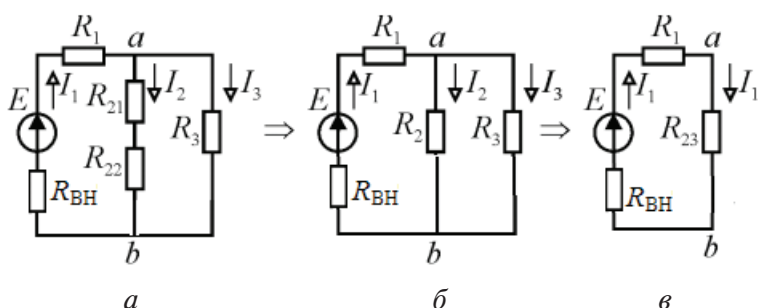


Рис. 4.1. Анализ ЭЦ методом эквивалентного сопротивления

Требуется:

- определить токи во всех ветвях схемы замещения ЭЦ;

- составить уравнения равновесия ЭЦ по первому закону Кирхгофа для токов в узле a , чтобы проверить правильность решения;
- составить баланс мощностей.

Ток I_1 в первой ветви равен сумме токов во второй I_2 и третьей I_3 ветвях ЭЦ согласно первому закону Кирхгофа. Токи I_2 и I_3 можно найти, поэтапно преобразовав схему к цепи, состоящей из одного контура, как показано на рис. 4.1, ϑ , и вычислив вначале ток I_1 в первой ветви.

Эквивалентные преобразования ЭЦ (рис. 4.1) включают следующие шаги.

- Определить эквивалентное сопротивление R_2 последовательно включенных резисторов R_{21} и R_{22} (рис. 4.1, a):

$$R_2 = R_{21} + R_{22}.$$

- Определить эквивалентное сопротивление R_{23} параллельно включенных резисторов R_2 и R_3 (рис. 4.1, b):

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{(R_2 + R_3)}.$$

- Определить ток I_1 в цепи (рис. 4.1, ϑ) с помощью обобщенного закона Ома для участка ab (10):

$$U_{ab} = R_{23} I_1;$$

$$U_{ab} = E - I_1 (R_1 + R_{\text{вн}}).$$

Решая совместно два выражения относительно тока I_1 , получим

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_{\text{вн}} + R_{23}}.$$

Определить токи I_2 и I_3 , применив *правило делителя тока* (17):

$$I_2 = \frac{I_1 R_3}{R_2 + R_3}; I_3 = \frac{I_1 R_2}{R_2 + R_3}.$$

- Составить уравнение равновесия для узла a ЭЦ (рис. 4.1, b):

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

- Составить баланс мощностей для схемы замещения ЭЦ (рис. 4.1, a):

- мощность источника энергии, рассеиваемая в ЭЦ:

$$P_{\text{и}} = EI_1;$$

- мощность, которая преобразуется в сопротивлениях ЭЦ:

$$P_{\text{н}} = I_1^2 R_{\text{вн}} + I_1^2 R_1 + I_2^2 (R_{21} + R_{22}) + I_3^2 R_3;$$

- убедиться в выполнении баланса мощностей: $P_{\text{и}} = P_{\text{н}}$.

На основании закона сохранения энергии мощность $P_{\text{и}}$, рассеиваемая источниками электрической энергии в ЭЦ, должна быть равна мощности $P_{\text{н}}$, преобразуемой в другие виды энергии в сопротивлениях ЭЦ.

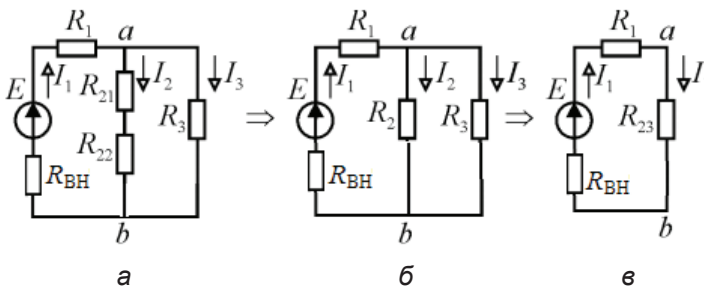
Выполнить анализ ЭЦ методом «эквивалентного сопротивления». в среде программы Mathcad [4, с. 31]. Листинг программы приведен в примере 4.1.

Открыть новый документ в Mathcad и сохранить его в файле *Упр_4_1_NNN*.

**Пример 4.1. Листинг анализа схемы замещения ЭЦ
методом эквивалентного сопротивления**

**Анализ разветвленной ЭЦ постоянного тока
методом эквивалентного сопротивления**

Дана схема замещения ЭЦ, представленная на рис. а.



Параметры ЭЦ имеют следующие значения:

$E = 75 \text{ В}$, $R_{\text{вн}} = 0,5 \text{ Ом}$, $R_1 = 2,5 \text{ Ом}$, $R_{21} = 10 \text{ Ом}$, $R_{22} = 20 \text{ Ом}$, $R_3 = 20 \text{ Ом}$.

Требуется определить токи в ветвях ЭЦ и составить баланс мощностей.

Дано:

$$E := 75 \text{ V} \quad R_{\text{вн}} := 0.5 \Omega \quad R_1 := 2.5 \Omega \quad R_{21} := 10 \Omega$$

$$R_{22} := 20 \Omega \quad R_3 := 20 \Omega$$

Окончание примера 3.1

Решение:

1. Вычислить эквивалентные сопротивления:

Эквивалентное сопротивление R_2 (рис. б)

$$R_2 := R_{21} + R_{22} \quad R_2 = 30 \Omega$$

Эквивалентное сопротивление R_{23} (рис. в)

$$R_{23} := \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} \quad R_{23} = 12 \Omega$$

2. Вычислить токи в ветвях ЭЦ:

Ток I_1

$$I_1 := \frac{E}{(R_{\text{вн}} + R_1 + R_{23})} = 5 \text{ A}$$

Токи I_2 и I_3

$$I_2 := I_1 \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 2 \text{ A} \quad I_3 := I_1 \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 3 \text{ A}$$

Проверить решение, вычислив уравнение равновесия для узла а

$$5 - 2 - 3 = 0$$

Алгебраическая сумма токов ветвей, подключенных к узлу а, равна нулю.

3. Составить баланс мощностей

Мощность электрической цепи

$$E \cdot I_1 = 375 \text{ W}$$

$$I_1^2 \cdot R_{\text{вн}} + I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot (R_{21} + R_{22}) + I_3^2 \cdot R_3 = 375 \text{ W}$$

Баланс мощностей сошелся, что подтверждает правильность расчета значений тока в ветвях.

4.2. Метод непосредственного применения законов Кирхгофа

Анализ линейной ЭЦ, у которой известны параметры источников напряжения (ИН) и сопротивлений ветвей, относится к *прямой задаче анализа ЭЦ*, которая может быть решена с применением *непосредственно законов Кирхгофа*. Для анализа ЭЦ необходимо составить систему таких независимых уравнений, чтобы задача имела *единственное решение* [5, с. 25].

4.2.1. Алгоритм формирования системы уравнений Кирхгофа

Алгоритм формирования системы уравнений включает следующие действия

1. Определяется количество ветвей p и узлов q в схеме замещения ЭЦ. Количество ветвей определяет общее количество уравнений Кирхгофа, так как неизвестными величинами являются токи в ветвях. Обозначаются и маркируются ветви и узлы ЭЦ. Все элементы, принадлежащие k -й ветви, ($k = 1, 2, \dots, N_B$), а также выбранные для ветви положительные направления токов I_k и напряжений U_k , маркируются одной цифрой.

2. Составляются уравнения равновесия на основе первого закона Кирхгофа для *независимых* узлов. Общее количество уравнений по первому закону Кирхгофа равно $m = q - 1$. При составлении уравнений условно считают токи, направленные в узел «отрицательными», а направленные от узла — «положительными».

3. Составляются уравнения равновесия на основе второго закона Кирхгофа для *независимых* контуров ЭЦ. Контур считается *независимым*, если он включает хотя бы одну новую ветвь, не включая ветви с источниками тока. Общее количество уравнений по второму закону Кирхгофа равно количеству независимых контуров $n = p - m = p - q + 1$. Произвольно выбираются направления токов в ветвях, а затем направления обхода независимых контуров. В уравнениях для контуров в левую часть включают напряжения на резистивных элементах, а в правую — ЭДС ИН. При этом напряжения на элементах, у которых направления протекания тока совпадает с направлением движения

при обходе контура, включаются в уравнение с знаком «плюс», а не совпадающие — со знаком «минус». ЭДС ИН включается в уравнение со знаком «плюс», если ее направление совпадает с направлением обхода контура, и со знаком «минус» — при встречном направлении.

4. Объединить $m = q - 1$ независимых уравнений равновесия, составленных по первому закону Кирхгофа, и $n = p - q + 1$ зависимых уравнений равновесия, составленных по второму закону Кирхгофа. В результате получим $p = m + n$ независимых уравнений. В сочетании с p -компонентными уравнениями ветвей получим $2p$ линейно независимых уравнений, что позволит определить все неизвестные токи и напряжения в ветвях схемы замещения ЭЦ.

Пример составления уравнений Кирхгофа для ЭЦ с источниками напряжения

Дана схема замещения ЭЦ (рис. 4.2).

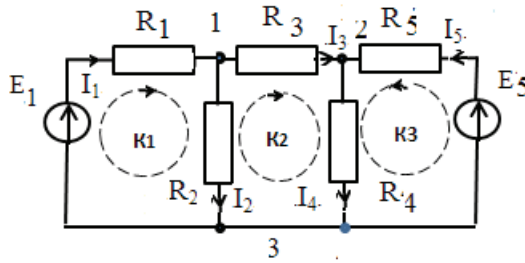


Рис. 4.2. Топологический анализ схемы ЭЦ

Стрелками показаны произвольно выбранные направления токов во всех ветвях (индексы элементов цепи соответствуют номеру ветви). В результате топологического анализа схемы ЭЦ получены следующие результаты:

- общее количество «ветвей», по которым протекает один и тот же ток (неизвестных токов) в ЭЦ, равно пяти;
- в ЭЦ имеется три узла;
- количество *независимых узлов* равно двум (выберем узлы 1 и 2; узел 3 является *зависимым* — уравнение для этого узла является суммой уравнений для других узлов).

Уравнения равновесия, составленные по первому закону Кирхгофа для первого и второго узлов, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{Узел (1)} \quad & -I_1 + I_2 + I_3 = 0; \\ \text{Узел (2)} \quad & -I_3 + I_4 - I_5 = 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Всего для ЭЦ схемы (см. рис. 4.2) можно составить шесть контуров. Выбрать три произвольных контура с минимальным количеством элементов таких, чтобы в них входили все ветви (К1, К2, К3), как показано на рис. 4.2. Примем направление обхода контуров К1 и К2 по часовой стрелке, а К3 против часовой стрелки. Направление обхода контура может быть любым в каждом контуре.

Уравнения равновесия, составленные по второму закону Кирхгофа, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{Контур (К1)} \quad & I_1 R_1 + I_2 R_2 = E_1; \\ \text{Контур (К2)} \quad & I_3 R_3 + I_4 R_3 - I_2 R_2 = 0; \\ \text{Контур (К3)} \quad & I_5 R_5 + I_4 R_4 = E_5. \end{aligned} \quad (23)$$

Объединив системы уравнений равновесия (22) и (23) получим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ «равновесия») пятого порядка (24):

$$\begin{aligned} -I_1 + I_2 + I_3 &= 0; \\ -I_3 + I_4 - I_5 &= 0; \\ I_1 R_1 + I_2 R_2 &= E_1; \\ I_3 R_3 + I_4 R_3 - I_2 R_2 &= 0; \\ I_5 R_5 + I_4 R_4 &= E_5. \end{aligned} \quad (24)$$

Преобразовать систему уравнений (24) и записать ее в нормализованной форме:

$$\begin{aligned} -I_1 + I_2 + I_3 + 0 + 0 &= 0; \\ 0 + 0 - I_3 + I_4 - I_5 &= 0; \\ I_1 R_1 + I_2 R_2 &= E_1; \\ I_1 R_1 + I_2 R_2 + 0 + 0 + 0 &= E_1; \\ 0 - I_2 R_2 + I_3 R_3 + I_4 R_4 + 0 &= 0; \\ 0 + 0 + 0 + I_4 R_4 + I_5 R_5 &= E_5. \end{aligned} \quad (25)$$

Подставить численные значения параметров резисторов и ЭДС ИН схемы замещения ЭЦ в систему уравнений (25) и решить ее относительно неизвестных токов ветвей с использованием законов Кирхгофа в матричной форме (п. 3.3.5).

4.2.2. Законы Кирхгофа в матричной форме

При составлении уравнений Кирхгофа в матричной форме токи I_k и напряжения U_k ветвей задаются в виде вектор-столбцов, как показано ниже.

$$\begin{array}{c} \text{Номера} \\ \text{ветвей} \end{array} \downarrow \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ k \\ \vdots \\ p \end{array} \begin{array}{c} \left(I_1 \right) \\ \left(I_2 \right) \\ \left(I_k \right) \\ \left(\vdots \right) \\ \left(I_p \right) \end{array} \\ [I] = \\ \\ \begin{array}{c} \text{Номера} \\ \text{ветвей} \end{array} \downarrow \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ k \\ \vdots \\ p \end{array} \begin{array}{c} \left(U_1 \right) \\ \left(U_2 \right) \\ \left(U_k \right) \\ \left(\vdots \right) \\ \left(U_p \right) \end{array} \\ [U] :=
 \end{array}$$

При записи векторов $[I]$ и $[U]$ непосредственно по виду схемы замещения ЭЦ необходимо учитывать следующее.

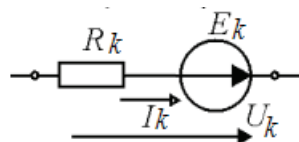
1. При топологическом описании схемы «ветвью» считается участок цепи, по которому протекает один и тот же ток. В схеме замещения (см. рис. 4.2) участки ЭЦ, которые содержат последовательно соединенные источник напряжения и резистор (R_1, E_1 и R_5, E_5), считаются «ветвями».

2. Количество элементов в векторах $[I]$ и $[U]$ равно количеству ветвей в схеме замещения.

3. Вектор напряжений ветвей $[U]$ учитывает наличие в ветвях ЭДС источников напряжения:

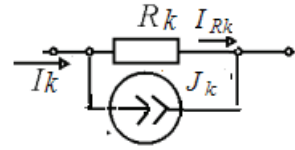
$$U_k = R_k I_k \pm E_k.$$

Суммарная ЭДС ветви E_k записывается со знаком «плюс», если положительное направление этой ЭДС и тока ветви не совпадают, и со знаком «минус», если совпадают.



4. Вектор токов ветвей $[I]$ учитывает наличие в ветвях источников тока. Ток ветви определяется по формуле

$$I_k = I_{Rk} \pm J_k.$$



Причем J_k записывается со знаком «плюс», если положительные направления тока источника J_k и тока ветви I_k совпадают, и со знаком «минус», если направления токов не совпадают.

Первый закон Кирхгофа в матричной форме

Матричное уравнение равновесия (токов ветвей) — *первый закон Кирхгофа в матричной форме* имеет следующий вид:

$$[A][I] = 0, \tag{26}$$

где $[I]$ — вектор-столбец токов ветвей; $[A]$ — прямоугольная узловая матрица, строки которой содержат сведения о ветвях, связанных с узлами ЭЦ, и отражают направления токов ветвей к этим узлам (22).

Номера ветвей				
1	2	3	4	5
$[A] = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$				
1 Номера				
2 узлов				

Матричное уравнение токов ветвей (26) представляет собой сумму произведений элементов каждой строки узловой матрицы $[A]$ на соответствующие элементы вектора-столбца токов ветвей $[I]$.

Для схемы замещения ЭЦ (см. рис. 4.2) матричное уравнение токов ветвей, составленное по первому закону Кирхгофа примет следующий вид.

$$[A][I] = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -I_1 + I_2 + I_3 \\ -I_3 + I_4 - I_5 \end{pmatrix} = 0.$$

Рис. 4.3. Матричное уравнение токов для схемы ЭЦ (см. рис. 4.2)

Второй закон Кирхгофа в матричной форме

Матричное уравнение равновесия (напряжений ветвей) — *второй закон Кирхгофа в матричной форме* имеет следующий вид:

$$[B][U] = 0, \quad (27)$$

где $[B]$ — контурная матрица.

Контурная матрица $[B]$ представляет собой матрицу, строки которой соответствуют n независимым контурам ЭЦ, а столбцы — ее p -ветвям.

$$[B] = \begin{array}{ccccc} \text{Номера ветвей} & & & & \\ & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{matrix} \text{Номера} \\ \text{контуров} \end{matrix} & & \end{array}$$

Если контур содержит ветвь, то соответствующему элементу матрицы $[B]$ присваивается значение $+1$, когда направление обхода контура совпадает с направлением тока в ветви, и -1 , когда направление противоположно. Если контур не содержит ветвь, то соответствующему элементу матрицы присваивается нулевое значение.

Поскольку элементы строки контурной матрицы $[B]$ содержат сведения о ветвях, связанных с контурами ЭЦ, и отражают направления напряжения (совпадающие с направлениями токов) в этих ветвях, то матричное произведение контурной матрицы $[B]$ и вектора напряжений ветвей $[U]$ (27) представляет матричное уравнение напряжений ветвей — *второй закон Кирхгофа в матричной форме* для схемы ЭЦ (см. рис. 4.2).

$$[B][U] = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R_1 I_1 - E_1 \\ R_2 I_2 \\ R_3 I_3 \\ R_4 I_4 \\ R_5 I_5 - E_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 I_1 - E_1 + R_2 I_2 \\ -R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_4 I_4 \\ R_4 I_4 + R_5 I_5 - E_5 \end{pmatrix} = 0.$$

Матричное уравнение напряжений представляет собой сумму произведений элементов каждой строки прямоугольной контурной матрицы $[B]$ на соответствующие элементы вектора напряжений ветвей $[U]$.

Преобразуем матричное уравнение напряжений к виду

$$[C][I] = \begin{pmatrix} R_1 & R_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_2 & R_3 & R_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & R_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \\ 0 \\ E_5 \end{pmatrix}.$$

Представим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) (27) в матричной форме, объединив в блоке AM матрицы A и C .

$$[AM][I] = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & -1 \\ R_1 & R_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_2 & R_3 & R_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & R_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_1 \\ 0 \\ E_5 \end{pmatrix}. \quad (28)$$

Система линейных алгебраических уравнений (28) в матричной форме примет вид

$$[AM][I] = [EM], \quad (29)$$

где $[AM]$ — матрица коэффициентов системы размерностью $p \times p$ (5×5); $[I]$ — вектор-столбец неизвестных токов; $[EM]$ — вектор-столбец правых частей системы уравнений.

Столбцами матрицы $[AM]$ являются множители соответствующих токов в уравнениях Кирхгофа, а в векторе правых частей $[EM]$ включены ЭДС источников напряжения, действующие в контурах.

Решение СЛАУ (29) матричным способом (по формуле Крамера) имеет вид:

$$[I] = [AM]^{-1} [EM]. \quad (30)$$

Значениям компонентов вектора $[I] = (I_1, I_2, \dots, I_5)$ будут соответствовать значения токов в ветвях ЭЦ.

Определив токи $[I] = (I_1, I_2, \dots, I_5)$, можно найти по закону Ома значения элементов вектора напряжений на резисторах всех ветвей $[U] = (U_1, U_2, \dots, U_5)$ по формулам $U_k = I_k R_k$.

Составить баланс мощностей ЭЦ:

$$P_R = \sum_{k=1}^m I_k^2 R_k; \quad P = \sum_{k=1}^m \pm E_k I_k, \quad (31)$$

где P_R — мощность, рассеиваемая на сопротивлениях электрической цепи, а P — мощность ЭЦ, доставляемая n -источниками ЭДС. Мощность источника считается положительной, если направление тока в нем совпадает с направлением ЭДС.

Баланс мощностей (31) можно вычислить другим способом по формулам скалярного произведения векторов:

$$P_R = [I]^2 \cdot [R] = [U] \cdot [I]; \quad P = [E] \cdot [I]. \quad (32)$$

4.2.3. Анализ ЭЦ методом непосредственного применения законов Кирхгофа в среде программы Mathcad

Для ЭЦ постоянного тока (см. рис. 4.2) определить токи в резистивных ветвях ЭЦ и составить баланс мощностей. Расчет выполнить матричным способом в среде программы Mathcad [4, с. 50]. Листинг программы анализа ЭЦ методом применения законов Кирхгофа в среде Mathcad, приведен в примере 4.2.

Открыть новый документ в Mathcad и сохранить его в файле *Упр_4_2_NNN*.

Параметры элементов схемы ЭЦ имеют следующие значения:

$E_1 = 10$ В, $E_5 = 5$ В, $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 20$ Ом, $R_4 = 10$ Ом, $R_5 = 20$ Ом.

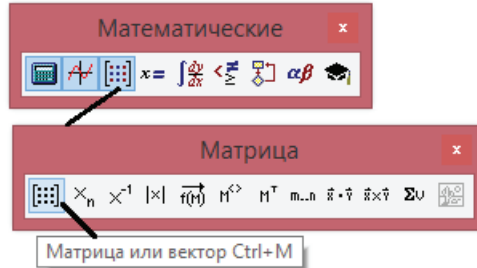
Параметры элементов схемы ЭЦ (векторы-столбцы сопротивлений резисторов $[R]$ и ЭДС $[E]$ источников напряжения) отобразить в Mathcad в виде массивов-векторов $[R]$ и $[E]$.

В программе Mathcad рекомендуется для получения значений элементов массивов-векторов $[R]$ и $[E]$ задать их матричный индекс, равный номеру строки, на которой элемент находится. В Mathcad начальные индексы по умолчанию отсчитываются с 0 (нуля). Можно изменить точку отсчета индексов на 1 (или любое другое значение), выполнив переопределение величины параметра ORIGIN («Точка отсчета») вверху Рабочего листа.

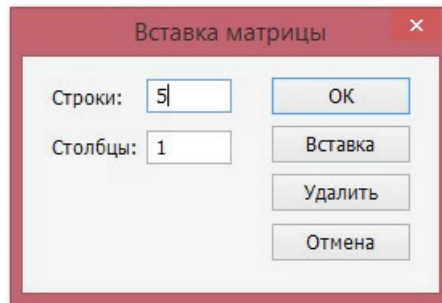
$$[R] = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \end{pmatrix}$$

Для создания массивов-векторов $[R]$ и $[E]$ в программе Mathcad рекомендуется использовать следующий способ.

- Ввести имя массива-вектора и знак операции присваивания;



- Вызвать на экран панель **Матрица**, в которой нажать аналогичную кнопку **Матрица или вектор**, чтобы вызвать диалоговое окно **Вставка матрицы**;



- В диалоговом окне задать число строк вектора, которые необходимо создать. Для создания массивов-векторов $[R]$ и $[E]$ ввести следующие значения: **Строки:5**; **Столбцы:1**;
- Нажать кнопку ОК. В результате Mathcad вставит в документ заготовку массива-вектора с одним столбцом и пятью строками с пустыми местозаполнителями;



- Ввести значения параметров резисторов схемы замещения ЭЦ в местозаполнители массива-вектора $[R]$. Переход от одного элемента массива-вектора к другому можно выполнить с помощью клавиш со стрелками;
- Ввести значения параметров ЭДС источников напряжения схемы замещения ЭЦ в местозаполнители массива-вектора $[E]$. Задать размерность массивов-векторов $[R]$ и $[E]$.

$$\text{ORIGIN} := 1$$

$$R := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 20 \\ 10 \\ 20 \end{pmatrix} \Omega \quad E := \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} \text{V}$$

Для отображения в Mathcad матрицы $[AM]$ размером 5×5 создать массив-матрицу $[AM]$ в окне **Вставка матрицы** ввести **Строки: 5; Столбцы: 5**.

$$AM = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & -1 \\ R_1 & R_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_2 & R_3 & R_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & R_5 \end{pmatrix} \quad EM = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_1 \\ 0 \\ E_5 \end{pmatrix}$$

Ввести численные значения коэффициентов вектор-столбца $[R]$ и матрицы $[A]$ в пустые местозаполнители созданного массива-матрицы $[AM]$.

$$AM := \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & -1 \\ 5 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -10 & 20 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 20 \end{pmatrix} \quad EM := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 10 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix}$$

Создать массив-вектор правых частей $[EM]$ СЛАУ. Ввести численные значения коэффициентов в местозаполнители массива-вектора $[EM]$.

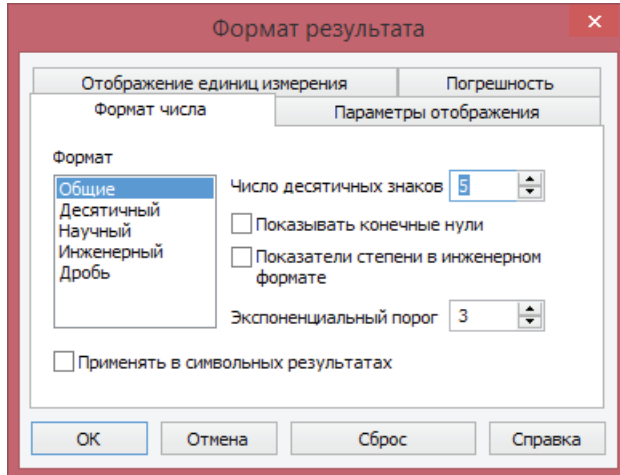
Решение матричного уравнения (29) по формуле Крамера (30) имеет вид массива-вектора $[I]$, приведенный ниже:

$$I := AM^{-1} \cdot EM \quad I = \begin{pmatrix} 0.77778 \\ 0.61111 \\ 0.16667 \\ 0.27778 \\ 0.11111 \end{pmatrix} \cdot \begin{matrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{matrix} \quad I_{\text{м}} := \begin{pmatrix} 0.77778 \\ 0.61111 \\ 0.16667 \\ 0.27778 \\ 0.11111 \end{pmatrix} \text{ A}$$

Значения компонентов массива-вектора $[I] = (I_1, I_2, \dots, I_5)$ соответствуют значениям токов в ветвях ЭЦ. Матричные индексы в массиве-векторе $[I]$ равны номеру строки в векторе-столбце, на котором расположен элемент. Точка отсчета индексов элементов равна 1 (ORIGIN:= 1).

Результат матричной операции не может иметь размерности. Чтобы задать размерность массива-вектора токов в ветвях, необходимо создать массив-вектор $[I]$, в пустые местозаполнители которого скопировать вычисленные значения токов $[I] = (I_1, I_2, \dots, I_5)$. Затем вызвать окно **Вставка единицы измерения**, нажав комбинацию клавиш $\langle \text{Ctrl} \rangle + \langle \text{U} \rangle$, и вставить **Единицу измерения (A)**.

При стандартных настройках в программе Mathcad (по умолчанию) численный результат отображается в формате **Общие** до 3-го знака после запятой. Для проверки правильности расчета токов в ветвях при составлении баланса мощностей необходимо отобразить результат до 5-го знака после запятой. Формат **Общие** позволяет произвольным образом определять количество отображаемых десятичных знаков от 0 до 15. Чтобы получить отображение до 5 знаков, необходимо открыть окно **Формат результата**, щелкнув мышью на команде **Результат** меню **Формат**. В окне **Число десятичных знаков** ввести цифру 5 и нажать ОК. При этом изменение отображения результата коснется всего листа документа Mathcad.



Значения всех элементов массива-вектора напряжений на резисторах ветвей $[U] = (U_1, U_2, \dots, U_5)$ определяются по закону Ома по формуле

$$U_k = I_k R_{k.},$$

где $k = 1, 2, \dots, 5$.

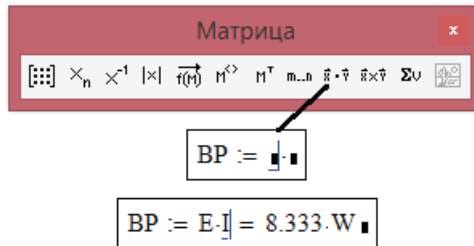
Для определения элементов массива-вектора U_k , которые образованы произведением соответствующих элементов массивов-векторов I_k и $R_{k.}$, ввести *оператор векторизации* (см. п. 2.1.14), щелкнув на кнопке **Векторизовать** на панели **Матрица**, или нажать сочетание клавиш <Ctrl>+<->

$$U := (I \cdot R) = \begin{pmatrix} 3.88890 \\ 6.11110 \\ 3.33340 \\ 2.77780 \\ 2.22220 \end{pmatrix} \text{ V}$$

Составление баланса мощностей

Мощность ЭЦ (32) определить по формуле *скалярного произведения* двух массивов-векторов: $[E]$ и $[I]$ (см. п. 2.1.14). После ввода имени

переменной BP (P -мощность ЭЦ) и оператора присваивания, как показано далее, щелкнуть мышью по пиктограмме **Скалярное произведение** на панели **Матрица**. В выражение будет вставлен *оператор скалярного произведения* с двумя пустыми местозаполнителями для ввода имен векторов.



Вычислить *скалярное произведение* двух массивов-векторов, сложив попарно перемноженные элементы E_k и I_k массивов-векторов $[E]$ и $[I]$ (31).

$$BP2 := \sum_{k=1}^5 (E_k \cdot I_k) = 8.333 \cdot W$$

Определить суммарную мощность, которая рассеивается на сопротивлениях ЭЦ (BPR) как *скалярное произведение* массивов-векторов R и I^2 , также двумя способами.

$$BPR := R \cdot I^2 = 8.333 \cdot W$$

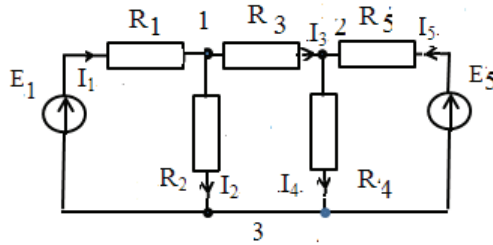
$$BPR2 := \sum_{k=1}^5 [R_k \cdot (I_k)^2] = 8.333 \cdot W$$

Баланс мощностей сошелся. Правильность расчета токов в ЭЦ подтверждена.

Пример 4.2. Листинг программы анализа схемы замещения ЭЦ методом непосредственного применения законов Кирхгофа

Анализ разветвленной ЭЦ постоянного тока методом непосредственного применения законов Кирхгофа

Дана схема замещения ЭЦ, представленная на рис.



Параметры элементов ЭЦ имеют следующие значения:

$E_1 = 10$ В, $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 20$ Ом, $R_4 = 10$ Ом, $R_5 = 20$ Ом, $E_5 = 5$ В.
Требуется определить токи в ветвях ЭЦ и составить баланс мощностей.

Исходные данные

Параметры элементов схемы замещения ЭЦ задать в матричной форме в виде массивов-векторов R и E.

$$\begin{array}{l} \text{ORIGIN} := 1 \\ \underline{\underline{R}} := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 20 \\ 10 \\ 20 \end{pmatrix} \Omega \quad \underline{\underline{E}} := \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} \text{V} \end{array}$$

Решение:

Создать массивы-матрицы коэффициентов AM и EM

$$\underline{\underline{AM}} := \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & -1 \\ 5 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -10 & 20 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 20 \end{pmatrix} \quad \underline{\underline{EM}} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 10 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix}$$

Окончание примера 3.2

Решить СЛАУ матричным способом

$$I := AM^{-1} \cdot EM \quad I = \begin{pmatrix} 0.77778 \\ 0.61111 \\ 0.16667 \\ 0.27778 \\ 0.11111 \end{pmatrix} \cdot \begin{matrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{matrix} \quad I := \begin{pmatrix} 0.77778 \\ 0.61111 \\ 0.16667 \\ 0.27778 \\ 0.11111 \end{pmatrix} A$$

Вычислить значения элементов массива-вектора напряжений на резистивных ветвях по закону Ома, применив оператор векторизации

$$U := \overrightarrow{(I \cdot R)} = \begin{pmatrix} 3.88890 \\ 6.11110 \\ 3.33340 \\ 2.77780 \\ 2.22220 \end{pmatrix} V$$

Составить баланс мощностей, вычислив значения мощностей по формуле скалярного произведения двух массивов-векторов

1. Мощность ЭЦ

1 способ: $BP := E \cdot I = 8.333 \text{ W}$

2 способ: $BP2 := \sum_{k=1}^5 (E_k \cdot I_k) = 8.333 \text{ W}$

2. Суммарная мощность, рассеиваемая на резистивных элементах ЭЦ

1 способ: $BPR := R \cdot I^2 = 8.333 \text{ W}$

2 способ: $BPR2 := \sum_{k=1}^5 [R_k \cdot (I_k)^2] = 8.333 \text{ W}$

Баланс мощностей в ЭЦ сошелся.

4.2.4. Проверка результатов анализа ЭЦ методом непосредственного применения законов Кирхгофа в среде Multisim

Модель ЭЦ постоянного тока (см. рис. 4.2) в среде программы Multisim с применением измерительного прибора **Multimeter** приведена на рис. 4.4. Модель ЭЦ постоянного тока в среде программы Multisim с применением измерительных индикаторов **Ammeter** и **Voltmeter** и измерительного прибора **Wattmeter** приведена на рис. 4.5 (см. п. 4.3.4).

Сравнительный анализ результатов моделирования ЭЦ постоянного тока в среде программ Mathcad и Multisim свидетельствует о том, что показания приборов **Multimeter** (XMM1-XMM5) модели ЭЦ совпадают до 5-го знака после запятой с соответствующими результатами расчета в программе Mathcad (см. пример 4.2).

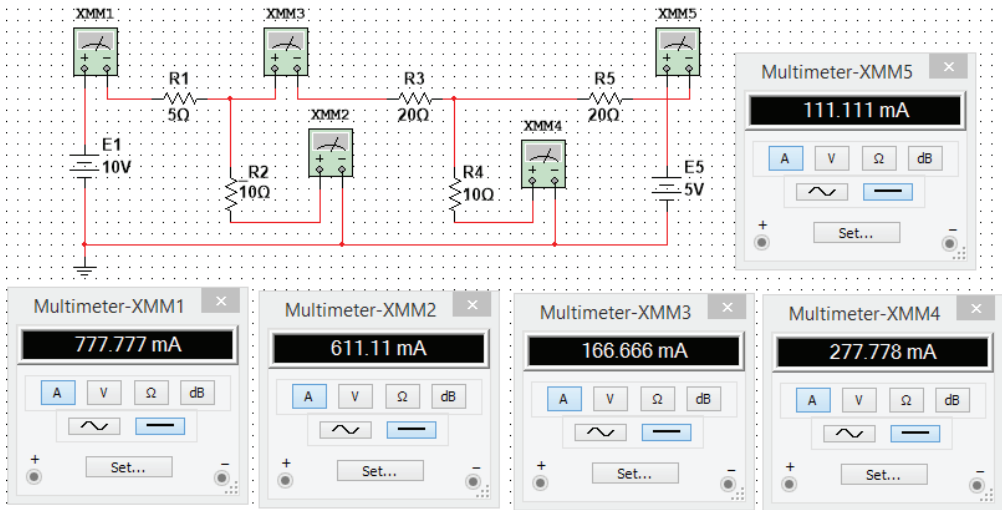


Рис. 4.4. Схема моделирования ЭЦ в среде Multisim с применением прибора Multimeter

4.3. Метод контурных токов

Метод контурных токов (метод КТ) используют для анализа ЭЦ с большим количеством узлов. Решение *прямой задачи анализа ЭЦ* на основе метода КТ позволяет исключить уравнения равновесия, со-

ставленные по первому закону Кирхгофа, и решать ту же задачу анализа ЭЦ через СЛАУ меньшей размерности.

Метод КТ основан на предположении, что в каждом контуре ЭЦ протекает собственный ток, независимый от токов в других контурах, а истинные токи в ветвях определяются как алгебраическая сумма контурных токов (с учетом их направления), протекающих через каждую ветвь ЭЦ [1, с. 38; 2, с. 73].

4.3.1. Метод контурных токов для ЭЦ с ветвями первого типа

Пусть ЭЦ не содержит ветвей с источниками тока. Если в схеме ЭЦ p -ветвей и $q - 1$ независимых узлов, то в такой ЭЦ можно выделить $n = p - q + 1$ независимых контуров (см. п. 4.2.1).

Для каждого контура составляется уравнение равновесия по второму закону Кирхгофа, включив в левую часть падения напряжения на резистивных элементах R контура, создаваемые протекающими по ним контурными токами IC , а в правую часть — ЭДС E источников напряжения, действующих в контуре.

Обозначим *формализованные переменные* (контурные токи) IC_1, IC_2, \dots, IC_n .

СЛАУ «равновесия контурных токов», составленная по второму закону Кирхгофа для формализованных переменных, примет вид

$$\begin{aligned} R_{11}IC_1 + R_{12}IC_2 + \dots + R_{1n}IC_n &= \sum_1 E; \\ R_{21}IC_1 + R_{22}IC_2 + \dots + R_{2n}IC_n &= \sum_2 E; \\ R_{n1}IC_1 + R_{n2}IC_2 + \dots + R_{nn}IC_n &= \sum_n E. \end{aligned} \quad (33)$$

В этой системе приняты следующие обозначения:

- R_{ii} — собственное сопротивление i -го контура, которое представляет собой сумму всех сопротивлений ветвей, принадлежащих этому контуру; значения R_{ii} всегда записываются со знаком «плюс»;
- $R_{ij} = R_{ji}$ — взаимное сопротивление i - и j -го контуров, которое представляет собой алгебраическую сумму сопротивлений смежных (взаимных) ветвей, которые являются общими для этих контуров. Взаимное сопротивление записывается в си-

стему со знаком «плюс», если токи IC_1 и IC_2 в общей ветви совпадают по направлению, и со знаком «минус», если токи направлены встречно. Если контуры не имеют общей ветви, то это взаимное сопротивление приравняется нулю;

- $\sum_i E$ — контурная ЭДС i -го контура складывается алгебраически из всех ЭДС источников напряжения, действующих в i -м контуре. Знаки слагаемых согласуются с направлением действия контурного тока IC_i . ЭДС E источников напряжения будем считать положительными, если направление их действия совпадает с направлением протекания контурного тока, и отрицательными, если направлены встречно;
- $R_{ii}IC_i$ — падение напряжения на сопротивлениях i -го контура, создаваемое собственным током i -го контура; $R_{ij}IC_i$ — падения напряжения на сопротивлениях i -го контура, создаваемые токами j -го контура в общих сопротивлениях, которые принадлежат одновременно i - и j -му контурам.

СЛАУ «равновесия контурных токов» (33) преобразуется в форму *матричного уравнения контурных токов*.

4.3.2. Матричные уравнения контурных токов

Матричное уравнение контурных токов может быть представлено в виде произведения квадратной матрицы собственных и взаимных сопротивлений контуров $[RC]$ на вектор контурных токов $[IC]$ и матрицы контурных ЭДС $[EC]$:

$$[RC][IC] = [EC]. \quad (34)$$

В матричном уравнении (34) приняты следующие обозначения:

$$[RC] = \begin{pmatrix} R_{11} & -R_{12} & \dots & -R_{1n} \\ -R_{21} & R_{22} & \dots & -R_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -R_{n1} & -R_{n2} & \dots & R_{nn} \end{pmatrix} \quad [IC] = \begin{pmatrix} IC_1 \\ IC_2 \\ \dots \\ IC_n \end{pmatrix} \quad [EC] = \begin{pmatrix} EC_1 \\ EC_2 \\ \dots \\ EC_n \end{pmatrix}$$

Матричное уравнение контурных токов (34) может быть решено относительно матрицы контурных токов IC по формуле Крамера:

$$[IC] = [RC]^{-1} [EC], \quad (35)$$

где $[RC]^{-1}$ — обратная матрица собственных и взаимных сопротивлений контуров.

Корни *матричного уравнения* (34) определяют значения неизвестных контурных токов при заданных значениях параметров резистивных элементов и ЭДС-источников напряжения. Токи ветвей ЭЦ рассчитываются как алгебраическая сумма контурных токов, протекающих в каждой из ветвей.

4.3.3. Анализ ЭЦ методом контурных токов в среде программы Mathcad

Выполнить анализ схемы ЭЦ, приведенной на рис. 4.2, методом контурных токов. Требуется определить токи во всех ветвях ЭЦ и составить баланс мощностей. Расчет выполнить матричным способом в среде программы Mathcad [4, с. 53]. Листинг программы анализа схемы ЭЦ методом контурных токов приведен в примере 4.3.

Открыть новый документ в Mathcad и сохранить его в файле *Упр_4_3_NNN*.

Схема ЭЦ (см. рис. 4.2) имеет пять ветвей и три независимых контура с тремя контурными токами IC_1, IC_2, IC_3 . Направление действия контурного тока в каждом контуре совпадает с направлением обхода контура. Направление обходов контуров выбираются произвольно. Примем направления обходов 1-го и 2-го контуров по часовой стрелке, а направление обхода 3-го контура — против часовой стрелки.

Для анализа ЭЦ методом контурных токов для каждого контура необходимо составить уравнение равновесия по второму закону Кирхгофа и объединить их в «СЛАУ равновесия» вида (33):

$$\begin{aligned} (R_1 + R_2)IC_1 - R_2IC_2 &= E_1, \\ -R_2IC_1 + (R_2 + R_3 + R_4)IC_2 + R_4IC_3 &= 0, \\ R_4IC_2 + (R_4 + R_5)IC_3 &= E_5. \end{aligned}$$

СЛАУ «равновесия контурных токов» преобразуется в форму *матричного уравнения контурных токов* вида (34) и решается методом Крамера (35).

Создать массивы-векторы $[R]$ и $[E]$ для отображения в Mathcad вектор-столбцов $[R]$ и $[E]$ параметров элементов схемы замещения ЭЦ. Ввести данные в массивы-векторы $[R]$ и $[E]$ и вставить **Единицу измерения** (Ω и V), как приведено ниже.

$$\begin{aligned} & \text{ORIGIN} := 1 \\ & \underline{R} := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 20 \\ 10 \\ 20 \end{pmatrix} \Omega \quad \underline{E} := \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} V \end{aligned}$$

В Mathcad создать квадратную массив-матрицу собственных и взаимных сопротивлений контуров $[RC]$ и массив-вектор контурных ЭДС $[EC]$:

$$RC := \begin{pmatrix} R_1 + R_2 & -R_2 & 0 \\ -R_2 & R_2 + R_3 + R_4 & R_4 \\ 0 & R_4 & R_4 + R_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 15 & -10 & 0 \\ -10 & 40 & 10 \\ 0 & 10 & 30 \end{pmatrix} \Omega$$

$$EC := \begin{pmatrix} E_1 \\ 0 \\ E_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix}$$

Определить контурные токи с помощью нахождения корней матричного уравнения контурных токов (34). Решить матричное уравнение $[RC][IC] = [EC]$ относительно массива-матрицы контурных токов $[IC]$ по формуле Крамера (35).

В результате получим значения корней матричного уравнения контурных токов, которые располагаются в массиве-векторе $[IC]$:

$$IC := RC^{-1} \cdot EC \quad IC = \begin{pmatrix} 0.77778 \\ 0.16667 \\ 0.11111 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} IC_1 \\ IC_2 \\ IC_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.77778 \\ 0.16667 \\ 0.11111 \end{pmatrix}$$

Выполнить форматирование результата, щелкнув на команде **Результат** меню **Формат**. В открывшемся окне **Формат Результат** в окне **Число десятичных знаков** ввести цифру 5 и нажать ОК.

По значениям контурных токов IC_1, IC_2, IC_3 определить токи в ветвях $I = (I_1, I_2, \dots, I_5)$ как алгебраическую сумму протекающих в них контурных токов. Выражения для определения токов в ветвях задать в виде элементов массива-вектора $[I]$.

$$I := \begin{pmatrix} IC_1 \\ IC_1 - IC_2 \\ IC_2 \\ IC_2 + IC_3 \\ IC_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.77778 \\ 0.61111 \\ 0.16667 \\ 0.27778 \\ 0.11111 \end{pmatrix} \text{ A}$$

Вставить единицу измерения (А) после вывода массива-вектора численного значения результата вычисления токов в ветвях: в разделе **Размерность** диалоговое окно **Вставка единицы измерения** выбрать строку «электрический ток», а в разделе **Единица измерения** — строку «ампер (А)».

$$U := (I \cdot R) = \begin{pmatrix} 3.88890 \\ 6.11110 \\ 3.33340 \\ 2.77780 \\ 2.22220 \end{pmatrix} \text{ V}$$

Вычислить элементы массива-вектора напряжений $[U] = (U_1, U_2, \dots, U_5)$ на резистивных ветвях, перемножив элементы массивов-векторов токов I и сопротивлений R по закону Ома, применив *оператор векторизации*:

$$U_k = I_k R_{k.},$$

где $k = 1, 2, \dots, 5$.

Ввести оператор векторизации, щелкнув по кнопке **Векторизовать** на панели **Матрица** или нажать сочетание клавиш <Ctrl>+<-> (см. п. 2.1.14).

Вычислить баланс мощностей двумя способами по формулам (31, 32).

Данные для расчета суммарной мощности электрической цепи BP , доставляемой источниками ЭДС, рассеиваемой в ЭЦ, и суммарной мощности BPR , рассеиваемой на сопротивлениях ЭЦ, представлены в виде массивов-векторов $[E]$, $[I]$ и $[R]$:

$$\begin{array}{l} \text{ORIGIN} := 1 \\ E := \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} \text{ V} \quad I := \begin{pmatrix} 0.7778 \\ 0.61111 \\ 0.16667 \\ 0.27778 \\ 0.11111 \end{pmatrix} \text{ A} \quad R := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 20 \\ 10 \\ 20 \end{pmatrix} \Omega \end{array}$$

В Mathcad формулы для вычисления суммарных мощностей BP и BPR имеют вид

$$BP := E \cdot I = 8.333 \cdot W \quad BPR := R \cdot I^2 = 8.333 \cdot W$$

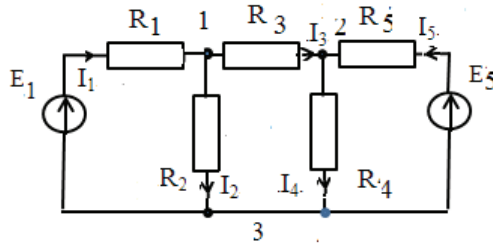
После ввода имени переменной BP и оператора присваивания щелкнуть мышью по пиктограмме **Скалярное произведение** на панели **Матрица**. В выражение будет вставлен оператор *скалярного произведения* с двумя пустыми местозаполнителями для ввода имен векторов.

Баланс мощностей сошелся. Правильность расчета токов в ЭЦ подтверждена.

**Пример 4.3. Листинг программы анализа схемы замещения ЭЦ
методом контурных токов**

**Анализ разветвленной ЭЦ постоянного тока
методом контурных токов**

Дана схема замещения ЭЦ, представленная на рис.



Параметры ЭЦ имеют следующие значения:

$E_1 = 10$ В, $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 20$ Ом, $R_4 = 10$ Ом, $R_5 = 20$ Ом, $E_1 = 5$ В.

Требуется: определить токи в ветвях ЭЦ; составить баланс мощностей.

Дано:

Векторы-столбцы [R] и [E] параметров элементов схемы замещения ЭЦ задать в виде массивов-векторов R и E.

$$\begin{aligned} & \text{ORIGIN} := 1 \\ & \underline{R} := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 20 \\ 10 \\ 20 \end{pmatrix} \Omega \quad \underline{E} := \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} \text{V} \end{aligned}$$

Решение:

Создать массив-матрицу RC собственных и взаимных сопротивлений контуров и массив-вектор EC контурных ЭДС.

$$RC := \begin{pmatrix} R_1 + R_2 & -R_2 & 0 \\ -R_2 & R_2 + R_3 + R_4 & R_4 \\ 0 & R_4 & R_4 + R_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 15 & -10 & 0 \\ -10 & 40 & 10 \\ 0 & 10 & 30 \end{pmatrix} \Omega$$

Окончание примера 4.3

$$EC := \begin{pmatrix} E_1 \\ 0 \\ E_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} \text{ V}$$

Определить контурные токи. Составить матричное уравнение контурных токов и решить его относительно контурных токов [IC] по формуле Крамера. Задать массив контурных токов IC.

$$IC := RC^{-1} \cdot EC \quad IC = \begin{pmatrix} 0.77778 \\ 0.16667 \\ 0.11111 \end{pmatrix} \text{ A}$$

Значения контурных токов располагаются в форме столбца

$$\begin{pmatrix} IC_1 \\ IC_2 \\ IC_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.77778 \\ 0.16667 \\ 0.11111 \end{pmatrix} \text{ A}$$

Определить токи в ветвях ЭЦ, как алгебраическую сумму протекающих в них токах

$$I := \begin{pmatrix} IC_1 \\ IC_1 - IC_2 \\ IC_2 \\ IC_2 + IC_3 \\ IC_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.77778 \\ 0.61111 \\ 0.16667 \\ 0.27778 \\ 0.11111 \end{pmatrix} \text{ A}$$

Составить баланс мощностей, применив операцию **Скалярное произведение** двух векторов.

Мощность электрической цепи

$$E \cdot I = 8.333 \text{ W}$$

Мощность, которая рассеивается на резистивных элементах

$$R \cdot I^2 = 8.333 \text{ W}$$

Баланс мощностей сошелся.

4.3.4. Проверка результатов анализа ЭЦ методом контурных токов в среде программы Multisim

Виртуальная модель разветвленной цепи постоянного тока в среде программы Multisim (рис. 4.2) приведена на рис. 4.5.

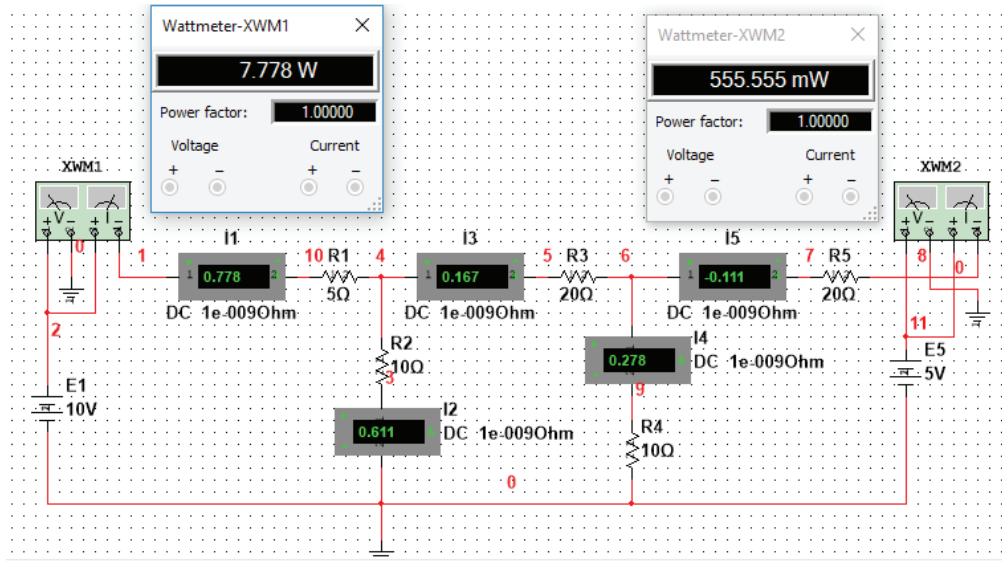


Рис. 4.5. Схема модели ЭЦ среде MS14 с индикатором Ammeter и прибором Wattmeter

Сравнительный анализ результатов математического моделирования разветвленной ЭЦ постоянного тока в среде программ Mathcad (см. пример 4.3.) и схмотехнического моделирования в среде программ Multisim 14.2 свидетельствует о том, что показания измерительных индикаторов **Ammeter** и приборов **Wattmeter** модели ЭЦ полностью (до 3-го знака после запятой) совпадают с соответствующими результатами расчета в программе Mathcad.

4.4. Анализ ЭЦ методом узловых потенциалов

Метод узловых потенциалов (метод УП) решает задачу анализа ЭЦ через СЛАУ меньшей размерности по сравнению с методом анализа на основе непосредственного применения законов Кирхгофа

(см. п. 4.2). Метод УП позволяет исключить уравнения равновесия, составленные по второму закону Кирхгофа. В качестве вспомогательной *формализованной переменной* в методе УП используются *потенциалы узловых точек* [1, с. 53; 2, с. 79].

Метод УП основан на применении обобщенного закона Ома (9,10) и уравнений Кирхгофа (12) для узлов схемы замещения ЭЦ. С помощью обобщенного закона Ома можно определить ток в ветви, если известно напряжение на концах ветви, т. е. разность потенциалов узлов, к которым подключена ветвь, а также ее проводимость и действующая ЭДС. Потенциал любого узла может быть приравнен нулю и этот узел считается *базисным* (зависимым) узлом. В этом случае напряжения ветвей могут быть представлены как разность потенциалов между узловыми точками и базисным узлом.

4.4.1. Метод узловых потенциалов для ЭЦ с ветвями первого типа

Пусть схема замещения ЭЦ включает только ветви с источниками ЭДС (первого типа), а ветви с источниками тока (второго типа) отсутствуют. Если в схеме ЭЦ p -ветвей, то можно выделить $m = q - 1$ независимых узлов (см. п. 3.3.3).

Выберем произвольно направление токов в ветвях ЭЦ с резистивными элементами, а в ветвях с источниками напряжения примем за положительное направление тока, совпадающее с направлением действия ЭДС.

Ток k -й ветви I_k ($k = 1, 2, \dots, p$), присоединенной к i -му узлу ЭЦ ($i = 1, 2, \dots, m$), определяется по формуле на основании закона Ома в обобщенной форме

$$I_k = \frac{\varphi_i}{R_k} = \varphi_i g_k,$$

где $g_k = \frac{1}{R_k}$ — проводимость k -й ветви; φ_i — узловой потенциал.

Ток k -й ветви I_k с сопротивлением резистора R_k и ЭДС источника напряжения E_k , присоединенной к i -му узлу ветви, определяется по формуле

$$I_k = \frac{E_k - \varphi_i}{R_k} = (E_k - \varphi_i) g_k.$$

Значение параметра E_k в формуле на основании закона Ома в обобщенной форме вводится с учетом знака ЭДС: *положительный знак E_k соответствует согласному направлению тока и ЭДС, а отрицательный знак — встречному.*

Ток k -й межузловой ветви I_k , присоединенной к i - и j -му узлам, определяется по формуле

$$I_k = \frac{\varphi_i - \varphi_j}{R_k} = (\varphi_i - \varphi_j)g_k.$$

Ток k -й межузловой ветви I_k с источником напряжения E_k , присоединенной к i - и j -му узлам ветви, определяется по формуле

$$I_k = \frac{E_k - (\varphi_i - \varphi_j)}{R_k} = (E_k - (\varphi_i - \varphi_j))g_k.$$

Составим для m независимых узлов схемы замещения ЭЦ уравнения равновесия по первому закону Кирхгофа и подставим вместо токов I_k ветвей выражения на основании закона Ома в обобщенной форме. После группировки членов при соответствующих узловых потенциалах φ_i и переноса $E_{ik}g_{ik}$ в правую часть образуется СЛАУ равновесия относительно неизвестных узловых потенциалов.

СЛАУ для искоемых потенциалов узлов имеет вид

$$\begin{aligned} G_{11}\varphi_1 - G_{12}\varphi_2 \cdots - G_{1m}\varphi_m &= \sum_k E_{1k}g_{1k}; \\ -G_{21}\varphi_1 - G_{22}\varphi_2 \cdots - G_{2m}\varphi_m &= \sum_k E_{2k}g_{2k}; \\ -G_{m1}\varphi_1 - G_{m2}\varphi_2 \cdots + G_{mm}\varphi_m &= \sum_k E_{mk}g_{mk}. \end{aligned} \quad (36)$$

Структура каждого уравнения в системе (36) одинаковая.

В СЛАУ (36) введены следующие обозначения:

- $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$ — искоемые потенциалы, количество которых совпадает с количеством независимых узлов $m = q - 1$. Нумерация узлов и потенциалов произвольна. Узел, к которому подключен «минус» ЭДС источника напряжения примем в качестве «базисного» узла, потенциал которого приравнивается нулю;
- G_{ii} — *собственная проводимость i -го узла*, которая равна сумме всех проводимостей ветвей, присоединенных к этому узлу:

$$G_{ii} = \sum_{k=1}^p g_{ik}.$$

В СЛАУ (36) диагональные элементы G_{ii} всегда положительны;

- $G_{ij} = G_{ji}$ — взаимная (межузловая) проводимость i - и j -го узлов ($i \neq j$), которая равна сумме проводимостей всех ветвей, которые непосредственно связывают эти две узловые точки:

$$G_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ijk}$$

В СЛАУ (36) элементы G_{ij} и G_{ji} вне диагонали всегда отрицательны;

- Составляющие узлового тока для i -го узла определяются произведением ЭДС ветвей E_{ik} , присоединенных к i -му узлу, на проводимости этих ветвей g_{ik} . Алгебраическая сумма составляющих узлового тока для i -го узла определяется по формуле

$$\sum_{k=1}^p E_{ik} g_{ik};$$

- Составляющая узлового тока для i -узла $E_{ik} g_{ik}$, обусловленная ветвями с источниками напряжения с ЭДС E_{ik} , которые присоединены к этому узлу, записываются со знаком «плюс», если ЭДС источников напряжения направлены в узел, и со знаком «минус», если направлены от узла.

СЛАУ (36) преобразуется в матричную форму. Матричное уравнение узловых потенциалов решается относительно потенциалов независимых узлов. $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$. Корни матричного уравнения определяют значения неизвестных узловых потенциалов при заданных значениях параметров резистивных элементов и ЭДС источников напряжения.

Напряжения ветвей определяются как разность потенциалов смежных узловых точек, связанных между собой ветвями, по формуле

$$U_k = U_{ij} = \varphi_i - \varphi_j.$$

В формуле определения напряжения ветвей выполняется соотношение между потенциалами узлов φ_i и φ_j ($\varphi_i > \varphi_j$), что автоматически предполагает выбор положительного направления напряжения U_k для k -й ветви.

4.4.2. Матричное уравнение узловых потенциалов

Система уравнений (36), записанная для различных узловых потенциалов и узловых токов ЭЦ постоянного тока, может быть представлена в виде произведения квадратной матрицы узловых и межузловых проводимостей $[GM]$ на вектор-столбец узловых потенциалов $[\varphi]$ и матрицы составляющих узлового тока $[EG]$, обусловленных ветвями с источниками напряжения $[E]$, которые присоединены к этому узлу. В результате преобразования получим матричное уравнение узловых потенциалов, которое имеет вид

$$[GM][\varphi] = [EG] \quad (37)$$

где

$$[GM] = \begin{pmatrix} G_{11} & -G_{12} & \dots & -G_{1m} \\ -G_{21} & +G_{22} & \dots & -G_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -G_{m1} & -G_{m2} & \dots & +G_{mm} \end{pmatrix} \quad [\varphi] = \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \dots \\ \varphi_m \end{pmatrix} \quad [EG] = \begin{pmatrix} EG_1 \\ EG_2 \\ \dots \\ EG_m \end{pmatrix}$$

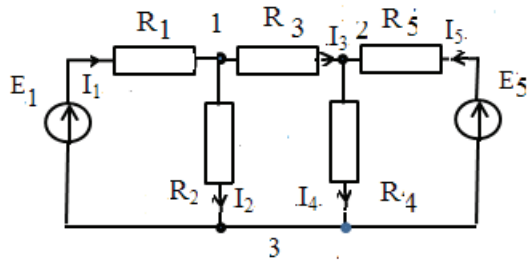
Матричное уравнение узловых потенциалов (37) может быть решено относительно вектора-столбца узловых потенциалов $[\varphi]$ по формуле Крамера:

$$[\varphi] = [GM]^{-1} [EG], \quad (38)$$

где $[GM]^{-1}$ — обратная матрица проводимостей ветвей.

4.4.3. Анализ ЭЦ постоянного тока методом узловых потенциалов

Выполнить анализ ЭЦ, приведенной на схеме, методом узловых потенциалов. Схема замещения ЭЦ имеет пять ветвей и два независимых узла (узел 3 примем за базовый (потенциал φ_3 приравнивается нулю). Обозначим узловые напряжения независимых узлов φ_1 и φ_2 .



Требуется определить токи во всех ветвях ЭЦ и составить баланс мощностей.

Выбрать произвольно направление токов в ветвях 2,3,4 с резистивными элементами. В ветвях 1 и 5 с источниками ЭДС положительное направление тока совпадает с направлением действия ЭДС.

На основании закона Ома в обобщенной форме формулы для определения токов в ветвях примут следующий вид:

$$I_1 = (E_1 - \varphi_1)g_1;$$

$$I_2 = \varphi_1 g_2;$$

$$I_3 = (\varphi_1 - \varphi_2)g_3; \quad (39)$$

$$I_4 = \varphi_2 g_4$$

$$I_5 = (E_5 - \varphi_2)g_5,$$

где $g_k = \frac{1}{R_k}$.

Составить для независимых узлов 1 и 2 уравнения равновесия по первому закону Кирхгофа:

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

$$-I_3 + I_4 - I_5 = 0.$$

Подставить в эту систему уравнений выражения (39). После группировки членов при соответствующих узловых потенциалах и переноса $E_{ik}g_{ik}$ в правую часть образуется СЛАУ (40) относительно неизвестных узловых потенциалов.

$$G_{11}\varphi_1 - G_{12}\varphi_2 = E_1g_1;$$

$$-G_{21}\varphi_1 + G_{22}\varphi_2 = E_5g_5, \quad (40)$$

где $G_{11} = g_1 + g_2 + g_3$ (собственная проводимость 1-го узла); $G_{12} = G_{21} = g_3$ (взаимная проводимость узлов 1- и 2-го); $G_{22} = g_3 + g_4 + g_5$ (собственная проводимость 2-го узла).

Для анализа ЭЦ будем использовать матричный способ решения СЛАУ (40).

Запишем систему уравнений (40) в матричной форме для определения узловых потенциалов FI :

$$[GM][FI] = [EG], \quad (41)$$

где

$$GM = \begin{pmatrix} G_{11} & -G_{12} \\ -G_{21} & G_{22} \end{pmatrix}, \quad FI = \begin{pmatrix} FI_1 \\ FI_2 \end{pmatrix}, \quad EG = \begin{pmatrix} E_1 G_1 \\ E_5 G_5 \end{pmatrix}$$

Решение системы уравнений (41) находим по методу Крамера:

$$[FI] = [GM]^{-1} [EG]. \quad (42)$$

Значения компонентов вектора-столбца $[FI] = (FI_1, FI_2)$ будут соответствовать значениям узловых потенциалов φ_1 и φ_2 .

4.4.4. Анализ ЭЦ методом узловых потенциалов в среде Mathcad

Анализ схемы ЭЦ выполнить матричным способом в среде программы Mathcad [4, с. 59]. Листинг программы «Анализ ЭЦ методом узловых потенциалов в среде Mathcad» приведен в примере 4.4.

Открыть новый документ в Mathcad и сохранить его в файле **Упр_4_4_NNN**.

Переменные R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 и E_1, E_5 определить как переменные с индексами — элементы массивов-векторов $[R]$ и $[E]$ (см. п. 4.2.3).

ORIGIN := 1

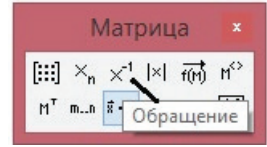
$$R := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 20 \\ 10 \\ 20 \end{pmatrix} \Omega \quad E := \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} V$$

Вычислить элементы массива-вектора проводимостей ветвей $[G]$.

$$[G] = [R]^{-1}.$$

Выражение $[R]^{-1}$ можно ввести с помощью возведения в степень «-1» имени массива-вектора $[R]$ аналогично числам или

кнопки **Обращение** панели **Матрица**, как показано на схеме. При этом следует иметь в виду, что в Mathcad операция возведение массива-вектора в степень «-1» не является *операцией обращения* матрицы, которая применяется только в том случае, если обращаемая матрица квадратная и ее определитель не равен нулю.



$$G := R^{-1} = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.1 \\ 0.05 \\ 0.1 \\ 0.05 \end{pmatrix} \frac{1}{\Omega} \quad \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \\ G_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.1 \\ 0.05 \\ 0.1 \\ 0.05 \end{pmatrix} \frac{1}{\Omega}$$

Встроенной единицей измерения «Электропроводность» в Mathcad является «сименс». Вызвать диалоговое окно **Вставка единицы измерения**, нажав комбинацию клавиш <Ctrl> + <U>, и вставить **Единицу измерения** ($\frac{1}{\Omega}$).

Создать массив-матрицу проводимостей $[GM]$.

$$GM := \begin{pmatrix} G_1 + G_2 + G_3 & -G_3 \\ -G_3 & G_3 + G_4 + G_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.35 & -0.05 \\ -0.05 & 0.2 \end{pmatrix} \frac{1}{\Omega}$$

Матрица проводимостей $[GM]$ симметрична относительно главной диагонали, на которой расположены суммарные проводимости ветвей, сходящихся в i -м узле ($i = 1, 2$ — уравнения СЛАУ). Вне главной диагонали расположены элементы матрицы, представляющие собой суммарные проводимости всех ветвей, соединяющие j -е узлы ($j \neq i$) с i -м узлом.

Создать матрицу $[EG]$ правых частей уравнений (43):

$$EG := \begin{pmatrix} E_1 \cdot G_1 \\ E_5 \cdot G_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0.25 \end{pmatrix} A$$

Элементами массива-вектора $[EG]$ правых частей уравнений явля-

ются ЭДС источников напряжений ветвей E_i , сходящихся в i -м узле, умноженные на проводимости этих ветвей G_i . ЭДС источников напряжений E_i взяты со знаком плюс, так как их действие направлено к узлу.

Определить значения элементов массива-вектора узловых потенциалов $[FI]$, решив СЛАУ (42) методом Крамера:

$$FI := GM^{-1} \cdot EG \quad \begin{pmatrix} FI_1 \\ FI_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.111 \\ 2.778 \end{pmatrix} V$$

Определить токи в ветвях ЭЦ, подставив значения узловых потенциалов в компонентные выражения, составленные для ветвей ЭЦ, на основании обобщенного закона Ома (39).

$$I_1 := (-FI_1 + E_1) \cdot G_1 = 0.778 A$$

$$I_2 := FI_1 \cdot G_2 = 0.611 A$$

$$I_3 := (FI_1 - FI_2) \cdot G_3 = 0.167 A$$

$$I_4 := FI_2 \cdot G_4 = 0.278 A$$

$$I_5 := (-FI_2 + E_5) \cdot G_5 = 0.111 A$$

Составить баланс мощностей, применив операцию **Скалярное произведение** массивов-векторов $[E]$, $[I]$ и $[R]$, $[I^2]$ (см. п. 4.3).

Мощность электрической цепи:

$$E \cdot I = 8.333 \cdot W \blacksquare$$

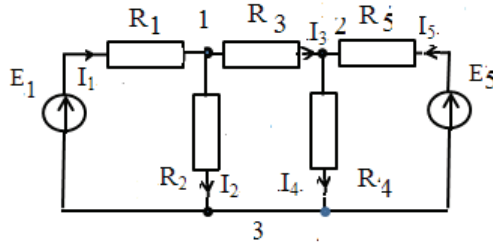
Мощность, рассеиваемая на резистивных элементах:

$$R \cdot I^2 = 8.333 \cdot W \blacksquare$$

Баланс мощностей сошелся. Правильность расчета токов в ЭЦ подтверждена.

Пример 4.4. Листинг анализа схемы замещения ЭЦ методом узловых потенциалов**Анализ ЭЦ постоянного тока методом узловых потенциалов**

Дана схема замещения ЭЦ



Параметры ЭЦ имеют следующие значения:

$E_1 = 10$ В, $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 20$ Ом,
 $R_4 = 10$ Ом, $R_5 = 20$ Ом, $E_1 = 5$ В.

Требуется определить токи в ветвях ЭЦ и составить баланс мощностей.

Параметры элементов схемы замещения ЭЦ задать в виде массивов-векторов R и E.

$$\begin{aligned} \text{ORIGIN} &:= 1 \\ \underline{\underline{R}} &:= \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 20 \\ 10 \\ 20 \end{pmatrix} \Omega \quad \underline{\underline{E}} := \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix} \text{ V} \end{aligned}$$

Вычислить значения элементов массива-вектора проводимостей ветвей G, равных обратным значениям соответствующих элементов массива-вектора R.

$$\underline{\underline{G}} := \underline{\underline{R}}^{-1} = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.1 \\ 0.05 \\ 0.1 \\ 0.05 \end{pmatrix} \frac{1}{\Omega} \quad \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \\ G_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.1 \\ 0.05 \\ 0.1 \\ 0.05 \end{pmatrix} \frac{1}{\Omega}$$

Окончание примера 4.4

Создать массив-матрицу GM и вычислить значения ее элементов.

$$GM := \begin{pmatrix} G_1 + G_2 + G_3 & -G_3 \\ -G_3 & G_3 + G_4 + G_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.35 & -0.05 \\ -0.05 & 0.2 \end{pmatrix} \frac{1}{\Omega}$$

Создать массив-матрицу EG и вычислить значения ее элементов.

$$EG := \begin{pmatrix} E_1 \cdot G_1 \\ E_5 \cdot G_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0.25 \end{pmatrix} A$$

Набрать в программе формулу Крамера решения матричного уравнения и вычислить неизвестные потенциалы узлов.

$$FI := GM^{-1} \cdot EG$$

$$\begin{pmatrix} FI_1 \\ FI_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.111 \\ 2.778 \end{pmatrix} V$$

Определить токи в ветвях ЭЦ, подставив значения потенциалов узлов FI_1 и FI_2 в выражение, на основании обобщенного закона Ома

$$I_1 := (-FI_1 + E_1) \cdot G_1 = 0.778 A$$

$$I_2 := FI_1 \cdot G_2 = 0.611 A$$

$$I_3 := (FI_1 - FI_2) \cdot G_3 = 0.167 A$$

$$I_4 := FI_2 \cdot G_4 = 0.278 A$$

$$I_5 := (-FI_2 + E_5) \cdot G_5 = 0.111 A$$

Составить баланс мощностей. Вычислить мощности с использованием операции Скалярное произведение векторов.

Мощность электрической цепи

$$E \cdot I = 8.333 W$$

Мощность, которая рассеивается на резистивных элементах

$$R \cdot I^2 = 8.333 W$$

Баланс мощностей сошелся.

4.4.5. Проверка результатов анализа ЭЦ методом узловых потенциалов в среде программы Multisim

Модель разветвленной ЭЦ постоянного тока в среде программы Multisim приведена на рис. 4.6.

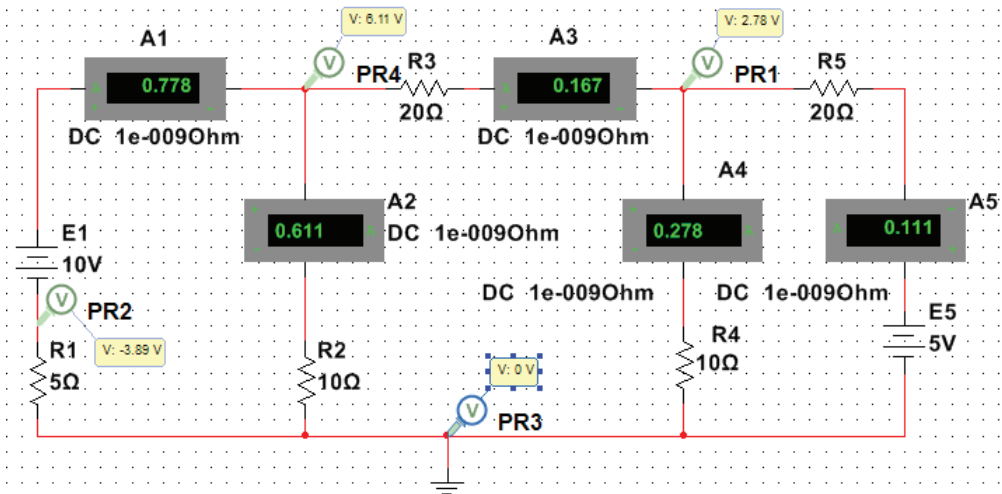


Рис. 4.6. Схема модели анализа ЭЦ методом узловых потенциалов в среде программы MS14

В схеме модели ЭЦ, реализованной в среде программы MS14, для определения потенциалов узлов рекомендуется использовать измерительные пробники **Probe**. Пробник фиксирует потенциал узла, с которым соединена ветвь, где пробник установлен (см. п. 2.2.4).

Сравнительный анализ результатов математического моделирования разветвленной ЭЦ постоянного тока в среде программ Mathcad (см. пример 4.4.) и схемотехнического моделирования в среде программ Multisim 14.2 свидетельствует о том, что показания измерительных индикаторов **Ammeter** и измерительных пробников **Probe** виртуальной модели ЭЦ полностью (до 3-го знака после запятой) совпадают с соответствующими результатами расчета в программе Mathcad (см. пример 4.4).

4.5. Анализ ЭЦ постоянного тока методом наложения (суперпозиции)

Для линейных ЭЦ справедлив *принцип суперпозиции*, который заключается в том, что *реакция* ЭЦ на суммарное воздействие равна сумме реакций на элементарные воздействия (см. п. 3.2.1). Под реакцией ЭЦ понимается режим работы, который устанавливается в результате действия каждого источника электрической энергии. Метод основывается на независимом действии каждого источника напряжения (ИН) на ЭЦ для каждой составной ЭЦ, в которой действует только один ИН. Определяют *частичные токи* в ветвях от действия каждого ИН отдельно. Ток в каждой ветви является суммой *частичных токов*.

4.5.1. Алгоритм анализа ЭЦ методом наложения

Алгоритм анализа ЭЦ методом наложения включает следующие действия.

1. Замена исходной ЭЦ, которая содержит n_e источников напряжения, набором составных ЭЦ, в каждой из которых действует только один источник ЭДС. Исключаемые ИН в ЭЦ заменяются короткозамкнутой перемычкой (режим «короткого замыкания» для идеального ИН (источника ЭДС) или своим внутренним сопротивлением (для реального ИН).

2. Расчет *частичных* токов и напряжений для каждой составной цепи (с одним источником ЭДС) производится с применением эквивалентных преобразований резистивной цепи: последовательное, параллельное и смешанное соединение резисторов, преобразования трехполюсников (см. п. 3.1) и закон Ома.

3. Выбор условных положительных направлений токов (напряжений) в ветвях исходной ЭЦ с учетом направления действия ЭДС (ток в цепи направлен от высшего потенциала к низшему).

4. Определение токов ветвей исходной цепи как алгебраической суммы частичных токов для каждой ветви: частичные токи, направления которых совпадают с направлениями токов, указанными в исходной цепи, берутся со знаком плюс, а противоположно направленные — со знаком минус.

5. Проверка результатов численного решения задачи анализа ЭЦ путем составления уравнений равновесия ЭЦ для суммарных токов и напряжений.

4.5.2. Анализ ЭЦ постоянного тока методом наложения в среде Mathcad

Дана ЭЦ, которая содержит шесть ветвей и два ИН (рис. 4.7).

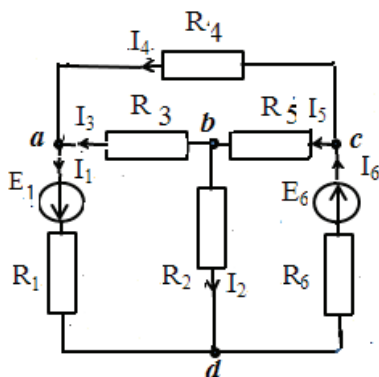


Рис. 4.7. Схема ЭЦ для анализа методом наложения

Исходные данные (параметры ЭЦ): $E_1 = 20$ В; $E_6 = 40$ В; $R_1 = 0,5$ Ом (внутреннее сопротивление ИН с ЭДС E_1); $R_2 = 6$ Ом; $R_3 = 8$ Ом; $R_4 = 20$ Ом; $R_5 = 5$ Ом; $R_6 = 0,6$ Ом (внутреннее сопротивление ИН с ЭДС E_6).

Требуется: рассчитать токи во всех ветвях ЭЦ методом наложения; проверить решение задачи анализа ЭЦ путем составления уравнений равновесия для суммарных токов и напряжений; составить баланс мощностей;

Расчет выполнить матричным способом в среде программы Mathcad [4, с. 39]. Листинг анализа ЭЦ методом наложения приведен в примере 4.5.

Открыть новый документ в Mathcad и сохранить его в файле Упр_4_5_NNN.

Задать «Точку отсчета» индекса, равной 1, с помощью переопределения параметра ORIGIN. Задать параметры элемен-

ORIGIN := 1

$$R := \begin{pmatrix} 0.5 \\ 6 \\ 8 \\ 20 \\ 5 \\ 0.6 \end{pmatrix} \Omega \quad E := \begin{pmatrix} 20 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 40 \end{pmatrix} \text{V}$$

тов схемы замещения (значения сопротивлений резисторов $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ и ЭДС источников напряжения E_1, E_6) в форме массивов-векторов $[R]$ и $[E]$ с шестью элементами $[R] = (R_1, R_2, \dots, R_6)$ и $[E] = (E_1, E_2, \dots, E_6)$. Определить массивы-векторы $[R]$ и $[E]$ в программе в диалоговом окне **Вставка матрицы**. Ввести значения сопротивлений резисторов и ЭДС источников напряжения в массивы $[R]$ и $[E]$. Вставить единицы измерения (Ω и V).

Этап 1. Исключить из исходной схемы (см. рис. 4.7) источник напряжения с ЭДС E_6 , заменив его внутренним сопротивлением R_6 .

Составная схема ЭЦ, которая будет получена после исключения источника напряжения с ЭДС E_6 , показана на рис. 4.8. В схеме ЭЦ показаны положительные направления токов, которые указывают действия источника напряжения с ЭДС E_1 , по переносу положительных зарядов от «плюса» к «минусу».

Провести топологический анализ составной схемы замещения. Участок $abcd$ схемы представляет собой трехполюсник в форме «треугольника». Преобразовать «треугольник» в эквивалентную «звезду» (рис. 4.9).

Определить эквивалентные сопротивления «звезды» R_{b1}, R_{c1}, R_{d1} по формулам преобразования «треугольника» в эквивалентную «звезду» (21) (см. п. 3.5.4):

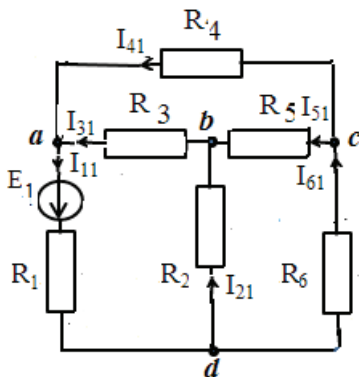


Рис. 4.8. Схема ЭЦ после исключения источника E_6

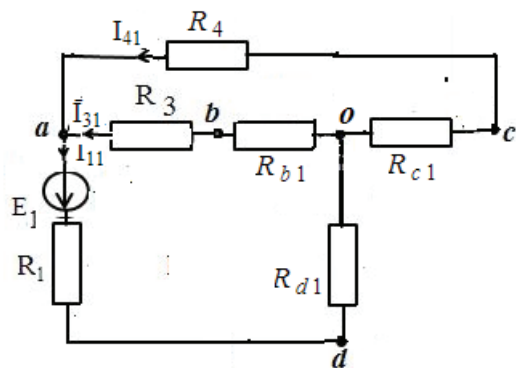


Рис. 4.9. Схема ЭЦ после преобразования «треугольника» $abcd$ в эквивалентную «звезду»

$$R_{b1} := \frac{R_2 \cdot R_5}{R_2 + R_5 + R_6} = 2.586 \Omega$$

$$R_{c1} := \frac{R_5 \cdot R_6}{R_2 + R_5 + R_6} = 0.259 \Omega$$

$$R_{d1} := \frac{R_2 \cdot R_6}{R_2 + R_5 + R_6} = 0.31 \Omega$$

Определить составляющие токов в ветвях I_{11} , I_{31} , I_{41} схемы ЭЦ от действия ЭДС E_1 источника напряжения, пользуясь эквивалентными преобразованиями смешанного соединения резисторов и законом Ома (см. п. 3.5.3).

Определить эквивалентное сопротивление R_{acoabo} ветвей $(R_4 + R_{c1})$ и $(R_3 + R_{b1})$ по формуле

$$R_{\text{acoabo}} := \frac{(R_4 + R_{c1}) \cdot (R_3 + R_{b1})}{R_3 + R_{b1} + R_4 + R_{c1}} = 6.953 \Omega$$

Определить эквивалентное сопротивление R_{abod} ветвей $(R_1 + R_{d1})$ и R_{acoabo} по формуле

$$R_{\text{abod}} := R_{d1} + R_1 + R_{\text{acoabo}} = 7.763 \Omega$$

Составляющая тока I_{11} источника напряжения

$$I_{11} := \frac{E_1}{R_{\text{abod}}} = 2.576 \text{ A}$$

Падение напряжения U_{ado} на участке ado:

$$U_{\text{ado}} := E_1 - I_{11} \cdot (R_1 + R_{d1}) = 17.912 \text{ V}$$

Определить токи I_{31} и I_{41} :

$$I_{31} := \frac{U_{ado}}{R_3 + R_{b1}} = 1.692 \text{ A} \quad I_{41} := \frac{U_{ado}}{R_4 + R_{c1}} = 0.884 \text{ A}$$

Определить падения напряжения на участках ЭЦ U_{ba} и U_{ca} :

$$U_{ba} := I_{31} \cdot R_3 = 13.536 \text{ V} \quad U_{ca} := I_{41} \cdot R_4 = 17.684 \text{ V}$$

Определить падение напряжения U_{cb} между узлами c и b схемы ЭЦ (см. рис. 4.8). Эквивалентные преобразования «треугольника» в «звезду» выполняются при соблюдении условия: *равенство токов*, подходящих к узлам a , b и c , а также *равенство напряжений* между узлами в обеих схемах.

$$U_{cb} := U_{ca} - U_{ba} = 4.147 \text{ V}$$

Для схемы ЭЦ (см. рис. 4.8) определить

$$\text{ток } I_{51} \quad I_{51} := \frac{U_{cb}}{R_5} = 0.829 \text{ A};$$

$$\text{ток } I_{61} \quad I_{61} := I_{41} + I_{51} = 1.714 \text{ A};$$

$$\text{ток } I_{21} \quad I_{21} := I_{11} - I_{61} = 0.863 \text{ A}.$$

Составить уравнения равновесия по первому закону Кирхгофа для узлов a , b , c :

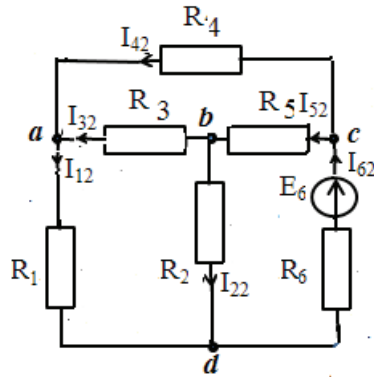
$$\text{узел } a \quad I_{11} - I_{31} - I_{41} = 0 \text{ A};$$

$$\text{узел } b \quad I_{31} - I_{51} - I_{21} = 0 \text{ A};$$

$$\text{узел } c \quad I_{41} + I_{51} - I_{61} = 0 \text{ A}.$$

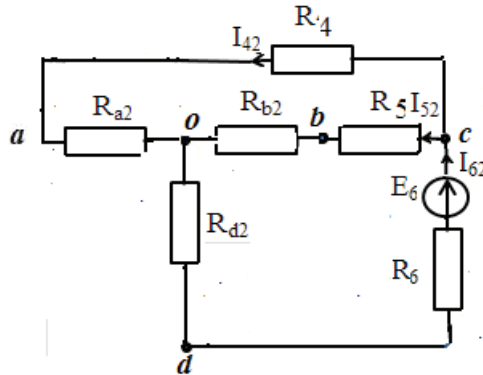
Этап 2. Исключить источник напряжения с ЭДС E_1 , заменив его внутренним сопротивлением, равным R_1 .

Составная схема ЭЦ, которая получена после исключения из исходной цепи источника напряжения с ЭДС E_1 , показана на рис. 4.10.

Рис. 4.10. Схема ЭЦ после исключения источника напряжения с ЭДС E_1

Участок **abda** схемы ЭЦ представляет собой трехполюсник в форме «треугольника».

Преобразуем «треугольник» **abda** в эквивалентную «звезду», как показано на рис. 4.11, используя формулы преобразования (21).

Рис. 4.11. Схема ЭЦ после преобразования «треугольника» **abda** в эквивалентную «звезду»

Определить эквивалентные сопротивления «звезды» R_{a2}, R_{b2}, R_{d2} по формулам преобразования (21).

$$R_{a2} := \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 0.276 \Omega$$

$$R_{b2} := \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 3.31 \Omega$$

$$R_{d2} := \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3} = 0.207 \Omega$$

Определить составляющие токов в ветвях I_{32}, I_{42}, I_{62} схемы ЭЦ от действия источника напряжения с ЭДС E_6 , пользуясь эквивалентными преобразованиями и законом Ома.

Определить эквивалентное сопротивление $R_{\text{саосбо}}$ параллельных ветвей $(R_4 + R_{a1})$ и $(R_5 + R_{b2})$ по формуле

$$R_{\text{саосбо}} := \frac{(R_4 + R_{a2}) \cdot (R_5 + R_{b2})}{R_5 + R_{b2} + R_4 + R_{a2}} = 5.894 \Omega$$

Определить эквивалентное сопротивление R_{codc} ветвей $(R_6 + R_{d2})$ и $R_{\text{саосбо}}$ по формуле

$$R_{\text{codc}} := R_{d2} + R_6 + R_{\text{саосбо}} = 6.701 \Omega$$

Определить составляющую тока I_{62} источника напряжения с ЭДС E_6 :

$$I_{62} := \frac{E_6}{R_{\text{codc}}} = 5.969 \text{ A}$$

Падение напряжения U_{cdo} на участке **cdo**:

$$U_{\text{cdo}} := E_6 - I_{62} \cdot (R_6 + R_{d2}) = 35.184 \text{ V}$$

Определить токи I_{52} и I_{42} :

$$I_{52} := \frac{U_{\text{cdo}}}{R_5 + R_{b2}} = 4.234 \text{ A} \quad I_{42} := \frac{U_{\text{cdo}}}{R_4 + R_{a2}} = 1.735 \text{ A}$$

Определить падения напряжения на участках ЭЦ U_{bc} и U_{ac} :

$$U_{bc} := I_{52} \cdot R_5 = 21.169 \text{ V}; \quad U_{ac} := I_{42} \cdot R_4 = 34.705 \text{ V}.$$

Определить падение напряжения между узлами **a** и **b** исходной схемы ЭЦ (рис. 4.8). Эквивалентные преобразования «треугольника» в «звезду» выполняются при соблюдении условия: равенство токов, подходящих к узлам **a**, **b** и **c**, а также равенство напряжений между узлами в обеих схемах.

$$U_{ab} := U_{ac} - U_{bc} = 13.536 \text{ V}.$$

Определить ток I_{32} в ветви R_3 :

$$I_{32} := \frac{U_{ab}}{R_3} = 1.692 \text{ A}.$$

Определить токи I_{12} и I_{22} :

$$I_{12} := I_{42} + I_{32} = 3.427 \text{ A}.$$

$$I_{22} := I_{52} - I_{32} = 2.542 \text{ A}.$$

Составить уравнения равновесия для узлов **a**, **b**, **c** схемы ЭЦ (рис. 4.11):

$$\text{узел } a \quad I_{12} + I_{32} + I_{42} = 0 \text{ A};$$

$$\text{узел } b \quad -I_{22} - I_{32} + I_{52} = 0 \text{ A};$$

$$\text{узел } c \quad -I_{42} - I_{52} + I_{62} = 0 \text{ A}.$$

Найти токи $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$ в ветвях схемы (см. рис. 4.7), учитывая направления соответствующих составляющих токов в ветвях составных схем, которые получены: после исключения из исходной цепи источника напряжения с ЭДС E_6 (см. рис. 4.8) и после исключения из исходной цепи источника напряжения с ЭДС E_1 (см. рис. 4.10).

$$\underline{I} := \begin{pmatrix} I_{11} + I_{12} \\ -I_{21} + I_{22} \\ I_{31} + I_{32} \\ I_{41} + I_{42} \\ I_{51} + I_{52} \\ I_{61} + I_{62} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.004 \\ 1.679 \\ 3.384 \\ 2.619 \\ 5.063 \\ 7.683 \end{pmatrix} \text{ A}$$

Положительные направления токов на схеме рис. 4.10 выбраны правильно (все токи имеют положительный знак).

Составить баланс мощностей, применив операцию **Скалярное произведение** массивов-векторов E , I и R , I^2 , аналогично анализу ЭЦ методом контурных токов (см. п. 4.3).

После ввода имени переменной BP и оператора присваивания щелкнуть мышью по пиктограмме **Скалярное произведение** на панели **Матрица**. В выражение будет вставлен *оператор скалярного произведения* с двумя пустыми местозаполнителями для ввода имен векторов.

Мощность ЭЦ:

$$BP := E \cdot I = 427.375 \text{ W.}$$

Мощность, которая рассеивается на резисторах ЭЦ:

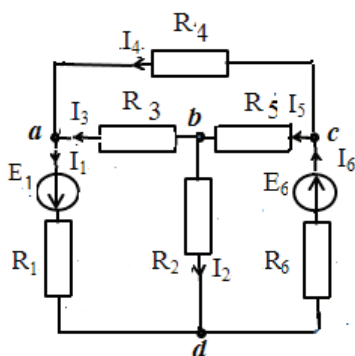
$$BPR := R \cdot I^2 = 427.375 \text{ W.}$$

Баланс мощностей сошелся. Правильность расчета токов в ЭЦ подтверждена.

Пример 4.5. Листинг анализа схемы замещения ЭЦ методом наложения

Анализ разветвленной ЭЦ постоянного тока методом наложения

Дана схема замещения ЭЦ



Параметры ЭЦ имеют следующие значения:

$E_1 = 20$ В; $E_6 = 40$ В; $R_1 = 0,5$ Ом; $R_2 = 6$ Ом; $R_3 = 8$ Ом; $R_4 = 20$ Ом; $R_5 = 5$ Ом; $R_6 = 0,6$ Ом.

Требуется определить токи в ветвях ЭЦ и составить баланс мощностей.

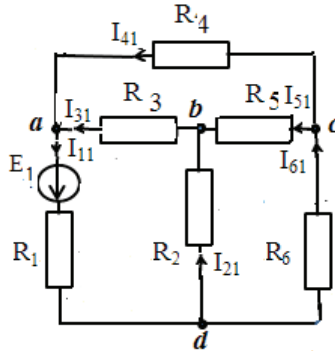
Параметры элементов схемы замещения ЭЦ задать в матричной форме в виде массивов-векторов R и E .

ORIGIN := 1

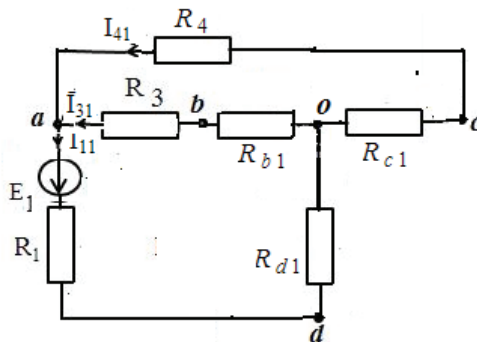
$$R := \begin{pmatrix} 0.5 \\ 6 \\ 8 \\ 20 \\ 5 \\ 0.6 \end{pmatrix} \Omega \quad E := \begin{pmatrix} 20 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 40 \end{pmatrix} \text{V}$$

Продолжение примера 4.5

Этап 1. Исключить источник напряжения с ЭДС E_6 , заменив его внутренним сопротивлением R_6 . Получена составная схема замещения вида



Участок **dbcd** схемы представляет собой «треугольник» в форме «треугольника». Преобразовать «треугольник» в эквивалентную «звезду».



Определить эквивалентные сопротивления «звезды» по формулам преобразования «треугольник»-«звезда».

$$R_{b1} := \frac{R_2 \cdot R_5}{R_2 + R_5 + R_6} = 2.586 \Omega$$

$$R_{c1} := \frac{R_5 \cdot R_6}{R_2 + R_5 + R_6} = 0.259 \Omega$$

$$R_{d1} := \frac{R_2 \cdot R_6}{R_2 + R_5 + R_6} = 0.31 \Omega$$

Продолжение примера 4.5

Определить составляющие токов в ветвях I_{11} , I_{31} и I_{41} схемы ЭЦ от действия ЭДС источника E_1 .

Определить эквивалентное сопротивление $R_{\text{асоабо}}$ ветвей $(R_4 + R_{c1})$ и $(R_3 + R_{b1})$ $(R_4 + R_{c1})$ и $(R_3 + R_{b1})$ 1 по формуле

$$R_{\text{асоабо}} := \frac{(R_4 + R_{c1}) \cdot (R_3 + R_{b1})}{R_3 + R_{b1} + R_4 + R_{c1}} = 6.953 \Omega$$

Определить эквивалентное сопротивление $R_{\text{ао}}$ ветвей $(R_1 + R_{d1})$ и $R_{\text{асоабо}}$ по формуле

$$R_{\text{абод}} := R_{d1} + R_1 + R_{\text{асоабо}} = 7.763 \Omega$$

Составляющая тока I_{11} ЭДС источника напряжения E_1

$$I_{11} := \frac{E_1}{R_{\text{абод}}} = 2.576 \text{ A}$$

Падение напряжения $U_{\text{адо}}$ на участке ado :

$$U_{\text{адо}} := E_1 - I_{11} \cdot (R_1 + R_{d1}) = 17.912 \text{ V}$$

Определить токи I_{31} и I_{41} :

$$I_{31} := \frac{U_{\text{адо}}}{R_3 + R_{b1}} = 1.692 \text{ A} \quad I_{41} := \frac{U_{\text{адо}}}{R_4 + R_{c1}} = 0.884 \text{ A}$$

Определить падения напряжения на участках ЭЦ $U_{\text{ба}}$ и $U_{\text{са}}$:

$$U_{\text{ба}} := I_{31} \cdot R_3 = 13.536 \text{ V} \quad U_{\text{са}} := I_{41} \cdot R_4 = 17.684 \text{ V}$$

$$U_{\text{сб}} := U_{\text{са}} - U_{\text{ба}} = 4.147 \text{ V}$$

Для схемы ЭЦ с удаленным источником напряжения E_6 определить токи:

$$I_{51} := \frac{U_{\text{сб}}}{R_5} = 0.829 \text{ A} \quad I_{21} := I_{11} - I_{61} = 0.863 \text{ A} \quad I_{61} := I_{41} + I_{51} = 1.714 \text{ A}$$

Составить уравнения равновесия для узлов **a**, **b**, **c**:

$$\text{Узел a} \quad I_{11} - I_{31} - I_{41} = 0 \text{ A}$$

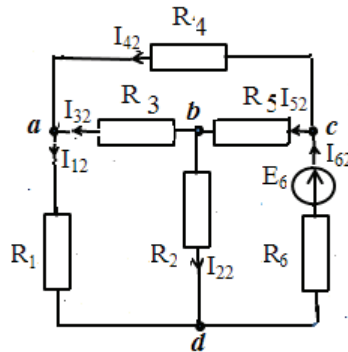
$$\text{Узел b} \quad I_{31} - I_{51} - I_{21} = 0 \text{ A}$$

$$\text{Узел c} \quad I_{41} + I_{51} - I_{61} = 0 \text{ A}$$

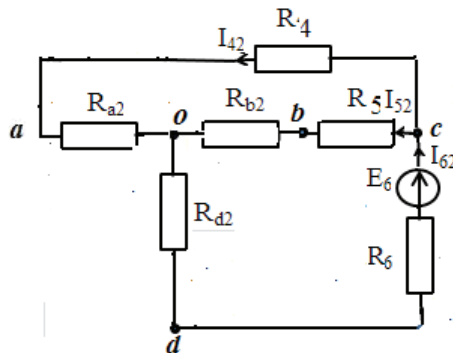
Продолжение примера 4.5

Этап 2. Исключить источник напряжения с ЭДС E_1 , заменив его внутренним сопротивлением R_1

Получена составная схема замещения вида



Участок **abda** схемы представляет собой трехполюсник в форме «треугольника». Преобразовать «треугольник» в эквивалентную «звезду»



Определить эквивалентные сопротивления «звезды» R_{a2} , R_{b2} , R_{d2} по формулам преобразования

$$R_{a2} := \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 0.276 \Omega$$

$$R_{b2} := \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 3.31 \Omega$$

$$R_{d2} := \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3} = 0.207 \Omega$$

Продолжение примера 4.5

Определить составляющие токов в ветвях I_{32} , I_{42} и I_{62} схемы ЭЦ от действия ЭДС источника напряжения E_6 .

Определить эквивалентное сопротивление R_{caocbo} параллельных ветвей $(R_4 + R_{a2})$ и $(R_5 + R_{b2})$ по формуле

$$R_{\text{caocbo}} := \frac{(R_4 + R_{a2}) \cdot (R_5 + R_{b2})}{R_5 + R_{b2} + R_4 + R_{a2}} = 5.894 \Omega$$

Определить эквивалентное сопротивление R_{codc} ветвей $(R_6 + R_{d2})$ и R_{caocbo} по формуле

$$R_{\text{codc}} := R_{d2} + R_6 + R_{\text{caocbo}} = 6.701 \Omega$$

Определить составляющую тока I_{62} источника напряжения E_6

$$I_{62} := \frac{E_6}{R_{\text{codc}}} = 5.969 \text{ A}$$

Падение напряжения U_{cdo} на участке cdo :

$$U_{\text{cdo}} := E_6 - I_{62} \cdot (R_6 + R_{d2}) = 35.184 \text{ V}$$

Определить токи I_{52} и I_{42} :

$$I_{52} := \frac{U_{\text{cdo}}}{R_5 + R_{b2}} = 4.234 \text{ A} \quad I_{42} := \frac{U_{\text{cdo}}}{R_4 + R_{a2}} = 1.735 \text{ A}$$

Определить падения напряжения на участках ЭЦ U_{bc} и U_{ac} :

$$U_{bc} := I_{52} \cdot R_5 = 21.169 \text{ V} \quad U_{ac} := I_{42} \cdot R_4 = 34.705 \text{ V}$$

$$U_{ab} := U_{ac} - U_{bc} = 13.536 \text{ V}$$

Окончание примера 4.5

Определить падение напряжения между узлами a и b исходной схемы ЭЦ
 Определить ток I_{32} в ветви R_3 :

$$I_{32} := \frac{U_{ab}}{R_3} = 1.692 \text{ A}$$

Определить токи I_{12} и I_{22} :

$$I_{12} := I_{42} + I_{32} = 3.427 \text{ A}$$

$$I_{22} := I_{52} - I_{32} = 2.542 \text{ A}$$

Найти токи I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 и I_6 в ветвях схемы (рис. 54), учитывая направления соответствующих составляющих токов в ветвях составных схем.

$$I := \begin{pmatrix} I_{11} + I_{12} \\ -I_{21} + I_{22} \\ I_{31} + I_{32} \\ I_{41} + I_{42} \\ I_{51} + I_{52} \\ I_{61} + I_{62} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.004 \\ 1.679 \\ 3.384 \\ 2.619 \\ 5.063 \\ 7.683 \end{pmatrix} \text{ A}$$

Составить баланс мощностей, применив операцию **Скалярное произведение** массивов-векторов E, I и R, I^2 :

Мощность ЭЦ:

$$BP := E \cdot I = 427.375 \text{ W}$$

Мощность, которая рассеивается на резисторах ЭЦ

$$\underline{BPR} := R \cdot I^2 = 427.375 \text{ W}$$

Баланс мощностей сошелся.

4.5.3. Проверка результатов анализа ЭЦ методом наложения в среде программы Multisim

Схема модели разветвленной ЭЦ постоянного тока, содержащей два источника напряжения, в среде программы Multisim, приведена на рис. 4.12.

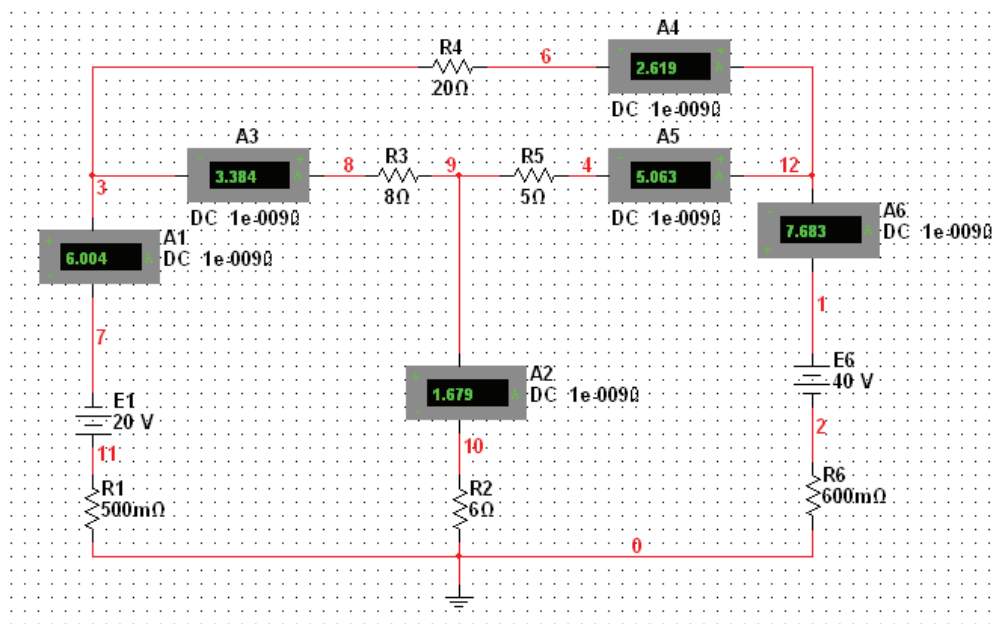


Рис. 4.12. Схема модели проверки анализа исходной ЭЦ методом наложения

Схема модели в среде программы Multisim составной ЭЦ (см. рис. 4.8) постоянного тока, которая получена после исключения из исходной цепи источника напряжения с ЭДС E_6 , приведена на рис. 4.13, а составной ЭЦ (см. рис. 4.10) после исключения источника напряжения с ЭДС E_1 — на рис. 4.14.

Сравнительный анализ результатов расчета и моделирования позволяет убедиться в достоверности как результатов анализа ЭЦ методом наложения, так и процесса моделирования по составленной схеме модели исходной ЭЦ, а также анализа составных ЭЦ.

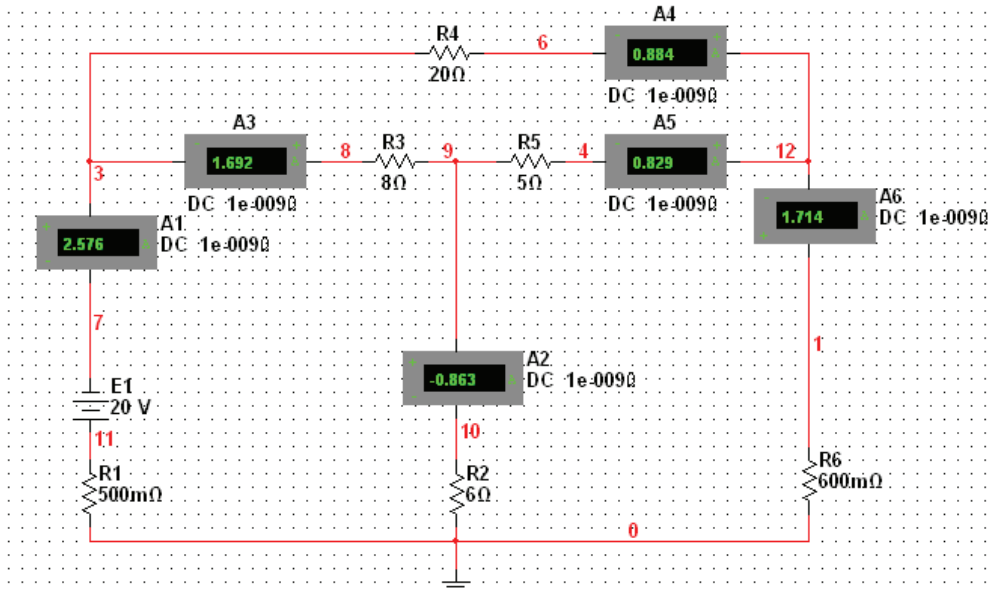


Рис. 4.13. Схема модели анализа ЭЦ с действующим источником E_1 методом наложения

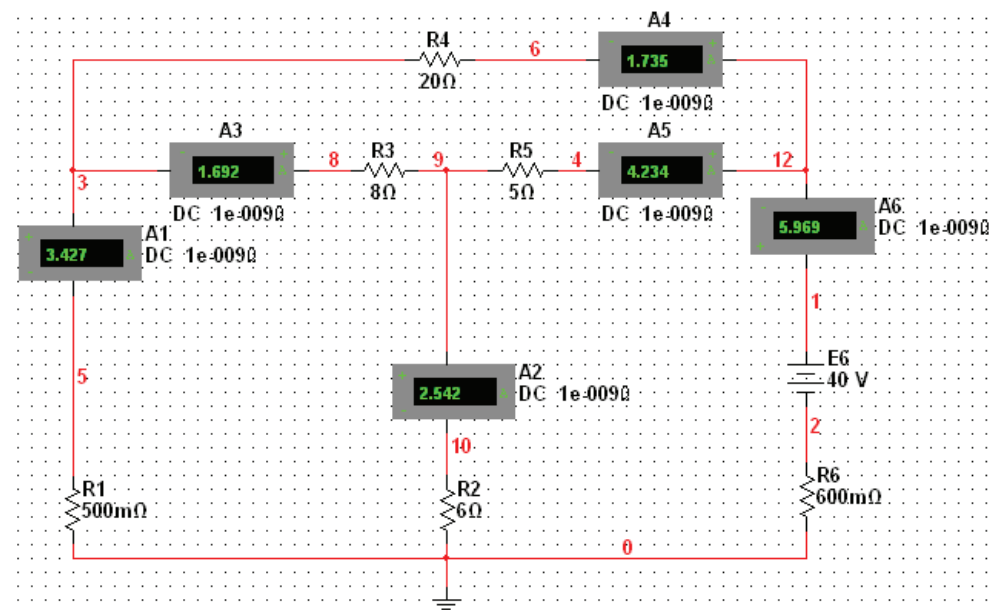


Рис. 4.14. Схема модели анализа ЭЦ с действующим источником E_6 методом наложения

4.6. Анализ электрической цепи методом эквивалентного генератора

Метод *эквивалентного генератора* (метод ЭГ) используется для определения токов в ветвях пассивной разветвленной ЭЦ. Метод основан на теореме об *активном эквивалентном двухполюснике* (см. п. 3.2.3) [1, с. 62; 5, с. 56].

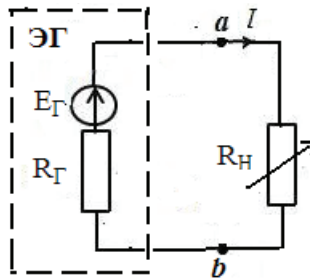


Рис. 4.15. Анализ ЭЦ, основанный на теореме об активном эквивалентном двухполюснике

В любой схеме ЭЦ можно выделить какую-то одну ветвь, а остальную часть схемы независимо от ее структуры и сложности условно изобразить некоторым прямоугольником (рис. 4.15). По отношению к выделенной ветви вся схема, обозначенная пунктирным прямоугольником, представляет собой *двухполюсник*. Двухполюсник двумя выходными зажимами (полюсами) *ab* присоединяется к выделенной ветви R_H .

По отношению к выделенной ветви двухполюсник при анализе ЭЦ можно заменить схемой замещения — *эквивалентным генератором* (ЭГ) (рис. 4.15), которая включает источник напряжения с ЭДС E_G и внутренним сопротивлением R_G . ЭДС источника напряжения E_G принимается равной напряжению между полюсами *a* и *b* при разомкнутой выделенной ветви *ab* (напряжению «холостого хода» U_{abxx}). Входное сопротивление двухполюсника R_G принимается равным сопротивлению пассивной части ЭЦ по отношению к полюсам *ab*. Из этого следует, что по отношению к выделенной ветви всю остальную часть ЭЦ можно рассматривать как источник электрической энергии с ЭДС E_G , равной напряжению в точках *ab* подключения, и вну-

тренним сопротивлением R_{Γ} , равным эквивалентному сопротивлению ЭЦ относительно точек подключения.

В задаче анализа ЭЦ методом *эквивалентного генератора* необходимо рассчитать ток в выделенной пассивной ветви R_{H} ЭЦ постоянного тока. В теории цепей доказывается, что ток I в любой ветви сколь угодно сложной цепи можно найти, разделив напряжение U_{abxx} , которое будет в точках **ab** подключения выделенной ветви R_{H} в разомкнутом состоянии, на сумму сопротивления выделенной ветви R_{H} и эквивалентного сопротивления R_{Γ} , равного R_{ab} всей ЭЦ относительно точек **ab**, по формуле

$$I = \frac{U_{abxx}}{R_{\text{H}} + R_{\Gamma}}, \quad (43)$$

где сопротивление R_{H} может принимать любые значения, а параметры эквивалентного генератора (U_{abxx} и R_{Γ}), замещающего внешнюю ЭЦ, остаются неизменными.

4.6.1. Алгоритм метода эквивалентного генератора

Алгоритм метода эквивалентного генератора включает следующие действия:

1. Определение напряжения холостого хода на зажимах **ab** разомкнутой ветви (разомкнутого двухполюсника) U_{abxx} , численно равного E_{Γ} , используя любой расчетный метод (см. пп. 4.1–4.5).

2. Исключение из схемы замещения ЭГ всех источников энергии: источники напряжения следует считать закороченными, но остаются их внутренние сопротивления; источники тока следует считать разомкнутыми (внутреннее сопротивление источника тока равно бесконечности).

3. Определение входного сопротивления пассивного двухполюсника по отношению к зажимам **ab** R_{ab} , численно равного R_{Γ} , на основе объединения последовательно и параллельно соединенных резистивных сопротивлений.

4. Замену двухполюсника эквивалентным генератором и вычисление тока в сопротивлении нагрузки R_{H} (выделенной ветви в одноконтурной цепи) по формуле (43) (см. рис. 4.15).

4.6.2. Анализ ЭЦ методом эквивалентного генератора

Пусть задана мостовая схема ЭЦ, представленная на рис. 4.16, *a*. Требуется определить ток в резисторе R_5 , который включен в диагонали ab «неуравновешенного моста».

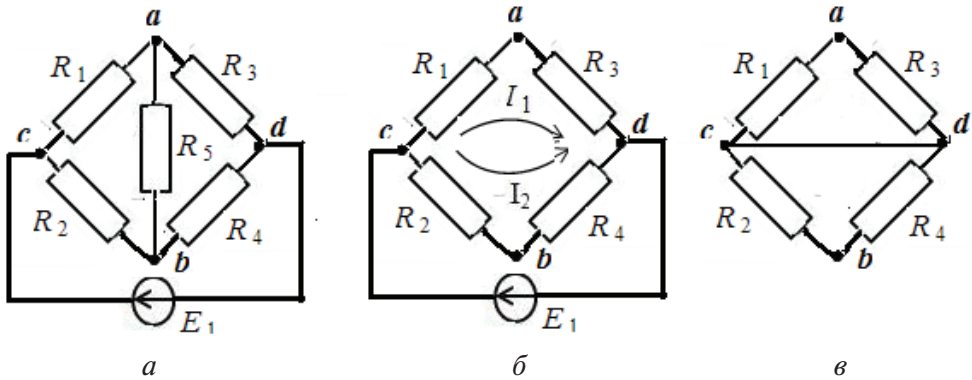


Рис. 4.16. Преобразование ЭЦ мостовой схемы методом эквивалентного генератора

Мысленно заключим всю схему, содержащую ЭДС E_1 , и резисторы в двухполюсник, выделив из нее одну ветвь R_5 между полюсами ab .

Разомкнем ветвь R_5 , как показано на рис. 4.16, *б*, и определим напряжение холостого хода U_{abxx} в точках его подключения. Для этого составим уравнение Кирхгофа для контура $abda$:

$$U_{abxx} + I_1 R_3 - I_2 R_4 = 0$$

Токи в параллельных ветвях cad и cbd независимы:

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1 + R_3}; \quad I_2 = \frac{E_1}{R_2 + R_4}.$$

Определим выражение для входного сопротивления эквивалентного генератора по отношению к зажимам при закороченном источнике ЭДС (рис. 4.16, *в*). Резисторы R_1, R_3 , и R_2, R_4 образуют две пары параллельных сопротивлений, включенных последовательно между точками ab :

$$R_{\text{вх}} = R_{ab} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4}.$$

Заменим внешнюю по отношению к резистору R_H ЭЦ эквивалентным генератором с параметрами $E_{\Gamma} = U_{abxx}$ и $R_{\Gamma} = R_{ab}$. Определим искомый ток в диагонали моста (43).

4.6.3. Анализ ЭЦ методом эквивалентного генератора в среде Mathcad

Исходные данные: $E = 20$ В; $R_1 = R_4 = 2$ Ом; $R_2 = 8$ Ом; $R_3 = 4$ Ом; $R_5 = 4$ Ом.

Требуется: рассчитать ток в выделенной ветви R_5 ЭЦ в среде программы Mathcad [4, с. 65]. Листинг программы анализа ЭЦ приведен в примере 4.6.

$$\begin{array}{l} \text{ORIGIN} := 1 \\ \mathbf{R} := \begin{pmatrix} 2 \\ 8 \\ 4 \\ 2 \\ 4 \end{pmatrix} \Omega \quad E := 20V \end{array}$$

Открыть новый документ в Mathcad и сохранить его в файле **Упр_4_6_NNN**.

Параметры резисторов (сопротивления $[R] = (R_1, R_2, R_3, R_4, R_5)$ схемы замещения ЭЦ задать в матричной форме в виде массива-вектора $[R]$.

Значения компонентов вектора будут соответствовать значениям сопротивлений резисторов в ветвях ЭЦ мостовой схемы.

Этап 1. Определить напряжение холостого хода между клеммами **a** и **b**.

Преобразовать исходную схему ЭЦ: отключить резистор R_5 , разомкнув схему между клеммами **a** и **b**. Определить токи I_1 и I_2 в ветвях **cad** и **cbd**:

$$I_1 := \frac{E}{R_1 + R_3} = 3.333A ; \quad I_2 := \frac{E}{R_2 + R_4} = 2A.$$

Уравнение Кирхгофа для контура **abca** преобразовать к виду

$$U_{abxx} = I_2 R_2 - I_1 R_1.$$

Подставить значения токов I_1 и I_2 в уравнение Кирхгофа для контура **abca**.

$$U_{abxx} := I_2 \cdot R_2 - I_1 \cdot R_1 = 9.333V.$$

Этап 2. Определить входное сопротивление эквивалентного генератора R_{BX} по отношению к зажимам ab при замкнутом источнике ЭДС E .

$$R_{\text{BX}} := \left(\frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 \cdot R_4}{R_2 + R_4} \right) = 2.933 \Omega.$$

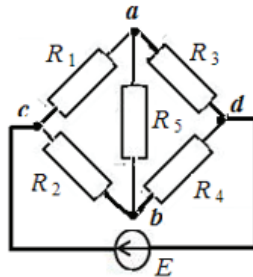
Заменить внешнюю по отношению к резистору R_5 схему ЭЦ эквивалентным генератором и вычислить ток I в выделенной ветви (сопротивлении R_5).

$$I := \frac{U_{ab\text{XX}}}{R_5 + R_{\text{BX}}} = 1.346 \text{ A}.$$

Пример 4.6. Листинг анализа схемы замещения ЭЦ методом эквивалентного генератора

Анализ ЭЦ методом эквивалентного генератора

Дана схема замещения мостовой ЭЦ постоянного тока



Параметры ЭЦ имеют следующие значения:

$E = 20 \text{ В}$, $R_1 = 2 \text{ Ом}$, $R_2 = 8 \text{ Ом}$, $R_3 = 4 \text{ Ом}$, $R_4 = 2 \text{ Ом}$, $R_5 = 4 \text{ Ом}$.

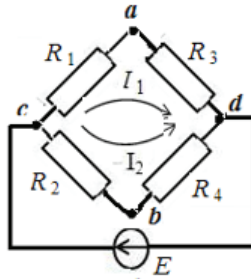
Требуется определить ток в резисторе R_5 , который включен в диагонали ab «неуравновешенного моста».

Параметры резисторов $R = (R_1, R_2, R_3, R_4, R_5)$ схемы замещения ЭЦ задать в матричной форме в виде массива-вектора.

$$\begin{aligned} & \text{ORIGIN} := 1 \\ & R := \begin{pmatrix} 2 \\ 8 \\ 4 \\ 2 \\ 4 \end{pmatrix} \Omega \quad E := 20\text{V} \end{aligned}$$

Окончание примера 4.6

Этап 1. Отключить резистор R_5 , разомкнув ветвь между полюсами **ab** в исходной схеме замещения ЭЦ.



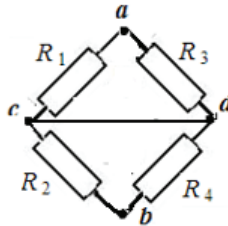
Определить токи I_1 и I_2 в ветвях **cad** и **cbd**:

$$I_1 := \frac{E}{R_1 + R_3} = 3.333 \text{ A} \quad I_2 := \frac{E}{R_2 + R_4} = 2 \text{ A}$$

Определить напряжение холостого хода $U_{ab\text{xx}}$.

$$U_{ab\text{xx}} := I_2 \cdot R_2 - I_1 \cdot R_1 = 9.333 \text{ V}$$

Этап 2. Закоротить источник ЭДС, соединив накоротко точки **c** и **d** на схеме замещения ЭЦ.



Определить входное сопротивление всей схемы по отношению к зажимам **a** и **b** при закороченном источнике ЭДС.

$$R_{a0} := \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 \cdot R_4}{R_2 + R_4} = 2.933 \Omega$$

Определить ток в ветви R_5 , включенной в диагональ моста между клеммами **a** и **b**

$$I := \frac{U_{ab\text{xx}}}{R_{a0} + R_5} = 1.346 \text{ A}$$

4.6.4. Проверка результатов анализа ЭЦ методом эквивалентного генератора в среде Multisim

Схема модели мостовой схемы ЭЦ постоянного тока (рис. 4.16, а), содержащей источник напряжения, в среде программы MS14 приведена на рис. 4.17. Для измерения значения неизвестного тока в диагонали *ab* «неуравновешенного моста» включен измерительный индикатор **Ammeter**. Значение тока $I = 1,346$ А в диагонали между клеммами *ab* до третьего знака совпадает со значением тока, который был определен расчетным путем в среде программы Mathcad (п. 4.6.2).

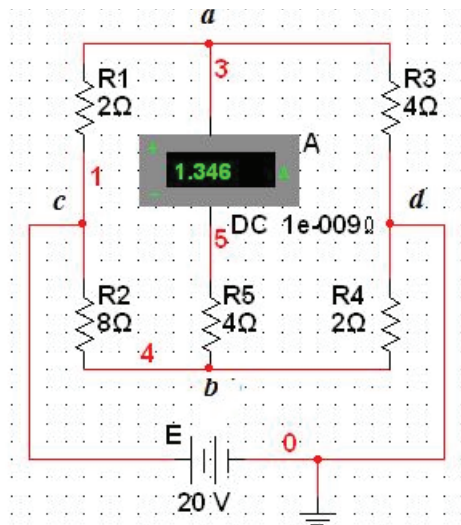


Рис. 4.17. Схема модели мостовой схемы ЭЦ постоянного тока

4.6.5. Моделирование определения напряжения холостого хода

Схема модели мостовой схемы ЭЦ постоянного тока (см. рис. 4.16, б) для определения напряжения холостого хода $U_{abxx} = E_{\Gamma}$ эквивалентного генератора по отношению к зажимам *ab* разомкнутой ветви приведена на рис. 4.18. Измерение значения напряжения холостого хода $U_{abxx} = E_{\Gamma}$ эквивалентного генератора между клеммами *ab* производится с помощью включенного в цепь индикатора **Voltmeter**. Значение напряжения $U_{abxx} = 9,333$ В в диагонали *ab* до третьего знака совпадает со значением U_{abxx} , найденным расчетным путем в среде программы Mathcad (п. 4.6.2).

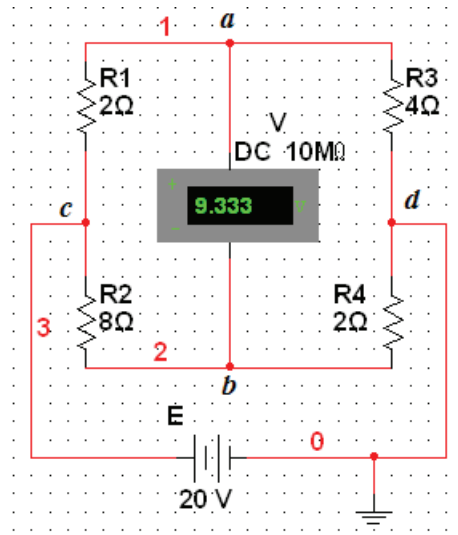


Рис. 4.18. Схема модели для определения напряжения холостого хода ЭГ

4.6.6. Моделирование определения входного сопротивления схемы при закороченном источнике ЭДС

Схема модели мостовой схемы ЭЦ постоянного тока (см. рис. 4.16, б) для определения $R_{\text{вх}}$ ЭГ по отношению к зажимам ab при закороченном источнике ЭДС E приведена на рис. 4.19.

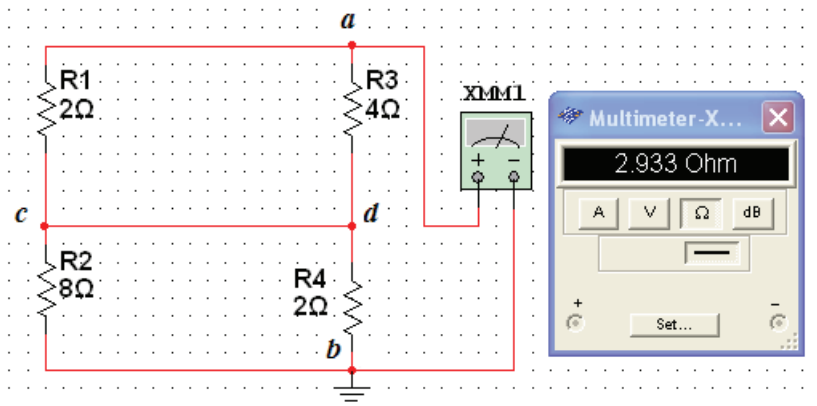


Рис. 4.19. Схема модели для определения входного сопротивления ЭГ

Для измерения значения $R_{\text{вх}}$ ЭГ между зажимами **ab** включен прибор **Multimeter** (Мультиметр) в режиме Омметра. Значение сопротивления $R_{\text{вх}} = R_{ab} = 2,933 \text{ Ohm}$ в диагонали **ab** до третьего знака совпадает со значением $R_{\text{вх}}$, найденным расчетным путем в среде Mathcad (п. 4.6.2).

4.6.7. Моделирование экспериментального определения входного сопротивления эквивалентного генератора в среде Multisim

Если сопротивление выделенной ветви между зажимами **ab** *закоротить* (сделать равным нулю), то для нее будет иметь место *режим короткого замыкания*, а протекающий по ней ток будет *током короткого замыкания* ($I_{\text{к.з.}}$).

Из формулы (43) при $R_{\text{н}} = 0$ получим

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{U_{ab\text{xx}}}{R_{\text{вх}}}$$

ИЛИ

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{ab\text{xx}}}{I_{\text{к.з.}}} \quad (44)$$

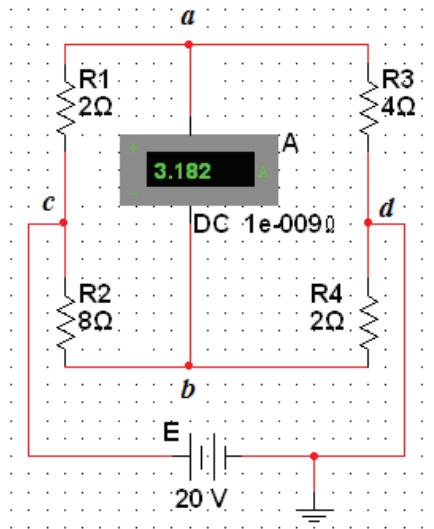


Рис. 4.20. Схема модели для определения тока короткого замыкания ЭГ

Из формулы (44) следует метод экспериментального определения *входного сопротивления эквивалентного генератора* («метод холостого хода и короткого замыкания»). Для этого необходимо измерить напряжение холостого хода ***ab*** на зажимах разомкнутой ветви и ток короткого замыкания (при $R_n = 0$), как показано на схеме модели на рис. 4.20.

Значение сопротивления $R_{вх}$, вычисленное по формуле (44), нужно подставить в формулу (43). Получим значение тока в выделенной ветви $I = 1,346$ А, которое совпадает со значением тока, найденным расчетным путем в среде Mathcad.

Тесты по теме

Элементы и параметры

линейных электрических цепей

1. Выбрать из списка определение понятия «Линейная электрическая цепь»:
 - 1) Расчетный эквивалент, который заменяет электромагнитное устройство с происходящими в нем и в окружающем его пространстве физическими процессами.
 - 2) Совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе, электрическом токе и электрическом напряжении.
 - 3) Описание электромагнитных процессов в устройствах с помощью понятий «ток», «напряжение», «ЭДС», «сопротивление» («проводимость»), «индуктивность», «емкость».
 - 4) Упорядоченное движение носителей электрических зарядов в проводниках электромагнитного устройства, которое вызывается электрическим полем, созданным в них источниками электрической энергии.
 - 5) Графическое изображение, которое заменяет совокупность соединенных друг с другом источников электрической энергии и нагрузок, по которым может протекать электрический ток, с помощью условных знаков.
 - 6) Совокупность соединенных друг с другом источников электрической энергии и нагрузок, по которым может протекать электрический ток.
2. Выбрать из списка определение понятия «Схема электрической цепи»:
 - 1) Графическое изображение, которое заменяет совокупность соединенных друг с другом источников электриче-

- ской энергии и нагрузок, по которым может протекать электрический ток, с помощью условных знаков.
- 2) Графическое изображение всех электрических элементов и устройств, необходимых для осуществления и контроля заданных электромагнитных процессов, всех электрических связей между ними, разъемов, переключателей и т. п.
 - 3) Графическое изображение расположения всех элементов и устройств (с их внешними очертаниями), соответствующих действительному их размещению в электромагнитном устройстве.
 - 4) Это схема замещения, в которой реальные элементы заменены расчетными моделями и исключены все вспомогательные элементы, не влияющие на результаты расчета.
 - 5) Графическое изображение, содержащее условные обозначения элементов цепи и показывающее соединение этих элементов.
3. Сущность понятия «Элементы схемы замещения электрической цепи». Выбрать из списка правильные ответы.
- 1) Элементы, генерирующие электрическую энергию.
 - 2) Резистивные регуляторы тока.
 - 3) Элементы, преобразующие электромагнитную энергию в другие формы энергии.
 - 4) Заземление (предназначено для обеспечения исходной точки (нулевого напряжения).
 - 5) Элементы, запасаящие и отдающие энергию.
 - 6) Измерительные приборы.
 - 7) Выключатели.
4. Выбрать из списка определение понятия «Электрический ток проводимости».
- 1) Это неизменное и однонаправленное движение заряженных частиц (зарядов). $I = q/t$, где q — весь заряд в кулонах (Кл) за время t (с).
 - 2)
$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[q]}{[t]} = \frac{dq}{dt}.$$
 - 3) Это направленное движение свободных носителей электрического заряда q в веществе или пустоте.

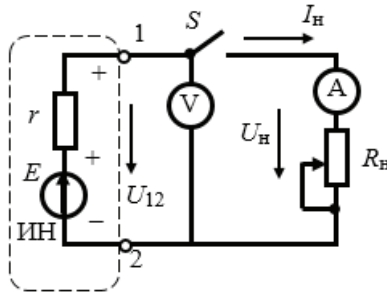
- 4) Определяется направлением движения потока электронов во внешней от источника цепи.
- 5) $[I] = [q] / [t] = \text{Кл/с}$.
- 6) В замкнутом проводящем контуре электроны перемещаются от отрицательного зажима источника к положительному, нейтрализуя недостаток электронов на зажиме «+».
5. Выбрать из списка определение понятия «Постоянный электрический ток».
- 1) Это направленное движение свободных носителей электрического заряда q в веществе или пустоте.
- 2) $i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[q]}{[t]} = \frac{dq}{dt}$.
- 3) Это неизменное и однонаправленное движение заряженных частиц (зарядов). $I = q/t$, где q — весь заряд в кулонах (Кл) за время t (с).
- 4) В замкнутом проводящем контуре электроны перемещаются от отрицательного зажима источника к положительному, нейтрализуя недостаток электронов на зажиме «+».
- 5) $[I] = [q] / [t] = \text{Кл/с}$.
6. Выбрать из списка определение понятия «Потенциал точки a электрической цепи».
- 1) Работа, которую нужно выполнить, чтобы перенести заряд (1 Кл) из данной точки a в точку, где нет электрического поля (∞) $(\int_a^{\infty} \mathbf{E} dl)$.
- 2) Подразумевают разность потенциалов между одной точкой и другой (обычно заземленной), потенциал которой принимают равным нулю.
- 3) Работа, затрачиваемая для переноса заряда (1 Кл) из данной точки a в точку b поля с напряженностью \mathbf{E} по произвольному пути ab $(\int_a^b \mathbf{E} dl)$.
7. Выбрать из списка определение понятия «Электрическое напряжение».
- 1) Подразумевают разность потенциалов между одной точкой и другой (обычно заземленной), потенциал которой принимают равным нулю.

- 2) Работа, затрачиваемая, чтобы перенести заряд (1 Кл) из данной точки a в точку b поля с напряженностью \mathbf{E} по произвольному пути ab ($\int_a^b \mathbf{E}dl$).
- 3) Работа, которую нужно выполнить, чтобы перенести заряд (1 Кл) из данной точки a в точку, где нет электрического поля (∞) ($\int_a^\infty \mathbf{E}dl$).
- 4) $[U] = [V] / [M] = V$.
8. Выбрать определение понятия «Электродвижущая сила (ЭДС \mathcal{E})».
- 1) $\mathcal{E} = [W] / [q] = \text{Дж/Кл} = \text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с} / (\text{А} \cdot \text{с}) = \text{В}$.
- 2) Численно равна работе (энергии) W , затрачиваемой полем на перемещение единицы заряда (1 Кл) из одной точки поля в другую (W / q).
- 3) Работа сторонних сил, которая затрачивается на перемещения единичного положительного заряда внутри источника от зажима с меньшим потенциалом к зажиму с большим потенциалом.
- 4) Работа, затрачиваемая, чтобы перенести заряд (1 Кл) из данной точки a в точку b поля с напряженностью \mathbf{E} по произвольному пути ab ($\int_a^b \mathbf{E}dl$).
9. Выбрать определение понятия «Напряженность электрического поля».
- 1) Численно равна отношению силы, действующей на заряженную частицу, к значению ее заряда.
- 2) $[H] / [Kl] = (\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с} / \text{м}) / (\text{А} \cdot \text{с}) = \text{В} / \text{м}$ (вольт на метр).
- 3) Работа, затрачиваемая, чтобы перенести заряд (1 Кл) из данной точки a в точку b поля с напряженностью \mathbf{E} по произвольному пути ab ($\int_a^b \mathbf{E}dl$).
- 4) Способность стороннего поля и индуцированного электрического поля вызывать электрический ток.

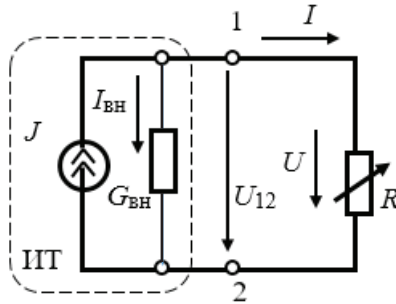
10. Выбрать определение понятия «Электрическая энергия источника».
- 1) Работа, совершаемая при перемещении заряда между полюсами источника электрической энергии.
 - 2) Работа, совершаемая при перемещении всех зарядов, проходящих через источник электрической энергии (энергия движущихся носителей электрических зарядов).
 - 3) Участок ЭЦ, на котором действует ЭДС, является источником электрической энергии.
 - 4) Энергия, преобразуемая в ЭЦ в единицу времени. Единицей измерения является джоуль (Дж).
 - 5) Источники электрической энергии — активные элементы ЭЦ, преобразующие различные виды энергии в электрическую: аккумуляторные и солнечные батареи, генераторы электрических станций, термопары и др.
11. Выбрать определение понятия «Мощность электрической цепи».
- 1) Интенсивность преобразования электрической энергии в ЭЦ.
 - 2) Энергия, преобразуемая в ЭЦ источника или приемника (нагрузки) в единицу времени. Единицей измерения является ватт (Вт).
 - 3) Мощность, преобразуемая в нагрузке всегда положительна.
 - 4) Мощность, развиваемая источником с ЭДС, зависит от взаимной направленности ЭДС и тока, протекающего через источник.
 - 5) Для ЭЦ постоянного тока мощность, развиваемая источником, равна $P_{\text{и}} = EI$, а мощность, рассеиваемая в нагрузке, равна $P_{\text{н}} = UI$.
12. Выбрать определение понятия «Баланс мощности ЭЦ».
- 1) Мощность, развиваемая в источнике электрической энергии, должна быть равна сумме мощностей, преобразуемой в другие виды энергии в нагрузке и потерь энергии внутри источника.
 - 2) Источник может работать как в режиме генерирования электрической энергии, так и в режиме рассеяния (быть нагрузкой для внешней ЭЦ).

- 3) Если источник является «нагрузкой», то его мощность включается в баланс с отрицательным знаком.
 - 4) При составлении баланса учитывают, что направление тока в источнике, полученное в результате расчета ЭЦ, может не совпадать с направлением действия ЭДС.
 - 5) Мощность, развиваемая источником электрической энергии в ЭЦ, в балансе мощности учитывает потери мощности (тепловые) в источнике.
13. Выбрать определение понятия «Вольтамперная характеристика элемента электрической цепи».
- 1) Зависимость напряжения от тока на этом элементе.
 - 2) График зависимости тока от напряжения на резисторе в виде прямой линии.
 - 3) Характеристики, которые используются для описания свойств активных и резистивных элементов электрической цепи в виде зависимости тока через них от напряжения (по оси абсцисс откладывают напряжение, а по оси ординат — ток).
 - 4) График зависимости тока от напряжения на резисторе, которая не является прямой линией.
 - 5) График зависимости накопленного заряда на одном из электродов линейного конденсатора от приложенного к зажимам напряжения.
 - 6) Характеристика, которая выражается законом Ома.
14. Выбрать из списка вопросы по источнику напряжения (ИН), на которые можно дать утвердительный ответ.
- 1) Это источник электрической энергии, который характеризуется электродвижущей силой и внутренним электрическим сопротивлением.
 - 2) ИН представляется на схеме замещения в виде двух элементов: идеального источника напряжения с ЭДС E , внутреннее сопротивление которого равно нулю, и последовательно соединенного с ним резистора, сопротивление которого $R_{\text{вн}}$.
 - 3) Электродвижущая сила E численно всегда равна разности потенциалов между положительным и отрицательным выводами ИН.

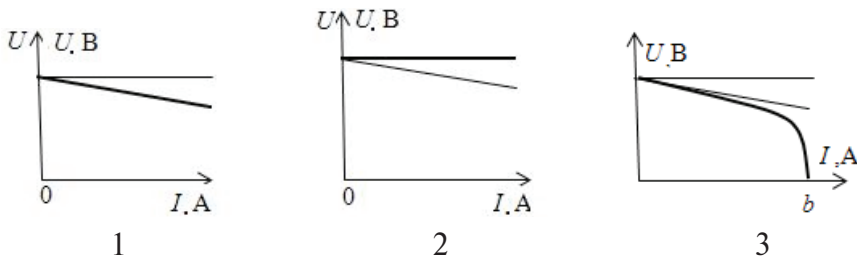
- 4) В реальном ИН ($E = \text{const}$, $R_{\text{вн}} = \text{const}$) внешняя характеристика источника $U_{12} = f(I_{\text{н}})$ будет линейной при любом значении тока I .
- 5) Внешняя характеристика $U_{12} = f(I_{\text{н}})$ идеального источника напряжения представляет собой прямую линию $U_{12} = f(I_{\text{н}})$, параллельную оси абсцисс.
15. На схеме замещения электрической цепи, которая приведена ниже, источник напряжения представлен в виде двух элементов: идеального источника напряжения с ЭДС E , внутреннее сопротивление которого равно нулю, и последовательно соединенного с ним резистора r . При разомкнутом ключе S показание вольтметра V равно 1 В. При замкнутом ключе S показание амперметра A равно 1 А. Сопротивление приемника $R_{\text{н}} = 2$ Ом. Определить параметры электрической цепи: ЭДС E , r , напряжение холостого хода $U_{\text{хх}}$ и напряжение $U_{\text{н}}$ на зажимах приемника (выбрать правильный ответ в списке).



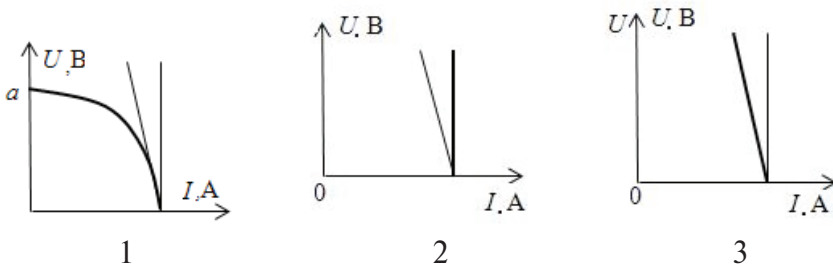
- 1) $E = 2,1$ В, $U_{\text{хх}} = 2,1$ В, $r = 0,1$ Ом, $U_{\text{н}} = 2$ В.
- 2) $E = 2,1$ В, $U_{\text{хх}} = 2,0$ В, $r = 0,1$ Ом, $U_{\text{н}} = 2$ В.
- 3) $E = 2,2$ В, $U_{\text{хх}} = 2,1$ В, $r = 0,2$ Ом, $U_{\text{н}} = 2$ В.
- 4) $E = 2,0$ В, $U_{\text{хх}} = 2,1$ В, $r = 0$ Ом, $U_{\text{н}} = 2$ В.
16. Выбрать из списка вопросы по источнику тока (ИТ), на которые можно дать утвердительный ответ.
- 1) Представляется на схеме замещения в виде двух элементов: идеального источника тока с заданным током $J = E_{\text{вн}} / R_{\text{вн}}$; параллельно с ним соединенного элемента с проводимостью $G_{\text{вн}}$, равной $1 / R_{\text{вн}}$ и элемента (резистора приемника R) с проводимостью $G = 1 / R$, $G_{\text{вн}} \ll G$.



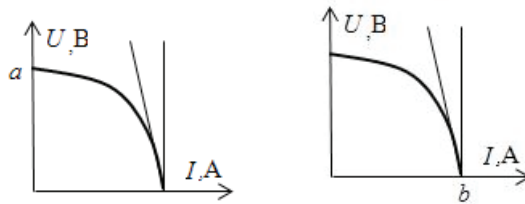
- 2) Это источник электрической энергии, который характеризуется электрическим током J в нем и внутренней проводимостью $G_{\text{вн}}$.
 - 3) Представляет собой источник питания, который создает ток $J = I$, не зависящий от сопротивления нагрузки R , к которой он присоединен.
 - 4) Для идеального ИТ исключается режим холостого хода ($I = 0$).
 - 5) Для источника тока в режиме, близком к режиму короткого замыкания, можно пренебречь значением тока $I_{\text{вн}}$ и исключить ветвь с элементом $G_{\text{вн}}$ из схемы замещения.
 - 6) Внешняя характеристика $I = f(U)$ источника тока представляет собой прямую линию ($J = I$), параллельную оси ординат.
17. Выбрать из списка вид вольтамперной характеристики идеального источника электрического напряжения.



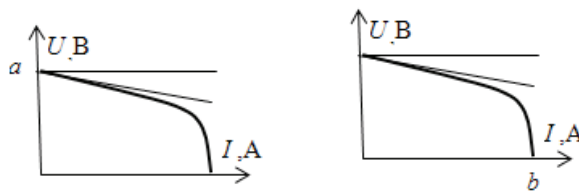
18. Выбрать из списка вид вольтамперной характеристики реального (идеализированного) источника тока.



19. Выбрать из списка режимы работы идеализированного источника тока, которым соответствуют точки пересечения a и b его вольтамперной характеристики с осями координат:

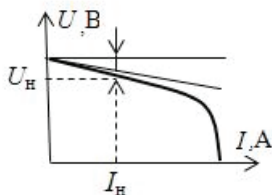


- 1) режим короткого замыкания;
 - 2) режим при номинальном сопротивлении нагрузки;
 - 3) режим холостого хода;
 - 4) близкий к режиму холостого хода;
 - 5) аварийный режим.
20. Выбрать из списка режимы работы идеализированного источника напряжения, которым соответствует точки пересечения a и b его вольтамперной характеристики с осями координат:



- 1) режим короткого замыкания;
- 2) режим при номинальном сопротивлении нагрузки;
- 3) режим холостого хода;
- 4) близкий к режиму холостого хода.

21. Дана внешняя характеристика источника напряжения при подключении к выводам сопротивления нагрузки. Какому режиму работы источника соответствуют напряжение на зажимах приемника и ток в нагрузке?



- 1) близкий к оптимальному режиму;
 - 2) близкий к режиму холостого хода;
 - 3) близкий к режиму короткого замыкания;
 - 4) расчетный режим источника питания;
 - 5) линейный режим;
 - 6) нелинейный режим;
 - 7) аварийный режим.
22. Выбрать из списка вопросы по свойствам идеализированных источников энергии, на которые можно дать утвердительный ответ.
- 1) Возможно ли физически изготовить реальные (идеализированные) источник ЭДС и источник тока?
 - 2) Возможен ли эквивалентный переход от схемы идеального источника ЭДС с последовательно соединенным с ним внутренним сопротивлением R_0 к схеме с идеальным источником тока и наоборот?
 - 3) Возможно заменить идеальный источник ЭДС без последовательно соединенного с ним внутреннего сопротивления реального источника R_0 идеальным источником тока?
 - 4) Схема с идеальным источником ЭДС эквивалентна схеме с идеальным источником тока в отношении энергии, которая выделяется в сопротивлении нагрузки.
 - 5) При анализе ЭЦ реальный источник электрической энергии с конечным значением внутреннего сопротивления R_0 заменяют ли его расчетным эквивалентом?

- б) Схема с идеальным источником ЭДС эквивалентна схеме с идеальным источником тока в отношении энергии, которая выделяется во внутреннем сопротивлении источника питания R_s , так ли это?

Тесты по теме

Анализ линейных электрических цепей

постоянного тока

1. Выбрать из списка положения, которые характеризуют основные задачи анализа электрической цепи.
 - 1) Определить токи и напряжения в каждом пассивном элементе цепи, если известны величины всех источников энергии.
 - 2) По известному току (или напряжению) на каком-либо элементе цепи и способу соединения ветвей определить токи на других участках цепи и величины источников энергии.
 - 3) Исследование способа соединения ветвей (топологии цепи), образование узловых точек и замкнутых контуров.
 - 4) Написание уравнений равновесия (по первому и второму законам Кирхгофа).
2. Выбрать из списка методы анализа электрических цепей, основанные на законах Ома и Кирхгофа:
 - 1) Метод контурных токов.
 - 2) Теорема наложения.
 - 3) Метод узловых потенциалов.
 - 4) Преобразования схем электрических цепей.
 - 5) Метод непосредственного применения законов Кирхгофа.
 - 6) Теорема об эквивалентном генераторе.
3. Последовательное соединение элементов одного типа: резисторов R_i , источников напряжения E_i , катушек индуктивности L_i

и конденсаторов C_i . Выбрать из списка формулы, которые позволяют вычислить параметры эквивалентных элементов:

$$1) R_k = \sum_{i=1}^n R_i; \quad 2) E_k = \sum_{i=1}^q E_i; \quad 3) L_k = \sum_{i=1}^m L_i; \quad 4) C_k = \sum_{i=1}^m C_i.$$

4. Параллельное соединение элементов одного типа: резисторов R_i , катушек индуктивности L_i , конденсаторов C_i и источников тока J_i . Выбрать из списка формулы, которые не позволяют вычислить параметр эквивалентного элемента.

$$1) R_k = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}; \quad 2) L_k = \sum_{i=1}^m L_i; \quad 3) C_k = \sum_{i=1}^m C_i; \quad 4) J_k = \sum_{i=1}^q J_i.$$

5. Выбрать из списка вопросы по разделу «Основные топологические понятия и определения», на которые можно дать утвердительный ответ:

- 1) Ветвь электрической цепи — это последовательное соединение источников и приемников электрической энергии, имеющее два зажима (концевых точек) для присоединения ее к другим участкам цепи.
 - 2) Каноническая схема замещения ветви включает минимальный набор эквивалентных элементов, которые определяются по формулам последовательного соединения элементов одного типа.
 - 3) Зависит ли замена группы однотипных элементов на эквивалентные элементы от места расположения того или иного элемента ветви?
 - 4) Все элементы ветви связаны между собой узлами, в которых ток не делится на части (простыми узлами).
 - 5) В канонической ветви ток, все напряжения на элементах и действие суммарной ЭДС направлены в одну и ту же сторону.
6. Определите компонентные уравнения, которые формируются на основании закона Ома для ветви с источником напряжения резистивной цепи:
- 1) $U_k = R_k I_k - E_k$;
 - 2) $I_k = G_k (U_k + E_k)$;
 - 3) $U_k = E_k$ при $R_k = 0$;
 - 4) $U_k = R_k I_k$ или $I_k = G_k U_k$ при $E_k = 0$.

7. Определить формулы компонентных уравнений ветвей, которые справедливы при условии, что действия тока, напряжения и ЭДС направлены в одну и ту же сторону:
- 1) $U_k = R_k I_k - E_k$;
 - 2) $I_k = G_k (U_k + E_k)$;
 - 3) $U_k = R_k I_k + E_k$;
 - 4) $I_k = G_k (U_k - E_k)$.
8. Определите особенности, которыми обладают системы уравнений равновесия, составленные по первому закону Кирхгофа:
- 1) Определяет распределение токов в узлах цепи.
 - 2) Положительные направления токов в ветвях с источником напряжения (ветвь первого типа) есть направление движения положительных зарядов, противоположное движению электронов.
 - 3) Решение прямой задачи — определение токов и напряжений ветвей — должно гарантировать одни и те же их численные значения независимо от того, как первоначально направлены токи в ветвях.
 - 4) Направление тока в ветви с источником тока (ветвь второго типа) фиксированы направлением действия источника тока.
 - 5) Применяется только для канонических ветвей первого и второго типов, подключенных к узлам цепи.
 - 6) Уравнения равновесия составляются только для независимых узлов. Один из узлов схемы замещения ЭЦ является лишним.
9. Уравнения равновесия ЭЦ, содержащей несколько ветвей, составленных на основании второго закона Кирхгофа, обладают следующими особенностями:
- 1) Определяют правило распределения напряжений ветвей в замкнутых контурах схемы замещения ЭЦ.
 - 2) Определяют правило распределения напряжений на резистивных элементах ветвей по заданным токам в каждой отдельной ветви схемы замещения ЭЦ.
 - 3) Решение задачи анализа ЭЦ для величин напряжений одно и то же независимо от того, как указаны положительные

- направления токов и напряжений ветвей, а также направление обхода контура.
- 4) Каждый независимый контур должен состоять только из ветвей первого типа.
 - 5) Схема замещения ЭЦ требует упрощения до записи уравнений равновесия по второму закону Кирхгофа.
10. Уравнения равновесия ЭЦ, содержащей несколько ветвей, составленные на основании второго закона Кирхгофа, обладают следующими особенностями:
- 1) Определяют правило распределения напряжений на резистивных элементах ветвей контура с учетом алгебраической суммы ЭДС, входящих в тот же контур.
 - 2) Положительные направления тока в ветвях с источником напряжения (ветвь первого типа) выбираются произвольно.
 - 3) Направление напряжения в ветви с источником тока (ветвь второго типа) указывается произвольно.
 - 4) Уравнение для любого одного замкнутого контура схемы, составленное на основании второго закона Кирхгофа, является линейной комбинацией остальных и его включать в систему уравнений для определения напряжений ветвей не следует.
11. Расчет токов и напряжений ветвей может быть сведен к «прямой задаче анализа электрической цепи» при выполнении определенных условий. Выбрать в списке условия, при которых прямая задача имеет единственное решение:
- 1) Прямая задача анализа всегда имеет единственное решение для токов и напряжений ветвей, если известны источники энергии и сопротивления ветвей.
 - 2) В систему уравнений включаются только линейно независимые уравнения равновесия, составленные по законам Кирхгофа для схемы замещения ЭЦ.
 - 3) Добавить к системе уравнений компонентные уравнения, основанные на обобщенной форме закона Ома, которые связывают напряжение каждой ветви с током той же ветви.
 - 4) Добавить к системе уравнений компонентные уравнения, основанные на обобщенной форме закона Ома, которые связывают ток каждой ветви с напряжением той же ветви.

- 5) Система уравнений должна быть переписана в матричной форме и решена с использованием методов решения матричных уравнений (формулы Крамера).
12. Алгоритм формирования системы линейно независимых уравнений по законам Кирхгофа предполагает определенный порядок действий. Перечислите приведенные в списке действия в порядке возрастания.
- 1) Определяется общее количество уравнений в системе N как разность общего числа канонических ветвей N_B и ветвей с источниками тока (второго типа) N_J .
 - 2) Обозначаются и маркируются все элементы, принадлежащие k -й канонической ветви.
 - 3) Обозначаются и маркируются ветви ЭЦ. Общее количество ветвей равно N_B .
 - 4) Указываются направления обхода независимых контуров и составляются уравнения по второму закону Кирхгофа. Общее число уравнений по второму закону Кирхгофа определяется формулой $N_2 = N - N_1 = N_B - N_J - (N_Y - 1)$.
 - 5) Маркируются узловые точки и произвольно указываются условные положительные направления токов ветвей, подключенных к узлу. Если схема имеет N_Y узлов, то общее число уравнений по первому закону Кирхгофа $N_1 = N_Y$.
 - 6) Определяется число неизвестных токов: из общего числа ветвей вычитается число ветвей с источниками тока $N = N_B - N_J$.
 - 7) Сформировать систему уравнений с искомыми токами канонических ветвей первого типа, основанных на обобщенной форме закона Ома.
13. Выбрать из перечисленных положений, являющиеся следствием второго закона Кирхгофа.
- 1) Алгебраическая сумма падений напряжений на резистивных элементах ветвей контура равна алгебраической сумме ЭДС, входящих в тот же контур.

$$\sum r_k I_k = \sum E_k.$$
 - 2) Алгебраическая сумма падений напряжений ветвей ЭЦ для любого замкнутого контура равна 0.

$$\sum U_k = 0.$$

- 3) Можно проверить выполнение уравнений равновесия для всех замкнутых контуров схемы замещения ЭЦ.
14. Правила выбора положительных направлений напряжений и токов ветвей при записи уравнений равновесия по первому и второму законам Кирхгофа:
 - 1) Условные положительные направления токов ветвей первого типа выбираются произвольно, а для ветвей второго типа фиксированы.
 - 2) Если некоторые токи и напряжения ветвей получились со знаком минус, то их истинные положительные направления противоположны первоначально выбранным при формировании уравнений равновесия по законам Кирхгофа.
 - 3) Физически правильные результаты определения неизвестных токов ветвей должны получиться при любых знаках найденных токов и напряжений?
 - 4) Источники энергии в электрической цепи могут только отдавать энергию, а резистивные элементы потреблять мощности. Баланс мощностей — суммарная мощность, отдаваемая источниками энергии, должна равняться суммарной мощности, потребляемой в резистивных элементах цепи.

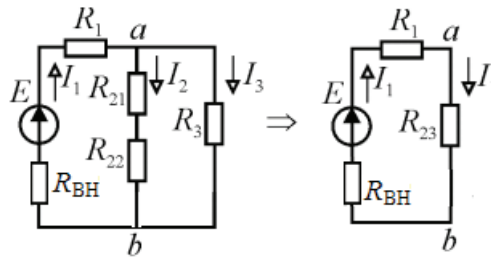
Тесты по теме

Анализ разветвленной ЭЦ постоянного тока

Метод входного сопротивления

1. Выбрать законы электротехники и правила, на которых основывается «метод входного сопротивления» для расчета токов и напряжений ветвей схемы замещения ЭЦ.
 - 1) Пошаговое упрощение схемы цепи путем объединения последовательно и параллельно соединенных элементов или ветвей.
 - 2) Сведение резистивной схемы ЭЦ к одному сопротивлению.

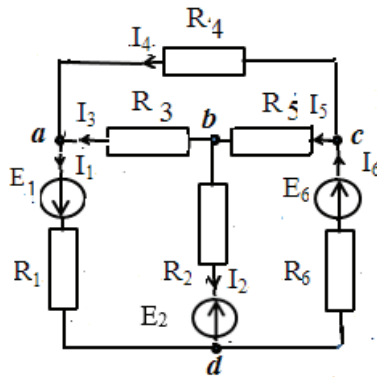
- 3) Использование законов Ома и Кирхгофа для определения тока в источнике напряжения.
 - 4) Объединение сопротивлений ветвей следует начинать с наиболее удаленных от источника элементов цепи.
 - 5) Используя формулу объединения, заменить смешанные соединенные резисторы и проводимостей одним резистором.
 - 6) В схеме замещения ЭЦ может действовать один источник напряжения или источник тока.
2. Выделите в списке законы электротехники и правила, на которых основан алгоритм определения токов и напряжений ветвей в схеме электрической цепи с источником напряжения «методом входного сопротивления» (см. схему).



- 1) Пошаговое преобразование схемы замещения с помощью объединения последовательно и параллельно соединенных резистивных элементов или ветвей.
- 2) Закон Ома для определения тока I_1 в источнике напряжения E при известном значении входного сопротивления $R_{\text{вх}}$ со стороны источника.
- 3) Правило делителя напряжения для определения напряжений на одном из резисторов ветви, состоящей из двух последовательно соединенных резисторов.
- 4) Правило делителя токов для определения тока в одной из двух ветвей для цепи с двумя параллельно соединенными резисторами.
- 5) Законы Кирхгофа для определения токов и напряжений в ветвях схемы цепи.

Метод контурных токов

3. Выбрать из списка основные положения «метода контурных токов» для решения прямой задачи анализа электрической цепи с ветвями первого типа.
 - 1) Решает задачу анализа электрических цепей через систему уравнений, составленную для формализованных переменных, — контурных токов только на основе второго закона Кирхгофа.
 - 2) Использует для расчета ЭЦ с большим количеством узлов.
 - 3) Позволяет исключить уравнения, составленные по первому закону Кирхгофа.
 - 4) Основан на предположении, что в каждом контуре протекает собственный ток, независимый от токов в других контурах.
 - 5) Токи в ветвях определяются как сумма контурных токов, протекающих через ветвь.
4. Определить неточность в описании решения прямой задачи анализа электрической цепи с ветвями первого типа методом контурных токов.
 - 1) Под контурными токами понимают токи независимых контуров, которые образованы ветвями первого типа (с источниками напряжения). Число уравнений в системе определяется выражением: $n = NB - (NY - 1)$, где NB — общее число ветвей первого типа; NY — число независимых узлов.
 - 2) Для решения прямой задачи контуры в схеме ЭЦ выбираются произвольно.
 - 3) В контурах протекают независимые контурные токи. Положительные направления контурных токов выбираются произвольно и независимо один от другого.
 - 4) Для каждого контура составляется уравнение по второму закону Кирхгофа, предполагая, что в каждом контуре протекает собственный ток.
 - 5) Токи ветвей схемы электрической цепи определяются как алгебраическая сумма контурных токов, протекающих в каждой ветви.
5. Определить неточность в описании действий алгоритма решения прямой задачи анализа электрической цепи с ветвями первого типа *методом контурных токов* (см. схему).



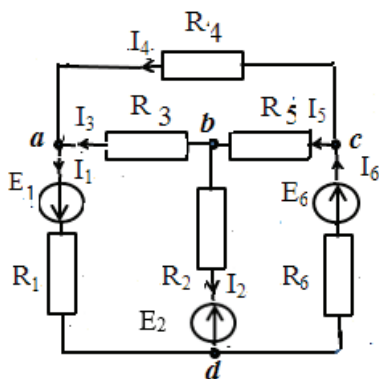
- 1) Определить число независимых контуров и, следовательно, неизвестных контурных токов (формализованных переменных) по формуле $n = N_B - (N_Y - 1)$, где N_B — число ветвей, N_Y — число независимых узлов.
- 2) Составить систему формализованных уравнений по второму закону Кирхгофа:

$$\sum_i^n \sum_j^m R_{ij} I_k_j = \sum_i E,$$

где i — порядковый номер контура (уравнения) в системе; j — порядковый номер члена в уравнении; I_k_j — токи j -го контура, число которых совпадает с числом независимых контуров n .

- 3) По правилу обхода по контурам определить R_{ii} — собственные сопротивления i -го контура, которые складываются из всех сопротивлений ветвей, принадлежащих этому контуру.
- 4) По правилу обхода по контурам определить R_{ij} — взаимные сопротивления i -го и j -го контуров, которые складываются из всех сопротивлений ветвей, лежащих на границе этих контуров, либо равны нулю. Если контурные токи в смежных ветвях направлены встречно, то R_{ij} записывается в систему уравнений со знаком минус.
- 5) Контурная ЭДС i -го контура складывается алгебраически из всех ЭДС, принадлежащих i -тому контуру.

- 6) Решить систему уравнений относительно контурных токов и рассчитать токи ветвей как алгебраическую сумму контурных токов, протекающих в каждой ветви.
 - 7) Проверить правильность решения, составив уравнения равновесия по второму закону Кирхгофа.
6. Определить количество уравнений в системе, составленной для анализа ЭЦ с ветвями первого типа «методом контурных токов» (см. схему).



- 1) 4; 2) 2; 3) 3; 4) 1; 5) 0.
7. Выбрать в списке определения, характеризующие собственное сопротивление R_{ii} i -го контура в системе уравнений «метода контурных токов».
- 1) Складывается из всех сопротивлений ветвей, принадлежащих этому контуру. В систему уравнений записывается всегда со знаком «плюс».
 - 2) Складывается из всех сопротивлений ветвей, принадлежащих этому контуру.
 - 3) Каждый независимый контур должен состоять только из ветвей первого типа.
 - 4) Складывается из сопротивлений всех ветвей, которые лежат на границе этого контура со смежным. В систему записывается со знаком «плюс», если контурные токи в смежных ветвях совпадают по направлению, и со знаком «минус», если направлены встречно.

- 5) Складывается алгебраически из всех сопротивлений ветвей, принадлежащих этому контуру. В систему уравнений записывается всегда со знаком «плюс», если направление тока (напряжения) ветви совпадает с направлением контурного тока.

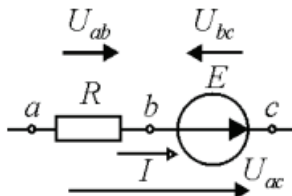
Метод узловых потенциалов

8. Выбрать из списка основные положения метода узловых потенциалов для решения прямой задачи анализа электрической цепи с ветвями первого типа:

- 1) Решает задачу анализа ЭЦ через систему уравнений, составленную для вспомогательных формализованных переменных, — потенциалов узловых точек. Нумерация узлов и потенциалов произвольна.
- 2) Метод основан на применении обобщенного закона Ома для определения тока в резистивной ветви, если известна разность потенциалов узлов, к которым подключена ветвь, а также действующий в ветви источник ЭДС.
- 3) В формуле обобщенного закона Ома для ветви первого типа исключается появления знака минус <-> перед разностью потенциалов узлов.
- 4) Ток в k -й ветви определяется по формуле

$$I_k = ((\varphi_i - \varphi_j) \pm E_k) g_k,$$
 где g_k — проводимость k -й межузловой ветви.
- 5) Для ветви первого типа, в которой направления тока и ЭДС совпадают, выражение обобщенного закона Ома имеет вид

$$I_k = ((\varphi_i - \varphi_j) \pm E_k) g_k.$$



- 6) Токи ветвей определяются потенциалами узлов.

9. Определить неточность в описании решения прямой задачи анализа электрической цепи с ветвями первого типа методом узловых потенциалов:
- 1) Число линейных уравнений в системе для искомым потенциалов узлов n на один меньше числа узлов в схеме замещения ЭЦ.
 - 2) Потенциалы независимых узлов совпадают с напряжениями реальных ветвей.
 - 3) Метод узловых потенциалов целесообразно применять для сложных ЭЦ с большим количеством ветвей.
 - 4) Направления токов в ветвях ЭЦ с резистивными элементами и в ветвях с источниками напряжения выбираются произвольно.
 - 5) Уравнения по первому закону Кирхгофа составляются для независимых узлов схемы замещения ЭЦ.
 - 6) Для получения СЛАУ относительно искомым потенциалов узлов в уравнения Кирхгофа вместо токов I_k ветвей следует подставить выражения на основании закона Ома в обобщенной форме.
10. Определить неточность в описании действий алгоритма решения прямой задачи анализа электрической цепи с ветвями первого типа методом узловых потенциалов:
- 1) Определить число ветвей. Выбрать произвольно направления токов в ветвях с пассивными элементами, а в ветвях с источниками ЭДС за положительное направление тока принять совпадающее с направлением действия ЭДС в ветви.
 - 2) Составить уравнения, определяющие токи в ветвях, на основании обобщенного закона Ома.
 - 3) Определить число независимых узлов и, следовательно, неизвестных узловых потенциалов (формализованных переменных) по формуле
$$n = N_Y - 1,$$
где N_Y — число узлов.
 - 4) Составить систему уравнений баланса токов в узлах схемы замещения ЭЦ по первому закону Кирхгофа.
 - 5) Составить систему формализованных уравнений для искомым потенциалов узлов $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$, которая имеет вид

$$G_{ii}\varphi_i - \sum_{j=1}^n G_{ij}\varphi_j = \sum_i Eg,$$

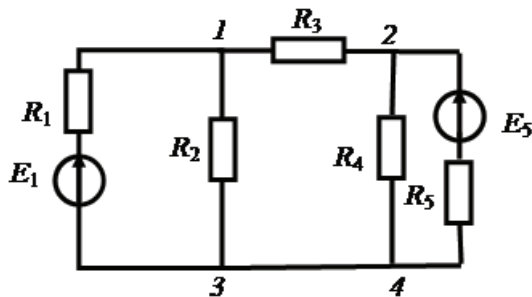
где i — порядковый номер узла (уравнения) в системе; φ_i — потенциал i -го узла, число которых совпадает с числом независимых узлов n ; j — порядковый номер члена в уравнении.

- б) Решить систему уравнений относительно потенциалов независимых узлов. По уравнениям токов на основании обобщенного закона Ома определить токи в ветвях схемы и их положительные направления.
11. Система формализованных уравнений для искомых потенциалов узлов $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ имеет вид

$$G_{ii}\varphi_i - \sum_{j=1}^n G_{ij}\varphi_j = \sum_i Eg.$$

Определите правила составления уравнений системы, которые позволят составлять ее без вывода:

- 1) $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ — искомые потенциалы независимых узлов.
 - 2) G_{ii} — собственная проводимость i -го узла — суммарная проводимость ветвей, которые присоединены к i -му узлу.
 - 3) $G_{ij} = G_{ji}$ — взаимная проводимость i -го и j -го узлов — суммарная проводимость ветвей, которые соединяют i и j узлы.
 - 4) $\sum_i Eg$ — суммы ЭДС источников ветвей, сходящихся в узле, умноженные на проводимости этих ветвей.
12. Определить количество уравнений в системе, составленной для анализа электрической цепи с ветвями первого типа, методом узловых потенциалов.



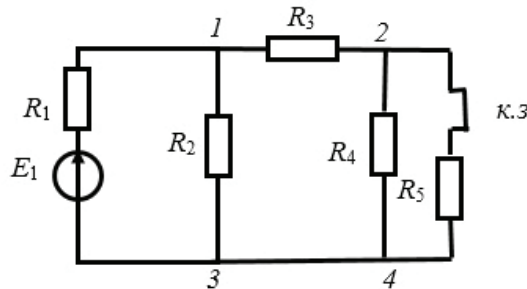
- 1) 4; 2) 3; 3) 2; 4) 5.

Метод наложения

13. В списке приведены действия, которые выполняются при анализе схемы замещения ЭЦ, которая содержит источники напряжения (ИН), «методом наложения». Каждый ИН характеризуется ЭДС и внутренним электрическим сопротивлением $R_{\text{вн}} = \text{const}$. Определите последовательность действий в алгоритме создания составных цепей и расчета частичных токов:
- 1) Проверяется применимость метода наложения для анализа ЭЦ. Метод наложения применим к ЭЦ, которые описываются системами линейных алгебраических уравнений на основе законов Кирхгофа и компонентных уравнений.
 - 2) Определяется, сколько ИН содержится в схеме замещения ЭЦ. Метод наложения основан на независимом действии каждого ИН на ЭЦ.
 - 3) Исходная ЭЦ заменяется набором *составных* ЭЦ, в которых действует только один ИН, остальные ИН необходимо исключить.
 - 4) Для каждой составной ЭЦ проводится расчет *частичных* токов и напряжений ветвей с применением любого метода, например эквивалентных преобразований резистивной схемы и закона Ома.
 - 5) Указываются условные положительные направления токов в исходной ЭЦ.
 - 6) В каждой из составных цепей отключаются все ИН, кроме одного, который заменяется своим внутренним сопротивлением.
 - 7) Указываются положительные направления *частичных* токов в ветвях каждой составной цепи с учетом направления действия источника ЭДС.
14. В списке приведены действия, которые выполняются при анализе схемы замещения ЭЦ, которая содержит источники ЭДС с внутренним сопротивлением, равным нулю, методом наложения. Определите последовательность действий в алгоритме создания составных цепей и расчета частичных токов:
- 1) Проверяется применимость метода наложения для анализа ЭЦ. Метод наложения применим к ЭЦ, которые описываются системами линейных алгебраических уравнений на основе законов Кирхгофа и компонентных уравнений.

- 2) Определяется, сколько источников ЭДС содержится в схеме замещения ЭЦ. Метод наложения основан на независимом действии каждого из источников ЭДС на ЭЦ.
 - 3) Исходная ЭЦ заменяется набором *составных* ЭЦ, в которых действует только один источник ЭДС.
 - 4) Необходимо указать положительные направления частичных токов в ветвях каждой составной цепи с учетом направления действия источника ЭДС.
 - 5) Для каждой составной ЭЦ проводится расчет *частичных* токов и напряжений ветвей с применением любого метода, например эквивалентных преобразований резистивной схемы и закона Ома.
 - 6) Указать условные положительные направления токов в исходной схеме ЭЦ.
 - 7) В каждой из составных цепей отключаются все источники ЭДС, кроме одного, который заменяется короткозамкнутой перемычкой (режим «короткого замыкания»).
15. В списке приведены действия, которые выполняются при анализе схемы замещения ЭЦ, которая содержит источники напряжения, методом наложения. Определите последовательность действий в алгоритме после исключения в исходной схеме ЭЦ всех ИН, кроме одного, и создания составных схем:
- 1) Для составной цепи (с одним ИН) производятся эквивалентные преобразования резистивной цепи. В результате будет получен участок ЭЦ, содержащий один источник ЭДС и эквивалентное сопротивление.
 - 2) Производится расчет частичных токов и напряжений для каждой ветви составной схемы с применением эквивалентных преобразований резисторов и закона Ома в обобщенной форме.
 - 3) Указать условные положительные направления токов в составной цепи по направлению действия одного источника ЭДС.
 - 4) Определяются токи ветвей исходной цепи как алгебраическая сумма частичных токов для каждой ветви.
 - 5) Отмечается принадлежность частичных токов определенному источнику ЭДС.
 - 6) Проверяется правильность решения задачи на основе составления уравнений равновесия для суммарных токов и напряжений по первому и второму законам Кирхгофа.

16. Ниже приведена составная ЭЦ, в которой исключен источник питания. Определите тип источника.



- 1) Источник ЭДС.
- 2) Идеальный источник тока.
- 3) Источник напряжения.
- 4) Реальный источник тока.

Метод эквивалентного генератора

17. Метод расчета тока в выделенной ветви, подключенной к зажимам ab , основанный на замене активного двухполюсника источником ЭДС, равную напряжению на зажимах при холостом ходе (разомкнутой ветви), и входным сопротивлением двухполюсника по отношению к зажимам принято называть так:
- 1) Метод активного двухполюсника.
 - 2) Метод эквивалентного генератора.
 - 3) Метод холостого хода и короткого замыкания.
 - 4) Метод входного сопротивления.
18. Выбрать в приведенном списке положения, на которых основан «метод эквивалентного генератора» анализа ЭЦ, содержащей ветви первого типа.
- 1) Выделение одной ветви и представление остальной части схемы ЭЦ в виде двухполюсника, присоединенного к выделенной ветви полюсами ab .
 - 2) Замена двухполюсника эквивалентной схемой замещения, которая включает источник напряжения и некоторое внутреннее сопротивление.
 - 3) Схема замещения, включающая источник напряжения и внутреннее сопротивление, заменяющие внешнюю часть

- ЭЦ, в совокупности называются «эквивалентным генератором».
- 4) Преобразование исходной ЭЦ, исключая все источники напряжения, замыкая их накоротко.
 - 5) Входное сопротивление двухполюсника принимается равным эквивалентному сопротивлению пассивной части ЭЦ по отношению к полюсам ab .
 - 6) Двухполюсник по отношению к выделенной ветви можно рассматривать как источник напряжения с ЭДС, равной напряжению на полюсах ab .
 - 7) Сопротивление выделенной ветви (нагрузки) и параметры двухполюсника, замещающего внешнюю ЭЦ, должны оставаться неизменными.
19. В списке приведены действия, которые выполняются при анализе схемы замещения ЭЦ методом эквивалентного генератора. Определите последовательность действий в алгоритме.
- 1) Выделение из исходной схемы ЭЦ одной ветви и условное заключение схемы, содержащей источника ЭДС и сопротивления в прямоугольник, представляющий двухполюсник.
 - 2) Двухполюсник двумя полюсами ab присоединяется к выделенной ветви.
 - 3) Определение напряжения холостого хода на полюсах ab разомкнутого двухполюсника, используя любой расчетный метод анализа ЭЦ.
 - 4) Исключение из схемы ЭЦ ветви с сопротивлением нагрузки, замена ее разомкнутыми полюсами ab .
 - 5) Определение входного сопротивления схемы ЭЦ со стороны разомкнутых полюсов ab . Объединение последовательно и параллельно соединенных резистивных сопротивлений.
 - 6) Исключение из исходной схемы ЭЦ всех источников напряжения замыканием их накоротко.

Список библиографических ссылок

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник. 11-е изд. М. : Гардарики, 2006. 701 с.
2. Боневоленский С. Б., Марченко А. Л. Основы электротехники : учебное пособие для вузов. М. : Изд-во Физико-математической литературы, 2007. 568 с.
3. Марченко А. Л. Освальд С. В. Лабораторный практикум по электротехнике и электронике для вузов в среде Multisim : учебное пособие для вузов. М. : ДМК Пресс, 2010. 448 с.
4. Любимов Э. В. Mathcad. Теория и практика проведения электротехнических расчетов в среде Mathcad и Multisim. СПб. : Наука и Техника, 2012. 400 с.
5. Осипов Ю. М., Борисов П. А. Методы расчета линейных электрических цепей : учебное пособие по курсам электротехники и ТОЭ. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 120 с. URL: <http://window.edu.ru/resource/598/76598> (дата обращения: 27.08.2021).

Приложение

Ответы по теме Элементы и параметры линейных электрических цепей

Номер задания	Ответ	Пояснения
1	2	п. 1.1.1., с. 6
2	5	п. 1.1.1., с. 7
3	1,2,3,4,5	п. 1.1.1., с. 8
4	3	п. 1.1.2., с. 8
5	3	п. 1.1.2., с. 9
6	1	п. 1.1.2., с. 10
7	2	п. 1.1.2., с. 11
8	3	п. 1.1.2., с. 10
9	1	п. 1.1.2., с. 10
10	1	п. 1.1.3, с. 11
11	2	п. 1.1.3, с. 11
12	1	п. 1.1.3, с. 12
13	1	п. 1.2.2, с. 16
14	1,2,5	п. 1.2.2, с. 15
15	1	п. 1.2.2, с. 19
16	1,2,4,5,6	п. 1.2.3, с. 19
17	2	п. 1.2.2, с. 15
18	3	п. 1.2.3, с. 20
19	1,3,5	п. 1.2.3, с. 21
20	1,3,5	п. 1.2.2, с. 17
21	4	п. 1.2.2, с. 17
22	1,2,4,5,6	п. 1.2.4 с. 21

Ответы по теме
Анализ линейных электрических цепей постоянного тока

Номер задания	Ответ	Пояснения
1	1,3,4	п. 3.1., с. 125
2	1,2,3,5,6	п. 3.1., с. 125
3	1,2,3	п. 3.5.1., с. 138
4	1,3,4	п. 3.5.2., с. 135
5	1,2,4,5	п. 3.3.2, с. 128
6	1,2,4	п. 3.2.5, с. 127
7	1,2	п. 3.2.5, с. 128
8	1,4,5,6	п. 3.3.2, с. 129
9	1,4,5	п. 3.3.2, с. 130
10	1,3,4	п. 3.3.3, с. 130
11	2,3	п. 4.2.1, с. 144
12	1,3,2,6,5,4,7	п. 4.2.1, с. 144
13	1,3	п. 3.3.2, с. 130
14	1,2,3	п. 4.2.1, с. 144

Ответы по теме
Анализ разветвленной ЭЦ постоянного тока

Номер задания	Ответ	Пояснения
1	1,2,4,6	п. 4.1, с. 140
2	2,3,4	п. 4.1, с. 141
3	1,2,3,4	п. 4.3.1, с. 160
4	2,4	п. 4.3.1, с. 160
5	5,7	п. 4.3.1, с. 160
6	3	п. 4.3, с. 160
7	1	п. 4.3.1, с. 160
8	1,3,4	п. 4.4.1, с. 169
9	2,3,4	п. 4.4.1, с. 169
10	4,6	п. 4.4.3, с. 169
11	1,2	п. 4.4.1, с. 170
12	3	п. 4.4.1, с. 170

Номер задания	Ответ	Пояснения
13	1,5,2,3,6,7,4	п. 4.5.1, с. 180
14	1,6,2,3,7,4,5	п. 4.5.1, с. 180
15	3,1,2,5,4,6	п. 4.5.1, с. 180
16	1	п. 4.5.1, с. 180
17	1,2,3	п. 4.6, с. 197
18	1,2,3,4,5	п. 4.6.1, с. 198
19	1,3,2,5,4,6	п. 4.6.1, с. 198

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Элементы и параметры линейных электрических цепей	6
1.1. Основные понятия и определения	6
1.1.1. Электрическая цепь. Схема электрической цепи	6
1.1.2. Величины, характеризующие состояние ЭЦ постоянного тока	8
1.1.3. Электрическая энергия и мощность. Баланс мощности	11
1.1.4. Топологические понятия теории электрических цепей	12
1.2. Идеализированные элементы ЭЦ постоянного тока	13
1.2.1. Резистивный элемент	13
1.2.2. Источник электрического напряжения ЭЦ постоянного тока	15
1.2.3. Идеальный источник постоянного тока	19
1.2.4. Взаимные преобразования источников тока и напряжения	21
Глава 2. Моделирование характеристик и параметров ЭЦ	23
2.1. Моделирование характеристик и параметров ЭЦ в среде программы Mathcad	23
2.1.1. Интерфейс пользователя. Инструментальные средства для моделирования	23
2.1.2. Создание нового документа	24
2.1.3. Ввод и форматирование текстовых комментариев и заголовков	25
2.1.4. Определение переменных	30
2.1.5. Ввод и редактирование математических выражений	33
2.1.6. Определение функций пользователя	40
2.1.7. Форматирование математических выражений	42
2.1.8. Сохранение документа Mathcad	44
2.1.9. Моделирование внешней характеристики источника напряжения	44

2.1.10. Массивы чисел.....	46
2.1.11. Ранжированная переменная.....	49
2.1.12. Ввод числовых значений элементов массива в таблицу ввода	50
2.1.13. Скалярные операции над массивами.....	51
2.1.14. Оператор векторизации.....	52
2.1.15. Отображение значений элементов массивов при выводе	55
2.1.16. Графическое представление массивов (векторов). График X-Y.....	58
2.1.17. Создание двумерного X-Y графика.....	59
2.1.18. Форматирование осей координат X-Y графика.....	61
2.1.19. Трассировка графиков.....	64
2.1.20. Оформление графика	66
2.1.21. Анализ параметров ЭЦ в номинальном и согласованном режимах	72
2.1.22. Определение внутреннего сопротивления ИН графоаналитическим способом	78
2.2. Моделирование характеристик элементов ЭЦ постоянного тока в среде программы NI Multisim 14	82
2.2.1. Запуск программы NI Multisim 14	82
2.2.2. Пользовательский интерфейс MS14.....	83
2.2.3. Настройки управления свойствами среды MS14	87
2.2.4. Компоненты моделей электрических схем в MS14.....	88
2.2.5. Панель библиотеки индикаторов «Приборы».....	103
2.2.6. Сборка электротехнических схем в среде MS14.....	106
2.2.7. Измерения на постоянном токе.....	113
Глава 3. Анализ линейных электрических цепей постоянного тока	125
3.1. Задача анализа ЭЦ	125
3.2. Принципы и теоремы электротехники	126
3.2.1. Принцип непрерывности (замкнутости) электрического тока	126
3.2.2. Принцип наложения (суперпозиции)	126
3.2.3. Теорема компенсации	126
3.2.4. Теорема об эквивалентном генераторе.....	126
3.2.5. Обобщенная форма закона Ома для ЭЦ постоянного тока	127
3.3. Математическое описание процессов в ЭЦ.....	128
3.3.1. Понятие о компонентных и топологических уравнениях...128	
3.3.2. Законы Кирхгофа для ЭЦ постоянного тока	129

3.3.3. Определение числа независимых узлов и контуров в ЭЦ	130
3.3.4. Уравнения электрического равновесия.....	131
3.3.5. Компонентные и топологические матрицы ЭЦ постоянного тока	132
3.4. Преобразование последовательных и параллельных соединений элементов в ЭЦ	134
3.4.1. Преобразование ЭЦ с резистивными элементами.....	134
3.4.2. Делители тока	135
3.4.3. Смешанное соединение сопротивлений	136
3.4.4. Преобразования трехполюсников	137
3.4.5. Мостовая схема.....	137
3.4.6. Последовательное соединение резисторов и источников ЭДС	138
3.4.7. Параллельное соединение резисторов и источников ЭДС	139
Глава 4. Анализ разветвленной ЭЦ постоянного тока	140
4.1. Метод эквивалентного сопротивления.....	140
4.2. Метод непосредственного применения законов Кирхгофа....	144
4.2.1. Алгоритм формирования системы уравнений Кирхгофа.....	144
4.2.2. Законы Кирхгофа в матричной форме	147
4.2.3. Анализ ЭЦ методом непосредственного применения законов Кирхгофа в среде программы Mathcad.....	151
4.2.4. Проверка результатов анализа ЭЦ методом непосредственного применения законов Кирхгофа в среде Multisim	159
4.3. Метод контурных токов.....	159
4.3.1. Метод контурных токов для ЭЦ с ветвями первого типа	160
4.3.2. Матричные уравнения контурных токов.....	161
4.3.3. Анализ ЭЦ методом контурных токов в среде программы Mathcad.....	162
4.3.4. Проверка результатов анализа ЭЦ методом контурных токов в среде программы MS14	168
4.4. Анализ ЭЦ методом узловых потенциалов	168
4.4.1. Метод узловых потенциалов для ЭЦ с ветвями первого типа	169
4.4.2. Матричное уравнение узловых потенциалов	172

4.4.3. Анализ ЭЦ постоянного тока методом узловых потенциалов	172
4.4.4. Анализ ЭЦ методом узловых потенциалов в среде Mathcad.....	174
4.4.5. Проверка результатов анализа ЭЦ методом узловых потенциалов в среде программы Multisim	179
4.5. Анализ ЭЦ постоянного тока методом наложения (суперпозиции).....	180
4.5.1. Алгоритм анализа ЭЦ методом наложения	180
4.5.2. Анализ ЭЦ постоянного тока методом наложения в среде Mathcad	181
4.5.3. Проверка результатов анализа ЭЦ методом наложения в среде программы Multisim	195
4.6. Анализ электрической цепи методом эквивалентного генератора	197
4.6.1. Алгоритм метода эквивалентного генератора	198
4.6.2. Анализ ЭЦ методом эквивалентного генератора	199
4.6.3. Анализ ЭЦ методом эквивалентного генератора в среде Mathcad	200
4.6.4. Проверка результатов анализа ЭЦ методом эквивалентного генератора в среде Multisim	203
4.6.5. Моделирование определения напряжения холостого хода	203
4.6.6. Моделирование определения входного сопротивления схемы при замкнутом источнике ЭДС.....	204
4.6.7. Моделирование экспериментального определения входного сопротивления эквивалентного генератора в среде Multisim	205
Тесты	207
Список библиографических ссылок	234
Приложение	235

Учебное издание

Макаров Эдуард Петрович

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Редактор О. С. Смирнова
Верстка О. П. Игнатъевой

Подписано в печать 20.09.2021. Формат 70×100/16.
Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 19,5.
Уч.-изд. л. 10,1. Тираж 30 экз. Заказ 146.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: +7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13
Факс: +7 (343) 358-93-06
<http://print.urfu.ru>



МАКАРОВ ЭДУАРД ПЕТРОВИЧ

кандидат технических наук, доцент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Неоднократно проходил стажировку в университетах Канады, Бельгии, Нидерландов по информатике и информационным технологиям. Является автором многочисленных публикаций по применению информационных технологий в физике и вычислительной математике.