

Содержание

Предисловие	8
1. Основы описания и анализа систем с электрическими токами	10
Основные понятия и законы теории цепей	11
Ток и напряжение, электрическая цепь, схема цепи	11
Ток и напряжение – объекты анализа процессов в цепях	13
Опорные, или условные положительные, направления	15
Мгновенная мощность	15
Активные и пассивные элементы цепей	16
Идеальные пассивные элементы	16
Реальные пассивные элементы цепей, схемы замещения	21
Индуктивно связанные катушки, трансформатор	24
Источники тока и напряжения	27
Структура цепи, уравнения процессов в цепях	33
Основные понятия структуры электрической цепи	33
Задачи анализа и задачи синтеза	35
Законы Кирхгофа – структурные законы теории цепей	37
Уравнения процессов в цепях, принцип суперпозиции	40
Стационарные состояния и переходные процессы	43
Нелинейные элементы и цепи	45
Методы анализа цепей с постоянными токами	48
Метод контурных токов	49
Метод узловых потенциалов	51
Метод эквивалентного источника	53
Контрольные вопросы и задачи	58
Задание «Анализ цепей с постоянными токами».....	63
Пример анализа цепи с постоянными токами, варианты заданий	63
2. Гармонические колебания в линейных цепях.....	73
Свойства гармонических токов и напряжений.....	74
Описание гармонических колебаний	74
О получении гармонических напряжений.....	77
Векторные диаграммы гармонических колебаний	77
Метод комплексных амплитуд.....	80
Комплексные числа (справочные сведения)	81
Гармонические токи и напряжения в комплексной форме	83
Закон Ома для комплексных амплитуд	85
Законы Кирхгофа для комплексных амплитуд	89

Общая схема применения метода комплексных амплитуд.....	90
Преобразования комплексных сопротивлений (импедансов)	92
Формы комплексных сопротивлений (проводимостей).....	94
О методах анализа цепей с гармоническими токами	96
Энергетика в цепях гармонического тока	98
Мгновенная и активная мощности, коэффициент мощности	98
Реактивная, полная и комплексная мощности	100
Уравнения баланса мощностей	102
О коэффициенте мощности и добротности	102
Режим согласования	103
О вычислении коэффициента полезного действия.....	105
Основные сведения о трехфазных цепях.....	106
Устройство трехфазного генератора.....	106
Соединение трехфазного генератора с потребителем	108
Симметричные режимы работы трехфазных цепей	109
Мощность в трехфазных системах электрических цепей	112
Трехфазные цепи при несимметричных нагрузках	112
Создание равномерно вращающегося магнитного поля	115
Задачи и расчётные задания	120
3. Свойства линейных цепей	126
Способы описания линейных цепей.....	127
Анализ свойств цепей в частотной области.....	128
Комплексный коэффициент передачи	128
Амплитудно-частотная, фазочастотная характеристики	129
Виды и параметры фильтрующих цепей	130
Вычисление комплексного коэффициента передачи	132
Примеры характеристик простых ФНЧ и ФВЧ	133
Измерение частотных характеристик	135
Об искажении сигнала измерителем	137
Полосовая фильтрация, фазовая коррекция	139
Частотные свойства полосового <i>RC</i> -фильтра	139
Заграждающий <i>RC</i> -фильтр – мост Вина	141
Двойной Т-образный мост	142
Фазосдвигающие цепи, фазовый корректор.....	144
Временные характеристики цепей	146
Переходная характеристика цепи.....	146
Импульсная характеристика цепи	147
Связь переходной и импульсной характеристик	148

Измерение временных характеристик цепей	148
Временной анализ процессов в линейных цепях	151
Процедура временного анализа.....	151
Свойства RC -цепи в координатах времени	153
Переходные характеристики RL -цепи	154
Аналоговое интегрирование сигналов.....	155
Аналоговое дифференцирование сигналов	157
Интегрирование, дифференцирование линейной функции	159
Переходные характеристики полосового и заграждающего фильтров	161
Задачи и расчётные задания	163
4. Операторный метод анализа линейных цепей	167
Преобразование Лапласа и его свойства	168
Формула Лапласа, оригинал, изображение	168
Свойства преобразования Лапласа.....	169
Восстановление оригинала, формула разложения.....	172
Анализ процессов в операторных схемах	175
Операторные компонентные соотношения, схемы замещения	175
Законы Кирхгофа в операторной форме.....	177
Примеры применения операторного метода	178
Передаточная функция	181
Связь передаточной функции с характеристиками цепи	182
Свойства передаточных функций	184
Влияние на свойства цепей расположения нулей и полюсов $K(p)$	186
Контрольные вопросы и задачи.....	189
«Анализ свойств линейных цепей»	192
5. Колебательные цепи, резонансные явления	194
Вынужденные колебания в последовательном колебательном контуре	195
Резонанс в последовательном колебательном контуре	195
Частотные характеристики колебательного контура	199
Последовательный контур как полосовой фильтр.....	201
Свойства колебательного контура в координатах времени	204
Переходные характеристики колебательного контура.....	205
О свободных колебаниях в последовательном контуре	210
Параллельный колебательный контур	211
Резонанс в параллельном колебательном контуре	212
Полосовая фильтрация на основе параллельного контура	215
Колебательные цепи разветвленной структуры.....	218

Сложные колебательные контуры	219
Система связанных колебательных контуров	221
Задачи и расчётные задания	228
6. Частотные спектры колебаний, спектральный анализ	233
Преамбула	234
Описание колебаний в координатах частоты	234
Диапазоны частот электромагнитных колебаний	234
Виды спектров	236
Спектры периодических колебаний.....	238
Представление периодических колебаний рядами Фурье	239
Примеры частотных спектров периодических колебаний	242
Распределение энергии по гармоникам, равенство Парсеваля	245
Измерение спектров колебаний	248
Цифровой метод исследования спектров	248
Аппаратурное измерение амплитудных спектрограмм	250
Сигналы с непрерывными спектрами.....	252
Непериодические сигналы и интегралы Фурье	252
Спектры одиночных импульсов	253
Свойства преобразования Фурье	257
Спектры радиоимпульса с прямоугольной огибающей	259
Спектр затухающей синусоиды.....	260
Применение дельта-функции для описания спектров.....	261
Спектральный метод анализа линейных цепей.....	262
Общая схема применения спектрального анализа	262
Преобразование периодических колебаний линейной цепью	263
Передаточная функция и временные характеристики	265
Частотные характеристики неискажающей цепи	267
Влияние параметров сигнала и цепи на форму отклика	269
Модулированные колебания	270
Понятие радиосигнала.....	271
Амплитудно-модулированный сигнал.....	271
Сигналы с угловой модуляцией, спектры ЧМ-колебания	274
Спектры хаотических, шумовых колебаний	277
Описание и измерение хаотических колебаний, шумов	278
Преобразование шумового колебания линейной цепью	280
Об аналого-цифровом преобразовании и теореме отсчётов	281
Теорема отсчётов / Котельникова /	283
Об алиасинге – переносе высокочастотных помех на низкие частоты ..	285

Компьютерное моделирование алиасинга.....	286
Контрольные вопросы и расчётные задания	287
7. Волновые процессы в длинных линиях	293
Основы теории длинных линий	294
Описание длинных линий.....	294
Дифференциальные уравнения длинной линии.....	296
Волны в длинной линии в режиме гармонических колебаний.....	299
Подключение нагрузок к линиям без потерь	302
Уравнения передачи для фрагмента длинной линии.....	302
Входное сопротивление отрезка длинной линии.....	304
Коэффициент отражения.....	305
Распределение амплитуд напряжения и тока вдоль линии.....	307
Коэффициенты стоячей волны и бегущей волны	308
Режимы стоячих волн.....	310
Импедансы в сечениях длинной линии	314
Измерение и вычисление импедансов вдоль линии	314
Круговые диаграммы сопротивлений и проводимостей	317
Согласование длинных линий с нагрузками.....	321
Частотные искажения в рассогласованной линии	321
Согласование четвертьволновым трансформатором	322
Шлейф, согласование шлейфом и трансформатором.....	324
Одношлейфное согласование	324
Процессы в линиях с малыми потерями	326
Гармонические колебания в длинной линии с потерями	326
Передача энергии, КПД отрезка длинной линии	329
Колебательные контуры на отрезках длинных линий.....	330
Контрольные вопросы и практические задания	332
8. Компьютерное моделирование электрических цепей	334
Системы компьютерного моделирования.....	335
Среда моделирования Multisim	335
Выбор компонентов, настройка значений	337
Виртуальная измерительная лаборатория	340
Имитация измерительной аппаратуры.....	340
Моделирование осциллографических измерений	342
Моделирование измерения частотных характеристик	344
Контрольные вопросы и практические задания	345
Литература	347
Алфавитный указатель.....	349

Предисловие

В учебнике представлены начальные, базовые разделы дисциплин электротехнического, электронного, связного профилей. Именно *базовые разделы* – те, которые сегодня уместно считать *классическими*. Действительно, собранные здесь сведения формировались как результаты научных изысканий в двадцатом столетии и к нынешнему времени сложились в стройную систему знаний [1–3]. Учебные дисциплины, которые базируются на материале, собранном в книге, являются обязательными для многих специальностей, предусмотренных государственными образовательными стандартами среднего профессионального и высшего образования. И как бы ни именовались профессии, к какой бы группе направлений подготовки они ни относились – к *электротехнике, радиотехнике, электронике, телекоммуникациям, системам связи, приборостроению*, ко многим другим, для которых важны процессы в электрических, электронных цепях и в которых имеют дело с преобразованиями, обработкой сигналов, – будущие специалисты обязаны знать *базовые основы электротехники, электроники, схемотехники*.

При подготовке учебника решалась непростая задача – собрать в последовательное, логично связанное повествование именно то, что на сегодняшний день и применительно к обозримому будущему относится к основополагающим сведениям первостепенного значения. Для образовательных программ, на которые ориентирована книга, а именно – относящихся к интенсивно развивающимся отраслям техники, технологий, профессиональный труд в которых сопряжен с эксплуатацией высокотехнологичного оборудования, сложной аппаратуры, эта задача особенно актуальна. И чтобы решить ее лучшим образом, приходится тщательно выстраивать методические приемы, применять оригинальные подходы.

В последние годы методика обучения дисциплинам электрической, электронной тематики развивается под влиянием противоборствующих тенденций. С одной стороны, содержание этих дисциплин пополняется идейно новыми разделами, отражающими прогресс развития элементной базы и способов обработки сигналов. С другой стороны, временные рамки, отводимые в сетке аудиторных часов изучению электронной тематики, остаются прежними, иногда сужаются. Возникает непростая задача – дать больший набор знаний за меньшее время. Реально ли ее решить без ущерба для уровня подготовки? Ответ найти непросто. Однако следует к этому стремиться. Как? – Тщательно отбирая материал, отвечающий современному уровню развития науки, техники, технологий; аккумулируя проблемы в форме контрольных вопросов и задач; вводя разделы, помогающие освоить прогрессивные методы исследований и разработок. К таковым относится компьютерное моделирование в среде NI Multisim [4].

Программа NI Multisim используется здесь повсеместно для иллюстрации представленных в учебнике тем, ей посвящена специальная глава книги.

Методическая основа учебника базируется на современных тенденциях формирования профессиональных компетенций. Если в прежние годы многие усилия «взаимодействующих сторон» – преподавателей и студентов – тратились на выработку и шлифовку навыков выполнения сложных расчетов «вручную», сегодня есть мощное подручное средство анализа процессов, вычислений – компьютер. Уход от рутинных операций выводит на первые позиции выяснение физической сути происходящих в электрических и электронных системах процессов, формирование умений анализировать преобразования сложных сигналов электронными устройствами. Но вот проблема – для этого необходимо знать основные разделы высшей математики. Ведь *классика теории цепей и сигналов* сложилась в стройную, взаимосвязанную и, уместно сказать, красивую систему постольку, поскольку базируется на весьма сложном и разнообразном математическом аппарате. Здесь используются: высшая алгебра, функциональные ряды, интегральные преобразования, теория дифференциальных уравнений, теория функций комплексной переменной, теория случайных процессов. Это – разделы программ высшей математики. Но как быть при изучении насыщенной математикой электронной тематики в аудиториях колледжей, младших курсов университетов? Чтобы ослабить, преодолеть проблемы математического характера, автору учебника приходится по ходу изложения тщательно контролировать меру сложности раскрытия тем, осторожно ее углубляя. Если какие-то математические выкладки покажутся чрезмерно сложными, можно их опустить. Считайте, что их функция – теоретически обосновывать возникновение и развитие процессов, характер явлений. Но саму суть явления обязательно нужно постигнуть. Эффективно этому помогает компьютерное моделирование. Войдите в среду Multisim, соберите на «монтажной панели» (мониторе компьютера) цепь, электронное устройство, подключите источники энергии, генераторы сигналов, измерительные приборы, щелкните на кнопке «пуск», и процесс развернется на экране компьютера. Анализ компьютерной модели радикально облегчит понимание физики явления, наглядно представит картину возникновения и развития процесса.

Смею надеяться, что раскрытое вами собрание учебных материалов сложилось в уравновешенный по содержанию и объему учебник, доступный для понимания, освоения без избыточных усилий и учащимся колледжей, и студентам младших курсов университетов, академий, военных училищ. Изучению представленных в учебнике тем способствуют многочисленные контрольные вопросы и практические задания, приведенные в конце каждой главы. Некоторые из них имеют характер тестовых задач, другие могут использоваться как курсовые расчетные задания.

Юрий Николаевич Новиков

1. Основы описания и анализа систем с электрическими токами

■ Основные понятия и законы теории цепей

Ток и напряжение, электрическая цепь, схема цепи. Сосредоточенные и распределенные параметры. Опорные, или условные положительные, направления. Мгновенная мощность

■ Активные и пассивные элементы цепей

Идеальные пассивные элементы. Реальные пассивные элементы цепей, схемы замещения. Индуктивно связанные катушки, трансформатор. Источники тока и напряжения

■ Структура цепи, уравнения процессов в цепях

Основные понятия структуры электрической цепи. Задачи анализа и задачи синтеза. Законы Кирхгофа – структурные законы теории цепей. Уравнения процессов в цепях, принцип суперпозиции. Стационарные состояния и переходные процессы в линейных цепях. Нелинейные элементы и цепи.

■ Методы анализа цепей с постоянными токами

Метод контурных токов. Метод узловых потенциалов. Метод эквивалентного источника

■ Контрольные вопросы и задачи

■ Задание «Анализ цепей с постоянными токами»

Ключевые слова, термины

цепь, границы понятия цепь/ элементы, компоненты цепей/ полюсы, двухполюсники, многополюсники/ опорные направления/ компонентные соотношения/ мгновенная мощность/ активные и пассивные элементы цепей/ непрерывность токов через индуктивности, напряжений на емкостях/ сопротивление, резистор/ емкость, конденсатор/ индуктивность, катушка индуктивности/ взаимная индуктивность, трансформатор/ эквивалентность представлений источников электрической энергии/ независимые и зависимые источники тока и напряжения/ структура электрической цепи, ветви, узлы, контуры/ законы Кирхгофа (для узлов, для контуров)/ необходимое число уравнений задачи анализа/ баланс мощностей/ принцип суперпозиции/ линейные и нелинейные элементы и цепи/

Основные понятия и законы теории цепей

Понятия, термины, рассмотренные в этой главе, – основа дисциплины. При изложении материала учтено, что физические основы электромагнетизма изучаются по программе дисциплины «Общая физика».

Ток и напряжение, электрическая цепь, схема цепи

Электрическим током называют движение носителей электрических зарядов (q) положительного или отрицательного знака. Например, в полупроводниках это *электроны* (отрицательно заряженные частицы) или *дырки* (аналоги частиц с положительным зарядом). *Направлением тока* договорились считать то направление, в котором движутся положительные заряды. Ток бывает *постоянным* или *переменным* – изменяться во времени, в том числе менять знак. Для оценки количества тока используют понятие *сила тока* (i). Если за промежуток времени Δt через некое сечение перетекает количество электричества (количество зарядов) Δq , *мгновенное значение силы тока* (значение в фиксированный момент времени) вводим отношением приращений заряда и времени: $i = \Delta q / \Delta t$, или, используя понятие производной, пишем: $i = dq / dt$. Таким образом, сила тока равна скорости изменения заряда. Отметим, что термин *ток* используют и как *физическое понятие*, и как *синоним силы тока*.

Ток, порожденный движением носителей электрических зарядов в проводящей среде (в частности, по проводам), называют *током проводимости*. В теории электромагнетизма при рассмотрении переменных во времени электромагнитных полей в вакууме и диэлектрических средах используют понятие *тока смещения*. В вакууме *ток смещения* возникает при изменении силы электрического поля и не сопровождается движением каких-либо зарядов. В диэлектриках ток смещения дополнительно отражает смещение зарядов, связанных с молекулами диэлектрика. Ток смещения замыкает путь протекания переменного тока через вакуум или диэлектрик. Все цепи, рассматриваемые далее, обладают важной особенностью – при описании протекающих в них процессов удается обходиться *током проводимости*.

Напряжение, падение напряжения, (u) между двумя точками (*полюсами*) 1 и 2 есть разность электрических потенциалов (φ) в этих точках:

$$u_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 \text{ или } u_{21} = \varphi_2 - \varphi_1 = -u_{12}.$$

(*Полюсами* называют выводы, клеммы, зажимы, которые используют для подключения элементов к цепи. Элемент с двумя полюсами называют *двунополюсником*.) Напряжение – скалярная величина положительного или отрицательного знака, численно равная работе, совершаемой при переносе единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2.

Электрическая цепь – совокупность соединенных определенным образом элементов, устройств, объектов, проводов, образующих путь для

электрического тока. Состояние электромагнитных процессов в цепи однозначно определяется *значениями токов в проводах и напряжениями на выводах элементов*, из которых цепь составлена.

Отдельные элементы, или *компоненты*, выполняют в цепи разные функции – выступают, например, источниками, потребителями, накопителями электрической энергии. Это влечет специфические, зависящие от природы конкретных элементов, соотношения между током и напряжением на полюсах. Удобно считать, что физические явления, характерные для элемента, заключены в пространство между его полюсами и вовне проявляются только через *компонентные соотношения* [3] – формулы, связывающие токи и напряжения. Двухполюсники, многополюсники, для которых определены *компонентные соотношения*, относят к виду *элементы с сосредоточенными параметрами*.

Для токов в соединительных проводниках и напряжений на различных элементах цепи составляют уравнения, описывающие процессы в электрической цепи *заданной структуры*. Уравнения такого вида называют *структурными* [3].

ФРАГМЕНТ ЦЕПИ КАК ДВУХПОЛЮСНИК

Фрагмент цепи, составленный из многих элементов, можно представить двухполюсником. Соотношение компонентного типа – связь тока и напряжения на его полюсах – следствие структурных уравнений, а также компонентных соотношений, свойственных элементам, из которых фрагмент цепи составлен.

Электрическая схема – графическое изображение электрической цепи. Схема показывает, из каких элементов составлена цепь и как они связаны. Соединительные линии на схеме – аналог идеально проводящих проводов. Элементы, из которых цепь составлена, представляют на схеме идеализированными моделями (элементами схемы). Таковыми являются: для *резистора* – *сопротивление*, для *конденсатора* – *емкость*, для *катушки индуктивности* – *индуктивность*. Для разных элементов схемы предусмотрены соответствующие условные графические обозначения.

В электротехнике, электронике используют разные виды схем: *принципиальные* – на них показывают функциональные элементы цепи и связи между ними; *монтажные* – это чертежи расположения деталей и соединительных проводов на монтажных платах; *расчетные, эквивалентные схемы*, или *схемы замещения*, – на них представляют модели отдельных элементов, устройств и функциональные связи, отвечающие применяемому методу анализа. Довольно часто цепи, содержащие диоды, транзисторы, интегральные микросхемы, прочие подобные элементы, называют *электронными цепями*, а соответствующие им схемы – *электронными схемами*. Принципиального различия в этих наименованиях для рассматриваемого в учебнике круга вопросов по существу нет, и поэтому везде далее по тексту понятия *электрические* и *электронные цепи*, а также *электрические* и *электронные схемы* следует воспринимать синонимами.

Ток и напряжение – объекты анализа процессов в цепях

Исходим из постулата: для двухполюсников *с сосредоточенными параметрами* применительно к любому моменту времени справедливо:

- ток, втекающий в один полюс, равен току, вытекающему из другого;
- напряжение на элементе однозначно определяется разностью потенциалов полюсов и не зависит от пути переноса заряда.

Но сколь правомочны эти положения? Для изменяющихся во времени полей строгое следование законам электродинамики требует учитывать, что скорость распространения электромагнитного поля имеет конечное значение (для вакуума – это скорость света: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$). Если учитывать, что передача электромагнитного возмущения не является мгновенной, ток в разных сечениях элементов, вообще говоря, не будет одинаковым, а работа по переносу заряда из одной точки в другую (напряжение на элементе) окажется разной, зависящей от пути переноса заряда. В таком случае введение понятий *ток, напряжение* не имеет практического смысла, поскольку придется иметь дело непосредственно с электрическими и магнитными полями. Однако теоретики электромагнетизма нашли выход. Они ввели *условие квазистационарности электромагнитного поля* [5]. И на его основании сформулировали важнейшее положение теории электромагнетизма – *квазистационарное приближение*. Оно позволяет свести уравнения Максвелла к законам, описывающим электромагнитные процессы в системе всего лишь двумя понятиями: *ток и напряжение*. И именно такую систему, в которой все электромагнитные процессы исчерпывающе описываются поведением только двух физических переменных – *напряжение и ток*, – называем *электрической цепью*.

Условие квазистационарности можно понимать так: *размеры элементов, фрагментов цепи должны быть существенно меньше длин волн, соответствующих частотам изменения токов и напряжений*. Предположим, что в устройстве, максимальный размер которого D , а токи и напряжения заметно меняются за время T , выполняется неравенство $D/c \ll T$ (здесь c – скорость света). Это неравенство можем интерпретировать как *условие квазистационарности*. Из него следует, что токи и напряжения допустимо считать неизменными в течение времени, за которое возмущение электромагнитного поля распространяется по устройству. Если ввести характерную длину волны переменного электромагнитного процесса формулой $\lambda = cT$, несложно трансформировать условие $D/c \ll T$ в соотношение $D \ll \lambda$. Теперь можем сформулировать квазистационарное приближение так: *размер устройства должен быть много меньше λ – характерной длины волны процесса*.

Будем полагать: для рассматриваемых далее цепей, состоящих из резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, трансформаторов, диодов и прочих разнообразных двухполюсников и многополюсников,

условие квазистационарности выполняется. Это означает, что протяженность каждого элемента в пространстве не влияет на выполняемые ими функции. Важны только их электрические характеристики: *компонентные соотношения*, которые влекут определенные параметры. Такие элементы подобны «точечным» – локально *сосредоточенным*. Для них используют понятие *элементы с сосредоточенными параметрами*.

Природа электрических процессов такова, что по мере увеличения частоты сигналов размеры обрабатывающих, преобразующих сигналы устройств, как правило, уменьшаются. Поэтому, если речь не идет о процессах, для которых существенны явления излучения (например, для антенн), и если не рассматривается передача энергии на расстояния, пре-восходящие длину волн, вполне допустимо, анализируя самые разнообразные системы, оставаться в рамках понятий: *цепи с сосредоточенными параметрами, токи, напряжения*.

ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ УСЛОВИЯ КВАЗИСТАЦИОНАРНОСТИ

Электронный блок размером с ладонь обрабатывает сигналы FM-радиостанций. Характерная частота FM-диапазона 100 МГц, длина волны 3 метра. Поскольку размеры и блока, и его фрагментов заметно меньше трех метров, условие квазистационарности здесь выполняется, следовательно, можем анализировать процессы в данном устройстве, используя понятия цепь, ток, напряжение. При этом и блок, и его элементы следует считать объектами с сосредоточенными параметрами. Однако для расчета кабелей, передающих сигналы FM-диапазона на блоки, удаленные на несколько метров, нужно учитывать волновые процессы.

Среди систем с электромагнитными процессами, для которых условие квазистационарности не выполняется, выделяют *цепи с распределенными параметрами*. Слово «цепь» здесь означает, что для описания процессов в таких системах, в том числе характеризующихся волновыми явлениями, удается использовать понятия квазистационарного приближения: *напряжение и ток*. В теории электричества объектами такого рода являются *длинные линии*. Это – цепи, размеры которых в продольном направлении сравнимы с длиной волны λ и могут заметно её превосходить. Важно, что в поперечном сечении расстояние между проводами длинных линий много меньше λ . При этих условиях удается анализировать распространение волн *токов и напряжений* вдоль проводов линий.

Может случиться, что к цепи с сосредоточенными параметрами подключен элемент, для которого условия квазистационарности не выполняются, например, антенна. Хотя электромагнитные явления в антенне описывают уравнениями электродинамики, для анализа процессов во внешней по отношению к ней цепи, антенну в точках её включения в цепь можно представить эквивалентным двухполюсником. Если сформулированы компонентные соотношения, связывающие ток и напряжение на полюсах этого элемента, он органично впишется в структуру цепи с сосредоточенными параметрами.

Опорные, или условные положительные, направления

Ток – скалярная величина положительного или отрицательного знака. Анализируя процессы в электрических цепях, знак тока связывают

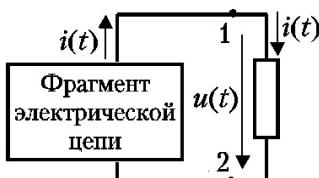


Рис. 1.1. Опорные направления для тока и напряжения

жительных зарядов) в данный момент совпадает с указанным направлением отсчета. Если значение тока оказалось отрицательным, истинное направление тока противоположно *опорному* или (синоним) *условному положительному направлению*, указанному стрелкой.

Знак напряжения также связывают с заранее выбранным условным направлением отсчета. Стрелку *условного положительного направления* для напряжения чертят между какими-либо точками (полюсами) схемы. Если при решении задачи получилось, что в некий момент времени значение напряжения положительно, это означает, что потенциал точки, от которой отходит стрелка, в данный момент времени выше потенциала точки, на которую стрелка указывает. Направления отсчета напряжения задают также порядком чередования подстрочных индексов. Если оказалось, что напряжение $u_{12} > 0$, это означает, что потенциал точки 1 выше потенциала точки 2. Иногда направления отсчета напряжения задают указанием знака «плюс» около полюса с высоким (условно) потенциалом и знака «минус» около полюса с низким (условно) потенциалом.

Важно: *опорные направления выбирают произвольно*. Выбор направлений не влияет на суть происходящих в цепи процессов, но задает вид соотношений, связывающих токи и напряжения на участках цепи. Если направления отсчета напряжения и тока выбирают для какого-либо элемента совпадающими, – реализуют случай *согласованных направлений*. Для другого элемента эти же стрелки могут оказаться *несогласованными*. Иллюстрация на рис. 1.1 – по отношению к полюсам фрагмента цепи, находящегося слева, условные положительные направления для тока и напряжения являются несогласованными.

Мгновенная мощность

Рассмотрим двухполюсник, имеющий в некий момент времени t напряжение между полюсами $u(t)$. Пусть через него переносится количество электричества Δq . На это тратится *порция энергии* $\Delta W = u(t)\Delta q$. (Считаем, что опорные направления переноса положительных зарядов и отсчета напряжения $u(t)$ совпадают.) Отданную двухполюснику энергию

на интервале от начала отсчета времени ($t = 0$) к моменту t найдем, вычислив интеграл:

$$W(t) = \int_{q(0)}^{q(t)} u(t) dq = \int_0^t u(t) \frac{dq}{dt} dt = \int_0^t u(t) i(t) dt.$$

Здесь $q(t)$ – количество электричества, прошедшее через выводы двухполюсника к моменту t . Скорость изменения энергии характеризуют *мгновенной мощностью* $p(t) = \Delta W / \Delta t$, или: $p(t) = dW/dt = u(t)i(t)$. Таким образом, при согласованных направлениях тока i и напряжения u мгновенная мощность для участка электрической цепи есть произведение силы тока и напряжения. Если приписанные двухполюснику условные положительные направления (стрелки тока и напряжения) противоположны, мгновенная мощность $p(t) = -u(t)i(t)$. Констатируем: при совпадении действительных (а не условных) направлений тока и напряжения мгновенная мощность положительна. Это означает прирост энергии, следовательно, двухполюсник (участок цепи) поглощает энергию. Если действительные направления тока и напряжения противоположны, мгновенная мощность отрицательна – участок цепи отдает энергию.

Активные и пассивные элементы цепей

В электрической цепи обычно присутствуют как источники, так и потребители энергии, а также элементы, способные накапливать и отдавать энергию, их называют *реактивными*. Источники энергии относят к *активным элементам* цепи. Источники вырабатывают энергию за счет действия *сторонних* (по отношению к цепи) сил, которые могут иметь разное происхождение: химическое, механическое, тепловое, электрическое, прочее. К активным элементам относят также устройства, превращающие один вид электромагнитной энергии в другой. Пример: транзисторы, используемые в генераторах и усилителях колебаний. Транзисторы в совокупности с подключенными к ним источниками постоянного напряжения пополняют цепь энергией, то есть выполняют функцию, свойственную активным элементам.

Элементы цепи, которые могут только поглощать или накапливать энергию, поступающую в цепь, а затем возвращать её, называют *пассивными*. Часто в цепи есть особый пассивный элемент, отличающийся от прочих тем, что поглощаемую им энергию считают *полезной*. Такой элемент принято называть *нагрузкой*.

Идеальные пассивные элементы

Рассмотрим идеализированные модели пассивных элементов цепей. Для них характерно выполнение определенных функций: *сопротивление* отображает преобразование электрической энергии в энергию другого вида (например, в тепло, излучение, механическую работу), *емкость*

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru