

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт ядерной энергии и промышленности

С.В. Гайдук, В.Е. Моряков, П.В. Бугаева

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Лабораторные работы
с использованием математического пакета
MATLAB в среде *WINDOWS*

Часть 3

Рекомендовано
Учебно-методическим советом института
в качестве учебно-методического пособия
для студентов направления подготовки 140400
«Электроэнергетика и электротехника»,
профиль подготовки «Электроснабжение» 140400.62-07

Севастополь
2015

621.3.01
Г 124
УДК 621.3.01 (076.5)

Рецензенты: А.М. Олейников
А.В. Углов
Научный редактор В.Е. Моряков

Гайдук С.В., Моряков В.Е., Бугаева П.В

Г 124 Теоретические основы электротехники. – Ч.3. Лабораторные работы: учеб.-метод. пособие. – Севастополь: ФГБОУВО «СевГУ», 2015. – 36 с.: ил.

Содержатся описания лабораторных работ, выполняемых при изучении третьей части курса «Теоретические основы электротехники».

Данное пособие предназначено для студентов очной и заочной формы обучения электротехнических специальностей.

© Издание ФГБОУВО «СевГУ», 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Введение	5
Лабораторная работа № 1. Переходные процессы в RL и RC-цепях с постоянным источником ЭДС	11
Лабораторная работа № 2. Переходные процессы в RLC-цепи с постоянным источником ЭДС	22

ПРЕДИСЛОВИЕ

Изучение теоретических основ электротехники в соответствии с федеральными государственными стандартами предусматривает практическое освоение студентами экспериментальных методов исследования электрических цепей, формирование компетенций, умений и навыков проектирования электрических приборов и устройств.

Целями лабораторного занятия является закрепление знаний, полученных студентами при изучении теоретических положений курса, обучение методам экспериментальных исследований, привитие навыков научного анализа и обобщения полученных результатов.

Работа в лаборатории является основным видом занятий, позволяющим получить практические навыки по эксплуатации и проектированию электрооборудования и производству электрических измерений. Лабораторные занятия способствуют развитию у студентов творческой инициативы и самостоятельности в работе.

В пособии содержатся описания лабораторных работ по курсу «ТОЭ», раздела исследования переходных процессов в электрических цепях с сосредоточенными параметрами. В каждой работе указаны тема, учебные цели, задание для подготовки к лабораторному занятию, программа выполнения, рекомендации по оформлению отчета, краткая теоретическая справка. После выполнения работы в лаборатории студентам рекомендуется выполнить моделирование этой же работы в программной среде Matlab Simulink в компьютерном классе или на домашнем компьютере. В помощь к такому заданию приведено описание использования среды Matlab Simulink.

Раздел описания программной среды был написан в совместной работе со студентами ИЯЭиП В. Шабалиным и К. Штепой. Компьютерный лабораторный практикум в программной среде Matlab Simulink поможет студентам закрепить знания теории, овладеть эффективной программой моделирования и получить практические навыки расчёта и исследования электрических цепей. Для самоконтроля в конце каждого описания лабораторной работы предлагается перечень контрольных вопросов. Кроме того, в пособии изложены необходимые сведения по технике безопасности.

ВВЕДЕНИЕ

1. Методические указания по проведению лабораторных работ

При проведении лабораторных работ по курсу «Теоретические основы электротехники» перед студентами ставятся следующие задачи:

- научиться собирать электрические схемы соединений элементов R , L , C , регулирующих устройств, трансформаторов, измерительных приборов и т.д.;
- углубить знания физических процессов, протекающих в электрических цепях при переходных режимах;
- изучить рабочие свойства основных элементов электрических цепей;
- получить навыки по проведению измерений в электрических цепях.

В электротехнической лаборатории для выполнения лабораторных работ студенты класса разбиваются на отдельные группы по 2–3 студента (в зависимости от числа рабочих мест) во главе со старшим. Каждая группа в соответствии с программой работы проводит исследование электрической цепи. Чтобы добиться качественного и организованного проведения лабораторных исследований, каждый студент должен к ней подготовиться в часы самостоятельных занятий. Эта подготовка заключается в следующем:

- в ознакомлении с целью и программой работы;
- в повторении теоретического материала;
- подготовке отчёта к лабораторной работе.

Подготовленность студента проверяется руководителем (преподавателем) занятия путем устного опроса или на ПЭВМ в течение 10...15 мин перед началом занятия. Неподготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются, по указанию руководителя приступают к изучению необходимого материала и подвергаются дополнительной проверке. Если студент не успевает выполнить весь объем работы в плановые часы, то обязан сделать это в часы самостоятельных занятий под руководством инженера.

Получив разрешение на работу, студенты под руководством инженера должны, прежде всего, ознакомиться с используемыми в лабораторной работе элементами схемы, далее приступают к сборке схемы. Схема после сборки должна быть тщательно проверена самими студентами. Собранная и проверенная схема предъявляется преподавателю или инженеру для проверки и только с их разрешения может быть включена под напряжение.

Затем следует приступить к выполнению программы работы в порядке и в соответствии с указаниями, изложенными в настоящем пособии. Каждая группа студентов при выполнении работы ведет протокол **наблюдений**.

Особое внимание следует обратить на осмысленное, а не механическое выполнение каждой операции, стремиться понять физическую сущность происходящих в электрических цепях явлений. После выполнения задания студенты предъявляют результаты работы инженеру и с его разрешения разбирают схему. Далее приступают к оформлению отчетов.

При выполнении графической части отчета необходимо соблюдать следующие правила.

1. Выполняя построение графика функциональной зависимости между двумя переменными, значение аргумента откладывать на оси абсцисс, а значение функции – на оси ординат.

2. Масштабы для аргумента и функции выбирать так, чтобы в 1 см содержалось 1, 2, 5, 10 единиц или кратные этим цифрам значения.

3. На координатных осях наносить только шкалы, соответствующие выбранным масштабам. При этом буквенные обозначения величин должны быть нанесены у концов осей: аргумента – выше оси абсцисс, а функции – правее оси ординат. Числовые значения величин соответственно – ниже оси абсцисс и левее оси ординат. Если совмещаются зависимости нескольких функций от одного аргумента, то параллельно оси ординат наносится соответствующее число масштабных линий.

4. Опытные данные наносить на график в виде отчетливых точек, кружков или звездочек (для каждой кривой свои обозначения). По точкам и между точками проводится плавная кривая или прямая, выражающая функциональную зависимость; не лежащие на этой линии точки чаще всего свидетельствуют о погрешности измерения, наблюдения или расчета.

5. Размер графиков не должен быть меньше 10 x 10 см². При необходимости в бланк отчета можно вклеивать дополнительные листы с графиками.

В выводах по работе необходимо сделать конкретный анализ полученных результатов по каждому пункту программы. При этом следует указать, какие явления или процессы наблюдались, и каковы причины их возникновения, охарактеризовать измерительную технику, отметить особые свойства элементов схемы, дать оценку их эксплуатационным качествам.

2. Основные правила техники безопасности при проведении лабораторных работ

Непосредственной причиной поражения человека при электротравме является электрический ток. Степень физиологического воздействия электрического тока определяется в основном его величиной, частотой, длительностью протекания и зависит от пути тока через тело человека. Наиболее вероятные пути тока: «рука-рука», «рука-ноги», «нога-нога».

При этом сопротивление тела на пути тока колеблется в широких пределах и зависит от многих факторов, в том числе от влажности и чистоты кожи, от общего состояния человека, от величины поверхности соприкосновения и плотности контакта и пр.

Принято считать, что сопротивление тела человека в среднем равняется 1 000 Ом. В качестве допустимого безопасного синусоидального тока промышленной частоты 50 Гц при длительном воздействии принимается величина 30 мА.

В лаборатории напряжение сети имеет величину до 380 В, оно является безусловно опасным для жизни, а при определенных условиях может оказаться смертельным. Поэтому при выполнении лабораторных работ студенты обязаны строжайшим образом выполнять следующие правила техники безопасности.

1. Запрещается включать схему под напряжение без разрешения преподавателя или лаборанта.

2. При включении схемы под напряжение убедиться, что никто не касается токоведущих элементов схемы, и предупредить находящихся вблизи командой «ВКЛЮЧАЮ!».

3. Нельзя касаться руками голых токоведущих частей (оголенных проводов и контактов, обмоток проволочных реостатов и т.д.) когда цепь находится под напряжением.

4. Категорически запрещается делать какое бы то ни было переключение или изменение в схеме, когда она находится под напряжением.

5. Включение цепи, переключения проводов и выключателей, перемещение движков реостатов производить одной рукой, не касаясь другой металлических и плохо изолированных частей.

6. При работе с открытыми пускорегулировочными реостатами, переключателями, приборами и т.п., а также вблизи распределительных щитков следует соблюдать осторожность, чтобы не замкнуть контакты бляхой поясного ремня и другими металлическими предметами.

7. При работе с электрическими цепями, содержащими катушки индуктивности и конденсаторы, следует помнить, что при резонансах напряжения и токи на отдельных участках таких цепей могут значительно превысить номинальные значения, и что конденсаторы длительное время сохраняют заряд.

8. При возникновении каких-либо ненормальностей в лабораторной установке, а также при исчезновении напряжения немедленно отключить схему и доложить преподавателю или лаборанту.

9. Категорически запрещается производить какие-либо включения, и переключения на щитках и установках, не входящих в комплект оборудования выполняемой лабораторной работы.

10. На рабочем месте не должно быть никаких посторонних предметов.

11. Запрещается выполнять лабораторную работу сидя и облокотившись на используемое оборудование и элементы лабораторной установки.

Студенты, изучившие правила техники безопасности, расписываются в специальном журнале у инженера лаборатории и только после этого допускаются к выполнению лабораторных работ.

При попадании человека под напряжение необходимо:

- если пострадавший находится в сознании, обеспечить ему полный покой;

- вызвать врача;

- при отсутствии у пострадавшего сознания, но при сохранившемся дыхании создать приток свежего воздуха, дать ему понюхать нашатырный спирт, обрызгать водой;

- при отсутствии у пострадавшего сознания, дыхания и пульса **НЕМЕДЛЕННО** начать делать искусственное дыхание и непрямой массаж сердца и продолжать их непрерывно до прибытия врача.

3. Применение среды Matlab Simulink

Рассмотрим применение среды Matlab R2014a (следует отметить, что в более ранних версиях элементы библиотеки Simulink могут не совпадать) для анализа лабораторных работ будем использовать библиотеку Simscape->SimpPowerSystems->Specialized Technology (рис. 1).

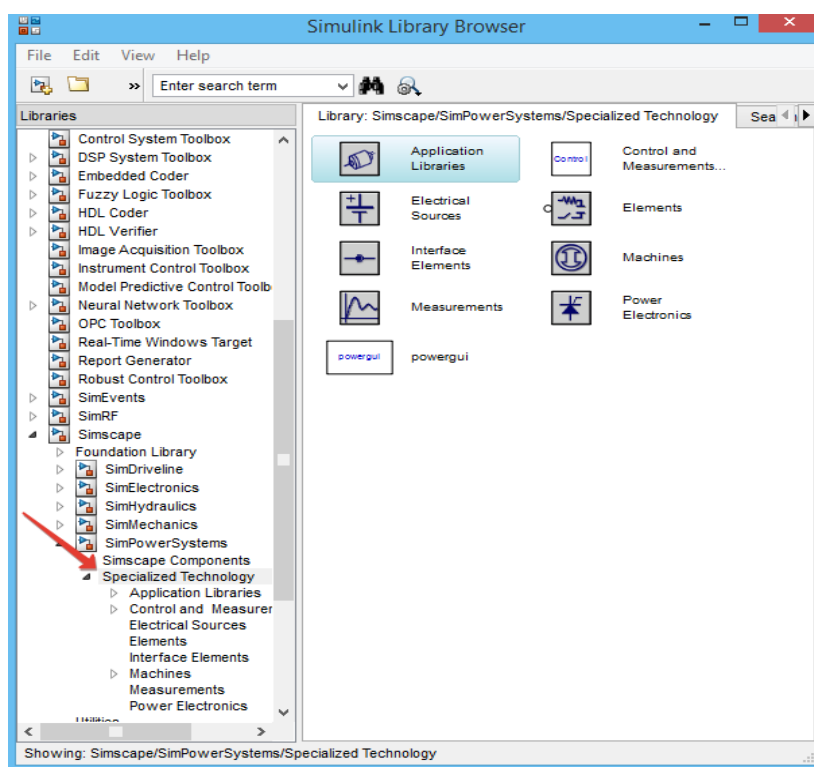


Рис. 1

Блоки, необходимые для моделирования схемы лабораторной работы.

1. Блок-источник постоянного напряжения (Simscape->SimpPowerSystems-> Specialized Technology->Electrical Sources) (рис. 2).

DC Voltage Source-источник постоянного напряжения

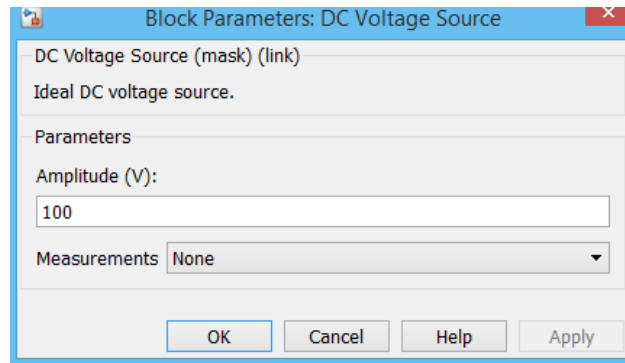


Рис. 2

Amplitude – Амплитуда напряжения. Measurements – измерительные нормативы. Имеет данные для снятия Voltage – измерение напряжения.

2. Блоки - параметры цепи R, L, C. Для их использования выбираем Simscape->SimpPowerSystems->Specialized Technology->Elements Series RLC (рис. 3).

Branch – последовательное соединение сопротивления.

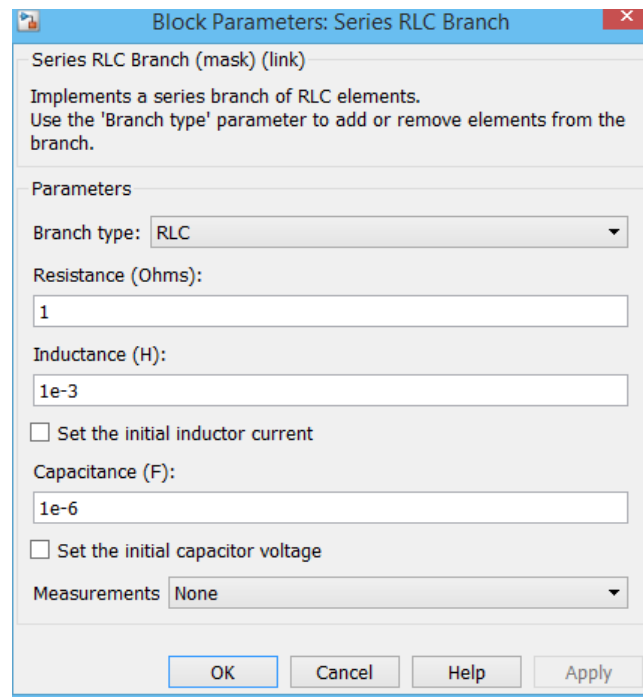


Рис. 3

Branch type – тип сопротивления, отсюда выбирают параметры RL, RC, LC, R, C, **L**.

Resistance – активное сопротивление, измеряемое в Омах;

Inductance – индуктивность в Генри;

Capacitance – емкость в Фарадах соответственно.

Кроме того, из библиотеки (Simscape->SimpPowerSystems->Specialized Technology->Elements) выбираем *Breaker* – ключ, необходимый для коммутации (рис. 4).

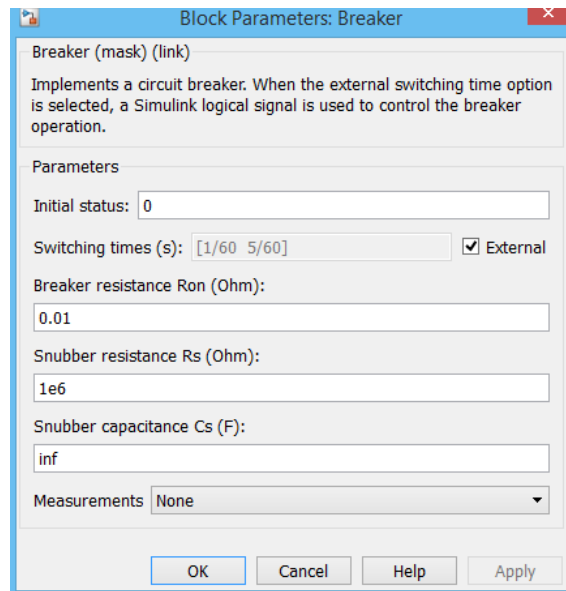


Рис. 4

Initial status – первоначальное положение ключа: 0 – ключ разомкнут; 1 – ключ замкнут.

Switching times – время коммутации измеряется в секундах.

Breaker resistance Ron – сопротивление ключа измеряется в Омах (данный параметр не может равняться нулю, ему надо установить очень маленькое значение чтобы уменьшить потери).

Snubber resistance – сопротивление демпфера, измеряемое в Омах, необходимо устанавливать более высокое или же оставить стандартное. При последовательном соединении индуктивности если параметр L будет установлен 0 то схема работать не будет.

Snubber capacitance – емкость демпфера, измеряемое в Омах необходимо оставить стандартное, чтобы не было учета потерь.

Если ключ не соединен с катушкой, то параметры сопротивления и емкости демпфера устанавливают 0.

Measurements – измеряемые величины, проходящие через ключ, могут принимать как значения токов, так и значения напряжения.

Измерительные приборы (Simscape -> SimpPowerSystems -> Specialized Technology -> Measurements).

Voltage measurement – измеритель напряжения или вольтметр.

Осциллограф Scope (Simulink-> Skins) – измеряет мгновенные значения токов и **напряжений**.

Лабораторная работа № 1

Переходные процессы в RL и RC - цепях с постоянным источником ЭДС

1.1. Цель работы

1. Исследовать переходные процессы в электрической RL и RC - цепи при включении и выключении ее на постоянное напряжение.
2. Исследовать влияние параметров цепи на скорость переходного процесса.

1.2. Схема лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. Электрическая схема лабораторной установки для исследования переходных процессов в RL и RC- цепях изображена на рис. 1.1.

В состав лабораторной установки входит магазин емкостей C1, магазин сопротивлений R17 и индуктивность L2.

В качестве источника ЭДС используется генератор прямоугольных импульсов напряжения (ГПИ).

График выходного напряжения ГПИ приведен на рис. 1.2.

Выходное напряжение генератора представляет собой прямоугольный импульс.

Амплитуда выходного напряжения ГПИ равна 5 В, длительность импульса $T_1 = 100$ мс, период следования импульсов $T = 200$ мс.

Длительность импульсов и период следования импульсов подобраны таким образом, что T_1 и T намного больше времени протекания переходных процессов в исследуемых RL- и RC-цепях.

Такой прием позволяет исследовать переходные процессы вызванные как включением исследуемой цепи на напряжение 5 В (передний фронт импульса ГПИ), так и переходные процессы вызванные отключением исследуемой цепи от напряжения 5 В (задний фронт импульса ГПИ).

Для наблюдения напряжений на элементах исследуемой электрической цепи используется осциллограф на базе персонального

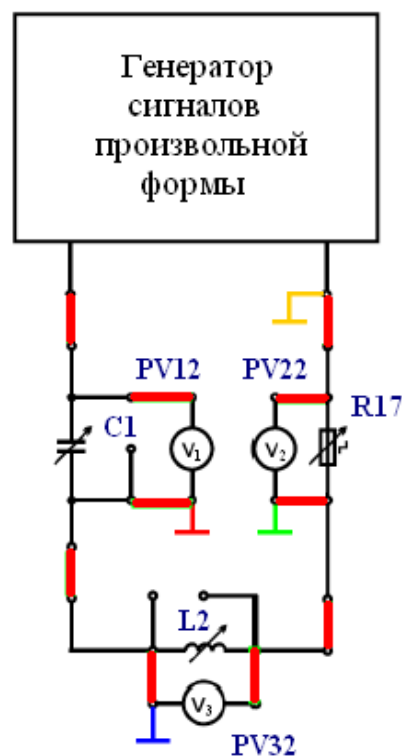


Рис. 1.1

компьютера, на схеме (см. рис. 1.1) измерительные каналы обозначены как PV12, PV22, PV32.

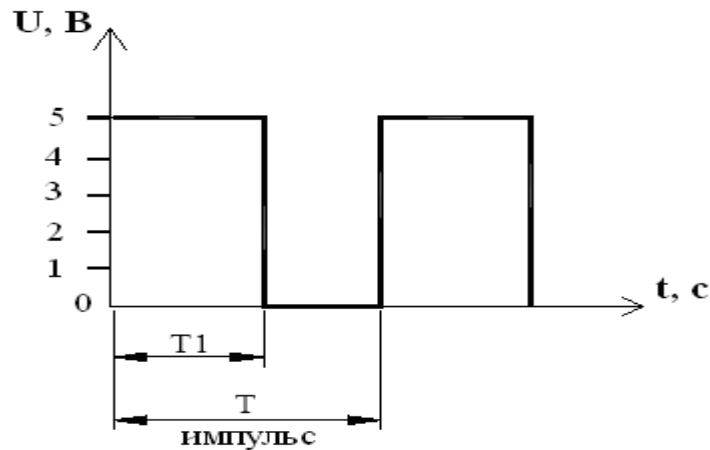


Рис. 1.2

- PV12 – используется для наблюдения напряжения на емкости $C1$;
- PV22 – используется для наблюдения напряжения на сопротивлении $R17$;
- PV32 – используется для наблюдения напряжения на индуктивности $L2$.

1.3. Основные теоретические положения

Переходные процессы возникают в электрических цепях при различных коммутациях и других воздействиях, т.е. воздействиях, приводящих к изменению режима работы цепи. Коммутации происходят при действии различного рода коммутационной аппаратуры, например ключей, переключателей для включения или отключения источника энергии при обрывах в цепи, при коротких замыканиях отдельных участков цепи и т.д.

Как и при расчете установившихся режимов, для расчета переходного процесса в электрической цепи необходимо все входящие в нее электротехнические устройства представить соответствующими моделями, т.е. схемами замещения, которые содержат резистивные, емкостные и индуктивные элементы, источники ЭДС и тока, а также коммутационные ключи.

Отметим, что физической причиной возникновения переходных процессов в цепях является наличие в них индуктивных и емкостных элементов. Объясняется это тем, что энергия магнитного и электрического полей этих элементов не может изменяться скачком при коммутации в цепи.

Режим цепи в течение переходного процесса описывается дифференциальными уравнениями, в общем случае неоднородными (если

в цепи есть источники ЭДС и тока) или однородными (если в цепи нет источников ЭДС и тока). Заметим, что переходный процесс в линейной цепи описывается линейными дифференциальными уравнениями, а в нелинейной – нелинейными дифференциальными уравнениями.

I закон коммутации утверждает, что *ток и потокосцепление в индуктивном элементе не могут изменяться скачком.*

Согласно **II закону коммутации**, *напряжение и заряд на зажимах конденсатора или другого емкостного элемента не может измениться скачком.*

Все катушки и обмотки электрических аппаратов и машин имеют сопротивление R и индуктивность L .

Поэтому исследуемую электрическую цепь, изображенную на рис. 1.3, можно считать эквивалентной схемой индуктивной катушки или обмотки, включаемой на постоянное напряжение.

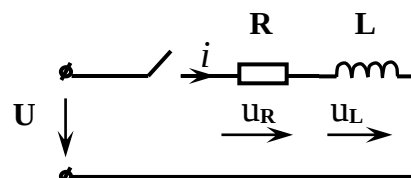


Рис. 1.3

В начальный момент времени тока в цепи нет и энергия магнитного поля индуктивной катушки равна нулю. После подключения цепи к источнику постоянного напряжения U в установившемся режиме в ней протекает ток I и энергия магнитного поля $LI^2/2 > 0$. Следовательно, в то время, когда происходит изменение энергии магнитного поля индуктивной катушки (от 0 до $LI^2/2$), в цепи протекает переходный процесс и существует переменный ток i .

Переходный процесс в такой цепи описывается дифференциальным уравнением (по второму закону Кирхгофа)

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U.$$

В результате решения получаем

$$i = I(1 - e^{-t/\tau}).$$

Величина $\tau = L/R$ имеет размерность времени и называется *постоянной времени* цепи. Она характеризует скорость протекания переходного процесса. Чем больше τ (больше L), тем дольше переходный процесс.

Падение напряжения на резисторе $u_R = Ri$ изменяется по такому же закону, что и ток. Падение напряжения на индуктивной катушке

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{I}{\tau} e^{-t/\tau} = L \frac{IR}{L} e^{-t/\tau} = U e^{-t/\tau},$$

то есть убывает с течением времени от значения напряжения источника питания до нуля.

Рассмотрим схему (рис. 1.4) в которой путем включения переключателя Π в положение 1 замыкают источник постоянного напряжения U на конденсатор емкостью C .

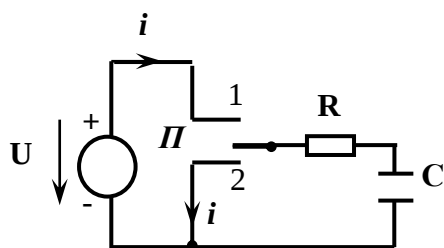


Рис. 1.4

На обкладках конденсатора начинают скапливаться заряды, и напряжение u_C увеличивается до значения, равного U . Это процесс зарядки конденсатора – процесс увеличения энергии электрического поля конденсатора, которая в конце процесса достигает значения $CU^2/2$.

Чтобы зарядить конденсатор до напряжения $u_C = U$, ему надо сообщить заряд $Q = CU$. Этот заряд не может быть сообщен мгновенно, так как для этого потребовался бы ток $i = \frac{dQ}{dt} = \frac{Q}{0} = \infty$.

В действительности зарядный ток в цепи ограничен сопротивлением R и в первый момент не может быть больше U/R . Поэтому процесс зарядки конденсатора растянут во времени и напряжение u_C на конденсаторе нарастет постепенно.

Для переходного процесса зарядки конденсатора, включенного по рассматриваемой схеме, можно записать

$$Ri + u_C = U.$$

Ток в такой цепи

$$i = \frac{d(Cu_C)}{dt} = C \frac{du_C}{dt}.$$

Подставив ток в уравнение $Ri + u_C = U$, получим

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U.$$

Рассмотрим конденсатор, который до включения переключателя Π в положение 1 (рис. 1.4) не был заряжен. По окончании процесса зарядки напряжение на конденсаторе равно напряжению источника питания U .

Напряжение в переходном режиме при зарядке конденсатора изменяется по закону

$$u_C = U(1 - e^{-t/\tau}).$$

$$\text{Ток } i = \frac{Ue^{-t/\tau}}{R}.$$

В начальный момент процесса зарядки ток в цепи ограничен только сопротивлением и при малом значении R может достигать больших значений $I_0 = \frac{U}{R}$. Переходный процесс, протекающий при зарядке конденсатора, используют в различных устройствах автоматики, например в электронных реле времени.

Постоянная времени $\tau = RC$ характеризует скорость зарядки конденсатора. Чем меньше R и C , тем быстрее заряжается конденсатор.

Если переключатель Π включить в положение 2 (см. рис. 1.4), то заряженный до напряжения U_C конденсатор начнет разряжаться через резистор R . Энергия электрического поля конденсатора будет постепенно расходоваться на нагревание резистора и окружающей среды.

По истечении некоторого времени установится режим, при котором напряжение на конденсаторе будет равно нулю (конденсатор полностью разряжен), а тока в цепи не будет.

Напряжение на конденсаторе при разрядке

$$u_C = U_C e^{-t/\tau},$$

а ток в цепи

$$i = -\frac{U_C e^{-t/\tau}}{R}.$$

Итак, напряжение и ток убывают по экспоненциальному закону. Ток в цепи отрицательный, т.е. направлен противоположно току во время процесса зарядки. Скорость разрядки конденсатора определяется постоянной времени $\tau = RC$.

Постоянную времени можно определить как промежуток времени, в течение которого конденсатор полностью зарядился (или разрядился) бы, если бы ток зарядки (или разрядки) оставался постоянным и равным начальному значению U/R или (U_C/R) .

1.4. Порядок проведения работы

1.4.1. Задание на подготовку к работе

1. **Задача 1.** По данным варианта табл. 1.1 определить через какое время после включения цепи с сопротивлением R и емкостью C на постоянное напряжение U , напряжение на конденсаторе достигнет значения U_1 .

Таблица 1.1

№ варианта	1	2	3	4	5	6
R , Ом	110	100	11	10	220	44
C , мкФ	100	25	10	2,5	200	40
U , В	220	200	22	20	440	88
U_1 , В	110	100	11	10	220	44

Задача 2. По данным варианта табл. 1.2 определить ток в цепи с параметрами R_1 , L , подключенной к источнику напряжения U , когда происходит внезапное уменьшение сопротивления от R_1 до R_2 (т.е. ключ замкнет некоторую часть резистора).

Таблица 1.2

№ варианта	1	2	3	4	5	6
R_1 , Ом	20	10	20	40	50	60
L , Гн	0,6	0,3	0,5	0,2	0,6	0,4
U , В	220	110	380	440	220	480
R_2 , Ом	12	6	18	20	30	45

2. В тетради для лабораторных работ подготовить бланк отчета по лабораторной работе, который должен содержать:

- название лабораторной работы;
- цель лабораторной работы;
- схему лабораторной установки (по ГОСТу и с учетом ЕСКД);
- задачи № 1, № 2;
- ответы на контрольные вопросы;
- таблицу для измеренных и вычисленных данных.

1.4.2. Задание на выполнение работы

1. Ознакомиться с элементами лабораторной установки, записать их номинальные данные в тетрадь для лабораторных работ.

2. Используя штатные перемычки, собрать электрическую цепь в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 1.1.

3. Предъявить собранную электрическую цепь преподавателю или лаборанту. Получить от них разрешение на включение ГПН.

4. Исследование переходных процессов в RC цепи.

4.1 Закоротить перемычкой индуктивность L_2 . Установить номиналы емкости C_2 и сопротивления R_{17} согласно указаниям преподавателя (лаборанта).

4.2 Установить масштаб увеличения осциллографа в положение 1:1.

4.3 Включить ГПН, подать импульсы на исследуемую электрическую цепь.

Снять осциллограмму кривой $U(t)$ при подаче в цепь переднего фронта импульса (режим включения).

Установить горизонтальную метку осциллографа на отметку 3 В и с помощью вертикальных меток зафиксировать время t от подачи переднего фронта импульса ГПН в исследуемую цепь до момента достижения на емкости напряжения 3 В.

Зафиксировать напряжение U_R на сопротивлении R17 соответствующее времени t . Полученные данные занести в табл. 1.3.

Снять осциллограмму кривой $U(t)$ при прохождении в цепи заднего фронта импульса (режим выключения).

Установить горизонтальную метку осциллографа на отметку 3 В и с помощью вертикальных меток зафиксировать время t от окончания импульса (задний фронт) до момента достижения на емкости напряжения 3 В.

Зафиксировать напряжение U_R на сопротивлении R17, соответствующее времени t .

Снять осциллограммы и выполнить измерения при изменении C1 и R17, полученные данные занести в табл. 1.3.

Рассчитать постоянные времени τ для каждого случая.

$$\tau = \frac{t}{\ln \frac{1}{1 - \frac{U}{U_0}}},$$

где t – время достижения напряжения на емкости значения 3 В;

$U = 3$ В – напряжение на емкости;

$U_0 = 5$ В – амплитуда импульсов ГПН.

5. Исследование переходных процессов в RL цепи.

5.1 Закоротить перемычкой емкость C1. Установить переключатель индуктивности в положение L2, задать сопротивление R17 согласно указаниям преподавателя (лаборанта).

5.2 Установить масштаб увеличения осциллографа в положение 1:1.

5.3 Выполнить требования п. 4.3 для исследования RL цепи, полученные данные занести в табл. 1.3. Рассчитать постоянную времени τ для каждого случая.

$$\tau = \frac{t}{\ln \frac{U_0}{U}},$$

где t – время достижения напряжения на емкости значения 3 В;

$U = 3$ В – напряжение на емкости;

$U_0 = 5$ В – амплитуда импульсов ГПН.

6. По данным табл. 1.3 и осциллограммам проанализировать и сделать выводы о влиянии параметров элементов цепи на скорость протекания переходного процесса.

Таблица 1.3

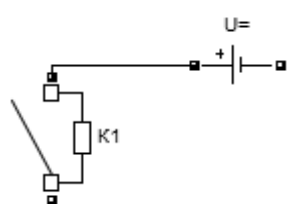
Режимы	Характер цепи	R	L	C	t	U _C	U _L	U _R	τ	Номер осциллограммы
		Ом	Гн	мкФ	мс	В	В	В		
Включение	RC		-				-			
			-				-			
			-				-			
Выключение	RC		-				-			
			-				-			
			-				-			
Включение	RL			-		-				
				-		-				
				-		-				
Выключение	RL			-		-				
				-		-				
				-		-				

1.5. План отчета по работе

Отчет о лабораторной работе кроме материалов, перечисленных в п.2 раздела 1.4.1 должен содержать:

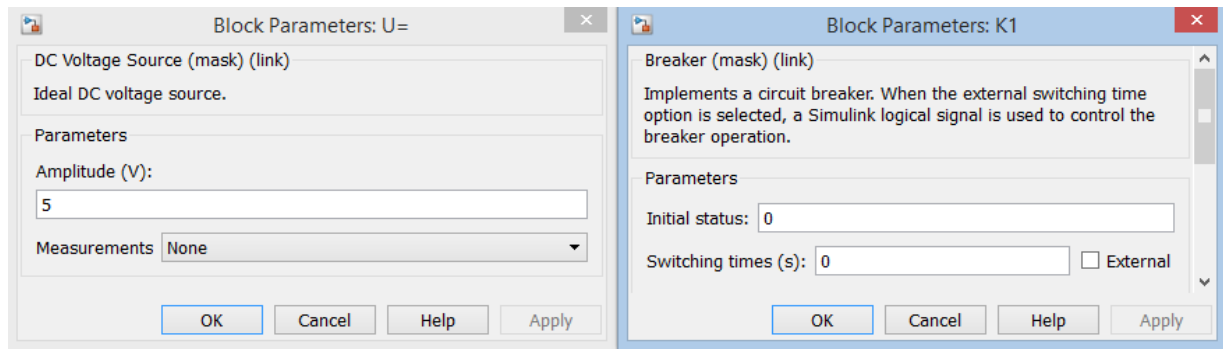
- расчетную формулу постоянной времени и вычисления;
- осциллограммы напряжений U_C, U_L;
- графики переходных процессов, полученные в среде Matlab Simulink;
- выводы, в которых должно быть указано влияние параметров элементов цепи на скорость протекания переходного процесса.

1.6. Анализ в среде Matlab Simulink

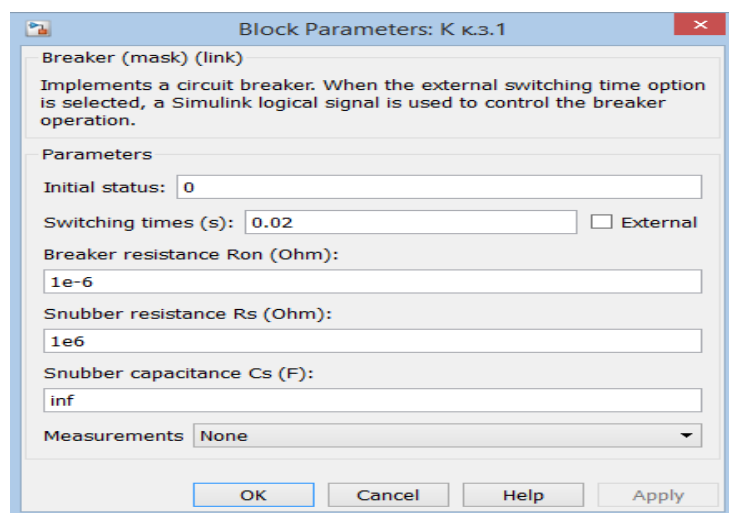
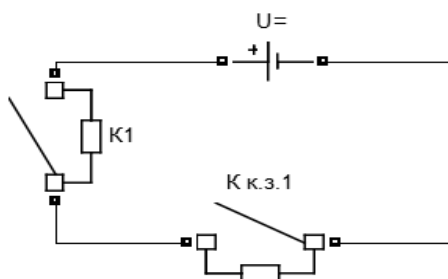


Для построения схемы выбираем источник постоянного напряжения и устанавливаем в нем параметр амплитуды 5 В.

Для имитации включения на схему добавляем параметр K1 (Breaker) со значение времени коммутации 0 секунд как показано **на рис.**



Остальные параметры K1 остаются без изменения. Создаем цепь для эмуляции выключения схемы.



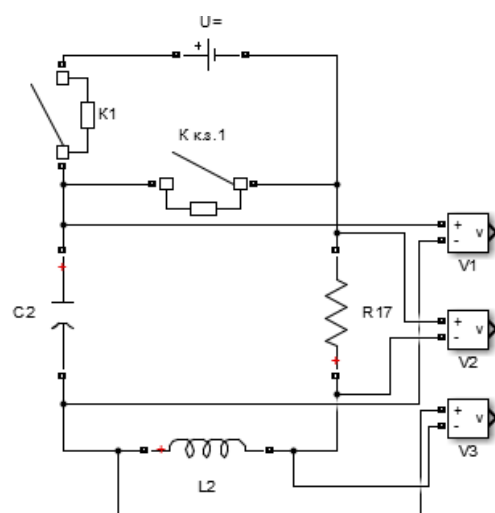
Подключаем параметры цепи. Для этого создаем три блока Series RLC Branch и выбираем соответственно тип C, R и L со значениями, указанными преподавателем или лаборантом. Прежде, чем задавать параметр L его необходимо рассчитать по формуле

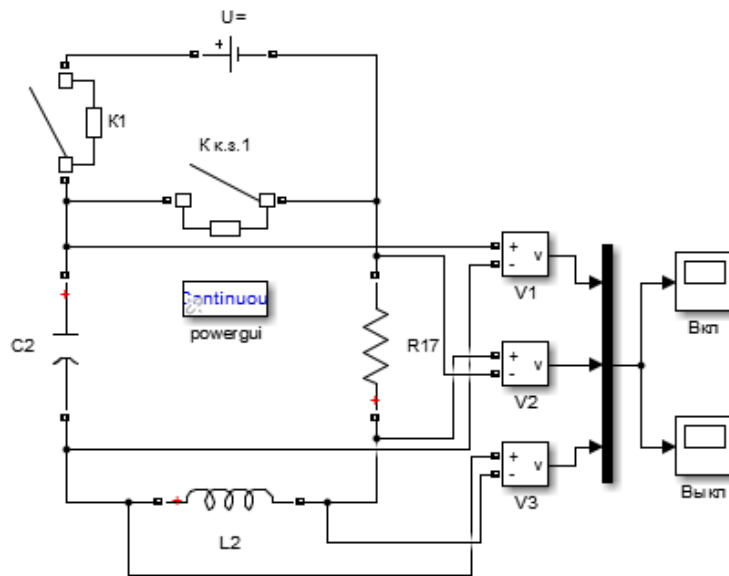
$$\tau = L/R.$$

Подключаем вольтметры Voltage measurement, которые измеряют соответственно:

- V1 - напряжение на ёмкости;
- V2 - напряжение на сопротивлении;
- V3 - напряжение на индуктивности.

Для того чтобы три графика выводились на один осциллограф, используем элемент Mux с параметром 3.

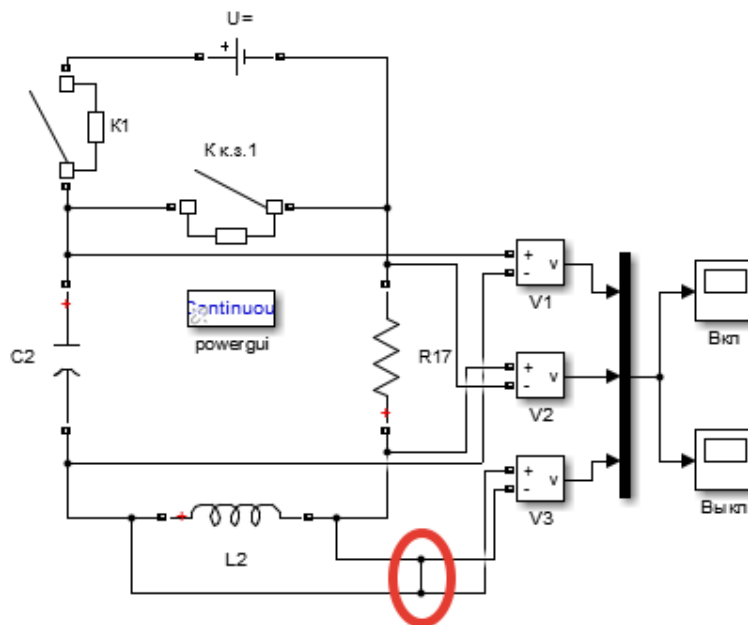




Во втором осциллографе с помощью функции Zoom X-Axis устанавливаем время от 0,02 до 0,03 секунды и устанавливаем на схему powergui.

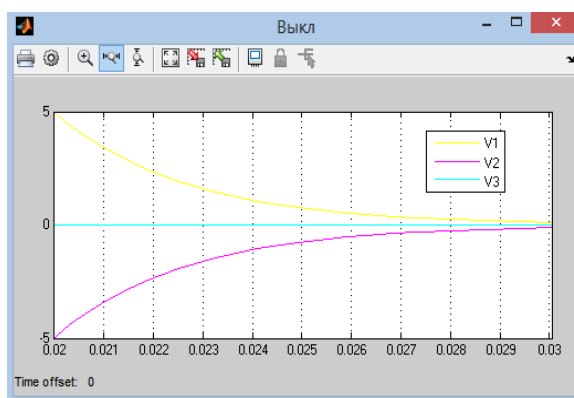
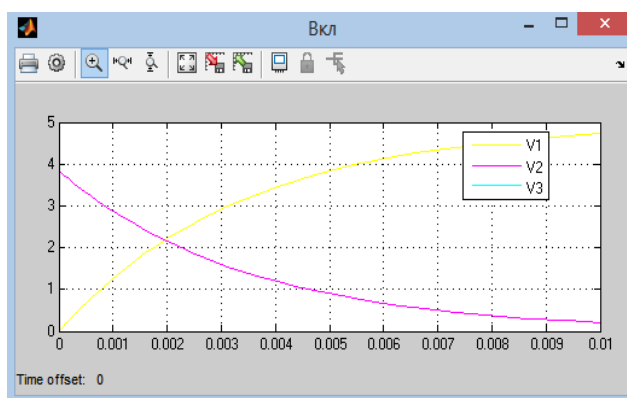
Для исследования RL или RC-цепи следует закоротить соответствующий элемент.

Например, для RC- цепи требуется закоротить элемент L2, как показано на схеме. Аналогично для RL- цепи.

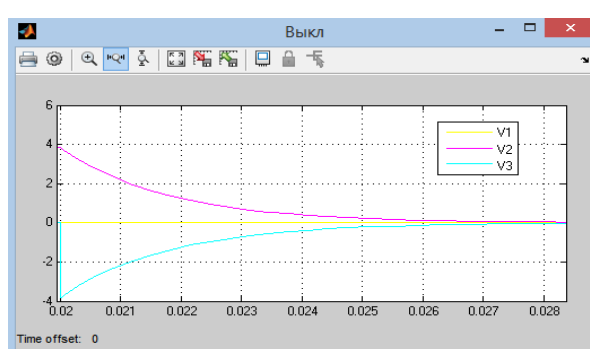
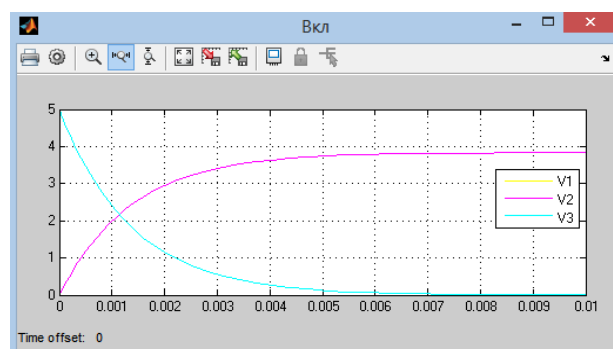


В результате получаем графики переходных процессов для рассматриваемых электрических цепей.

Графики переходного процесса для RC- цепи



Графики переходного процесса для RL- цепи



1.7. Контрольные вопросы

1. Дать определение переходного процесса.
2. Как определяется постоянная времени τ для RL и RC цепи?
3. Как влияют параметры R и L в RL цепи на скорость переходного процесса?
4. Как влияют параметры R и C в RC цепи на скорость переходного процесса?
5. Сформулировать I-й закон коммутации.
6. Сформулировать II-й закон коммутации.
7. Дать определение коммутации.
8. Дать определение нулевым начальным условиям.
9. Дать определение ненулевым начальным условиям.
10. Дать характеристику методам расчета переходного процессов.

Литература

1. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. – 6-е изд. / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1973.
2. *Зевеке Г.В.* Основы теории цепей / Г.В. Зевеке и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. *Анисимов О.Ю.* Переходные процессы в электрических цепях / О.Ю. Анисимов. – Севастополь: СВВМИУ, 1971.
4. *Касаткин А.С.* Электротехника: учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. *Иванов И.И.* Электротехника / И.И. Иванов. – М.: Высшая школа, 1984.
6. Конспект **лекций**.

Лабораторная работа № 2

Переходные процессы в RLC- цепи с постоянным источником ЭДС

2.1. Цель работы

1. Исследовать переходные процессы в электрической RLC цепи при включении ее на постоянное напряжение.
2. Исследовать влияние параметров цепи на характер переходного процесса.
3. Исследовать апериодический и периодический разряд конденсатора.

2.2. Схема лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. Электрическая схема лабораторной установки для исследования переходных процессов в RLC цепях изображена на рис. 2.1.

В состав лабораторной установки входит магазин емкостей C1, магазин сопротивлений R17 и индуктивность L2.

В качестве источника ЭДС используется генератор прямоугольных импульсов напряжения (ГПИ). График выходного напряжения ГПИ приведен на рис. 2.2.

Выходное напряжение генератора представляет собой прямоугольный импульс.

Амплитуда выходного напряжения ГПИ равна 5 В, длительность импульса $T_1 = 100$ мс, период следования импульсов $T = 200$ мс.

Длительность импульсов и период следования импульсов подобраны таким образом, что T_1 и T намного больше времени протекания переходных процессов в исследуемой RLC цепи.

Такой прием позволяет исследовать переходные процессы вызванные как включением исследуемой цепи на напряжение 5 В (передний фронт импульса ГПИ), так и переходные процессы вызванные отключением исследуемой цепи от напряжения 5 В (задний фронт импульса ГПИ).

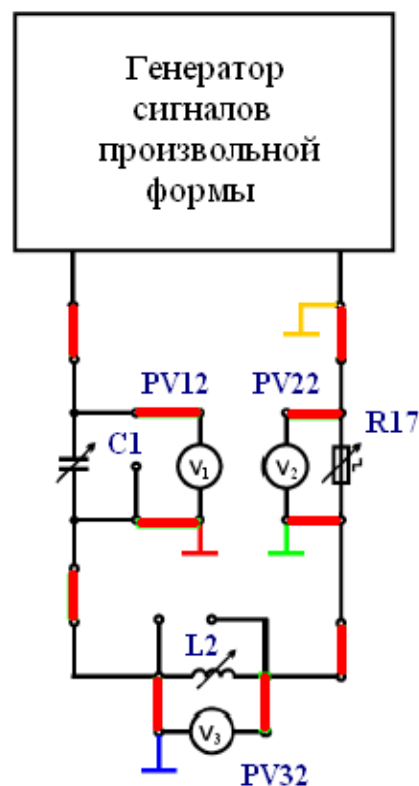


Рис. 2.1

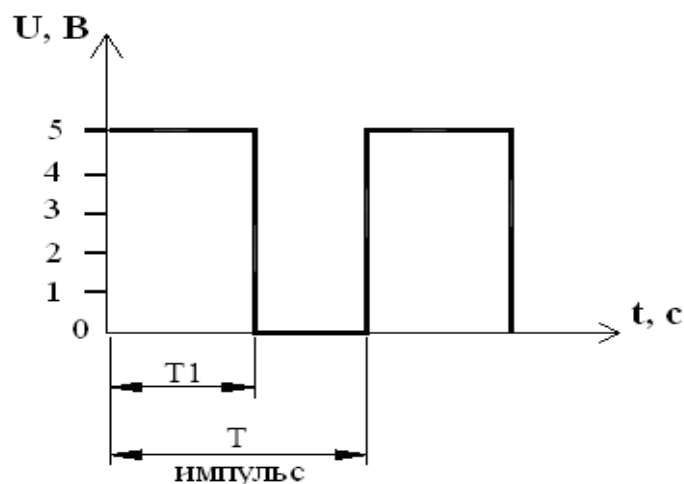


Рис. 2.2

Для наблюдения напряжений на элементах исследуемой электрической цепи используется осциллограф на базе персонального компьютера, на схеме (см. рис. 2.1), измерительные каналы обозначены как PV12, PV22, PV32.

- PV12 – используется для наблюдения напряжения на емкости C1;
- PV22 – используется для наблюдения напряжения на сопротивлении R17;
- PV32 – используется для наблюдения напряжения на индуктивности L2.

2.3. Основные теоретические положения

Рассмотрим случай, когда конденсатор, заряженный до напряжения U_{C0} , замыкается на цепь, содержащую R и L (см. рис. 2.3).

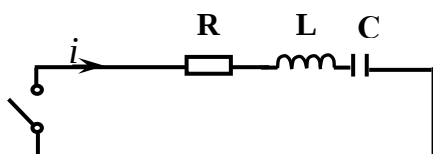


Рис. 2.3

Уравнение напряжений для этого контура имеет вид:

$$u_R + u_C + u_L = 0.$$

Правая часть его равна нулю, так как отсутствует приложенное извне напряжение.

Выразим все величины через u_C :

$$i = C \frac{du_C}{dt}, \quad u_R = Ri = RC \frac{du_C}{dt}, \quad u_L = L \frac{di}{dt} = LC \frac{d^2 u_C}{dt^2}.$$

Подставив эти значения в исходное уравнение, получим

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0;$$

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{LC} u_C = 0.$$

Это однородное линейное дифференциальное уравнение второго порядка. Его решение имеет вид:

$$u_C = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t},$$

где A_1 и A_2 – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий;

p_1 и p_2 – корни характеристического уравнения

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0$$

откуда

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}.$$

Вводя обозначения $\frac{R}{2L} = b$ и $\sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} = a$, получим значения корней характеристического уравнения:

$$p_1 = -b + a, \quad p_2 = -b - a.$$

Корни могут быть комплексными или вещественными, в частном случае равными.

Определим постоянные интегрирования, исходя из начальных условий при $t = 0$, $i = 0$, $u_C = U_{C0}$ и в предположении, что p_1 и p_2 уже определены.

Найдем выражение для тока:

$$i = C \frac{du_C}{dt} = C(p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}).$$

Применив начальные условия, получим

$$A_1 + A_2 = U_{C0}; \quad p_1 A_1 + p_2 A_2 = 0.$$

Отсюда

$$A_1 = -\frac{p_2 U_{C0}}{2a}; \quad A_2 = -\frac{p_1 U_{C0}}{2a},$$

а для u_C и i :

$$u_C = \frac{U_{C0}}{2a} (-p_2 e^{p_1 t} + p_1 e^{p_2 t}); \quad i = \frac{U_{C0}}{2aL} (-e^{p_1 t} + e^{p_2 t}).$$

Для исследования характера полученных выражений рассмотрим отдельно случаи вещественных и комплексных корней.

Случай вещественных корней (апериодический разряд).

Подкоренное число положительно, т.е.

$$\frac{R^2}{4L^2} > \frac{1}{LC}; \quad R^2 > 4\frac{L}{C}; \quad R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}; \quad R > 2p.$$

Тогда оба корня вещественные и отрицательные, причем $|p_2| > |p_1|$, поэтому слагаемые, содержащие $e^{p_1 t}$, затухают медленнее, чем слагаемые с $e^{p_2 t}$, и

$$p_1 - p_2 = 2a > 0.$$

Имея выражение для i , легко найти u_L :

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \frac{U_{C0}}{2a} (-p_1 e^{p_1 t} + p_2 e^{p_2 t}).$$

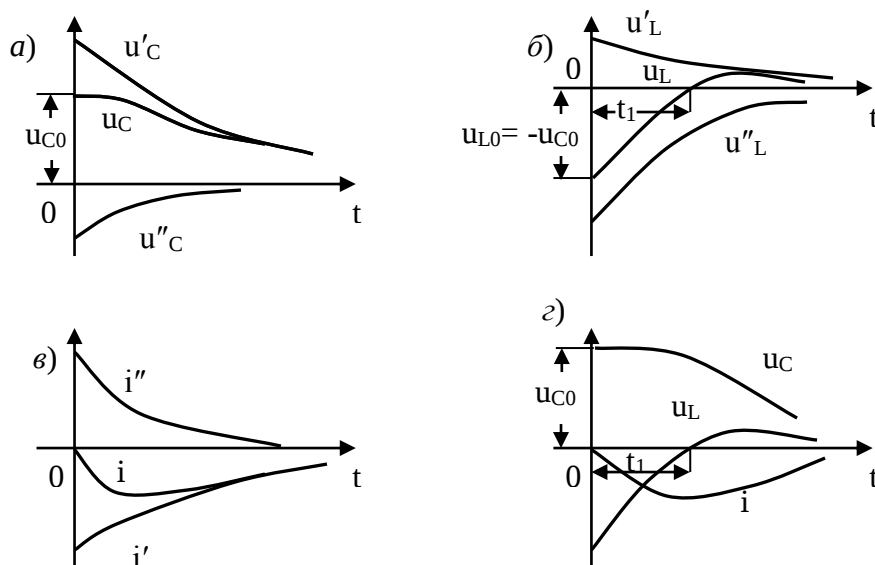


Рис. 2.4

Таким образом, каждая из этих трех величин (ток и напряжения на конденсаторе и индуктивности) состоит из двух слагаемых одного, медленно затухающего, и другого, быстро затухающего.

При рассмотрении графика видим, что в момент $t = t_1$ напряжение на индуктивности u_L проходит через нуль (меняя свой знак), i в этот момент имеет максимум (по абсолютному значению), а u_C — перегиб.

С энергетической точки зрения момент времени t_1 характеризуется **следующим**.

От начала до момента t_1 (рис. 2.4, г) уменьшающаяся энергия конденсатора, напряжение на котором монотонно убывает, расходуется на нагрев активного сопротивления и на создание магнитного поля; в момент t_1 ток и энергия магнитного поля достигают максимума; от момента t_1 до $t = \infty$ тепловые потери покрываются как за счет убывающей энергии электрического, так и магнитного полей.

Случай комплексных корней (колебательный разряд).

При малом R , а именно если $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, корни получаются комплексными. Тогда выражения для корней примут вид

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm j\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Введем обозначения

$$b = \frac{R}{2L} \quad \text{и} \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = \sqrt{\frac{1}{LC} - b^2}.$$

Путем подстановки получим окончательные выражения для u_C , i и u_L :

$$u_C = \frac{U_{C0}e^{-bt}}{\omega_0\sqrt{LC}} \sin(\omega_0 t + \psi_0); \quad i = -\frac{U_{C0}}{\omega_0 L} e^{-bt} \sin \omega_0 t,$$

$$u_L = \frac{U_{C0}}{\omega_0\sqrt{LC}} e^{-bt} \sin(\omega_0 t - \psi_0).$$

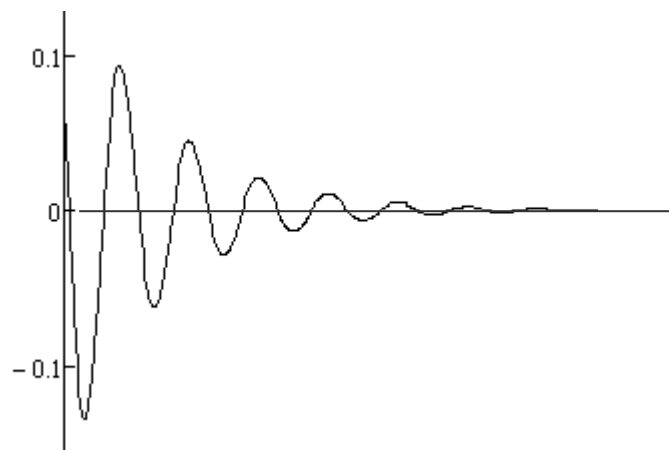


Рис. 2.5

Эти три величины являются гармоническими колебаниями одной и той же круговой частоты ω_0 , называемой *собственной круговой частотой*; благодаря множителю e^{-bt} все три колебания одинаково **затухают**,

множитель $b = \frac{R}{2L}$ называется *коэффициентом затухания контура*. Итак, все три величины – затухающие гармонические колебания. Собственная частота контура вычисляется по формуле

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Продолжительность одного колебания (период)

$$T_0 = \frac{1}{f_0} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}.$$

Декрементом затухания называется число, показывающее во сколько раз любая из величин u_C , i , u_L , называемых затухающими гармоническими колебаниями, уменьшается за один период (синусоидальный множитель, очевидно, не изменяется при этом), это величина постоянная, не зависит от времени, а зависит лишь от параметров RLC контура

$$\Delta = e^{-bt} : e^{-b(t+T_0)} = e^{bT_0}.$$

Показатель степени называется *логарифмическим декрементом*:

$$\ln \Delta = bT_0 = \frac{R}{2L} \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} = \frac{\pi R}{L \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}.$$

Если $\frac{1}{LC} \gg \frac{R^2}{4L^2}$, что часто имеет место, то можно пренебречь вторым членом под корнем и получить приближенную формулу

$$\ln \Delta \approx \frac{\pi R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{\pi R}{p} = \pi d.$$

С энергетической точки зрения процесс можно описать следующим образом.

К моменту $\omega_0 t = \pi - \psi_0$ напряжение на конденсаторе равно нулю, следовательно, равна нулю и энергия электрического поля. Однако часть этой энергии израсходована на тепловые потери в R , другая же перешла в энергию магнитного поля, так как ток в этот момент не равен нулю. Этот ток заряжает конденсатор в обратном направлении и снова создает электрическое поле, а в момент, когда ток снова равен нулю, конденса**тор**

оказывается заряженным до некоторой величины, меньшей U_{C0} из-за тепловых потерь. Затем снова начинается разряд конденсатора, и процесс повторяется теоретически бесконечно долго.

Случай равных корней.

В этом случае подкоренное выражение равно нулю.

$$\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC} = 0; \quad \frac{R^2}{4L^2} = \frac{1}{LC} = b^2; \quad R = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2p > R_{кр}.$$

Назовем *критическим сопротивлением контура* такое его наименьшее значение, при котором свободный процесс имеет еще аperiodический характер.

Выражение для u_C выглядит следующим образом:

$$u_C = U_{C0}e^{-bt}(bt+1).$$

Находим выражения для i и u_L , которые могут быть также определены из выражения для u_C :

$$i = C \frac{du_C}{dt}; \quad u_L = LC \frac{d^2u_C}{dt^2}.$$

В итоге:

$$u_C = U_{C0}e^{-bt}(bt+1); \quad i = -\frac{U_{C0}}{L}e^{-bt}t; \quad u_L = U_{C0}e^{-bt}(bt-1).$$

В этом случае процесс уже не колебательный.

При $t = 0$

$$u_C = U_{C0}; \quad i = 0; \quad u_L = -U_{C0}.$$

Приняв u_L нулю, получим моменты $t_1 = \frac{1}{b} = \frac{2L}{R}$, когда u_L меняет свой знак, i имеет максимум (по абсолютному значению), кривая u_C – перегиб.

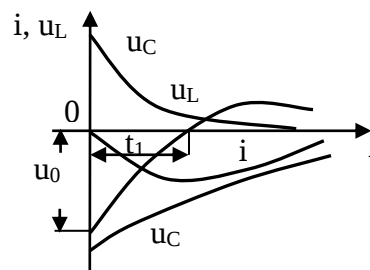


Рис. 2.6

2.4. Порядок проведения работы

2.4.1. Задание на подготовку к работе

Задача. По данным варианта табл. 2.1 определить параметр цепи, чтобы характер разрядки конденсатора был:

- 1) аperiodическим (включая предельный случай);
- 2) **периодическим.**

Таблица 2.1

№ варианта № задания		1	2	3	4	5	6
1	R, Ом	?	200	100	?	300	400
	L, мГн	667	?	334	223	?	650
	C, мкФ	2	2	?	0,1	3	?
2	R, Ом	100	50	20	60	30	?
	L, мГн	?	300	?	?	100	200
	C, мкФ	1	?	0,6	0,3	?	0,8
3	R, Ом	100	?	?	300	?	400
	L, мГн	40	20	35	80	40	?
	C, мкФ	?	0,5	0,7	?	0,9	1

2. В тетради для лабораторных работ подготовить бланк отчета по лабораторной работе, который должен содержать:

- название лабораторной работы;
- цель лабораторной работы;
- схему лабораторной установки (по ГОСТу и с учетом ЕСКД);
- задачу;
- ответы на контрольные вопросы;
- таблицу для измеренных и вычисленных данных.

2.4.2. Задание на выполнение работы

1. Ознакомиться с элементами лабораторной установки, записать их номинальные данные в тетрадь лабораторных работ.

2. Используя штатные перемычки, собрать электрическую цепь в соответствии со схемой, изображенной на рис. 2.1. Предъявить собранную электрическую цепь преподавателю или лаборанту.

3. Установить параметры исследуемой цепи:

- переключатель L1, L2, L3 установить в положение L2;
- переключателями R17 установить сопротивление 330 Ом;
- на батарее конденсаторов установить емкость $C = 40$ мкФ.

4. Включить ГПН, подать импульсы на исследуемую электрическую цепь.

4.1. На экране осциллографа наблюдать переходный процесс, имеющий апериодический характер. Снять осциллограммы при включении цепи (передний фронт импульса). Сделать вывод о характере изменения напряжений U_L , U_C , U_R .

4.2. Используя формулу $C = \frac{4L}{R^2}$ определить величину емкости, при которой апериодический процесс переходит в колебательный, при этом $R = 330$ Ом, $L = 0,11$ Гн.

4.3. Уменьшая емкость батареи конденсаторов, проследить по осциллограмме $U_C(t)$ переход от апериодического процесса к колебательному.

Зафиксировать емкость и сравнить ее с вычисленной (п.4.2). При появлении на экране осциллографа осциллограммы $U_C(t)$ с двумя хорошо различимыми полупериодами колебаний, измерить период колебаний и, по формуле $\omega' = \frac{2\pi}{T_k}$, определить частоту свободных колебаний. Используя метки времени и горизонтальные метки напряжения, измерить максимальный размах напряжения в цепи при переходном процессе. Полученные результаты занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

№ п/п	C	T_k	ω'	U'
	мкФ	мс	рад/с	В

4.4. Изменяя емкость батареи конденсаторов в сторону уменьшения, выполнить 5-6 измерений в соответствии с п.4.2.

4.5. Снять осциллограммы колебательного переходного процесса при включении цепи (задний фронт импульса).

4.6. Используя полученные экспериментальные и расчетные данные сделать выводы:

а) об изменении характера переходного процесса в RLC цепи при увеличении емкостного сопротивления;

б) об изменении максимального размаха напряжения в цепи при увеличении емкостного сопротивления.

2.5. План отчета по работе

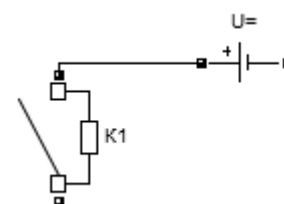
Отчет о лабораторной работе кроме материалов, перечисленных в п.2 раздела 2.4.1 должен содержать:

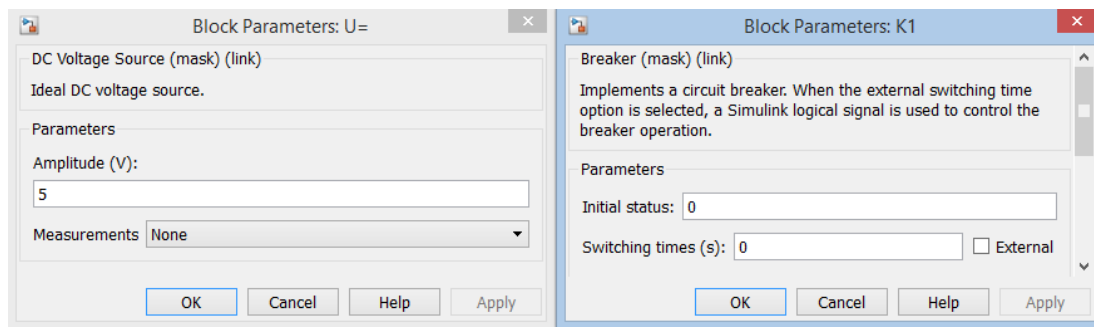
- расчетную формулу частоты свободных колебаний;
- осциллограммы напряжений U_C , U_L , U_R ;
- графики переходных процессов, полученные в среде Matlab Simulink.
- выводы, в которых должно быть указано влияние параметров элементов цепи на характер протекания переходного процесса.

2.6. Анализ в среде Matlab Simulink

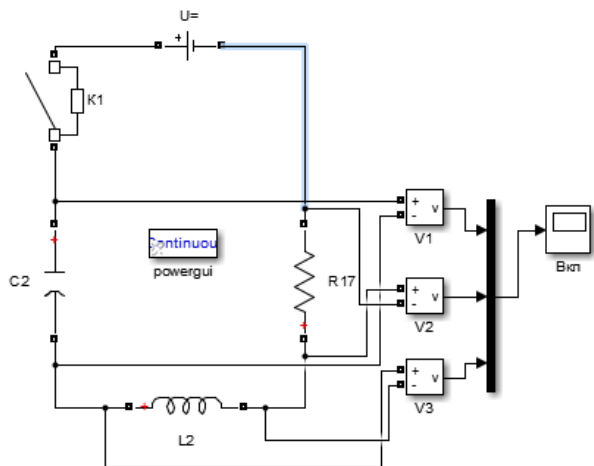
Выбираем источник постоянного напряжения и устанавливаем в нем параметр амплитуды 5 В.

Для имитации включения на схему добавляем параметр K1 (Breaker) со значением времени коммутации 0 секунд как показано на рисунке.





Остальные параметры K1 не изменяются.



Для подключения параметров цепи создаем три блока Series RLC Branch и выбираем соответственно тип C, R и L со значениями, указанными преподавателем или лаборантом.

Прежде, чем задавать параметр L его необходимо рассчитать по формуле

$$R^2/4L^2 \geq 1/LC.$$

Подключаем вольтметры Voltage measurement для измерения соответственно:

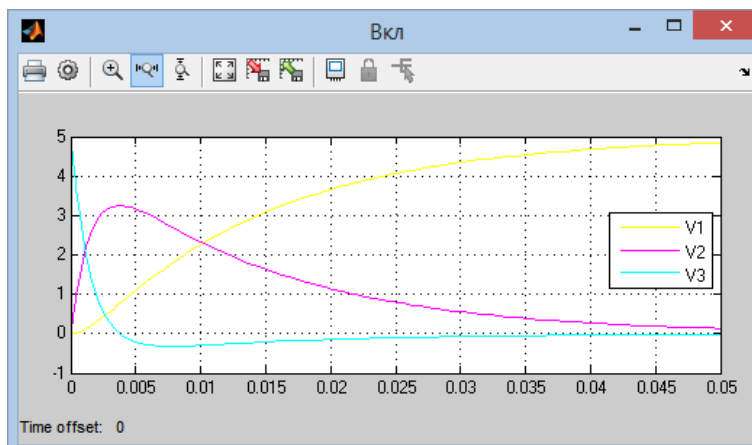
V1 - напряжение на ёмкости;

V2 - напряжение на сопротивлении;

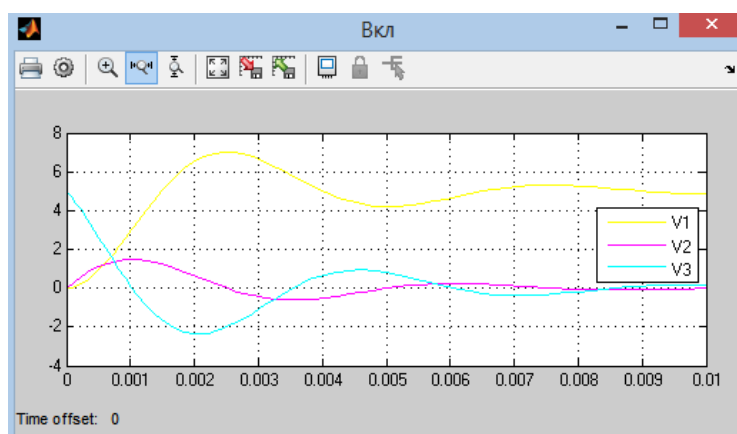
V3 - напряжение на индуктивности.

В результате получаем графики.

Апериодический заряд конденсатора



Периодический заряд конденсатора



2.7. Контрольные вопросы

1. Дать определение переходного процесса.
2. Дать понятие апериодической разрядке конденсатора.
3. Как влияют параметры R , L и C в цепи на характер переходного процесса?
4. Дать понятие критического сопротивления контура.
5. Сформулировать I-й закон коммутации.
6. Сформулировать II-й закон коммутации.
7. Дать определение коммутации.
8. Дать понятие периодической разрядке конденсатора.
9. Охарактеризовать предельный случай апериодической разрядки конденсатора.
10. Дать характеристику методам расчета переходных процессов.

Литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – 6-е изд. / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1973.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Анисимов О.Ю. Переходные процессы в электрических цепях / О.Ю. Анисимов. – Севастополь: СВВМИУ, 1971.
4. Гинсбург С.Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. – 3-е изд./ С.Г. Гинсбург. – М.: Высшая школа, 1967.
5. Конспект лекций.

**Светлана Владимировна Гайдук
Валентин Егорович Моряков
Полина Викторовна Бугаева**

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

**Лабораторные работы
с использованием математического пакета
MATLAB в среде *WINDOWS***

Часть 3

Литературный редактор
Р.В. Дмитриева
Технический редактор
Н.Н. Остапенко

Подписано к печати 15.05.15. Изд. № 05/15. Зак. 54/2015. Тираж 100 экз.
Объем 2,25 п. л. Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 2,205.
Формат бумаги 60 x 84 1/16

РИИЦМ ФГБОУВО «Севастопольский государственный университет»