

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Учебно-методическое пособие
для студентов очной и заочной форм обучения
направлений подготовки
11.04.01 – Радиотехника

Севастополь
СевГУ
2026

УДК [621.373.131:621.382.3]:004.9(076.5)
ББК 32.847.3:32.97в6я73
М744

Р е ц е н з е н т :

И. Л. Афонин - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой
«Радиоэлектроника и телекоммуникации»

Ответственный за выпуск:

И. Л. Афонин - д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

Составители: А. А. Щекатурин, Е. Е. Васин

М744 Математическое моделирование в радиоэлектронике. Лабораторный практикум по дисциплине : учебно-методическое пособие для студентов очной и заочной форм обучения направлений подготовки: 11.04.01 – Радиотехника / Севастопольский государственный университет ; сост.: А. А. Щекатурин, Г. В. Слёзкин, Е. Е. Васин. – Севастополь : СевГУ, 2026. – 31 с. – Текст : электронный.

Цель пособия: оказание помощи студентам при выполнении лабораторных работ по применению программы MATLAB в моделировании радиоэлектронных устройств.

УДК [621.373.131:621.382.3]:004.9(076.5)
ББК 32.847.3:32.97в6я73

Рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации», протокол № 13 от 16 июня 2025 г.

© Щекатурин А. А., Васин Е. Е., сост., 2026
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Основные теоретические сведения.....	5
1.1. Основы Simscape	5
1.2. Обзор библиотеки Simscape Electronics.....	6
1.3. Построение моделей и симуляция.....	7
2. Лабораторная работа № 1. Моделирование мультивибратора.....	11
2.1. Цель работы	11
2.2. Работа мультивибратора	11
2.3. Порядок выполнения работы.....	15
2.4. Вопросы для самоконтроля.....	15
3. Лабораторная работа № 2. Моделирование Генератора Колпитца	17
3.1. Цель работы	17
3.2. Работа генератора Колпитца.....	17
3.3. Порядок выполнения работы.....	20
3.4. Вопросы для самоконтроля.....	20
4. Лабораторная работа № 3. Моделирование усилителя на биполярном транзисторе	22
4.1. Цель работы	22
4.2. Работа усилителя на биполярном транзисторе	22
4.3. Порядок выполнения работы.....	24
4.4. Вопросы для самоконтроля.....	25
5. Лабораторная работа № 4. Моделирование интегрирующей цепи на операционном усилителе.....	26
5.1. Цель работы	26
5.2. Работа интегрирующей цепи на операционном усилителе	26
5.3. Порядок выполнения работы.....	28
5.4. Вопросы для самоконтроля.....	29
Библиографический список.....	30
Приложение А. Образец титульного листа	31

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания предназначены для проведения лабораторных работ по дисциплине «Математическое моделирование в радиоэлектронике» с использованием системы MATLAB (включая Simscape Electronics).

Цель лабораторного практикума – формирование у студентов практических навыков построения, анализа и верификации математических моделей радиоэлектронных устройств и систем.

В методических рекомендациях по каждой лабораторной работы указана цель работы, приведены сведения о средствах и модулях MATLAB, соответствующих тематике работы, а также содержатся набор индивидуальных заданий для самостоятельного решения и вопросы для самоконтроля.

Порядок выполнения лабораторных работ

Лабораторные работы выполняются фронтальным методом, в соответствии с которым в течение занятия все студенты выполняют одну и ту же лабораторную работу. При этом каждый студент выполняет лабораторную работу по индивидуальному заданию на отдельном персональном компьютере.

Перед выполнением лабораторной работы студенты обязаны:

- до начала занятия самостоятельно изучить методические рекомендации к предстоящей лабораторной работе;
- в начале занятия представить и защитить отчет по предыдущей лабораторной работе;
- ответить на контрольные вопросы, связанные с выполняемой предстоящей лабораторной работы;
- после ознакомления с примерами использования MATLAB, сведения о которых приведены в лабораторной работе, следует каждый из таких примеров выполнить самостоятельно.

Защита отчета по лабораторной работе производится каждым студентом индивидуально на очередном лабораторном занятии. В процессе защиты проверяются: правильность оформления отчета, знание студентами средств MATLAB, используемых в работе, и методики организации вычислений с их помощью, умение пояснять выполненные расчеты и полученные численные результаты, способность обосновать выводы по работе.

Требования к отчету по лабораторной работе

Отчет по работе оформляется в соответствии с методическими указаниями по оформлению текстовых работ и должен содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- задания;
- набранные в MATLAB моделируемые электронные схемы;
- полученные результаты;
- выводы по работе.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Основы Simscape

Simscape – среда физического моделирования, разработанная компанией MathWorks для платформы MATLAB/Simulink. Она позволяет инженерам и исследователям моделировать реальные физические системы с использованием компонентов, описывающих поведение в терминах физических законов, а не абстрактных уравнений.

Simscape объединяет несколько библиотек:

- Simscape Foundation – базовые элементы (электрические, механические, тепловые)

- Simscape Electrical – электроника и электропитание;

- Simscape Fluids – гидравлика и пневматика;

- Simscape Multibody – кинематика и динамика тел.

Simscape Electronics – это подраздел Simscape Electrical, ориентированный на моделирование электронных компонентов и систем управления.

В отличие от традиционного моделирования, где поведение системы задаётся уравнениями вручную, Simscape использует готовые блоки, описывающие физику компонентов.

Это позволяет быстро собирать модели из библиотек избегать ошибок в уравнениях интегрировать разные физические домены (электрика, механика, тепло).

Каждый компонент имеет физические порты, через которые передаются величины: ток, напряжение, сила, температура и т.д.

Simscape работает внутри среды Simulink, что даёт мощные возможности: использование блоков управления, логики, фильтрации, визуализация сигналов и состояний, генерация кода для микроконтроллеров и DSP, проведение параметрических исследований и оптимизации.

Модель Simscape может быть частью общей схемы Simulink, где физическая система взаимодействует с цифровым контроллером.

Типичная модель Simscape состоит из:

- физических компонентов: резисторы, транзисторы, двигатели;

- источников: напряжения, тока, сигнала;

- сенсоров: измерение тока, напряжения, положения;

- интерфейсов: преобразование физических величин в сигналы Simulink.

Сигнал напряжения можно измерить и передать в Simulink для анализа.

Simscape использует дифференциально-алгебраические уравнения (DAE), которые решаются численно.

Важно правильно выбрать тип решателя: фиксированный шаг (для реального времени) или переменный шаг (для точности); параметры симуляции: шаг, допуски, время моделирования.

Для сложных моделей с нелинейностями (например, транзисторы) рекомендуется использовать решатели типа ode15s или ode23t.

Simscape Electronics – это мощный инструмент для инженеров, позволяющий моделировать и анализировать электронные системы в контексте реальной

физики. В следующих главах мы подробно рассмотрим библиотеки компонентов, построение моделей и примеры практического применения.

1.2. Обзор библиотеки Simscape Electronics

Simscape Electronics предоставляет обширный набор блоков, сгруппированных по функциональному назначению.

Основные категории:

- Passive Components – пассивные элементы: резисторы, конденсаторы, индуктивности;
- Semiconductors – полупроводниковые приборы: диоды, транзисторы, тиристоры;
- Analog Devices – аналоговые компоненты: операционные усилители, компараторы;
- Digital Devices – цифровые элементы: логические вентили, триггеры, таймеры;
- Sensors & Actuators – датчики и исполнительные механизмы;
- Power Electronics – преобразователи, инверторы, источники питания;
- Interfaces – преобразователи сигналов между Simulink и физическими доменами.

Пассивные компоненты

Базовые строительные блоки любой схемы:

- Resistor – сопротивление с возможностью задания нелинейной зависимости;
- Capacitor – ёмкость, включая переменную;
- Inductor – индуктивность, с возможностью учета насыщения;
- Mutual Inductor – взаимная индуктивность для трансформаторов.

Полупроводниковые приборы

Simscape Electronics включает реалистичные модели:

- Diode – идеальные и реальные диоды с параметрами тока насыщения, напряжением порога;
- BJT (NPN, PNP) – с возможностью задания коэффициентов усиления;
- MOSFET, IGBT – ключевые элементы для силовой электроники;
- Thyristor, Triac – для управления переменным током.

Аналоговые устройства

Используются для усиления, сравнения и обработки сигналов:

- Operational Amplifier – с параметрами усиления, ограничения, смещения;
- Comparator – для генерации логических уровней;
- Voltage-Controlled Source – управляемые источники напряжения и тока.

Цифровые компоненты

Моделирование логики и цифровых систем:

- Logic Gates – AND, OR, NOT, XOR и другие;

- Flip-Flops – D, SR, JK триггеры;
- Timers, Counters – генераторы импульсов, счётчики;
- PWM Generator – генерация широтно-импульсной модуляции.

Датчики и исполнительные механизмы

Для взаимодействия с физическим миром используются:

- Position Sensor, Velocity Sensor – измерение движения;
- Solenoid, Electromagnet – преобразование электрической энергии в механическую;
- Thermal Sensor – измерение температуры.

Силовая электроника

Моделирование преобразователей и источников:

- DC-DC Converter – понижающие и повышающие схемы;
- Inverter – преобразование постоянного тока в переменный;
- Rectifier – выпрямители;
- Battery, Power Supply – источники питания с параметрами заряда/разряда.

Интерфейсы Simulink ↔ Simscape

Используются для передачи сигналов между физическими и цифровыми блоками:

- PS-Simulink Converter – преобразует физическую величину в сигнал Simulink;
- Simulink-PS Converter – преобразует сигнал Simulink в физическую величину.

Это позволяет строить системы управления, где Simulink контролирует физическую модель.

Библиотека Simscape Electronics – это мощный инструмент, охватывающий весь спектр электронных компонентов: от простых резисторов до сложных инверторов и цифровых систем.

1.3. Построение моделей и симуляция

Simscape Electronics позволяет строить модели электронных схем визуально, используя блоки, которые представляют реальные компоненты.

Моделирование включает:

- выбор компонентов из библиотеки;
- соединение их линиями;
- настройку параметров;
- добавление измерительных и управляющих элементов.

Такой подход позволяет быстро создавать, тестировать и модифицировать схемы без ручного ввода уравнений.

Этапы построения модели содержат следующие шаги.

Шаг 1. Создание новой модели:

Открыть MATLAB → Simulink ( в меню MATLAB, рис. 1) → создать новый файл модели, рис. 2.

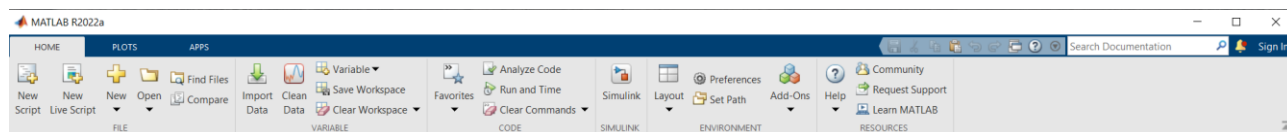


Рис. 1 – Меню MATLAB

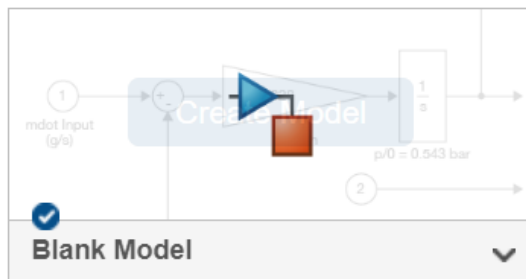


Рис. 2 – Создание нового файла модели

Откроется окно Simulink, рис. 3.

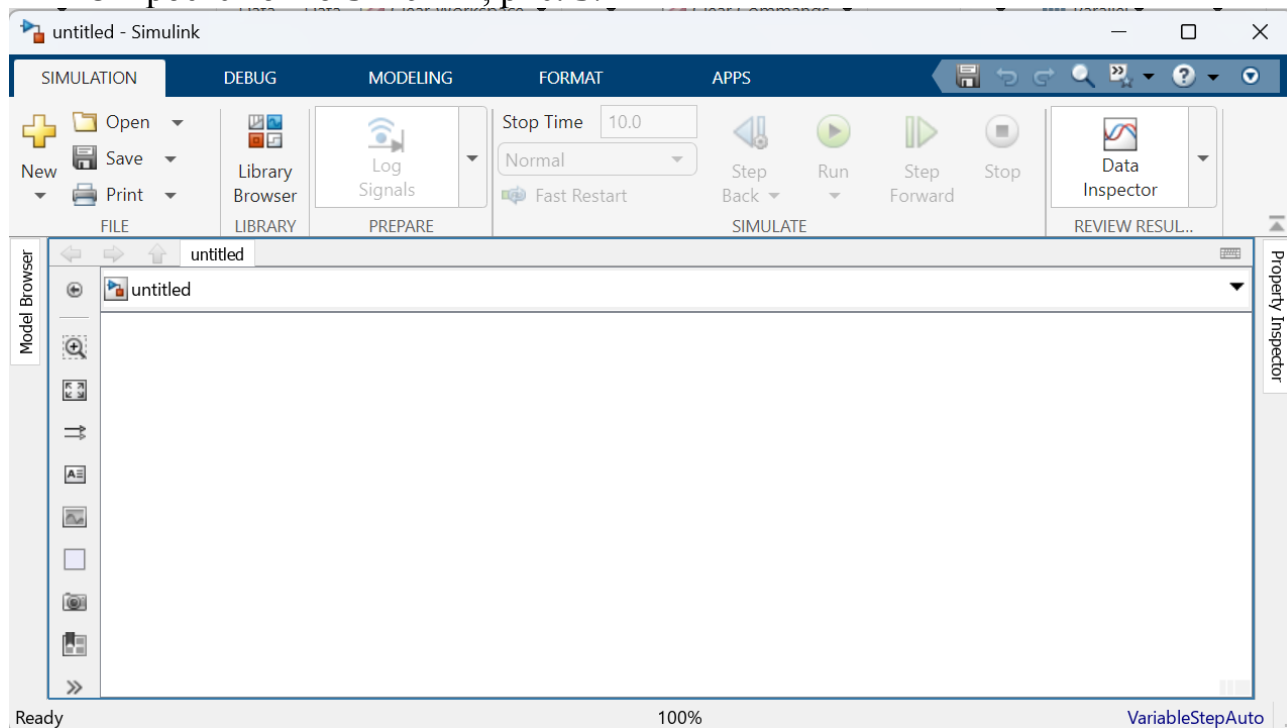


Рис. 3 – Окно Simulink

Шаг 2. Добавление компонентов.

Добавить в рабочее пространство компоненты из библиотеки Laboratory

browser (значок  из меню Simulink, рис. 4) → Simscape → Electrical или Laboratory browser → Simscape → Foundation Library → Electrical, рис. 5.

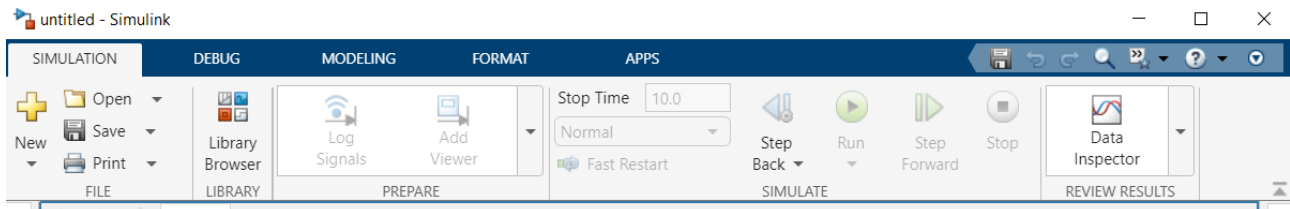


Рис. 4 – Меню Simulink

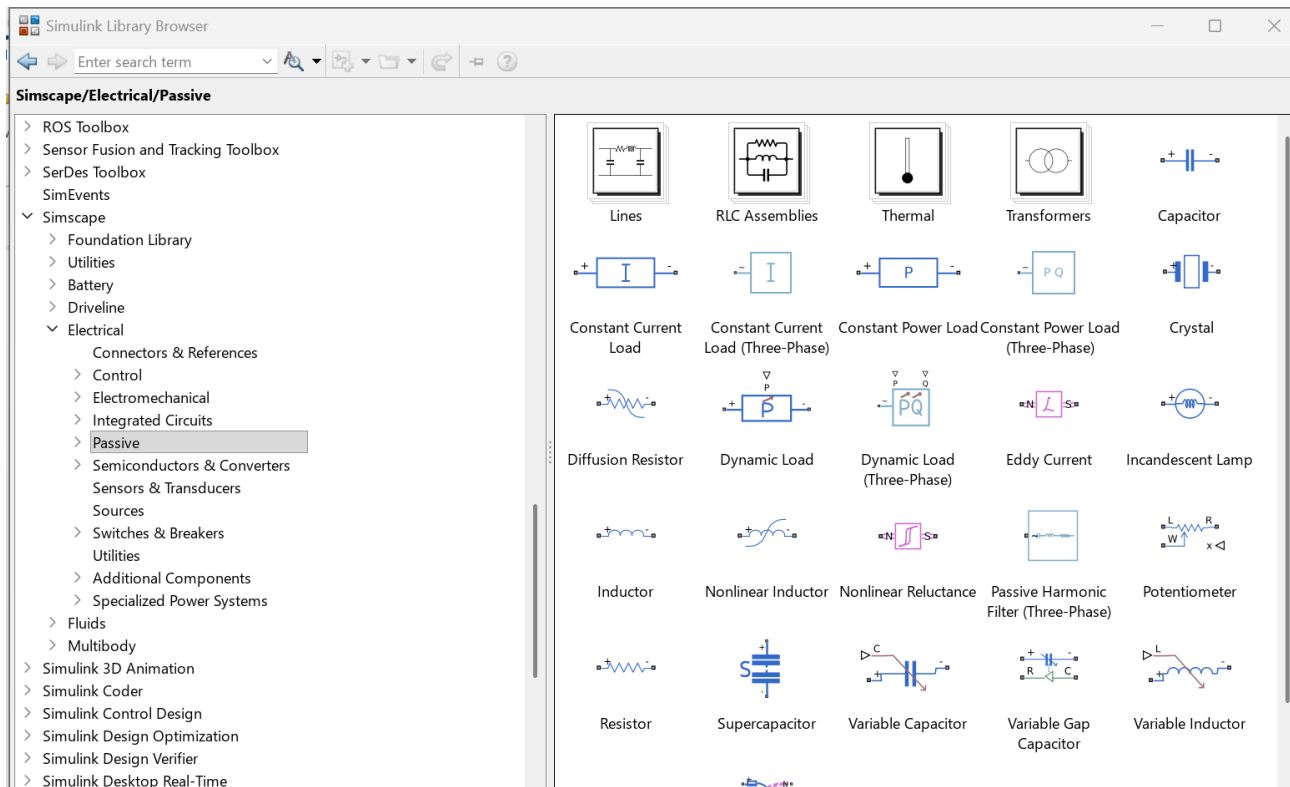


Рис. 5 – Библиотека пассивных элементов библиотеки Electrical

Компоненты добавляются в рабочее пространство из библиотеки перетаскиванием.

Компоненты можно вращать комбинацией клавиш Ctrl-r, инверсия элемента Ctrl-i.

Шаг 3: Соединение портов элементов

Соединение осуществляется созданием соединяющих линий между портами элементов.

Шаг 4: Настройка параметров

Двойной щелчок левой кнопки мыши на компоненте открывает окно параметров этого компонента.

Каждый компонент имеет параметры:

- номинальные значения (R, C, L);
- температурные коэффициенты;
- нелинейные зависимости.

Можно использовать переменные MATLAB ($R1 = 1e3$) и передавать их в блоки.

Шаг 5: Добавление измерителей.

Для анализа используются:

- Voltage Sensor – измерение напряжения;
- Current Sensor – измерение тока;
- PS-Simulink Converter – преобразование физической величины в сигнал

Simulink;

- Scope – визуализация сигнала.

Шаг 6: Запуск моделирования.

Если необходимо, настройте параметры моделирования: Simulation → Model Settings → Solver. Выберите тип решателя (обычно ode23t или ode45).

В Simulink Library Browser найдите блок Simscape > Utilities > Solver Configuration, рис. 6. Перетащите его в модель.

Подключите блок к любому узлу физической сети (например, к электрической цепи) через физическое соединение.

Настройте параметры блока, если требуется (обычно стандартные настройки подходят для большинства схем).

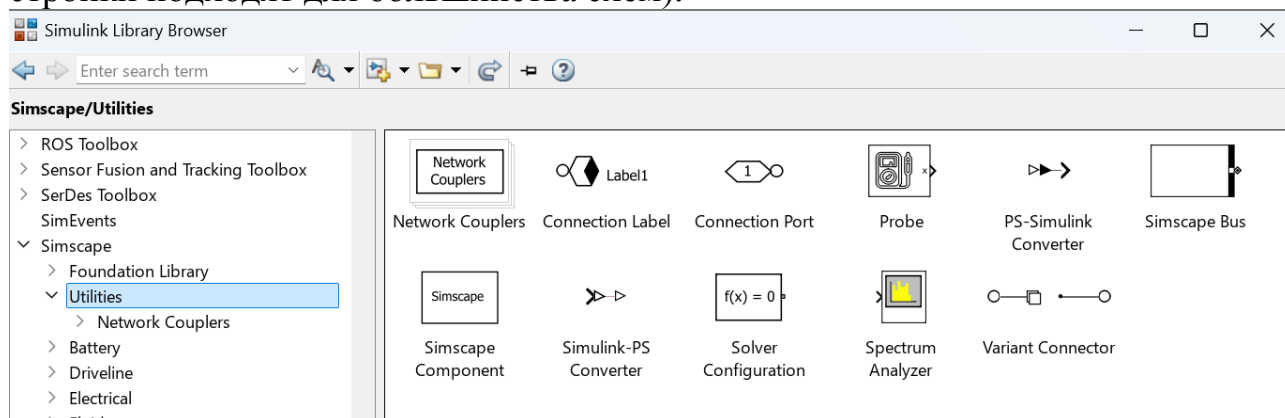


Рис. 6 – Выбор блока Solver Configuration

Установите в блоке Solver Configuration шаг интегрирования и время моделирования. Блок Solver Configuration задает параметры решателя, такие как тип (непрерывный или дискретный) и алгоритм интегрирования, позволяет настроить параметры, такие как шаг времени, а также позволяет задать начальные условия для физической схемы, что важно для корректной инициализации схемы, особенно если в ней есть элементы с накоплением энергии (например, конденсаторы или катушки индуктивности).

Нажмите Run  и наблюдайте за результатами.

Используйте Scope или Data Inspector для анализа напряжений, токов и других характеристик.

При необходимости измените параметры и повторите моделирование.

2. Лабораторная работа № 1 МОДЕЛИРОВАНИЕ МУЛЬТИВИБРАТОРА

2.1. Цель работы

Целью работы является создание модели и моделирование работы мультивибратора на биполярных транзисторах в Simcape Electronics.

2.2. Работа мультивибратора

Мультивибратор – это генератор электрических прямоугольных сигналов с короткими фронтами. Представляет собой двухкаскадный усилитель, охваченный глубокой положительной обратной связью.

Схема мультивибратора показана на рис. 7.

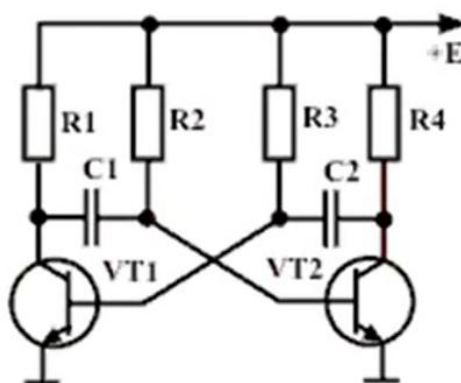


Рис. 7 – Принципиальная схема симметричного мультивибратора

Теория симметричного мультивибратора на двух n-p-n транзисторах.

Симметричный мультивибратор на двух n-p-n транзисторах – это автогенератор прямоугольных импульсов, работающий в автоколебательном режиме. Он используется для генерации периодических сигналов с фиксированной частотой и скважностью, близкой к 2 (симметричный сигнал). Рассмотрим его теорию, принцип работы, схему и характеристики.

Симметричный мультивибратор основан на двух транзисторах, работающих в ключевом режиме (открыт/закрыт), с перекрестной положительной обратной связью. Схема генерирует прямоугольные импульсы за счёт попеременного переключения транзисторов между состояниями насыщения и отсечки.

Типичная схема симметричного мультивибратора включает:

- Два n-p-n транзистора (VT1, VT2).
- Резисторы в цепи коллектора (R_1 , R_4): ограничивают ток коллектора и формируют выходной сигнал.
- Резисторы в цепи базы (R_2 , R_3): подключают базу каждого транзистора к коллектору другого, обеспечивая обратную связь.
- Конденсаторы (C_1 , C_2): соединяют базу одного транзистора с коллектором другого, определяя временные характеристики.
- Источник питания (V_{CC}): обеспечивает питание схемы.

Схема симметрична, то есть $R_1 = R_4 = R_C$, $R_2 = R_3 = R_B$, $C_1 = C_2 = C$, что обеспечивает равные длительности импульсов и пауз.

Рабочие состояния

Мультивибратор имеет два устойчивых состояния, в которых один транзистор открыт (в режиме насыщения), а другой закрыт (в отсечке). Переключение между состояниями происходит автоматически благодаря зарядке и разрядке конденсаторов.

Состояние 1: VT1 открыт, VT2 закрыт.

VT1 находится в насыщении, ток течёт через R1, напряжение на коллекторе VT1 близко к 0 В.

Конденсатор C1 заряжается через R3 и открытый VT1 от Vcc к низкому потенциалу коллектора VT1.

Конденсатор C2, ранее заряженный, разряжается через R2 и открытый VT1, поддерживая VT2 в закрытом состоянии.

Когда C1 заряжается до уровня, при котором напряжение на базе VT2 достигает $V_{BE} \approx 0,7$ В, VT2 начинает открываться.

Состояние 2: VT2 открыт, VT1 закрыт.

Открытие VT2 резко снижает напряжение на его коллекторе (через R4

Это изменение через C2 передаётся на базу VT1, закрывая его.

Теперь C2 заряжается через R2 и открытый VT2, а C1 разряжается через R3

Процесс повторяется, переключая состояния.

Период колебаний T определяется временем зарядки/разрядки конденсаторов. Для симметричной схемы ($R_2 = R_3 = R_B$, $C_1 = C_2 = C$):

Время одного полупериода (время, пока один транзистор открыт):

$$T_1 = T_2 = 0.69 \cdot R_B \cdot C,$$

где 0,69 – приближённая константа, связанная с зарядкой конденсатора до порога V_{BE} .

Полный период:

$$T = T_1 + T_2 = 2 \cdot 0.69 \cdot R_B \cdot C \approx 1.38 \cdot R_B \cdot C.$$

Частота колебаний:

$$f = \frac{1}{T} \approx \frac{1}{1.38 \cdot R_B \cdot C}.$$

Перекрестное соединение через C1, C2 и R2, R3 обеспечивает положительную обратную связь, необходимую для автоколебаний.

Режим транзисторов: транзисторы работают в ключевом режиме (насыщение/отсечка), что делает сигнал на выходе прямоугольным.

Симметрия: равенство элементов (R_C , R_B , C) обеспечивает одинаковую длительность импульсов и пауз.

Характеристики мультивибратора:

– форма сигнала: прямоугольные импульсы с крутыми фронтами;

- скважность: в симметричной схеме близка к 2 (длительность импульса равна длительности паузы);
- частота: зависит от R_B и C , варьируется от герц до десятков кГц;
- амплитуда: определяется напряжением V_{CC} и падением напряжения на R_C .

Симметричный мультивибратор используется в генераторах тактовых сигналов для цифровых схем, таймерах и импульсных устройствах, схемах управления и сигнализации, простых генераторах звуковых сигналов.

Пример расчёта.

Допустим, что $R_B = 10 \text{ кОм}$, $C = 1 \text{ мкФ}$, $V_{CC} = 12 \text{ В}$. Тогда полупериод

$$T_1 = 0.69 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 6,9 \text{ мс},$$

полный период

$$T = 2 \cdot 6.9 = 13,8 \text{ мс},$$

Частота

$$f = \frac{1}{13.8 \cdot 10^{-3}} \approx 72,5 \text{ Гц}.$$

Мультивибратор запускается автоматически за счёт шумов или асимметрии компонентов при включении питания.

Для повышения стабильности используют транзисторы с высоким коэффициентом усиления (β) и конденсаторы с низким разбросом параметров.

Выходной сигнал лучше снимать через буферный каскад, чтобы избежать влияния нагрузки на частоту.

Симметричный мультивибратор на двух n-p-n транзисторах – это простая и эффективная схема для генерации прямоугольных импульсов. Его частота и скважность определяются параметрами R_B и C , а работа основана на перекрёстной обратной связи. Схема надёжна, но имеет ограничения по стабильности частоты, что делает её подходящей для некритичных приложений. Для вывода напряжения на коллекторах транзисторов на осциллограф необходимо преобразовать сигнал с домена Simscape Electronics в домен Simulinc, для этого надо использовать два блока:

- сенсор напряжения, который произведет измерение напряжения на выходе коллектора и выдаст физический сигнал пропорциональный напряжению;
- конвертер для преобразования физического сигнала в сигнал Simulinc.

Модель мультивибратора должна иметь вид, показанный на рис. 8.

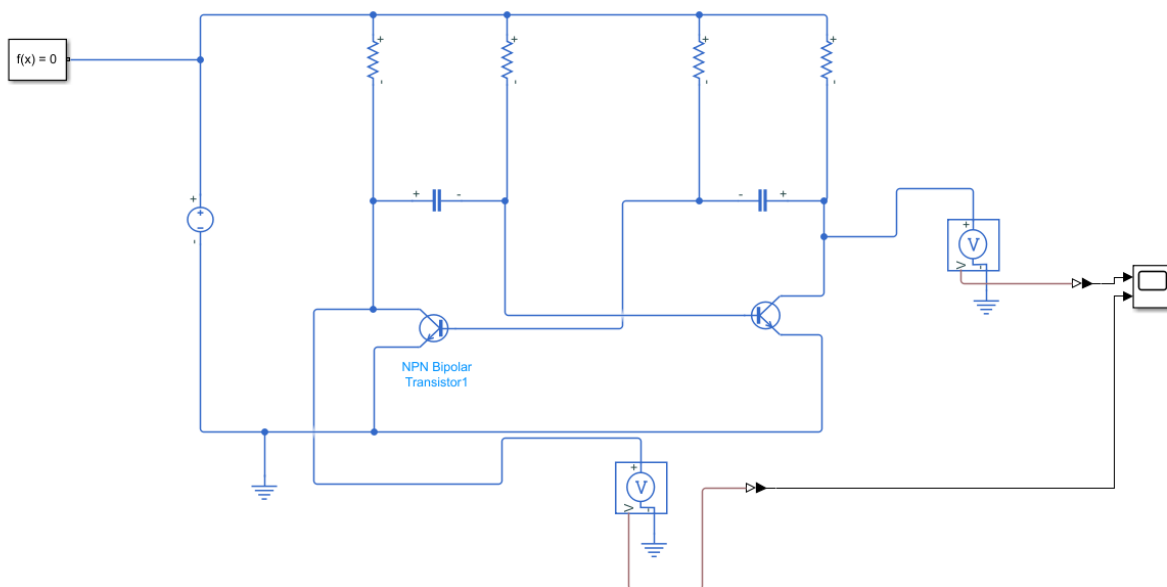


Рис. 8 – Модель мультивибратора

В результате моделирования должны быть получены зависимости напряжений на коллекторах транзисторов от времени, рис. 9.

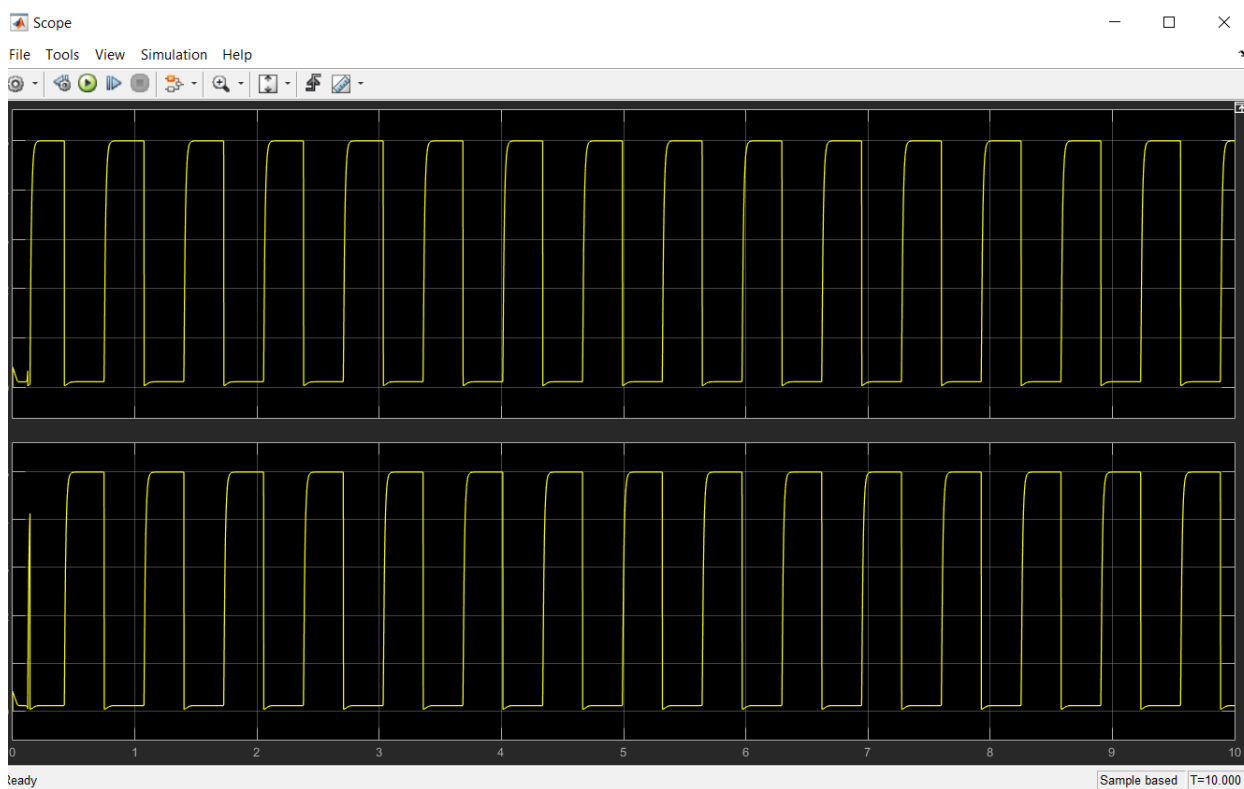


Рис. 9 – Зависимость напряжений на коллекторах транзисторов от времени

2.3. Порядок выполнения работы

В соответствии с вариантом, выданным преподавателем, разработать модель мультивибратора, выполнить его моделирование, получить зависимости напряжений на коллекторах транзисторов от времени в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 – Варианты по лабораторной работе № 1

№ варианта	Номиналы деталей				Напряжение питания, В
	R1, R4, кОм	R2, R3, кОм	C1, C2, мкФ	VT1, VT2	
1	2,2	100	4,7	BC546	5
2	4,7	2,2	4,7	C3198	12
3	1	10	1	BC546	3
4	10	33	10	C3198	8
5	8	54	6	BC546	10
6	15	10	5	C3198	7
7	4	65	8	BC546	6
8	3	23	11	C3198	5
9	1	11	3	BC546	3,3
10	7	23	8	C3198	11
11	3,5	18	20	BC546	9
12	2,5	20	15	C3198	10,5
13	6	57	12	BC546	6,5
14	5	39	23	C3198	7,3

2.4. Вопросы для самоконтроля

1. Что такое мультивибратор, и какие типы сигналов он генерирует?
2. Объясните принцип работы симметричного мультивибратора на двух n-p-n транзисторах.
3. Какую роль выполняют конденсаторы C_1 и C_2 в схеме мультивибратора?
4. Как рассчитывается период и частота колебаний мультивибратора? Приведите формулы.
5. Почему мультивибратор называют автогенератором? Как обеспечивается положительная обратная связь?
6. Как влияет изменение значений R_B и C на частоту генерируемых импульсов?
7. Объясните, почему транзисторы в мультивибраторе работают в ключевом режиме (насыщение/отсечка).
8. Как преобразовать сигнал из домена Simscape Electronics в домен Simulink для отображения на осциллографе?
9. Какие преимущества и недостатки имеет симметричный мультивибратор по сравнению с другими генераторами?
10. Какой блок в Simscape используется для настройки параметров решателя, и зачем он нужен?

11. Что такое библиотека Simscape Electronics, и какие типы компонентов она включает?
12. В чем основное отличие моделирования в Simscape Electronics от традиционного моделирования в Simulink?
13. Какие физические величины передаются через порты компонентов Simscape Electronics?

3. Лабораторная работа № 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА КОЛПИТЦА

3.1. Цель работы

Целью работы является создание модели и моделирование работы генератора Колпитца в Simcape Electronics.

3.2. Работа генератора Колпитца

Схема генератора Колпитца показана на рис. 10.

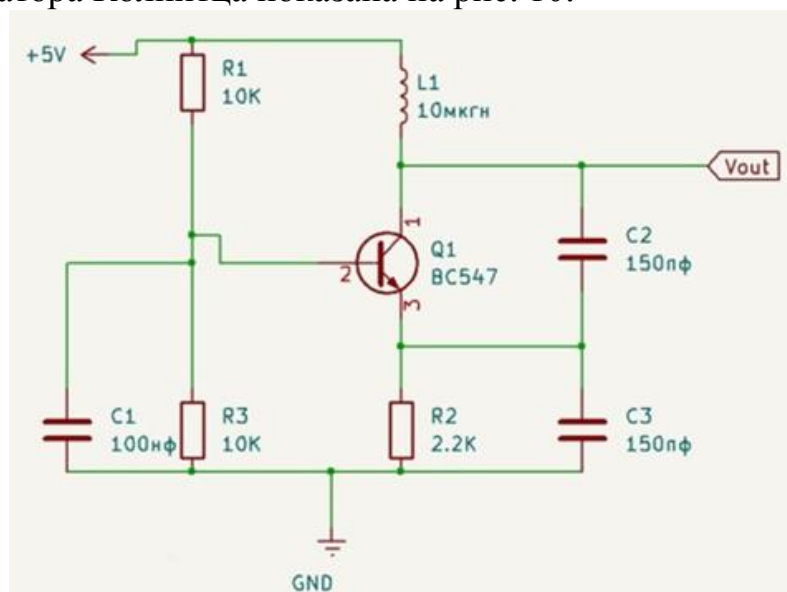


Рис. 10 – Схема генератора Колпитца

Генератор Колпитца – это электронный генератор синусоидальных сигналов, использующий биполярный транзистор (или полевой транзистор, операционный усилитель) и резонансный LC-контур с делителем ёмкости. Он относится к классу LC-генераторов и широко применяется в радиотехнике благодаря простоте схемы и стабильности частоты.

Генератор Колпитца работает на основе положительной обратной связи, создаваемой резонансным LC-контуром, который определяет частоту генерируемых колебаний.

Основные элементы схемы:

- усилительный элемент (обычно биполярный транзистор в схеме с общим эмиттером);
- LC-контур: состоит из катушки индуктивности L и двух конденсаторов C_1 и C_2 , образующих делитель напряжения;
- обратная связь: часть выходного сигнала с коллектора возвращается на базу транзистора через делитель C_1 , C_2 .

Генерация колебаний происходит, когда выполняются:

1. Условие амплитуды (выполнено условие Баркгаузена): коэффициент усиления каскада A , умноженный на коэффициент обратной связи β , равен или больше 1 ($A \cdot \beta \geq 1$).

2. Условие фазы: суммарный фазовый сдвиг в контуре обратной связи равен 0° или кратности 360° .

Типичная схема генератора Колпитца включает биполярный транзистор (п-р-п или р-п-р) в конфигурации с общим эмиттером, резонансный контур, катушка индуктивности L , два конденсатора C_1 и C_2 , соединённые последовательно, с точкой их соединения, подключённой к эмиттеру или земле.

Резисторы R_1 и R_2 образуют делитель напряжения для установки рабочей точки на базе.

R_E – резистор в цепи эмиттера для стабилизации тока.

R_C – резистор в цепи коллектора (иногда отсутствует, если сигнал снимается непосредственно с контура).

Конденсаторы развязки используются для предотвращения прохождения постоянного тока в контур или на выход.

Конденсатор C_E (включенный параллельно R_E) шунтирует эмиттер для переменного тока, увеличивая усиление.

Частота генерируемых колебаний определяется резонансной частотой LC-контура. Эквивалентная ёмкость контура C_{eq} вычисляется как ёмкость C_1 и C_2 , соединённых последовательно:

$$C_{eq} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}.$$

Резонансная частота f_0 :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_{eq}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}}}.$$

Делитель напряжения, образованный C_1 и C_2 , обеспечивает положительную обратную связь. Напряжение на C_1 (между базой и землёй) подаётся на базу транзистора, усиливая сигнал.

Коэффициент обратной связи β определяется соотношением ёмкостей:

$$\beta = \frac{C_2}{C_1}.$$

Чем больше C_2 по сравнению с C_1 , тем сильнее обратная связь, но это может снизить стабильность.

Для запуска генерации коэффициент усиления транзистора A должен компенсировать потери в контуре и обеспечивать $A \cdot \beta \geq 1$. В реальных схемах усиление избыточно на старте, а затем стабилизируется за счёт нелинейности транзистора (вход в режим насыщения).

Режимы работы:

– класс А: транзистор работает в линейном режиме, обеспечивая синусоидальный сигнал с минимальными искажениями.

– класс С: транзистор работает в нелинейном режиме, что повышает КПД, но увеличивает гармонические искажения. В генераторе Колпитца чаще используется класс А для чистоты синусоиды.

Преимущества схемы Колпитца: простота конструкции, хорошая стабильность частоты благодаря LC-контуре, подходит для высокочастотных приложений (от кГц до сотен МГц), низкий уровень гармонических искажений при правильной настройке

Недостатки: чувствительность к изменениям температуры и параметров компонентов (особенно L , C_1 , C_2), ограниченная амплитуда выходного сигнала из-за ограничений транзистора, требует точной настройки для стабильной работы.

Генератор Колпитца используется в радиопередатчиках и приёмниках (гетеродины), генераторах сигналов в измерительной технике, системах связи для генерации несущей частоты, в схемах с частотной модуляцией.

Пример расчёта

Допустим: $L = 100$ мкГн, $C_1 = 100$ пФ, $C_2 = 100$ пФ, $V_{CC} = 12$ В.

1. Эквивалентная ёмкость:

$$C_{eq} = \frac{100 \cdot 100}{100 + 100} = 50 \text{ пФ}$$

2. Резонансная частота:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{100 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^{-12}}} \approx 7,12 \text{ МГц}$$

3. Коэффициент обратной связи:

$$\beta = \frac{C_2}{C_1} = \frac{100}{100} = 1.$$

Для устойчивой генерации усиление транзистора должно быть $A \geq 1/\beta = 1$, что легко достигается.

Генератор Колпитца – это эффективная и простая схема для генерации синусоидальных сигналов с использованием LC-контра и делителя ёмкости. Его частота определяется параметрами L , C_1 , C_2 , а стабильность зависит от качества компонентов и настройки рабочей точки транзистора. Схема универсальна и широко применяется в радиотехнике.

На рис. 11 показана модель генератора Колпитца.

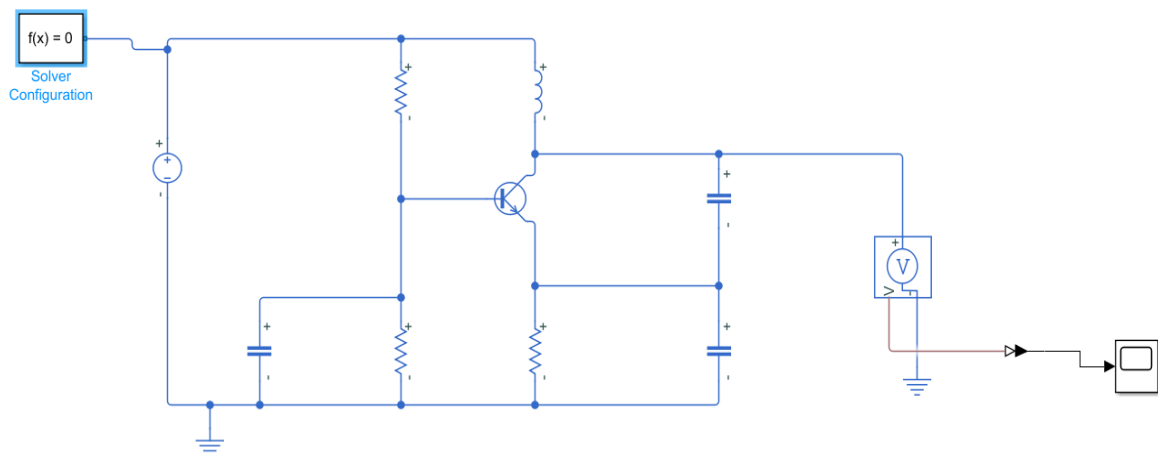


Рис. 11 – Модель генератора Колпитца

В результате моделирования должна быть получена зависимость напряжения на выходе генератора от времени, рис. 12.

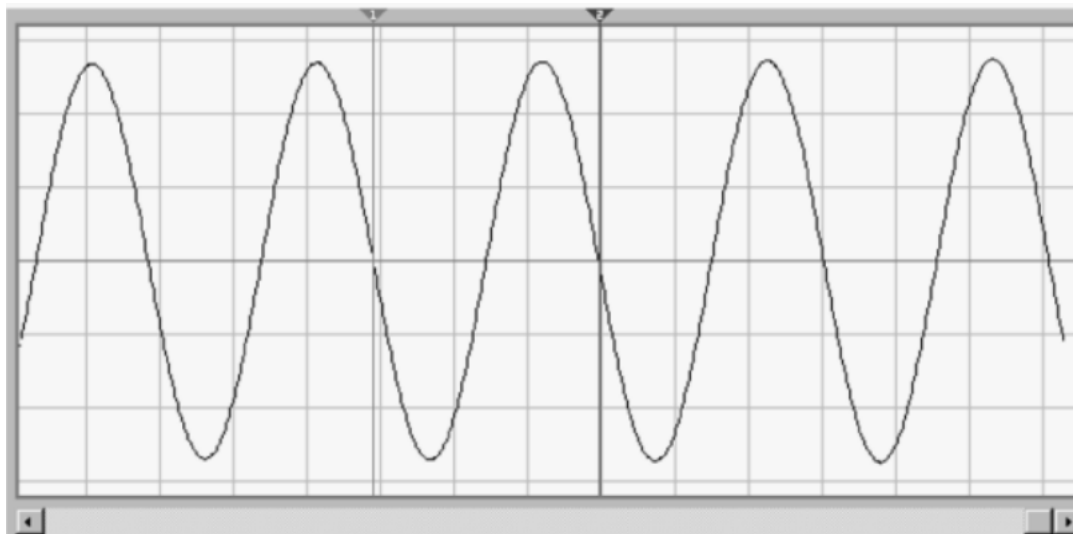


Рис. 12 – Зависимость напряжения на выходе генератора от времени

3.3. Порядок выполнения работы

В соответствии вариантом, выданным преподавателем, разработать модель мультивибратора, выполнить моделирование его работы, получить зависимость напряжения на выходе генератора от времени в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2 – Варианты по лабораторной работе № 2

№ вариан- та	Номиналы деталей			
	R1, кОм	R2, кОм	C1, нФ	C2, пФ
1	10	2,2	100	150
2	9	3	75	120
3	11	1	120	170
4	8,5	1,5	90	100
5	7	2,7	135	200
6	7,5	3,5	123	110
7	11,5	1,7	105	175
8	13	23	83	120
9	12	2,6	150	95
10	15	1,8	140	140
11	6	1,25	85	115
12	7,25	2	135	125
13	16	3,75	75	115
14	9,5	4	135	130

3.4. Вопросы для самоконтроля

1. Что такое генератор Колпитца, и какие типы сигналов он генерирует?
2. Какую роль играет LC-контур в генераторе Колпитца? Как рассчитывается резонансная частота?

3. Объясните назначение конденсаторов C_1 и C_2 в схеме генератора Колпитца.
4. Приведите формулу для расчёта эквивалентной ёмкости контура и резонансной частоты.
5. Как обеспечивается положительная обратная связь в генераторе Колпитца?
6. Какие параметры влияют на амплитуду и стабильность выходного сигнала генератора? 7. Как в Simscape Electronics смоделировать генератор Колпитца? Какие блоки используются?
7. Какие преимущества имеет генератор Колпитца по сравнению с мультивибратором?
8. Как влияет изменение индуктивности L на частоту генерируемого сигнала?
9. Какие меры можно предпринять для повышения стабильности частоты генератора Колпитца?
10. Какой блок в Simscape Electronics необходим для интеграции физической модели с блоками Simulink, и как он работает?
11. Как настроить параметры решателя в Simscape Electronics для повышения точности моделирования?
12. Какие преимущества даёт использование готовых блоков Simscape Electronics по сравнению с ручным написанием уравнений?
13. Как правильно выбрать тип решателя (например, ode23t или ode45) для моделирования электронных схем?
14. Объясните, как использовать блок Solver Configuration в моделях Simscape Electronics.
15. Какие параметры симуляции в Simulink наиболее важны для корректного моделирования электронных схем?

4. Лабораторная работа № 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

4.1. Цель работы

Целью работы является создание модели и моделирование работы усилителя на биполярном транзисторе в Simcape Electronics.

4.2. Работа усилителя на биполярном транзисторе

Модель усилителя на биполярном транзисторе показана на рис. 13.

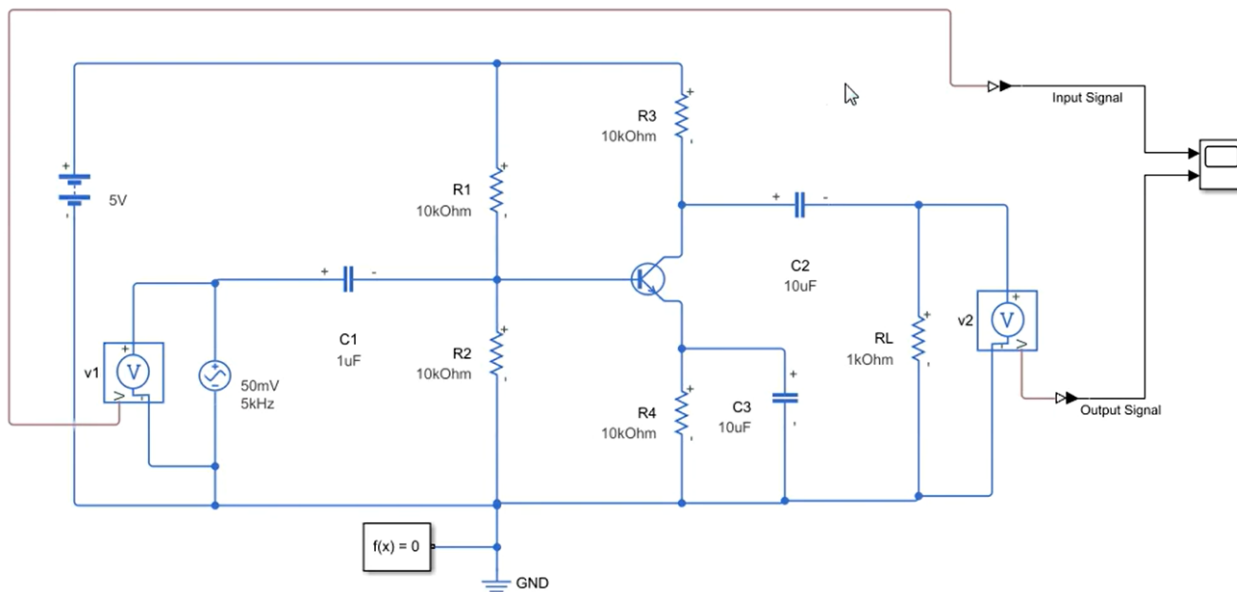


Рис. 13 – Модель усилителя на биполярном транзисторе

Теория усилителя на биполярном транзисторе с делителем напряжения в цепи базы и резистором с параллельным конденсатором в цепи эмиттера (схема с общим эмиттером) описывает одну из базовых конфигураций транзисторного усилителя. Рассмотрим её основные аспекты:

Схема усилителя включает биполярный транзистор (n-p-n или p-n-p) в конфигурации с общим эмиттером; делитель напряжения базы: два резистора R_1 и R_2 , подключённые к источнику питания V_{CC} , задают рабочую точку транзистора; резистор в цепи эмиттера R_E : обеспечивает отрицательную обратную связь, стабилизируя рабочую точку; конденсатор C_E , подключённый параллельно R_E : шунтирует R_E для переменного сигнала, увеличивая коэффициент усиления по переменному току; резистор нагрузки R_C в цепи коллектора: формирует выходной сигнал; входной и выходной конденсаторы (C_{in} , C_{out}): обеспечивают гальваническую развязку по постоянному току.

Режим постоянного тока (рабочая точка) определяется делителем напряжения R_1 и R_2 задаёт напряжение на базе V_B :

$$V_B = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Напряжение на эмиттере V_E определяется как

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

где $V_{BE} \approx 0,7$ В для кремниевого транзистора.

Ток эмиттера I_E :

$$I_E = \frac{V_E}{R_E}.$$

Ток коллектора $I_C \approx I_E$, так как ток базы I_B мал (коэффициент усиления по току $\beta \gg 1$).

Напряжение на коллекторе:

$$V_C = V_{CC} - I_C \cdot R_C$$

Резистор R_E стабилизирует рабочую точку, уменьшая зависимость от температуры и разброса параметров транзистора.

Переменный входной сигнал подаётся через C_{in} , который пропускает переменную составляющую и блокирует постоянный ток.

Конденсатор C_E шунтирует R_E для переменного тока, снижая сопротивление в цепи эмиттера до нуля (для частот, где $X_{C_E} = \frac{1}{2\pi f C_E} \ll R_E$).

Коэффициент усиления по напряжению A_V :

$$A_V \approx -\frac{R_C}{r_e},$$

где $r_e = \frac{1}{g_m} = \frac{kT}{qI_E} \approx \frac{25 \text{ мВ}}{I_E}$ – динамическое сопротивление эмиттерного перехода.

Знак «минус» указывает на инверсию фазы выходного сигнала относительно входного.

Входное сопротивление усилителя:

$$R_{in} \approx \beta \cdot (r_e + R_E).$$

Если C_E шунтирует R_E , то $R_{in} \approx \beta \cdot r_e$.

Выходное сопротивление $R_{out} \approx R_C$.

Делитель напряжения (R_1 , R_2): задаёт стабильное напряжение на базе, обеспечивая нужный режим работы транзистора.

Резистор R_E : стабилизирует ток покоя, снижая влияние температуры и разброса параметров.

Конденсатор C_E : увеличивает усиление для переменного сигнала, шунтируя R_E . Без C_E усиление уменьшается из-за отрицательной обратной связи через R_E .

Резистор R_C : определяет амплитуду выходного сигнала и влияет на усиление.

Конденсаторы C_{in} , C_{out} : обеспечивают развязку по постоянному току, пропуская только переменный сигнал.

Схема используется в усилителях звуковой частоты, предварительных каскадах радиоприёмников, аналоговых схемах обработки сигналов.

Пример расчёта.

Допустим: $V_{CC} = 12$ В, $R_1 = 10$ кОм, $R_2 = 15$ кОм, $R_E = 1$ кОм, $R_C = 2$ кОм, $\beta = 100$.

Напряжение на базе: $V_B = 12 \cdot \frac{15}{10+15} = 7,2 \text{ В}$.

Напряжение на эмиттере: $V_E = 7,2 - 0,7 = 6,5 \text{ В}$.

Ток эмиттера: $I_E = \frac{6,5}{1000} = 6,5 \text{ мА}$.

Ток коллектора: $I_C \approx 6,5 \text{ мА}$.

Напряжение на коллекторе: $V_C = 12 - 6,5 \cdot 2 = 12 - 13 = -1 \text{ В}$ (нужно пересмотреть R_C , чтобы $V_C > 0$).

Усиление: $r_e = \frac{25}{6,5} \approx 3,85 \text{ Ом}$, $A_V \approx -\frac{2000}{3,85} \approx -520$.

Схема с делителем напряжения и конденсатором в цепи эмиттера обеспечивает стабильную работу и высокое усиление. Для точного проектирования важно учитывать частотные характеристики, ёмкости конденсаторов и параметры транзистора.

В результате работы должны быть построены зависимости входных и выходных сигналов от времени, рис. 14.

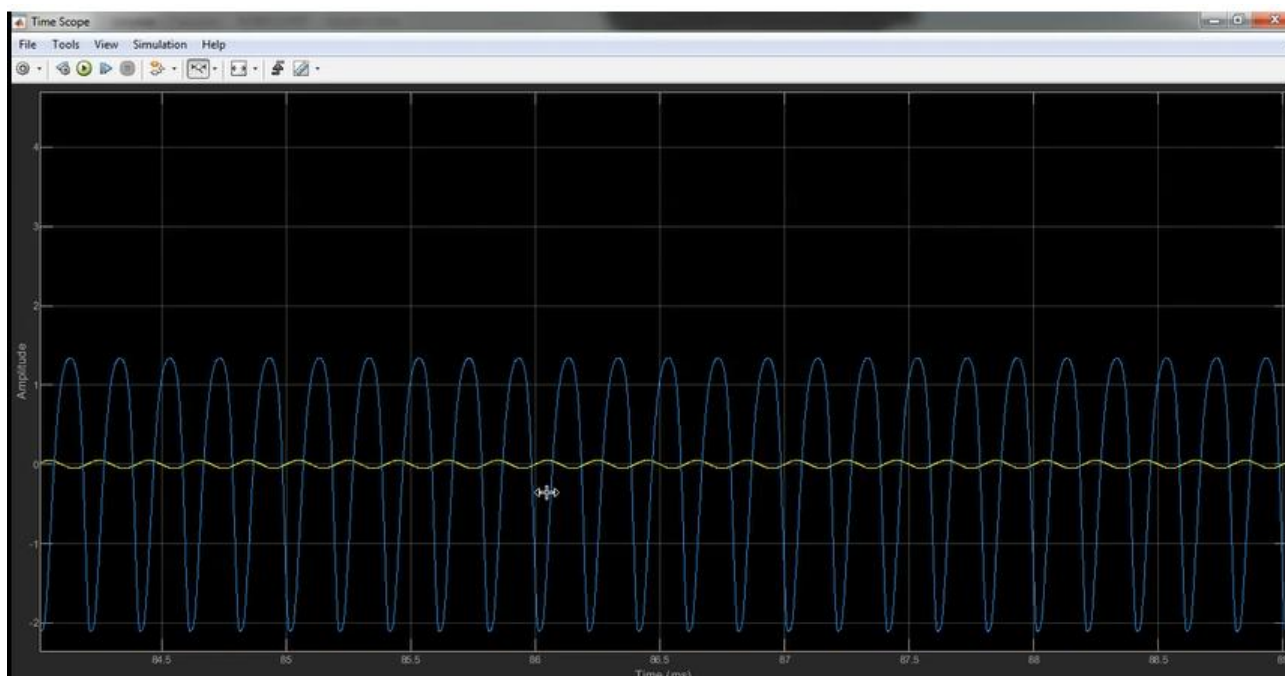


Рис. 14 – Зависимости входных и выходных сигналов от времени

4.3. Порядок выполнения работы

В соответствии вариантом, выданным преподавателем, разработать модель усилителя, выполнить моделирование его работы, получить зависимости входного и выходного напряжений на от времени в соответствии с таблицей 3.

Таблица 3 – Варианты по лабораторной работе № 3

№ вариан- та	Номиналы деталей			
	R1, кОм	R2, кОм	C1, нФ	C2, пФ
1	10	2,2	100	150
2	9	3	75	120
3	11	1	120	170
4	8,5	1,5	90	100
5	7	2,7	135	200
6	7,5	3,5	123	110
7	11,5	1,7	105	175
8	13	23	83	120
9	12	2,6	150	95
10	15	1,8	140	140
11	6	1,25	85	115
12	7,25	2	135	125
13	16	3,75	75	115
14	9,5	4	135	130

4.4. Вопросы для самоконтроля

1. Как работает усилитель на биполярном транзисторе с общим эмиттером?
2. Какую роль играет делитель напряжения в цепи базы усилителя?
3. Объясните назначение конденсатора, подключённого параллельно резистору в цепи эмиттера.
4. Как рассчитать коэффициент усиления по напряжению для схемы с общим эмиттером?
5. Какие параметры транзистора влияют на работу усилителя (например, β , $r_{ге}$)?
6. Как в Simscape Electronics настроить модель биполярного транзистора для усилителя?
7. Какие блоки Simscape используются для измерения напряжения и тока в схеме усилителя?
8. Почему в схеме усилителя используются конденсаторы развязки?
9. Как влияет значение резистора R_C на амплитуду выходного сигнала?
10. Какие недостатки имеет схема усилителя с общим эмиттером, и как их можно минимизировать?
11. Какие параметры биполярного транзистора (BJT) можно настроить в Simscape Electronics?
12. Как смоделировать n-p-n транзистор в режиме усиления в Simscape Electronics?
13. Какие блоки Simscape Electronics используются для моделирования MOSFET или IGBT?
14. Как задать коэффициент усиления (β) для биполярного транзистора в модели?

5. Лабораторная работа № 4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ ЦЕПИ НА ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ

5.1. Цель работы

Целью работы является создание модели и моделирование работы интегрирующей цепи в Simscape Electronics.

5.2. Работа интегрирующей цепи на операционном усилителе

Интегратор на операционном усилителе (ОУ) – это электронная схема, которая выполняет математическую операцию интегрирования входного сигнала по времени. Она широко используется в аналоговой электронике для обработки сигналов, в фильтрах, генераторах сигналов и системах управления.

Интегратор на ОУ преобразует входное напряжение $V_{in}(t)$ в выходное напряжение $V_{out}(t)$, которое пропорционально интегралу входного сигнала по времени:

$$V_{out}(t) = -\frac{1}{RC} \int V_{in}(t) dt + V_{out}(0),$$

где R – сопротивление резистора на входе,

C – емкость конденсатора в цепи обратной связи,

$V_{out}(0)$ – начальное напряжение на выходе (обычно принимается равным 0, если конденсатор разряжен).

Минус в формуле указывает на инвертирование сигнала, что обусловлено конфигурацией ОУ.

Базовая схема интегратора на ОУ включает операционный усилитель (идеально с высоким коэффициентом усиления и низким входным током); резистор R – подключен между входным сигналом V_{in} и инвертирующим входом ОУ (–); конденсатор C – подключен между инвертирующим входом (–) и выходом ОУ, образуя цепь обратной связи.

Неинвертирующий вход (+) – обычно подключен к земле (0 В) для обеспечения нулевого смещения.

Для анализа предположим, что ОУ идеальный (бесконечное усиление, нулевой входной ток, равенство потенциалов на входах).

По закону Ома ток через резистор R :

$$I_R = \frac{V_{in}}{R}.$$

Так как инвертирующий вход ОУ находится на потенциале земли (виртуальная земля, из-за высокого усиления ОУ), весь ток I_R течет через резистор.

Поскольку ток не течет в инвертирующий вход ОУ, ток I_R полностью идет на зарядку конденсатора C . Ток через конденсатор определяется как:

$$I_C = C \frac{dV_C}{dt},$$

где V_C – напряжение на конденсаторе, равное $-V_{out}$ (так как один конец конденсатора подключен к выходу ОУ, а другой – к виртуальной земле).

Так как $I_R = I_C$, получаем:

$$\frac{V_{in}}{R} = C \frac{d(-V_{out})}{dt}$$

или:

$$\frac{dV_{out}}{dt} = -\frac{V_{in}}{RC}.$$

Интегрируя обе стороны по времени, получаем:

$$V_{out}(t) = -\frac{1}{RC} \int V_{in}(t) dt + V_{out}(0).$$

Это показывает, что выходное напряжение пропорционально интегралу входного напряжения с коэффициентом $-\frac{1}{RC}$.

Интегратор на ОУ действует как фильтр нижних частот, поскольку его передаточная функция в частотной области имеет вид:

$$H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{1}{sRC},$$

где $s = j\omega$ – комплексная частота. Амплитуда передаточной функции уменьшается с увеличением частоты (ω), что характерно для интегратора.

Частота, при которой усиление равно 1 (0 дБ), называется частотой единичного усиления:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}.$$

На низких частотах интегратор эффективно интегрирует сигнал, а на высоких частотах его усиление падает.

Идеальный интегратор (описанный выше) имеет ряд ограничений в реальных условиях:

1. Накопление смещения. Входной ток смещения ОУ и дрейф напряжения могут заряжать конденсатор, вызывая дрейф выходного напряжения даже при $V_{in} = 0$. Решение: добавить резистор параллельно конденсатору (превращает интегратор в фильтр нижних частот с конечным усилением на низких частотах).

2. Насыщение ОУ. Если входной сигнал постоянный или низкочастотный, выходное напряжение может достичь предела питания ОУ ($\pm V_{cc}$), вызывая насыщение. Решение: использовать схемы с ограничением или сбросом (например, MOSFET для разрядки конденсатора).

Реальные ОУ имеют шумы и ограниченную полосу пропускания, что влияет на точность интегрирования.

Интегратор применяется при аналоговых вычислениях для выполнения

интегральных операций в аналоговых компьютерах; в генераторы сигналов, в схемах генерации треугольных или пилообразных сигналов; как часть активных фильтров нижних частот; системах управления для реализации интегральных звеньев в ПИД-регуляторах; для восстановления сигналов или подавления высокочастотных шумов.

Модель интегрирующей цепи на операционном усилителе с ограничивающими диодами на входе показана на рис. 15.

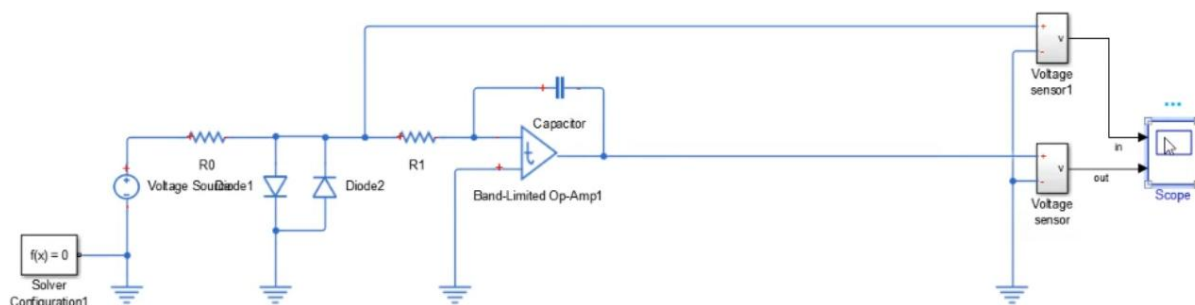


Рис. 15 – Модель интегрирующей цепи на операционном усилителе с ограничивающими диодами

Здесь $C = 1$ мкФ, $R_0 = 10$ КОм, $R_1 = 1$ МОм, напряжение источника 1 В.

В результате моделирования должны быть получены зависимости напряжений на входе и выходе интегратора, рис. 16.

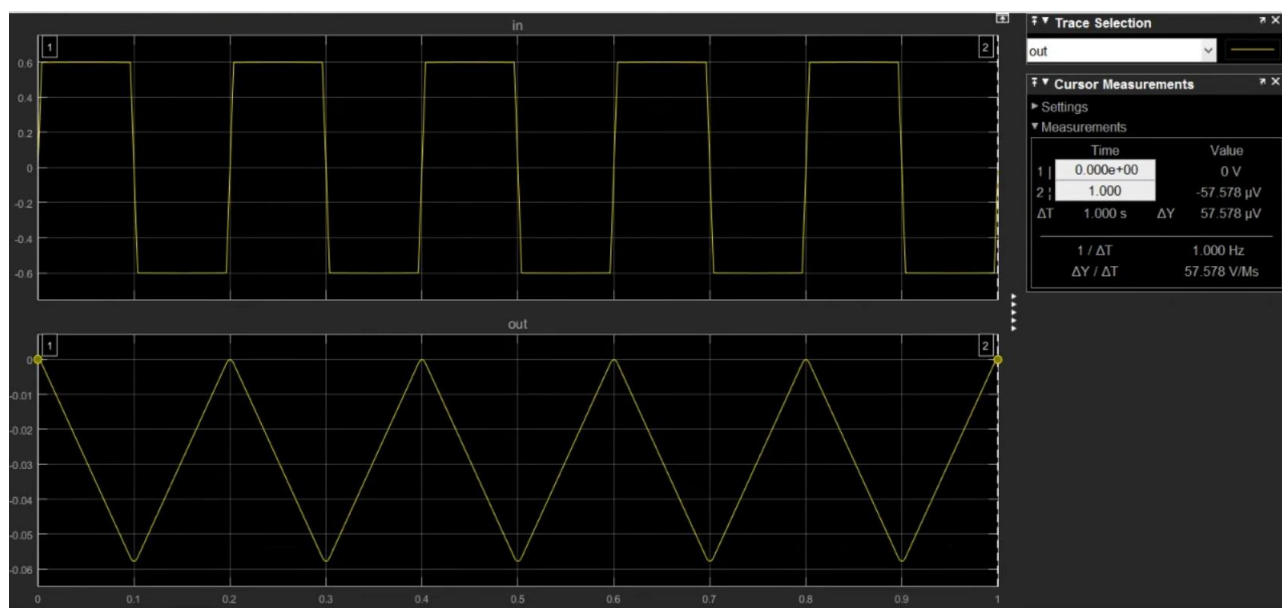


Рис. 16 – Зависимости напряжений на входе и выходе интегратора

5.3. Порядок выполнения работы

В соответствии вариантом, выданным преподавателем, разработать модель интегратора, выполнить моделирование его работы, получить зависимости входного и выходного напряжений от времени в соответствии с таблицей 4.

Таблица 4 – Варианты по лабораторной работе № 4

№ варианта	Номиналы деталей	
	R1, кОм	C, мкФ
1	10	1
2	11	0,5
3	9	0,25
4	12	1,25
5	8	1,5
6	10,5	1,75
7	11,5	2
8	8	3
9	13	2,5
10	15	3,5
11	14	1,25
12	7,25	135
13	16	1,75
14	9,5	1,45

5.4. Вопросы для самоконтроля

1. Что такое интегрирующая цепь на операционном усилителе, и каков её принцип действия?
2. Как рассчитывается выходное напряжение интегрирующей цепи? Приведите формулу.
3. Какие компоненты необходимы для построения интегрирующей цепи в Simscape Electronics?
4. Как влияет значение конденсатора в цепи обратной связи на характеристики интегратора?
5. Объясните, как в MATLAB/Simulink настроить модель операционного усилителя.
6. Какие операторы MATLAB используются для вычисления выражений, связанных с интегрированием?
7. Как преобразовать физический сигнал интегрирующей цепи в сигнал Simulink для анализа?
8. Какие практические применения имеет интегрирующая цепь в радиоэлектронике?
9. Как избежать насыщения операционного усилителя в интегрирующей цепи?
10. Какие параметры симуляции в Simulink следует настроить для корректного моделирования интегрирующей цепи?
11. Объясните, как использовать блок Solver Configuration в моделях Simscape Electronics.
12. Какие параметры симуляции в Simulink наиболее важны для корректного моделирования электронных схем?
13. Как в Simscape Electronics задать начальные условия для элементов с накоплением энергии (например, конденсаторов)?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дьяконов, В. П. MATLAB R2006/2007/2008 + Simulink 5/6/7. Основы применения / В. П. Дьяконов. – 2-е изд. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2008. – 800 с. – ISBN 978-5-91359-042-8. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/13774> (дата обращения: 16.06.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Монаков, А. А. Математическое моделирование радиотехнических систем / А. А. Монаков. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2023. – 148 с. – ISBN 978-5-507-47206-2. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/341177> (дата обращения: 16.06.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Формирование колебаний и сигналов [текст]: учебник для вузов / В. Н. Кулешов, Н. Н. Удалов, В. М. Богачев и др.; под ред. Н. Н. Удалова, В. Н. Кулешова. – М.: издат, Юрайт, 2018. – 421 с.
4. Радиопередающие устройства [текст]: учебник для вузов / В. В. Шахгильдян, В. В. Козырев, А. А. Ляховкин и др.; под ред. В. В. Шахгильдяна. – М. : Радио и связь, 2003. – 560 с.
5. Бочаров М. И. Построение и расчет схем автогенераторов [текст]: учеб. пособие / М. И. Бочаров. – Воронеж, ВГТУ, 2007. – 157 с.

Приложение А
ОБРАЗЕЦ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Институт радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем

Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

Лабораторной работе № ____
« _____ »
(название лабораторной работы)
по дисциплине
“**Математическое моделирование в радиоэлектронике**”
Вариант № ____

Выполнил студент гр. _____

(фамилия, инициалы)

Отметка о защите _____

Преподаватель _____

(фамилия, инициалы)

Севастополь 20__

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Учебно-методическое пособие

Составители: **Щекатурин** Андрей Алексеевич,
Васин Евгений Евгеньевич

В авторской редакции

Изд. № 204/2025. Объем 2 п. л. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,96.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»