

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

А.А. Короновский, А.О. Сельский, С.А. Куркин, О.И. Москаленко

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Учебно-методическое пособие

Содержание

Введение	2
Требования к умениям студентов при сдаче лабораторной работы	6
1 Генератор Рунцова (генератор с 1.5 степенями свободы)	7
1.1 Краткие теоретические сведения	7
1.1.1 Операционный усилитель	10
1.2 Задания	14
1.3 Требования к оформлению отчета	20
Список рекомендуемой литературы	22
2 Генератор на туннельном диоде (генератор Кияшко-Пиковского-Рабиновича)	23
2.1 Краткие теоретические сведения	23
2.1.1 Туннельный диод	26
2.1.2 Операционный усилитель	28
2.2 Задания	31
2.3 Требования к оформлению отчета	35
Список рекомендуемой литературы	37

Введение

Разработка практически любого современного радиоэлектронного устройства сопровождается, как правило, физическим или математическим моделированием. Физическое моделирование связано с большими материальными затратами, поскольку требует изготовления макетов и их исследования, которые могут быть весьма трудоемкими. Поэтому часто применяют математическое моделирование с использованием средств и методов вычислительной техники [1].

В данном учебном пособии рассматривается два подхода. Первый подход связан с непосредственным математическим моделированием системы дифференциальных уравнений, описывающих радиоэлектронное устройство. При этом студенту предоставляется возможность пройти все этапы построения и исследования модели: от выбора направлений течения токов в заданной схеме и составления системы дифференциальных уравнений с использованием законов Кирхгофа до численного интегрирования получившихся уравнений и обработки результатов численного моделирования.

Однако в последнее время появилось большое число специализированных программных пакетов. Одним из таких пакетов является электронная система моделирования Multisim (ранее Electronics Workbench), отличающаяся простым и интуитивно понятным пользовательским интерфейсом и широ-

кими возможностями моделирования. Большое распространение Multisim получила в средних и высших учебных заведениях, где она используется в учебных целях в качестве лабораторного практикума по целому ряду предметов (физика, основы электротехники и электроники, основы вычислительной техники и автоматики, электронные приборы, радиоп физика и электроника и др.). Электронная система моделирования Multisim имитирует реальное рабочее место исследователя – лабораторию, оборудованную измерительными приборами, работающими в реальном масштабе времени. С ее помощью можно создавать и моделировать как простые, так и сложные аналоговые и цифровые радиоп физические устройства. Таким образом, вторым подходом к моделированию радиоэлектронного устройства в данном учебном пособии будет использование пакета Multisim.

Объектом исследования являются радиоэлектронные генераторы (генератор Рунькова, генератор на туннельном диоде). Это связано с относительной простотой общей схемы данного класса устройств, а так же с их важностью для радиоэлектроники в целом [2]. Генератор гармонических или других видов колебаний является неотъемлемой частью почти любого электронного устройства. Кроме очевидных случаев автономных генераторов (а именно генераторы синусоидальных сигналов, импульсные генераторы) источник регулярных колебаний необходим в любом периодически действующем изме-

рительном приборе, в устройствах, инициирующих измерения или технологические процессы, и вообще в любом приборе, работа которого связана с периодическими состояниями или периодическими колебаниями. Они присутствуют практически везде. Так, например, генераторы колебаний специальной формы используются в цифровых мультиметрах, осциллографах, радиоприемниках, ЭВМ, в любом периферийном устройстве ЭВМ, почти в любом цифровом приборе (счетчики, таймеры, калькуляторы и любые приборы с “многократным отображением”) и во множестве других устройств, слишком многочисленных, чтобы их перечислять. Устройство без генератора либо вообще ни на что не способно, либо предназначено для подключения к другому (которое, скорее всего, содержит генератор). Не будет преувеличением сказать, что генераторы являются таким же необходимым устройством в электронике, как регулируемый источник питания постоянного тока. Особое внимание в последнее время уделяется генераторам хаотических колебаний, как одному из перспективных направлений в нелинейной динамике.

Учебное пособие предназначено для студентов старших курсов факультета нелинейных процессов ФГБОУ ВПО “Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского”, обучающихся по специальностям “Физика открытых нелинейных систем” и “Радиофизика”. Пособие может быть рекомендовано также в качестве дополнительной литературы при

подготовке курсовых и дипломных работ студентами, обучающимися на факультете нелинейных процессов, а также других факультетах и вузах, осуществляющих подготовку специалистов по смежным специальностям и направлениям.

Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

Требования к умениям студентов при сдаче лабораторной работы

Для того, чтобы успешно сдать лабораторную работу и получить зачет по курсу “Лаборатория вычислительного эксперимента”, студент обязан:

1. Пользуясь теоретической справкой, представленной пособию (см. подраздел **Краткие теоретические сведения** раздела, посвященного исследуемому генератору), тщательно ознакомиться с основами теории исследуемого генератора и ответить на предлагаемые контрольные вопросы (см. подраздел **Задания**, вопросы приведены к каждому заданию). При этом крайне желательно использовать рекомендуемую литературу (см. подраздел **Список рекомендуемой литературы**).
2. Выполнить все практические задания (см. подраздел **Задания** раздела, посвященного исследуемому генератору). Рекомендуется выполнять их по порядку.
3. По результатам выполненных практических заданий представить отчет, выполненный в редакторе \LaTeX (см. подраздел **Требования к оформлению отчета**). Отчет должен содержать все основные результаты, грамотно обработанные рисунки и таблицы с данными (где это уместно).

1 Генератор Рутькова (генератор с 1.5 степенями свободы)

В данной работе исследуется хаотический генератор с 1.5 степенями свободы (генератор Рутькова). В разделе 1.1 содержится краткое теоретическое описание генератора Рутькова, а также операционного усилителя, являющегося одним из основных элементов данного прибора. В разделе 1.2 содержатся указания для выполнения практических заданий, а также контрольные вопросы. В ходе выполнения работы студент должен овладеть навыками построения модели генератора в виде системы дифференциальных уравнений по приведенной схеме, а также навыками моделирования сложных радиоэлектронных объектов с помощью программы Multisim на примере предложенной схемы генератора. Особое внимание уделяется сравнению данных двух подходов к моделированию сложных устройств. Отдельным заданием стоит теоретическое исследование нелинейного элемента, составляющего основу для функционирования генератора, а также углубленное изучение возможных режимов работы генератора.

1.1 Краткие теоретические сведения

Схема генератора Рутькова [3] изображена на рисунке 1. На нем также приведены некоторые типичные параметры, которые рекомендуется использовать при выполнении большин-

ства заданий данной лабораторной работы. Генератор состоит из двух резисторов (R и r), двух емкостей (C и C'), катушки индуктивности (L) и нелинейного элемента (N). На рисунке 2 изображена схема нелинейного элемента и даны типовые параметры. Стоит обратить внимание, что $Rn3$ и $Rn6$ являются потенциометрами, то есть их сопротивление можно регулировать. Регулировкой этих потенциометров (сопротивление задается в процентах от максимально возможного значения) изменяется управляющий параметр системы α . Таким образом, меняя сопротивление на потенциометрах можно управлять режимом работы генератора.

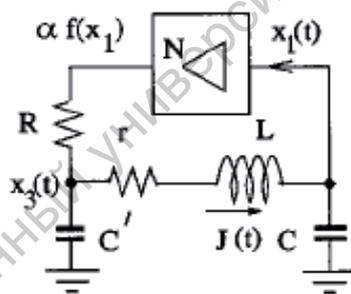


Рис. 1: Схема генератора Рулькова. Здесь: N – нелинейный элемент с передаточной функцией $\alpha f(x)$; $R = 4.01$ кОм, $r = 348$ Ом – резисторы; $C = 332$ нФ, $C' = 220$ нФ – емкости; $L = 144.9$ мГн – катушка индуктивности

На рисунке 3 приведено несколько типичных аттракторов системы, соответствующих различным режимам работы генератора с 1.5 степенями свободы. Данные аттракторы построены для различных значений управляющего параметра α . В хо-

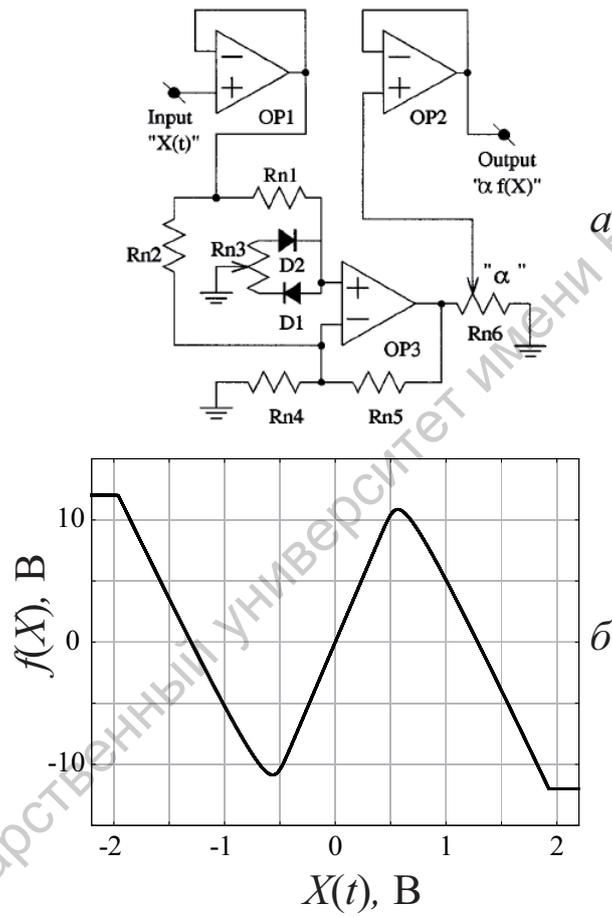


Рис. 2: (а) Схема нелинейного элемента. Здесь: $Rn1 = 2.7$ кОм; $Rn2 = Rn4 = 7.4$ кОм; $Rn3 = 100$ Ом; $Rn5 = 186$ кОм; $Rn6 = 2$ кОм. (б) Вид передаточной функции

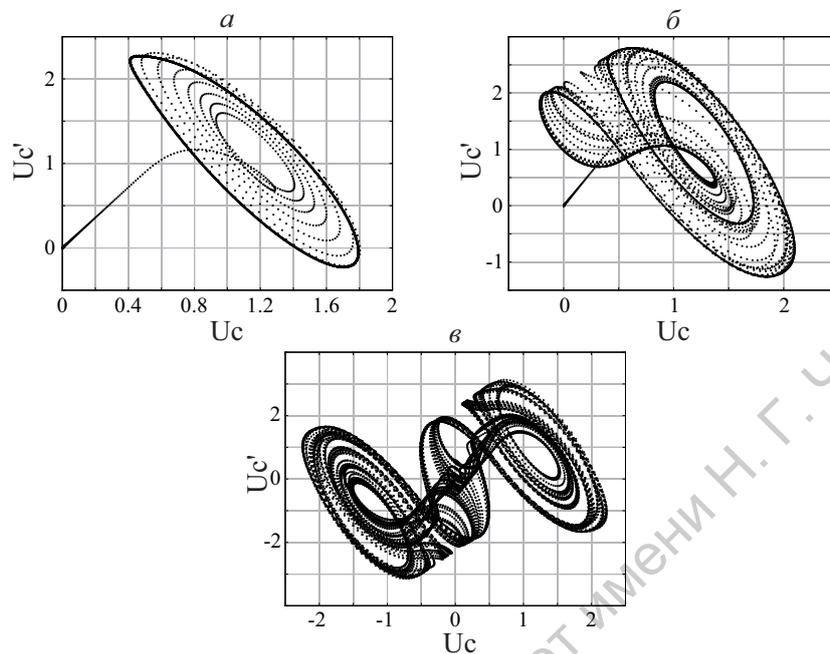


Рис. 3: Несколько наиболее типичных аттракторов. *a* – периодические колебания с периодом 1; *b*, *v* – хаос, с одной и двумя петлями, соответственно

де выполнения работы студенту будет необходимо пронаблюдать каждый из приведенных динамических режимов; также рекомендуется провести более углубленное исследование генератора, изменяя другие параметры системы (кроме управляющего параметра) и наблюдая, как изменяется её динамика.

1.1.1 Операционный усилитель

В исследуемом генераторе центральным элементом является операционный усилитель. Кратко рассмотрим принцип его работы и основные правила, определяющие характер функционирования операционного усилителя. Также в данном разделе

уделим внимание типовым схемам с использованием операционных усилителей.

Итак, операционный усилитель (ОУ) – это дифференциальный усилитель постоянного тока с очень большим коэффициентом усиления и несимметричным выходом. Коэффициент усиления очень высок, и обычно достигает $10^5 - 10^6$. На рисунке 4а показано условное обозначение ОУ на схемах. ОУ имеет два входа, (+) и (-), выходной сигнал изменяется в положительном направлении, когда потенциал на входе (+) становится более положительным, чем потенциал на входе (-), и наоборот. Символы “+” и “-” не означают, что на одном входе потенциал всегда должен быть более положительным, чем на другом; эти символы просто указывают относительную фазу выходного сигнала. Поэтому входы принято называть “инвертирующий” и “неинвертирующий”, а не “плюс” и “минус”. Операционные усилители никогда не используются без обратной связи, можно даже сказать, что они созданы для работы с обратной связью. Более детально работу операционного усилителя можно изучить в [4–6].

Теперь обратимся к важнейшим правилам, которые определяют поведение операционного усилителя, охваченного петлей обратной связи. Они справедливы для большинства возможных схем с использованием ОУ.

Во-первых, операционный усилитель обладает столь большим коэффициентом усиления по напряжению, что измене-

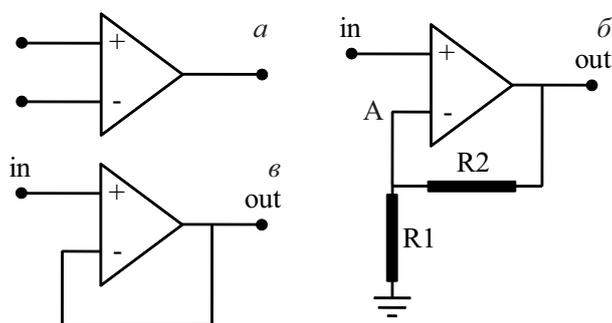


Рис. 4: *a* – Условное обозначение операционного усилителя на радиоэлектронных схемах; *b* – схема неинвертирующего усилителя; *в* – схема повторителя

ние напряжения между входами на несколько долей милливольты вызывает изменение выходного напряжения в пределах его полного диапазона, поэтому не будем рассматривать это небольшое напряжение, а сформулируем правило I:

I. Выход операционного усилителя стремится к тому, чтобы разность напряжений между его входами была равна нулю.

Во-вторых, операционный усилитель потребляет очень небольшой входной ток.

II. Входы операционного усилителя ток не потребляют.

Стоит отметить что изменение напряжений на входе изменяет не сам ОУ, оно изменяется в результате действия обратной связи между входами и выходом операционного усилителя. Данные правила дают достаточно информации для понимания работы ОУ в различных радиоэлектронных схемах.

Рассмотрим теперь основные схемы, основанные на опера-

ционных усилителях.

Неинвертирующий усилитель

На рисунке 4б приведена схема неинвертирующего усилителя. Здесь $U_A = U_{in}$. При этом $U_A = U_{out} \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$. Таким образом, коэффициент усиления зависит только от значения сопротивлений: $U_{out} / U_{in} = 1 + R_2 / R_1$.

Повторитель

На рисунке 4в представлен повторитель. Данная схема похожа на неинвертирующий усилитель, если сопротивление R_1 устремить к бесконечности, а R_2 к нулю. Тогда коэффициент усиления равен единице. Данный элемент используется как буфер.

1.2 Задания

Приведенные ниже задания подразумевают как практическую, так и теоретическую работу. В частности, к теоретической части относится получение системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику генератора Рулькова, и исследование нелинейного элемента. Данные пункты необходимы для полного понимания процессов, протекающих в данном радиоэлектронном устройстве. Таким образом, поддерживается баланс между непосредственным моделированием и изучением генератора как сложной нелинейной системы.

Задание №1. Получение системы дифференциальных уравнений генератора

1. Вспомнить закон Ома и законы Кирхгофа.
2. Используя упомянутые выше законы, составить уравнения, описывающие приведенную в разделе 1.1 схему.
3. Привести полученные уравнения к безразмерному виду.

Примечание. У данного генератора 1.5 степени свободы. Рекомендуется в качестве динамических переменных выбрать оба напряжения на конденсаторах и ток через катушку индуктивности. При составлении уравнений следует помнить, что нелинейный элемент не потребляет тока. Функцию $\alpha f(x)$ следует подставлять в уравнения в общем виде.

Контрольные вопросы. Получение системы дифференциальных уравнений генератора

1. На примере простой цепи показать, как с помощью законов Кирхгофа можно получить уравнения, описывающие систему (цепь придумать самостоятельно).

2. Объяснить, почему генератору с 1.5 степенями свободы соответствует система из трех дифференциальных уравнений [7].

3. Предположить, какие аттракторы могут быть получены при решении данной системы дифференциальных уравнений.

Задание №2. Исследование нелинейного элемента

1. Составить в программном пакете Multisim схему, идентичную нелинейному элементу, описанному в разделе 1.1.

2. Снять с нелинейного элемента передаточную характеристику и сравнить её с приведенной в разделе 1.1.

Контрольные вопросы. Исследование нелинейного элемента

1. Объяснить, почему не имеет смысла подавать на вход нелинейного элемента напряжение, которое по модулю превышает 2 В.

2. Нарисовать вольт-амперную характеристику диода. Сравнить её с характеристикой, построенной для диода в программном пакете Multisim.

Задание №3. Решение системы дифференциальных уравнений генератора

1. Вспомнить метод Эйлера или метод Рунге-Кутты для решения систем дифференциальных уравнений [8]. Создать программный модуль для решения системы дифференциальных уравнений методом Эйлера или методом Рунге-Кутты. Проверить правильность модуля на уравнении $\dot{x} = \sin x$.
2. Аппроксимировать передаточную функцию нелинейного элемента, полученную при выполнении предыдущего задания, и привести её к безразмерному виду для дальнейшего использования при численном решении системы дифференциальных уравнений.
3. С помощью разработанного программного модуля численно решить полученную систему безразмерных уравнений генератора и пронаблюдать аттракторы, реализуемые в схеме при различных значениях параметров.

Примечание. В первую очередь, следует воспользоваться рекомендованными значениями параметров схемы генератора, изменяя только управляющий параметр α . Следующим этапом полезно рассмотреть, как перестраивается динамика системы при изменении других параметров схемы.

4. Запротоколировать данные и построить соответствующие рисунки.

Примечание. Наиболее удобно для рассмотрения аттракторов системы использовать фазовое пространство напряжений на конденсаторах. Необходимо найти значения управляющего параметра α , отвечающие трем типовым аттракторам, изображенным на рисунке 3, и построить соответствующие рисунки.

Задание №4. Моделирование генератора Рутькова в Multisim

1. Составить в программном пакете Multisim схему, идентичную генератору Рутькова, описанному в разделе 1.1.
2. Запустить собранную схему и пронаблюдать различные аттракторы при изменении параметров системы.
3. Сравнить аттракторы, полученные с использованием пакета Multisim, с аттракторами, полученными при выполнении предыдущего задания при численном решении системы дифференциальных уравнений, описывающей генератор.

Контрольные вопросы. Моделирование генератора Рутькова в Multisim

1. Придумать, каким образом можно сопоставить параметр α в системе дифференциальных уравнений с сопротивлением

$Rn6$ на схеме в Multisim для получения идентичных аттракторов.

2. Объясните разницу в аттракторах, полученных с помощью решения дифференциальных уравнений и с помощью программы Multisim.

Задание №5. Теоретическое исследование нелинейного элемента*

1. Подробно изучить принципы действия операционного усилителя [4]. На основе общих принципов объяснить работу нелинейного элемента.
2. Используя соображения, полученные в предыдущем пункте, вывести кусочно-линейную функцию, соответствующую передаточной функции нелинейного элемента.

Примечание. Напряжение, поданное на нелинейный элемент, в общем случае отличается от напряжения на диоде из-за собственного сопротивления диода.

Контрольные вопросы. Теоретическое исследование нелинейного элемента*

1. Предложите метод, по которому можно вычислить собственное сопротивление диода.
2. Установить, как напряжение, приложенное к диоду, меняется с увеличением напряжения, поданного на вход нелинейного элемента.

3. Как можно интерпретировать в схеме нелинейного элемента одинаковые участки цепи, включающие операционный усилитель на входе и выходе нелинейного элемента? Какова их функция?

Задание №6. Исследование хаотического режима в генераторе Рутькова*

1. В схеме для генератора Рутькова в программе Multisim добавить спектрометр и пронаблюдать спектры для четырех основных режимов (которые показаны на рисунке 3).
2. Написать программу для расчета спектров сигналов, протестировать её на уравнении $\dot{x} = \sin x$. Рассчитать спектры для основных режимов, которые демонстрирует решение системы дифференциальных уравнений, полученной при выполнении задания 3. Сравнить спектры, рассчитанные самостоятельно, со спектрами из программы Multisim.
3. Написать программу для расчета старшего показателя Ляпунова системы. Доказать, что в системе можно наблюдать хаос.

1.3 Требования к оформлению отчета

В отчете обязательно должны присутствовать:

1. Схема генератора с указанием напряжений и токов, выбранных при выводе уравнений Кирхгофа. Уравнения, полученные из законов Кирхгофа, в размерной и безразмерной форме. Необходимо привести параметры нормировки.

2. Передаточная функция нелинейного элемента, построенная с помощью программы Multisim. Вид аппроксимации передаточной функции с указанием параметров аппроксимации. Передаточная функция и аппроксимация должны быть построены на одном графике (в одинаковом масштабе) для сравнения.

3. Аттракторы для трех основных режимов, изображенных на рисунке 3, полученные при решении системы дифференциальных уравнений. Необходимо указать, каким значениям параметра α соответствуют данные режимы.

4. Должно быть указано, как был выбран параметр α для схемы в программе Multisim. Для параметров α , выбранных в предыдущем пункте, построить фазовые портреты с помощью программы Multisim. Строить графики необходимо в тех же координатных осях и в том же масштабе (в тех же единицах), что в пункте 3. Для простоты сравнения рекомендуется изобразить на одном рисунке аттракторы, рассчитанные двумя способами. Сравнить полученные результаты и объяснить

различия.

5*. Схема нелинейного элемента с указанием напряжений и токов. Основные допущения, использованные при анализе нелинейного элемента. Должны быть приведены уравнения для расчета токов и напряжений, в результате решения которых была получена кусочно-линейная аппроксимация передаточной функции. Для сравнения на одном рисунке изобразить полученную кусочно-линейную аппроксимацию и передаточную функцию, полученную с помощью программы Multisim.

6*. Спектры, полученные в программе Multisim для основных режимов. Спектры для данных режимов, рассчитанные с использованием программы для решения системы дифференциальных уравнений. График зависимости старшего ляпуновского показателя от управляющего параметра исследуемого генератора.

7. В отчете должны быть представлены выводы по результатам, полученным с использованием различных методов моделирования.

Список рекомендуемой литературы

1. А.А. Самарский, А.П. Михайлов., *Математическое моделирование*, ФИЗМАТЛИТ, 2002. 320 с.
2. Е.И. Манаев, *Основы радиоэлектроники*, Радио и связь, 1990.
3. N.F. Rulkov, *Images of synchronized chaos: Experiments with circuits*, CHAOS 6 (3), 1996.
4. П. Хоровиц, У. Хилл, *Искусство схемотехники T1, T2*, М.: Мир, 1986. 600 с.
5. Ж. Марше, *Операционные усилители и их применение*, Л.: “Энергия”, 1974.
6. Л. Фолкенберри, *Применения операционных усилителей и линейных ИС*, М.: Мир, 1985.
7. Д.И. Трубецков, А.Г. Рожнев, *Линейные колебания и волны*, М.: Физматлит, 2001. 416 с.
8. Г. Корн, Т. Корн, *Справочник по математике для научных работников и инженеров*, М.: Наука, 1978. 832 с.

2 Генератор на туннельном диоде (генератор Кияшко-Пиковского-Рабиновича)

В данной работе исследуется хаотический генератор на туннельном диоде. В разделе 2.1 содержится краткое теоретическое описание генератора Кияшко-Пиковского-Рабиновича, а также операционного усилителя и туннельного диода, являющихся одними из основных элементов данного прибора. В разделе 2.2 содержатся указания для выполнения практических заданий, а также контрольные вопросы. В ходе выполнения работы студент должен овладеть навыками построения модели генератора в виде системы дифференциальных уравнений по приведенной схеме, а также навыками моделирования сложных радиоэлектронных объектов с помощью программы Multisim на примере предложенной схемы генератора. Особое внимание уделяется сравнению данных двух подходов к моделированию сложных устройств. Отдельным заданием стоит теоретическое исследование нелинейного элемента, составляющего основу для функционирования генератора, а также углубленное изучение возможных режимов работы генератора.

2.1 Краткие теоретические сведения

Схема генератора Кияшко-Пиковского-Рабиновича [1] изображена на рисунке 5. Генератор состоит из одного резистора (r),

двух емкостей (C_1 и C), катушки индуктивности (L), отрицательного сопротивления ($-R$) и туннельного диода. На рисунке 6а изображена эквивалентная схема для кусочно-линейной модели туннельного диода. Вольт-амперная характеристика кусочно-линейной модели приведена на рисунке 6б. На рисунке 7 представлена схема отрицательного сопротивления.

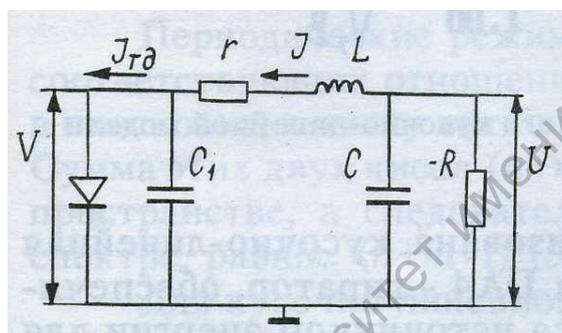


Рис. 5: Схема генератора Кияшко-Пиковского-Рабиновича. Здесь: J_{td} – ток через туннельный диод; $-R$ – отрицательное сопротивление; r – резистор; C , C_1 – емкости; L – катушка индуктивности. J – ток через катушку индуктивности; V , U – напряжения на конденсаторах C_1 , C , соответственно

На рисунке 8 приведено несколько типичных аттракторов системы, соответствующих различным режимам работы генератора на туннельном диоде. Данные аттракторы построены при различных значениях параметров генератора. Параметры, приведенные на рисунках 5–7 являются типовыми, управляющим параметром удобно выбрать сопротивление r . В ходе выполнения работы студенту будет необходимо пронаблюдать каждый из данных аттракторов.

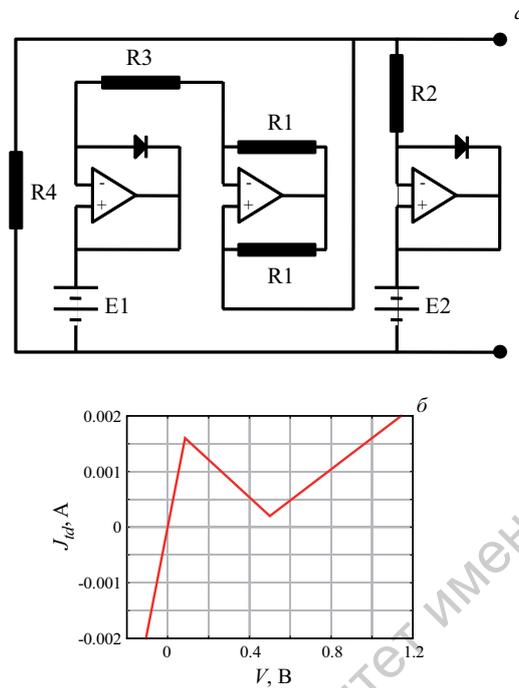


Рис. 6: (а) Схема кусочно-линейной аппроксимации туннельного диода. Здесь: $R1 = 150 \text{ Ом}$; $R2 = 157.5 \text{ Ом}$; $R3 = 43.645 \text{ Ом}$; $Rn4 = 51.5 \text{ Ом}$; $E1 = 0.085 \text{ В}$; $E2 = 0.5 \text{ В}$. (б) Вид ВАХ кусочно-линейной модели туннельного диода

При моделировании генератора в программе Multisim рекомендуется использовать следующий набор параметров: $C1 = 2 \text{ нФ}$, $C = 6.8 \text{ нФ}$, $-R = 1500 \text{ Ом}$, $L = 3.5 \text{ мГн}$, $R1 = 120 \text{ Ом}$, $R2 = 154 \text{ Ом}$, $R3 = 45 \text{ Ом}$, $R4 = 51.5 \text{ Ом}$, $E1 = 0.085 \text{ В}$ и $E2 = 0.5 \text{ В}$. При численном моделировании лучше взять следующие значения: $R1 = 300 \text{ Ом}$, $R2 = 134 \text{ Ом}$, $R3 = 79 \text{ Ом}$, $R4 = 125 \text{ Ом}$.

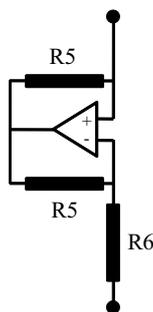


Рис. 7: Схема отрицательного сопротивления. Здесь: $R5 = 3.6 \text{ кОм}$; $R6 = 1.5 \text{ кОм}$

2.1.1 Туннельный диод

Туннельный диод был изготовлен в 1958 году Лео Эсаки, который в 1973 году получил Нобелевскую премию по физике за экспериментальное обнаружение эффекта туннелирования электронов в этих диодах [2]. Наибольшее распространение на практике получили туннельные диоды из Ge, GaAs, а также из GaSb. Эти диоды находят широкое применение в качестве генераторов и высокочастотных переключателей, они работают на частотах, во много раз превышающих частоты работы тетродов, до 30...100 ГГц.

Обычные диоды при увеличении прямого напряжения монотонно увеличивают пропускаемый ток. В туннельном диоде квантово-механическое туннелирование электронов добавляет горб в вольтамперную характеристику, при этом, из-за высокой степени легирования p и n областей, напряжение пробоя уменьшается практически до нуля. Туннельный эффект позволяет электронам преодолеть энергетический барьер в зоне

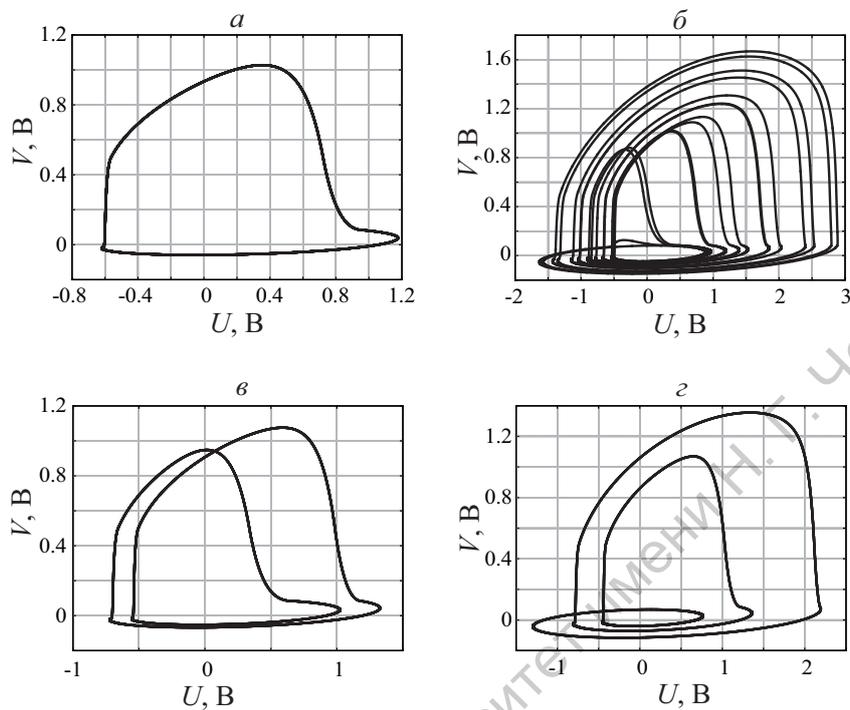


Рис. 8: Несколько наиболее типичных аттракторов. *a* – периодические колебания с периодом 1, без обхвата нуля. *б* – хаос, с обхватом нуля. *в* – периодические колебания с периодом 2, без обхвата нуля. *г* – периодические колебания с периодом 2, с обхватом нуля

перехода с шириной 50..150 Å при таких напряжениях, когда зона проводимости в n -области имеет равные энергетические уровни с валентной зоной p -области [3]. При дальнейшем увеличении прямого напряжения уровень Ферми n -области поднимается относительно p -области, попадая на запрещенную зону p -области, а поскольку туннелирование не может изменить полную энергию электрона, вероятность перехода электрона из n -области в p -область резко падает. Это создает на прямом участке вольт-амперной характеристики область, где

увеличение прямого напряжения сопровождается уменьшением силы тока. Данная область отрицательного дифференциального сопротивления используется для усиления слабых сверхвысокочастотных сигналов.

Характерная ВАХ туннельного диода изображена на рисунке 9.

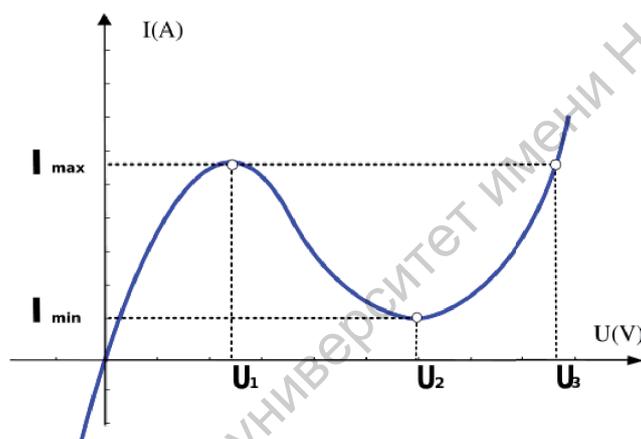


Рис. 9: ВАХ туннельного диода

2.1.2 Операционный усилитель

В исследуемом генераторе центральным элементом является операционный усилитель. Кратко рассмотрим принцип его работы и основные правила, определяющие характер функционирования операционного усилителя. Также в данном разделе уделим внимание типовым схемам с использованием операционных усилителей.

Итак, операционный усилитель (ОУ) – это дифференциальный усилитель постоянного тока с очень большим коэффициентом усиления и несимметричным выходом. Коэффициент усиления очень высок, и обычно достигает $10^5 - 10^6$. На рисунке 10а показано условное обозначение ОУ на схемах. ОУ имеет два входа, (+) и (-), выходной сигнал изменяется в положительном направлении, когда потенциал на входе (+) становится более положительным, чем потенциал на входе (-), и наоборот. Символы “+” и “-” не означают, что на одном входе потенциал всегда должен быть более положительным, чем на другом; эти символы просто указывают относительную фазу выходного сигнала. Поэтому входы принято называть “инвертирующий” и “неинвертирующий”, а не “плюс” и “минус”. Операционные усилители никогда не используются без обратной связи, можно даже сказать, что они созданы для работы с обратной связью. Более детально работу операционного усилителя можно изучить в [4–7].

Теперь обратимся к важнейшим правилам, которые определяют поведение операционного усилителя, охваченного петлей обратной связи. Они справедливы для большинства возможных схем с использованием ОУ.

Во-первых, операционный усилитель обладает столь большим коэффициентом усиления по напряжению, что изменение напряжения между входами на несколько долей милливольт вызывает изменение выходного напряжения в преде-

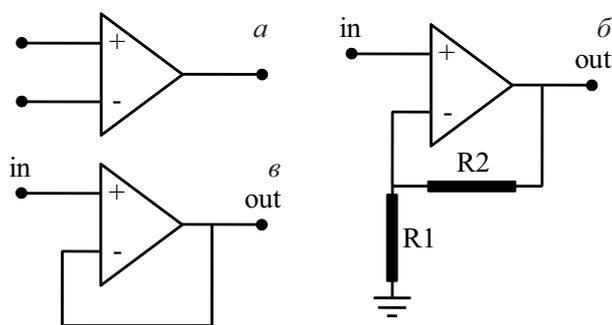


Рис. 10: *a* – Условное обозначение операционного усилителя на радиоэлектронных схемах; *б* – схема неинвертирующего усилителя; *в* – схема повторителя

лах его полного диапазона, поэтому не будем рассматривать это небольшое напряжение, а сформулируем правило I:

I. Выход операционного усилителя стремится к тому, чтобы разность напряжений между его входами была равна нулю.

Во-вторых, операционный усилитель потребляет очень небольшой входной ток.

II. Входы операционного усилителя ток не потребляют.

Стоит отметить что изменение напряжений на входе изменяет не сам ОУ, оно изменяется в результате действия обратной связи между входами и выходом операционного усилителя. Данные правила дают достаточно информации для понимания работы ОУ в различных радиоэлектронных схемах.

2.2 Задания

Приведенные ниже задания подразумевают как практическую, так и теоретическую работу. В частности, к теоретической части относится получение системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику генератора на туннельном диоде, и исследование нелинейного элемента. Данные пункты необходимы для полного понимания процессов, протекающих в данном радиоэлектронном устройстве. Таким образом, поддерживается баланс между непосредственным моделированием и изучением генератора как сложной нелинейной системы.

Задание №1. Получение системы дифференциальных уравнений генератора

1. Вспомнить закон Ома и законы Кирхгофа.
2. Используя упомянутые выше законы, составить уравнения, описывающие приведенную в разделе 2.1 схему.
3. Привести полученные уравнения к безразмерному виду.

Примечание. У данного генератора 1.5 степени свободы. Рекомендуется в качестве динамических переменных выбрать оба напряжения на конденсаторах и ток через катушку индуктивности. Для описания тока через туннельный диод следует пользоваться ВАХ кусочно-линейной модели диода.

Контрольные вопросы. Получение системы дифференциальных уравнений генератора

1. На примере простой цепи показать, как с помощью законов Кирхгофа можно получить уравнения, описывающие систему (цепь придумать самостоятельно).

2. Объяснить, почему генератору с 1.5 степенями свободы соответствует система из трех дифференциальных уравнений [8].

3. Предположить, какие аттракторы могут быть получены при решении данной системы дифференциальных уравнений.

Задание №2. Исследование схемы туннельного диода

1. Составить в программном пакете Multisim схему, идентичную кусочно-линейной модели туннельного диода, описанной в разделе 2.1.
2. Снять вольт-амперную характеристику кусочно-линейной модели и сравнить её с показанной в разделе 2.1.
3. Составить в программном пакете Multisim схему, идентичную отрицательному сопротивлению, описанному в разделе 2.1. Изучить ВАХ отрицательного сопротивления.

Контрольные вопросы. Исследование схемы туннельного диода

1. Нарисовать вольт-амперную характеристику диода. Сравнить её с характеристикой, построенной для диода в программном пакете Multisim.

Задание №3. Решение системы дифференциальных уравнений генератора

1. Вспомнить метод Эйлера или метод Рунге-Кутты для решения систем дифференциальных уравнений [9]. Создать программный модуль, для решения системы дифференциальных уравнений методом Эйлера или Рунге-Кутта. Проверить правильность модуля на уравнении $\dot{x} = \sin x$.

2. С помощью разработанного программного модуля численно решить полученную систему безразмерных уравнений генератора и пронаблюдать аттракторы, реализуемые в схеме при различных значениях параметров.

3. Запротоколировать данные и построить соответствующие рисунки.

Примечание. Наиболее удобно для рассмотрения аттракторов системы использовать фазовое пространство напряжений на конденсаторах. Необходимо найти значения управляющего параметра, отвечающие четырем типовым аттракторам, изображенным на рисунке 8, и построить соответствующие рисунки.

Задание №4. Моделирование генератора Кияшко-Пиковского-Рабиновича в Multisim

1. Составить в программном пакете Multisim схему, идентичную генератору Кияшко-Пиковского-Рабиновича, описанному в разделе 2.1.

2. Запустить собранную схему и пронаблюдать различные аттракторы при изменении управляющего параметра.
3. Сравнить аттракторы, полученные с использованием пакета Multisim, с аттракторами, полученными при выполнении предыдущего задания при численном решении системы дифференциальных уравнений, описывающей генератор.

Контрольные вопросы. Моделирование генератора Кияшко-Пиковского-Рабиновича в Multisim

1. Объясните разницу в аттракторах, полученных с помощью решения дифференциальных уравнений, и с помощью программы Multisim.

Задание №5. Теоретическое исследование кусочно-линейной модели туннельного диода*

1. Подробно изучить принципы действия операционного усилителя [4]. На основе общих принципов объяснить работу отрицательного сопротивления.
2. Изучить схему кусочно-линейной модели, расставить на ней напряжения и направления токов.
3. Используя соображения, полученные в предыдущем пункте, вывести кусочно-линейную функцию, соответствующую аппроксимации вольт-амперной характеристики туннельного диода.

2.3 Требования к оформлению отчета

В отчете обязательно должны присутствовать:

1. Схема генератора с указанием напряжений и токов, выбранных при выводе уравнений Кирхгофа. Уравнения, полученные из законов Кирхгофа, в размерной и безразмерной форме. Необходимо привести параметры нормировки.

2. ВАХ кусочно-линейной модели туннельного диода, построенная с помощью программы Multisim.

3. Аттракторы для четырех основных режимов, изображенных на рисунке 8, полученные при решении системы дифференциальных уравнений. Необходимо указать, каким значениям управляющего параметра соответствуют данные режимы.

4. Для значений параметра, выбранных в предыдущем пункте, построить фазовые портреты с помощью программы Multisim. Строить графики необходимо в тех же координатных осях и том же масштабе (в тех же единицах), что и в пункте 3. Для простоты сравнения рекомендуется изобразить на одном рисунке аттракторы, рассчитанные двумя способами. Сравнить полученные результаты и объяснить различия.

5*. Схема кусочно-линейной модели с указанием напряжений и токов. Основные допущения, использованные при анализе кусочно-линейной модели. Должны быть приведены уравнения для расчета токов и напряжений, в результате решения которых была получена ВАХ кусочно-линейной модели туннель-

ного диода. Для сравнения на одном рисунке изобразить полученную кусочно-линейную функцию и вольт-амперную характеристику, полученную с помощью программы Multisim.

7. В отчете должны быть представлены выводы по результатам, полученным с использованием различных методов моделирования.

Список рекомендуемой литературы

1. А.В. Андрушкевич, А.А. Кипчатов, Л.В. Красичков, А.А. Короновский, *Путь к хаосу в кусочно-линейной модели генератора на туннельном диоде*, Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1, 1,2 (1993) 93-103.
2. L. Esaki, *New phenomenon in narrow germanium p - n junctions*, Physical Review 109(2), 1958.
3. А. И. Лебедев, *Физика полупроводниковых приборов*, Физматлит, 2008.
4. П. Хоровиц, У. Хилл, *Искусство схемотехники T1, T2*, М.: Мир, 1986. 600 с.
5. И. Достал, *Операционные усилители*.
6. Ж. Марше, *Операционные усилители и их применение*, Л.: "Энергия", 1974.
7. Л. Фолкенберри, *Применения операционных усилителей и линейных ИС*, М.: Мир, 1985.
8. Д.И. Трубецков, А.Г. Рожнев, *Линейные колебания и волны*, М.: Физматлит, 2001. 416 с.
9. Г. Корн, Т. Корн, *Справочник по математике для научных работников и инженеров*, М.: Наука, 1978. 832 с.