ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования **«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»** 

Э.И. ЦИМБАЛИСТ, С.В. СИЛУШКИН

# ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛОГОВЫХ СХЕМ В ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ СРЕДЕ NI ELVIS

Издательство Томского политехнического университета 2009 УДК 621.382.049.7(075.8) ББК 32.973.3я73 Ц61

#### Цимбалист Э.И.

Ц61 Исследование аналоговых схем в программно-аппаратной среде *NI ELVIS*: учебное пособие / Э.И. Цимбалист, С.В. Силушкин; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 264 с.

Пособие включает в себя руководство по эксплуатации инструментов *NI ELVIS* и рекомендации по выполнению лабораторного цикла при изучении учебной дисциплины «Электроника», а также содержит контролирующие материалы. Позволяет познакомиться с современными средствами измерений, провести самооценку своих знаний и умений, подготовиться к выполнению лабораторных работ.

Предназначено для студентов, обучающихся по основной образовательной программе «Приборостроение», но также может быть полезным для студентов других направлений и специальностей.

#### УДК 621.382.049.7(075.8) ББК 32.973.3я73

#### Рецензенты

Кандидат технических наук, доцент директор Центра высшего дополнительного образования Института дополнительного образования ТУСУРа Д.В. Дубинин

# Кандидат технических наук, доцент начальник службы метрологии и стандартизации ТГАСУ *А.А. Алексеев*

# Кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной и медицинской электроники электрофизического факультета ТПУ *Е.В. Ярославцев*

- © ГОУ ВПО «Томский политехнический университет», 2009
- © Цимбалист Э.И., Силушкин С.В., 2009
- © Оформление. Изд-во Томского политехнического университета

# Оглавление

1. Введение в NI ELVIS	5
1.1. Общие сведения о лабораторном цикле	5
1.2. Внеаудиторная подготовка к лабораторным работам	6
1.3. Выполнение лабораторного эксперимента	8
1.4. Оформление отчета	9
2. Архитектура учебной лаборатории NI ELVIS	10
2.1. Что такое технология виртуальных инструментов?	10
2.2. LabVIEW	11
2.3. Обзор NI ELVIS	11
3. Аппаратные компоненты NI ELVIS	14
3.1. Настольная рабочая станция NI ELVIS	14
3.2. Виртуальные измерительные приборы	14
3.3. Органы управления рабочей станции	18
3.4. Лабораторная плата аналоговой электроники	
3.5. Метолические указания к провелению контролирующих	
мероприятий	26
4. Краткое руковолство по эксплуатании виртуальными	
измерительными приборами NI ELVIS	46
4.1. Начало работы	46
4.2. Цифровой мультиметр (Digital Multimeter – DMM)	47
43 Осниллограф (SCOPE)	55
44 Функциональный генератор (Function Generator – FGEN)	58
4 5 Регулируемые источники питания	
(Variable Power Supplies)	60
4 6 Анализатор амплитулно-частотных и фазочастотных	
характеристик – $AYX/ФЧХ$ (Bode Analyzer)	61
47 Анализатор спектра сигнала (Dynamic Signal Analyzer – DSA)	01
4.8 A Hanusaton Bonstampentia xanaktenuctuk	
лвухполюсников (Two-wire Current Voltage Analyzers)	65
4.9 Анализатор вольтамперных характеристик	00
четырехполюсников (Three-wire Current Voltage Analyzers)	66
4 10 Coxpanence percentator pations	00
5. Лабораторные работы цикла	
Лабораторная работа № 1. Ознакомпение с работой в	•••• 0 >
программно-аппаратной среде NI ELVIS	69
Пабораторная работа № 2. Исследование диодных схем	
Пабораторная работа № 3. Исследование режимов билодарного	02
транзистора	96

Лабораторная работа № 4. Исследование усилительного	
каскада ОЭ	120
Лабораторная работа № 5. Передача импульсных сигналов	
в резистивном усилительном каскаде	140
Лабораторная работа № 6. Типовые схемы включения	
операционных усилителей	152
Лабораторная работа № 7. Функциональное применение	
операционных усилителей (линейные преобразования сигналов).	180
Лабораторная работа № 8. Функциональное применение	
операционных усилителей (нелинейные преобразования	
сигналов)	202
Лабораторная работа № 9. Автогенераторы колебаний на	
операционных усилителях	226
6. Обработка результатов измерений. Работа в Excel	256
7. Дистанционное образование в программно-аппаратной среде	
NI ELVIS	259
Список пекоменлуемой литепатуры	

#### 1. Введение в NI ELVIS

#### 1.1. Общие сведения о лабораторном цикле

Образовательные профессиональные программы подготовки выпускников по направлениям и специальностям, в учебных планах которых присутствует дисциплина «Электроника» в разных модификациях, резко снизили аудиторные часы лабораторного цикла.

С другой стороны, переход учебного процесса на использование кредитных и балльно-рейтинговых оценок освоения дисциплин образовательных программ\* должен обеспечить каждому студенту (подгруппе студентов) определенную свободу в выборе модулей и отдельных работ лабораторного цикла.

В этой связи необходимо предусмотреть ряд мероприятий, ведущих к активизации познавательной деятельности студентов, формированию их положительной мотивации на самообразование.

Предлагаемые вниманию студентов методические указания к лабораторному циклу направлены на облегчение их подготовки к работам, в то же время оставляя им элементы творчества по различным этапам постановки, проведения и обработки результатов эксперимента.

Целью лабораторного цикла является:

 – экспериментальное освоение теоретических положений изучаемой дисциплины;

 получение практических навыков постановки и проведения эксперимента над различными объектами исследования;

 овладение навыками работы со средствами наблюдения, измерения и контроля, используемыми в изучаемой области знаний.

Задачами лабораторного цикла являются:

– овладение методикой и техникой экспериментального исследования элементной базы и схем аналоговой электроники; формирование навыков обработки результатов проведенных исследований и представление их в виде таблиц, графиков и/или синхронизированных временных диаграмм сигналов.

Результативность лабораторного цикла предполагается повысить введением следующих мероприятий:

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Временное положение об организации учебного процесса с использованием кредитных и балльно-рейтинговых оценок освоения образовательных программ / под общ. ред. А.А. Малышенко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2005. – 40 с.

– использованием современных технологий проведения работ лабораторного цикла, в частности технологии виртуальных инструментов в среде *NI ELVIS*, которая объединяет технические средства измерения и управления, прикладное программное обеспечение и стандартные промышленные компьютерные технологии;

– возможностью выбора тематики лабораторной работы из цикла работ и выбора для исследований набора схем в каждой из работ, представляющих наибольший интерес у обучаемого;

 уходом от технологии «бригадного подряда» и переходом к индивидуальному обучению;

- организацией входного и текущего контролей работ.

Технология выполнения каждой ЛР содержит три этапа:

1. Внеаудиторная подготовка к лабораторной работе.

2. Аудиторное лабораторное занятие, включающее в себя оценку подготовки студента к ЛР, лабораторный эксперимент над заданным объектом исследования и защиту отчета ранее проделанной ЛР.

3. Внеаудиторное оформление отчета выполненной ЛР.

# 1.2. Внеаудиторная подготовка к лабораторным работам

Внеаудиторная работа студента предполагает:

 изучение (повторение) теоретических положений изучаемой дисциплины или предшествующих дисциплин, на которые опирается планирование, постановка, проведение эксперимента и обработка его результатов;

- уяснение целей и задач лабораторной работы;

– понимание работы принципиальных схем эксперимента, методик получения требуемых характеристик и параметров;

– домашнюю разработку схем и методик эксперимента по поставленным задачам, если Вы работаете в активном режиме лабораторного эксперимента;

 ответы на контрольные вопросы, поставленные в описании к лабораторной работе.

Внеаудиторная подготовка студента к лабораторной работе проверяется вопросами текущего контроля и учитывается в баллах рейтинга.

Для реализации элементов сквозного обучения внеаудиторная подготовка к первым лабораторным работам дополнительно может включать изучение и повторение следующих разделов, использованных в предыдущих лабораторных циклах: – расчет погрешности измерений<sup>1</sup>;

– использование метода наименьших квадратов для обработки результатов измерений (в задачах аппроксимации эмпирических зависимостей)<sup>2</sup>.

Внеаудиторная подготовка студента к лабораторной работе считается законченной, когда у студента сформируется ясное понимание:

- технологии процесса эксперимента (что и как делать?);

– ожидаемых результатов по каждому этапу лабораторной работы (что должно получиться?).

Это произойдет тогда, когда студент овладеет определенным набором компетенций в виде требуемых для работы знаний, умений и пониманий.

В качестве примера их перечень при выполнении ряда процессов лабораторных работ по аналоговой электронике представлен в табл. 1.

Таблица 1

Процесс	Используемые компетенции		
Снятие ВАХ	1. Знание способов регулирования токов напряжений в		
двухполюс-	исследуемых цепях.		
ника (четы-	2. Правильный выбор и расстановка средств измерения		
рехполюс-	токов и напряжений (в среде NI ELVIS – отсутствует,		
ника)	так как выполняется автоматически).		
	3. Умение правильно собрать схему эксперимента.		
	4. Грамотное считывание показаний СИ и формирова-		
	ние массивов данных исследования (в среде NI ELVIS -		
	отсутствует, так как выполняется автоматически).		
	5. Проведение аналитической или графической ап-		
	проксимации закономерностей, полученных при лабо-		
	раторных исследованиях		

Примерный перечень компетенций, востребованных при подготовке к лабораторным работам

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Казанцева Н.Н. Расчет оценок погрешностей измерения. Практическое справочное руководство. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 36 с.; см. также «Подсчет погрешностей в лабораторных работах и запись результатов: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу общей физики для студентов всех специальностей. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 8 с.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Лабораторные работы по аналоговой электронике: методические указания к лабораторному циклу. В кн. 9: Казаков В.Ю. Использование метода наименьших квадратов для обработки результатов измерений. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 12 с.

Окончание табл. 1

	6. Знание методов расчета погрешностей		
Снятие АЧХ	1. Знание определения характеристик и выбор способа		
исследуемой	ее снятия.		
схемы	2. Умение грамотно собрать схему эксперимента.		
	3. Умение по результатам наблюдения выходного на-		
	пряжения ввести исследуемую схему в линеаризован-		
	ный режим работы.		
	4. Грамотная реализация алгоритма использования		
	АЧХ по выбранному методу, умение предъявить ре-		
	зультаты эксперимента в виде таблиц, графиков и т. д.		
	(в среде NI ELVIS отсутствует, так как выполняется ав-		
	томатически)		

Обратим внимание, что ряд указанных выше компетенций к циклу лабораторных работ по электронике должны быть наработаны на предшествующих лабораторных работах по физике и электротехнике.

# 1.3. Выполнение лабораторного эксперимента

Перед выполнением эксперимента в среде *NI ELVIS* следует вспомнить правила эксплуатации используемых средств наблюдения и измерения и источников сигналов. Затем можно приступить к измерениям по плану, изложенному или в методических указаниях, или наработанному самостоятельно в ходе внеаудиторной предварительной подготовки к лабораторной работе, если Вы избрали активный и творческий характер деятельности.

При наблюдениях/измерениях, выполняемых с помощью осциллографа, необходимо предварительно установить подходящий размер изображения. Если исследователя интересует процесс с сохранением информации о постоянной (средней) составляющей сигналов, то целесообразно, где возможно, использовать открытый вход осциллографа.

В противном случае используется закрытый вход осциллографа, когда в установившемся режиме постоянная составляющая задерживается цепью с входной разделительной емкостью.

При использовании цифрового мультиметра необходимо периодически осуществлять установку нуля, что гарантирует правильность его показаний.

Вся необходимая для оформления отчета информация заносится в лабораторный журнал («флешку»), который(ая) является единственным документом, удостоверяющим выполнение лабораторной работы.

#### 1.4. Оформление отчета

Отчет о проделанной работе оформляется к следующему лабораторному занятию и выполняется один на подгруппу до тех пор, пока в ходе защиты отчета не выясняется некомпетентность какого-нибудь из соавторов. В этом случае такой студент в дальнейшем выполняет свой отчет, а не копию отчета остальных членов подгруппы.

Отчет выполняется по правилам оформления студентами их работ в соответствии с СТП ТПУ 2.5.01–99 «Работы выпускные квалификационные, проекты и работы курсовые. Общие требования и правила оформления». Целесообразно также ознакомиться с СТП ТПУ 2.3.05–01 СМК ТПУ «Система образовательных стандартов. Занятия лабораторные. Общие требования к организации и проведению». Титульный лист отчета выполняется в соответствии с приложением А указанного стандарта.

В начале отчета формируется цель работы.

В дальнейшем по каждому этапу эксперимента обязательно изображается его схема и соответствующие таблицы, в которых приводятся результаты измерений. По табличным данным в выбранных масштабах строятся характеристики или семейства характеристик исследуемых объектов или процессов. На каждом графике должно быть указано, к какой части эксперимента он относится и что на нем изображено.

При необходимости приводятся все расчетные формулы, как в символьном виде, так и с подставленными числами. Если это задано, то приводится вывод формул для расчета погрешностей и сам расчет.

В последнем случае полезно использовать многократный эксперимент.

Отчет заканчивается выводами о проделанной работе. Выводы – это не содержание проделанной работы, а кратко сформулированные выявленные закономерности по процессам или объектам проделанной работы.

Все разделы отчета должны быть структурированы, содержать четко выверенную и правдивую информацию, написаны грамотно с соблюдением всех правил орфографии и пунктуации на основе использования общих требований и правил оформления СТП ТПУ 2.5.01–99.

Отчет, не удовлетворяющий указанным требованиям, или скопированный с другого отчета, или не защищенный вовремя, не принимается.

#### 2. Архитектура учебной лаборатории NI ELVIS

Настоящее руководство содержит информацию, необходимую для понимания архитектуры учебной лаборатории NI ELVIS (National Instruments Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite), в состав которой входит комплект виртуальных измерительных приборов, и для работы с этими приборами. Кроме того, рассматривается концепция виртуальных измерительных приборов и компоненты систем сбора данных (DAQ) компании National Instruments, специально разработанная для учебных лабораторий.

# 2.1. Что такое технология виртуальных инструментов?

Технология виртуальных инструментов объединяет технические средства измерения и управления, прикладное программное обеспечение и стандартные промышленные компьютерные технологии с целью создания измерительных, тестовых, управляющих и других технических систем, функциональность которых определяется пользователем.

Технология виртуальных инструментов представляет собой идеальную платформу, как для разработки учебных курсов, так и для проведения научных исследований. Выполняя различные эксперименты в лабораторных практикумах, студенты комбинируют операции измерения, автоматизации и управления. Средства или системы, используемые в этих экспериментах, должны быть гибкими и адаптируемыми. В научных экспериментах технология виртуальных приборов предоставляет исследователю гибкость, необходимую для модернизации систем при возникновении непредвиденных обстоятельств. И научный, и учебный эксперимент требуют, чтобы используемые системы были экономичными. Компоненты систем, построенных на основе технологии виртуальных инструментов, могут быть использованы многократно в самых различных экспериментах без приобретения дополнительных аппаратных средств и программного обеспечения, поэтому выбор данной технологии является экономически обоснованным. Наконец, измерительные системы должны быть масштабируемыми, чтобы удовлетворять будущим потребностям. Модульный характер технологии виртуальных приборов позволит вам с легкостью добавлять новые функциональные возможности в создаваемую вами систему.

В *NI ELVIS* используется программное обеспечение, разработанное в среде *LabVIEW*, и аппаратура сбора данных *NI* для создания виртуальной измерительной системы, обладающей функциональными возможностями комплекта привычных измерительных приборов.

Подытожив выше сказанное, отметим, что технология NI ELVIS:

 оперирует не с виртуальными, а с реальными физически существующими объектами аналоговой электроники – различными элементами и схемами;

имеет дело с реальными процессами, происходящими в электрических цепях разной конфигурации, в том числе и за счет воздействия на элементы и схемы физически сформированных сигналов;

– позволяет осуществлять наблюдение и измерение параметров сигналов и построение на этой основе различных характеристик.

Все действия осуществляются за счет преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму реально существующими аналогоцифровыми преобразователями с дальнейшим использованием программного обеспечения для их обработки.

# 2.2. LabVIEW

LabVIEW – это графический язык программирования, предназначенный для создания прикладных систем измерения, тестирования и автоматизации. При программировании в LabVIEW вместо текстовых строк используются пиктограммы. В отличие от текстовых языков в LabVIEW использована концепция потокового программирования, согласно которой выполнение программы определяется потоком данных. Виртуальный прибор (Virtual Instrument – VI) представляет собой программу на LabVIEW, которая моделирует внешний вид и функционирование настоящего измерительного прибора.

Гибкость, модульность и легкость программирования, присущие *LabVIEW*, делает эту среду разработки популярной в лабораториях ведущих университетов. С помощью *LabVIEW* вы можете создавать приложения с интерактивным пользовательским интерфейсом за очень короткое время, поскольку принципы графического программирования в *LabVIEW* интуитивно понятны. Ученые и инженеры могут использовать простые в реализации функциональные возможности *LabVIEW* по взаимодействию с устройствами ввода/вывода наряду с его аналитическими возможностями. *LabVIEW* может также применяться для решения чисто аналитических или численных задач в учебном процессе.

# 2.3. Обзор NI ELVIS

Функциональные возможности набора типовых лабораторных измерительных приборов в *NI ELVIS* реализованы на основе многофункционального устройства ввода-вывода (*DAQ*), специальной настольной рабочей станции, макетной платы и программ, разработанных в среде *LabVIEW*.

В настольную рабочую станцию *NI ELVIS* встроены аппаратно реализованные функциональный генератор и регулируемые блоки питания. А спроектированные в *LabVIEW* лицевые панели (*Soft Front Panel – SFP*) измерительных приборов объединяют функциональность *DAQ*устройства (модуля ввода-вывода) и рабочей станции *NI ELVIS*, предоставляя возможность работы со следующими приборами:

– генератором сигналов произвольной формы (Arbitrary Waveform Generator – ARB);

– анализатором амплитудно- и фазочастотных характеристик (*Bode Analyzer*);

- устройством чтения с цифровой шины (Digital Bus Reader);

- устройством записи на цифровую шину (Digital Bus Writer);

– цифровым мультиметром (Digital Multimeter – DMM);

- анализатором спектра (Dynamic Signal Analyzer – DSA);

– функциональным генератором сигналов (Function Generator – FGEN);

- анализатором импеданса (Impedance Analyzer);

- осциллографом (Oscilloscope – Scope);

– анализатором вольтамперной характеристики двухполюсников (*Two-Wire Current Voltage Analyzer*);

– анализатором вольтамперной характеристики четырехполюсников (*Three-Wire Current Voltage Analyzer*);

– регулируемыми источниками питания (Variable Power Supplies).

Кроме перечисленных приборов в *NI ELVIS* имеется набор высокоуровневых функций *LabVIEW* для усовершенствования средств отображения данных, организации экспериментов и управления.

В *NI ELVIS* версии 3.0 и выше управлять приборами *NI ELVIS* можно с помощью среды *SignalExpress*, которая не требует программирования.

Внешний вид NI ELVIS показан на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Схема размещения компонентов системы NI ELVIS на базе ноутбука и NI USB DAQ-устройства: 1 – ноутбук; 2 – USB-кабель; 3 – NI USB DAQ-устройства М-серии с типовым коннекторным блоком; 4 – сетевой шнур питания для NI USB DAQ-устройства М-серии; 5 – экранированный кабель для устройства серии М; 6 – настольная рабочая станция NI ELVIS

#### 3. Аппаратные компоненты NI ELVIS

#### 3.1. Настольная рабочая станция NI ELVIS

Настольная рабочая станция и *DAQ*-устройство (модуль вводавывода) вместе образуют завершенную лабораторную установку. Рабочая станция обеспечивает подключение исследуемых объектов и определяет функциональность лабораторной установки. На панели управления станции *NI ELVIS* расположены простые органы управления функциональным генератором и регулируемыми блоками питания, а также удобные средства подключения к осциллографу и цифровому мультиметру – *BNC*-разъемы и разъемы штекерного типа. Программное обеспечение *NI ELVIS* маршрутизирует сигналы в настольной рабочей станции между приборами. Например, выходной сигнал функционального генератора может быть направлен на определенный канал модуля ввода-вывода и, в конечном счете, этот сигнал окажется на нужном канале осциллографа *NI ELVIS*. Рабочая станция содержит также плату защиты, предохраняющую модуль ввода-вывода от повреждений, которые могут случиться при ошибочных действиях с лабораторным оборудованием.

Макетная плата *NI ELVIS* устанавливается в настольную рабочую станцию и предназначена для монтажа электронной схемы и подключения ее через соответствующие разъемы к приборам. С одной рабочей станцией можно использовать несколько сменных макетных плат.

Программное обеспечение *NI ELVIS*, разработанное в *LabVIEW*, обладает достоинствами программ, реализованных с использованием технологии виртуальных инструментов. Для программирования аппаратных средств *NI ELVIS* в состав программного обеспечения включены измерительные приборы с лицевой панелью, отображаемой на экране монитора (*Soft Front Panel Instruments – SFP*), *API*-функции *LabVIEW* (*Application Programming Interface –* интерфейс программных приложений) и программные блоки *SignalExpress*.

#### 3.2. Виртуальные измерительные приборы

NI ELVIS поставляется вместе с программным обеспечением измерительных приборов (SFP Instruments), разработанным в LabVIEW, и с исходным кодом программ. Исполняемые файлы программ изменить невозможно, однако вы можете изменять и совершенствовать функциональные возможности приборов, модифицируя программный код LabVIEW. Подобные измерительные приборы в LabVIEW называют вирту-

альными приборами – *Virtual Instruments (VI)* – и именно они необходимы при работе в лаборатории.

#### Модуль запуска приборов

Модуль запуска NI ELVIS (Instrument Launcher) предоставляет доступ ко всем виртуальным измерительным приборам NI ELVIS. Запускается этот модуль двойным щелчком левой кнопки мыши по пиктограмме NI ELVIS на рабочем столе или выбором в меню – Start  $\rightarrow$  All Program Files  $\rightarrow$  National Instruments  $\rightarrow$  NI ELVIS 3.0  $\rightarrow$  NI ELVIS. После инициализации открывается панель комплекта виртуальных измерительных приборов, спроектированных в LabVIEW.

Чтобы запустить какой-нибудь прибор, просто нажмите на соответствующую кнопку. Если программа *NI ELVIS* надлежащим образом сконфигурирована и рабочая станция подключена к соответствующему модулю ввода-вывода, все кнопки на панели запуска должны быть доступны.

Если же есть проблемы с конфигурацией системы, например рабочая станция подсоединена к модулю ввода-вывода, не указанному в конфигурации, или не включено питание рабочей станции, то кнопки всех приборов становятся недоступны. В этом случае единственная кнопка, на которую можно нажать, – это кнопка *Configure* (Конфигурировать).

Некоторые приборы выполняют одинаковые операции, используя одни и те же ресурсы аппаратуры *NI ELVIS* и модуля ввода-вывода, и поэтому не могут работать одновременно. При запуске двух приборов с перекрывающейся функциональностью, не позволяющей этим приборам работать одновременно, программное обеспечение *NI ELVIS* откроет диалоговое окно, в котором будет описана ошибка. Вызвавший ошибку прибор блокируется и не будет функционировать до тех пор, пока конфликтная ситуация не разрешится.

#### Генератор сигналов произвольной формы

Программа генератора сигналов произвольной формы (Arbitrary Waveform Generator – ARB) использует функции высокого уровня для формирования аналоговых сигналов с помощью модуля ввода-вывода. Вы можете создавать различные типы сигналов, используя Waveform Editor (Редактор сигналов), который входит в состав программного обеспечения NI ELVIS. Для генерации сигналов, созданных ранее этим редактором, их можно загружать в генератор из файлов. Более подроб-

ная информация о программе *Waveform Editor* содержится в справочной системе *NI ELVIS Help*.

Поскольку модуль ввода-вывода, как правило, имеет два аналоговых выхода, одновременно могут генерироваться два сигнала. Формирование сигналов может осуществляться в однократном или в непрерывном режиме. Максимальная скорость генерации сигналов зависит от максимальной частоты обновления данных в модуле ввода-вывода, к которому подключена рабочая станция *NI ELVIS*. Характеристики модуля ввода-вывода приведены в технической документации.

# Анализатор амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик (АЧХ/ФЧХ)

Полнофункциональный анализатор АЧХ/ФЧХ (*Bode Analyzer*) в *NI ELVIS* реализован путем развертки по частоте тестового сигнала, формируемого функциональным генератором, и измерения сигналов модулем ввода-вывода. Вы можете устанавливать частотный диапазон прибора, а также выбирать шкалу отображения – линейную или логариф-мическую. В *NI ELVIS Help* приведена информация о подключении анализатора.

#### Цифровой мультиметр

Популярный измерительный прибор – цифровой мультиметр (*Digital Multimeter – DMM*) позволяет измерять следующие величины:

- напряжение постоянного тока (DC Voltage);
- напряжение переменного тока (AC Voltage);
- силу постоянного и переменного тока (*Current DC and AC*);
- активное сопротивление (Resistance);
- емкость (*Capacitance*);
- индуктивность (*Inductance*);
- работоспособность диода (Diode test);

– проверять целостность электрических проводников – выполнять «прозвонку» (Audible continuity).

Подключиться к мультиметру можно через макетную плату или с помощью разъёмов штекерного типа на передней панели рабочей станции.

## Анализатор спектра

Анализатор спектра (*Dynamic Signal Analyzer – DSA*) особенно полезен на занятиях по углублённому изучению электротехники и физики. Этот прибор использует аналоговый вход модуля ввода-вывода для измерений, которые выполняются в непрерывном или в однократном режимах. В этом приборе для определения спектра можете фильтровать сигнал и накладывать различные окна.

#### Функциональный генератор

Этот прибор (Function Generator – FGEN) позволяет выбирать форму сигнала (синусоида, «меандр», «пила»), задавать его амплитуду и частоту. Кроме того, прибор дает возможность регулировать постоянную составляющую сигнала, осуществлять развертку сигнала по частоте, формировать сигналы с амплитудной (AM) и частотной (ЧМ) модуляцией.

#### Анализатор импеданса

Простой анализатор импеданса (*Impedance Analyzer*) предназначен для измерения активной и реактивной составляющей сопротивления пассивных двухполюсников на заданной частоте.

#### Осциллограф

Осциллограф (Oscilloscope – Scope) обладает всеми функциональными возможностями стандартного настольного прибора, который можно найти в любой учебной лаборатории. Осциллограф NI ELVIS имеет два канала и снабжен регуляторами выбора масштаба, сдвига лучей, переключателями временной развертки, выбора источника и режима запуска. Свойство автомасштабирования позволяет регулировать масштаб по оси Y в зависимости от размаха переменного напряжения для лучшего отображения сигнала. В зависимости от типа подключённого к рабочей станции модуля ввода-вывода запуск может быть цифровой и аналоговый. Сигналы на осциллограф подаются через макетную плату или через разъёмы типа BNC, установленные на лицевой панели NI ELVIS.

Внутри рабочей станции *NI ELVIS* предусмотрена возможность подключения к осциллографу сигналов от функционального генератора или цифрового мультиметра. Кроме того, программное обеспечение компьютеризированного осциллографа позволяет использовать курсоры для точных измерений параметров сигналов по осциллограмме на экране. Скорость сбора данных осциллографа ограничена только максимальной частотой дискретизации модуля ввода-вывода, через который *NI ELVIS* подключен к компьютеру.

#### Анализаторы вольтамперных характеристик двух- и четырехполюсников

Эти приборы (*Two-wire* и *Three-wire Current Voltage Analyzers*) позволяют проводить тестирование параметров диодов и транзисторов, наблюдать их вольтамперные характеристики. Анализатор двухполюсников предоставляет полную свободу в установке пределов изменения напряжения и тока, а также может сохранять данные в файл. Анализатор четырехполюсников позволяет задавать ток базы при измерениях параметров транзисторов n-p-n-типа. В обоих приборах предусмотрены курсоры для точных измерений параметров по кривой на экране. Информация о подключении прибора приведена в справочной системе *NI ELVIS Help*.

#### Регулируемые источники питания

Программное обеспечение регулируемых источников питания (Variable Power Supplies) позволяет изменять напряжения на их выходах: для источника отрицательного напряжения от -12 до 0 В, для источника положительного напряжения от 0 до +12 В.

#### 3.3. Органы управления рабочей станции

Схема расположения компонентов на панели управления рабочей станции приведена на рис. 3.1.

Настольная рабочая станция снабжена следующими элементами управления и индикации:

1. SYSTEM POWER – индикатор включения питания NI ELVIS.

**2.** *PROTOTYPING BOARD POWER* – выключатель питания макетной платы.

**3.** *СОММUNICATIONS* – переключатель режима управления – шлет запрос на отключение программного управления *NI ELVIS*.

В большинстве приложений этот переключатель устанавливают в положение *Normal*, в котором управление *NI ELVIS* передается компьютеру.

**4.** *VARIABLE POWER SUPPLY* – элементы управления регулируемыми блоками питания:

– *SUPPLY*– – элементы управления источником отрицательного напряжения;



Рис. 3.1. Панель управления настольной рабочей станции: 1 – System Power – индикатор питания системы; 2 – Prototyping Board Power – выключатель питания макетной платы; 3 – Communication – переключатель связи; 4 – Variable Power Supplies – элементы управления регулируемыми блоками питания; 5 – Function Generator – элементы управления функциональным генератором; 6 – DMM – клеммы для подключения к мультиметру; 7 – SCOPE – разъемы для подключения к осциллографу

 VOLTAGE – регулятор отрицательного выходного напряжения, диапазон изменения напряжения от –12 до 0 В. Чтобы воспользоваться этим регулятором, необходимо установить переключатель *Manual* в режим ручного управления источниками питания;

*– SUPPLY*+ – элементы управления источником положительного напряжения;

– MANUAL – переключатель режима управления источником (ручной или программный). В ручном режиме (Manual) регулятор VOLTAGE управляет источником положительного напряжения. В программном режиме этот источник управляется через виртуальный прибор Variable Power Supply;

– *VOLTAGE* – регулятор положительного выходного напряжения, диапазон изменения напряжения от 0 до +12 В. Чтобы воспользоваться этим регулятором, необходимо установить переключатель *Manual* в режим ручного управления источниками питания.

Подробную информацию о режиме программного управления блоками питания можно найти в *NI ELVIS Help*.

**5.** *FUNCTION GENERATOR* – элементы управления функциональным генератором:

– *MANUAL* – переключатель выбора режима управления функциональным генератором (ручной или программный). В ручном режиме функциональным генератором управляют переключатель выбора функции, переключатель *AMPLITUDE* и регуляторы *COARSE FREQUENCY* и *FINE FREQUENCY*.

В программном режиме функциональный генератор управляется через виртуальный прибор *FGEN*.

– *Function* – переключатель выбора формы генерируемого сигнала. *NI ELVIS* может генерировать синусоидальный, прямоугольный и треугольный сигналы.

- *AMPLITUDE* – регулятор амплитуды генерируемого сигнала.

– *COARSE FREQUENCY* – переключатель диапазона частот генерируемого сигнала.

- FINE FREQUENCY - плавный регулятор частоты сигнала.

– Подробную информацию о режиме программного управления функциональным генератором можно найти в *NI ELVIS Help*.

6. *DMM* – гнезда для подключения к цифровому мультиметру:

– *CURRENT* – гнезда для токовой цепи:

• *HI* – вход положительной полярности для всех режимов работы мультиметра, кроме измерения напряжения.

• *LO* – вход отрицательной полярности для всех режимов работы мультиметра, кроме измерения напряжения.

- *VOLTAGE* – гнезда для напряжения:

• *HI* – вход положительной полярности для измерения напряжения;

• *LO* – вход отрицательной полярности для измерения напряжения.

7. *SCOPE* – разъемы для подключения к осциллографу:

- *СНА* – вход канала *А* осциллографа;

– СНВ – вход канал В осциллографа;

- *TRIGGER* – вход синхронизации осциллографа.

Если вы используете входные гнезда цифрового мультиметра на лицевой панели, не подключайтесь к аналогичным входам на макетной плате.

На задней панели *NI ELVIS* расположены следующие компоненты (см. рис. 3.2):

– выключатель питания рабочей станции. Используйте этот выключатель для полного отключения рабочей станции от сети;

– разъем для подключения источника питания постоянного/переменного тока к рабочей станции;

– 68-контактный разъем для подключения кабеля от модуля вводавывода к рабочей станции.



Рис. 3.2. Вид сзади на настольную рабочую станцию NI ELVIS: 1 – выключатель питания рабочей станции; 2 – разъем для подключения источника питания постоянного/переменного тока; 3 – 68-контактный разъем для подключения кабеля от модуля ввода-вывода

#### 3.4. Лабораторная плата аналоговой электроники

Как отмечалось выше, для проведения учебных исследований может быть использована макетная плата *NI ELVIS*, расположенная сверху настольной рабочей станции.

Однако в предлагаемом цикле лабораторных работ по аналоговой электронике будет использоваться макетная плата, специально разработанная на кафедре КИСМ ЭФФ и предназначенная для монтажа исследуемой схемы и подключения ее к источникам питания и измерительным приборам *NI ELVIS*.

Плата расположена над макетной платой станции *NI ELVIS* и снабжена принципиальной схемой и гнездами, более удобными для монтажа исследуемой схемы с помощью прилагаемых перемычек.

Принципиальная схема разработанной макетной платы приведена на рис. 3.3. В левой части ее расположены монтажные гнезда (все гнезда на схеме обозначены концентрическими окружностями), соединенные с входами и выходами сигналов, которые предоставляют доступ ко всем виртуальным измерительным приборам *NI ELVIS*.

На остальной части платы показаны элементы, соединяя которые перемычками можно получать различные объекты исследования аналоговой электроники, как рекомендованные для проведения лабораторной работы в соответствующих методических указаниях, так и выбранные Вами, если они представляют интерес для исследования.

Принципиальная схема также содержит информацию об обозначениях и номиналах используемых элементов.

Входы и выходы сигналов, обеспечивающие доступ ко всем виртуальным измерительным приборам *NI ELVIS*, подписаны в соответствии с идеологией *NI ELVIS* и, по возможности, расположены с учетом функционального их назначения.

Назначение используемых в лабораторном цикле входов и выходов показано в табл. 2.

Для лучшего понимания устройства лабораторной платы на рис. 3.4 приведен ее монтаж (вид снизу двухслойной платы), где также изображены проводящие дорожки, их соединения с гнездами и расположение элементов электроники лабораторного макета.

Студенты должны обратить внимание, что многие элементы электроники являются элементами *SMD*, предназначенные для поверхностного монтажа, как одного из его современных видов.

По рисунку также можно судить о размерах использованной в лабораторном макете элементной базы, а также получить информацию об обозначениях и номиналах используемых элементов.



Рис. 3.3. Принципиальная схема лабораторной макетной платы



Рис. 3.4. Монтаж двухслойной платы лабораторного макета (вид снизу) с указанием гнезд и используемых электронных элементов

# Таблица 2

# Назначение входов и выходов лабораторного макета, предоставляющих доступ ко всем используемым виртуальным измерительным приборам NI ELVIS

Название	Тип	Описание
сигнала		
ACH <01>+	Аналоговые входы общего назначения	Analog Input Channels 0 through $1-$ положительные входы диф- ференциальных аналоговых ка- налов $0\div1(\pm)$ . Отрицательные входы каналов заземлены, т. е. присоелинены к GND
CH <ab>+</ab>	Осциллограф	Oscilloscope Channels $A$ and $B$ – положительные входы каналов A и $B$ (+) осциллографа
CH <ab>-</ab>	Осциллограф	Oscilloscope Channels A and B – отрицательные входы каналов осциллографа. Заземлены на GND
3-WIRE	Цифровой мультиметр	<i>Three Wire</i> (трехпроводной) – источник напряжения для циф- рового мультиметра, использу- ется при измерении параметров транзистора
CURRENT HI	Цифровой мультиметр	<i>Positive Current</i> (положитель- ный токовый контакт) – вход мультиметра положительной полярности для всех измерений, кроме измерения напряжения
CURRENT LO	Цифровой мультиметр	<i>Negative Current</i> (отрицатель- ный токовый контакт) – вход мультиметра отрицательной по- лярности для всех измерений, кроме измерения напряжения

Окончание табл. 2

VOLTAGE HI	Цифровой	Positive Voltage (контакт положи-
	мультиметр	тельного напряжения) – вход по-
		ложительной полярности для
		вольтметра мультиметра
VOLTAGE LO	Цифровой	Negative Voltage (контакт отрица-
	мультиметр	тельного напряжения) – вход от-
		рицательной полярности для
		вольтметра мультиметра
FUNC OUT	Функциональный	Function Output – выход функ-
	генератор	ционального генератора
+9 <i>V</i> ;	Источник питания	Выходные напряжения стабили-
-9 V	операционного	заторов постоянного напряжения.
	усилителя	Используются при фиксирован-
		ных значениях +U и -U питания
		операционного усилителя
SUPPLY+	Регулируемые	Выход регулируемого блока пи-
	блоки питания	тания с положительным выход-
		ным напряжением (+)
		от 0 до +12 В
SUPPLY-	Регулируемые	Выход регулируемого блока пи-
	блоки питания	тания с отрицательным выход-
		ным напряжением (-)
		от -12 до 0 В
+5 V	Источник	Выход источника питания
	постоянного тока	+5 В, относительно цепи
		GROUND, нерегулируемый
GND	Источник	<i>GROUND</i> – общая цепь макетной
	постоянного тока	платы – «заземление». Все кон-
		такты макетной платы с таким
		обозначением соединены между
		собой

# 3.5. Методические указания к проведению контролирующих мероприятий

# Принципы проведения контроля

В соответствии с рейтинг-планом дисциплины обычно осуществляется три рубежных контроля. В состав первого включены контролирующие материалы не только по первому модулю лабораторного цикла,

но и по входному контролю остаточных знаний и умений студентов по дисциплинам-пререквизитам. При остальных аттестациях степени подготовки студента к лабораторной работе используются контролирующие материалы, приведенные в описании к этой работе.

Содержание банка контролирующих материалов определяется декларированными в рабочей программе дисциплины целями и задачами.

Внедрены элементы проблемно-поисковой технологии обучения для реализации положительной мотивации студента на обучение, постановку и организацию процесса самообразования. При этом студенты обязаны:

– узнавать схему с целью определения того, какие характеристики и параметры ее необходимо анализировать;

– демонстрировать действия алгоритмов анализа и синтеза различных объектов электроники по изложенным на лекциях алгоритмам и приведенным примерам.

Указанная технология, когда студенту не приходится воспроизводить то, что он слышал на занятиях или видел в книгах, принципиально ведет к его самообразованию и воспитанию творческой личности.

На всех видах контроля студенту, как минимум, придется демонстрировать стандартные профессиональные действия за счет самостоятельного добывания необходимых знаний, умений и компетенций для конкретного и ранее неизвестного объекта аналоговой электроники.

Учитывая вышесказанное, контролирующие материалы (вопросы, тесты и т. п.) лабораторного цикла должны относиться к сравнительно простым принципиальным схемам аналоговой электроники при их анализе и несложным задачам синтеза подобных устройств.

Для ликвидации возможных конфликтных ситуаций целесообразно оговаривать бальную стоимость вопроса или теста. Должны быть приведены также четкие критерии правильности ответов.

Ответ студента на поставленный вопрос не должен быть формальным, он обязан быть доказательным. При тестировании без компьютера по вопросу необходимо привести требуемые аналитические выкладки, графические построения и расчет числовых значений величин.

Справедливым является критерий: задание засчитывается и получает высокую оценку, если ответ доказан и совпадает с ожидаемым результатом.

# Банк контролирующих заданий (БКЗ) в инструментальной адаптивной среде тестирования (ACT) для компьютерного тестирования студентов

АСТ использована для создания программно-педагогических тестов и адаптивного тестирования студентов по дисциплинам «Электро-

ника, микропроцессорная техника» в ее аналоговой и цифровой частях, а также по основной дисциплине-пререквизиту – «Электротехника».

Области применения АСТ:

 входной, текущий, промежуточный (рубежный) контроль соответствия уровня подготовки студентов планируемому результату обучения на данном этапе;

- оценка качества преподавания дисциплины.

При формировании банка использованы следующие формы тестовых заданий (ТЗ):

 закрытая форма со следующими составляющими – формулировка задания, содержание задания, группа ответов, среди которых обязательно есть один или несколько верных;

– открытая форма: формулировка задания, содержание задания, эталонные ответы (все возможные правильные ответы);

 задание на упорядочение: элементы групп, содержащие текст или однородные (неоднородные) объекты – необходимо установить правильный порядок упорядочения элементов;

– задание на соответствие: заданы две группы элементов – необходимо определить соответствие элементов одной группы элементам другой.

БКЗ дисциплины-пререквизита «Электротехника» (для входного контроля разработано 451 ТЗ) содержит разделы:

- электрические цепи;

- электрические цепи при воздействии постоянного тока;

- электрические цепи при гармоническом воздействии;

– электрические цепи при периодическом несинусоидальном воздействии;

- переходные процессы в линейных цепях;

– линейные цепи при трехфазном воздействии;

- анализ и расчет магнитных цепей;

– электромагнитные устройства.

БКЗ дисциплины «Электроника, микропроцессорная техника» (разработано 595 ТЗ) содержит разделы:

- общие положения – разработано 18 ТЗ;

- элементная база аналоговых устройств - 213 T3;

- усилители электрических сигналов - 117 T3;

- генераторы электрических сигналов - 28 T3;

- источники вторичного электропитания - 40 T3;

основы цифровой электроники – 43 ТЗ;

- комбинационные устройства 77 ТЗ;
- последовательные устройства 37 T3;
- запоминающие устройства 10 T3;
- программируемые логические устройства 10 ТЗ;
- схемы сопряжения 10 ТЗ;
- введение в МПТ 10 T3.

По дисциплине «Электроника, микропроцессорная техника» и дисциплине-пререквизиту «Электротехника» используются 1046 ТЗ. Из них по открытой форме – 337 ТЗ; по закрытой форме – 417 ТЗ; на соответствие – 226 ТЗ; на установление – 66 ТЗ.

В отечественной и зарубежной научно-педагогической литературе различают следующие виды тестовых заданий:

задания закрытой формы (с множественным выбором), в которых тестируемый выбирает правильный ответ из данного набора ответов;

– задания открытой формы (задания на дополнение), в которых требуется от тестируемого самостоятельное получение ответа;

задания на установление соответствия (с множественным выбором), выполнение которых связано с выявлением тождества между элементами двух множеств;

– задания на установление правильной последовательности, в которых тестируемый должен указать порядок действий или процессов.

#### Задания закрытой формы

В заданиях закрытой формы имеется основная часть, содержащая постановку проблемы, и готовые ответы, сформулированные разработчиком теста. Обычно, но не всегда, правильным ответом бывает только один.

#### Пример

Какие виды резонансных явлений могут быть в схемах?





#### Ответы:

а) в обеих схемах – резонанс токов;

б) в обеих схемах – резонанс напряжений;

в) в левой схеме – резонанс токов, в правой схеме – напряжений;

г) в левой схеме – резонанс напряжений, в правой схеме – токов;

д) резонансные явления отсутствуют.

#### Задания открытой формы

В заданиях на дополнение готовые ответы не даются. Их должен получить тестируемый. Эти задания встречаются двух видов:

 с ограничениями, налагаемыми на ответы, получение которых соответствующим образом определено по содержанию и по форме представления;

– со свободно конструируемыми ответами, в которых испытуемые должны составить развернутый ответ в виде решения задачи.

Задания второго вида близки к традиционным контрольным заданиям, поэтому положительно воспринимаются большинством преподавателей. Но они требуют больших затрат на проверку и сложнее поддаются компьютеризации.

При ответе на открытое задание с ограниченным ответом испытуемый дописывает пропущенное слово, формулу, символ или число на месте прочерка.

#### Пример

При определенных условиях в схеме могут развиваться резонансные явления. В схеме проявится резонанс \_\_\_\_\_.



Задания на установление соответствия

В заданиях на установление соответствия тестируемый должен показать знание связей между элементами двух множеств. Слева или вверху приводятся элементы задающего множества, содержащие постановку проблемы, а справа или внизу – элементы, подлежащие выбору.

# Пример

Установите правильное соответствие между элементами двух множеств: схемами и возможными видами резонансов в схемах:



2-я группа:

а) резонанс напряжения;

б) резонанс токов;

в) резонанс напряжения, если организован режим холостого хода на выходе схемы;

г) резонанс токов при коротком замыкании на выходе схемы;

д) резонансные явления отсутствуют.

#### Задания на установление правильной последовательности

Задания этой формы предназначены для оценки уровня владения последовательностью действий, процессов и т. п., которые приводятся в случайном порядке. Испытуемый должен установить правильный порядок действий, процессов и указать его с помощью цифр.

## Пример

Установите правильную последовательность действий при определении переходной характеристики четырехполюсника:

а) составляется изображение выходного сигнала (отклика) как произведение изображения единичной функции (воздействия) и операторного коэффициента передачи;

б) находятся изображения единичной функции и коэффициента передачи четырехполюсника в операторной форме;

в) осуществляется определение выражения для переходной характеристики, используя обратное преобразование Лапласа.

Ясно, что последовательность действий следующая: действие «б» выполняется 1-м по порядку; действие «а» – 2-м; действие «в» – 3-м.

#### Вопросы входного контроля

По математике:

1. Определить площадь круга, находящуюся в первом квадранте декартовой плоскости. Уравнение окружности: *x*2 + *y*2 = 4.

2. Найти среднее значение за период периодического сигнала прямоугольной, треугольной или трапецеидальной форм.

3. Провести преобразование в заданном уравнении прямой, вызывающее ее параллельное перемещение или смену угла наклона.

4. Взять производную или интеграл от заданной функции.

5. Осуществить суммирование, умножение и др. действия для матриц.

6. Решить систему алгебраических уравнений.

7. Разложить в ряд Фурье простую периодическую функцию.

8. Выполнить прямое преобразование Лапласа для единичной функции.

9. Произвести простые действия над комплексными числами.

# По электротехнике (анализ электрических цепей на постоянном токе и при гармоническом воздействии, переходные процессы):

1. Определить оптимальное соотношение между внутренним сопротивлением источника сигнала  $R_{\Gamma}$  и сопротивлением нагрузки, когда при заданном значении  $E_{\Gamma}$ , мощность, выделяемая в нагрузке, максимальна.

2. Начиная с момента  $t_0$ , конденсатор заряжается от идеального источника постоянного тока  $I_0$ . Запишите аналитическое выражение для напряжения на конденсаторе, если  $U_C(t_0) \neq 0$ .

3. Известно, что в параллельном колебательном контуре может быть резонанс токов. Контур подключен к идеальному источнику ЭДС, частота которого меняется от 0 до  $\infty$ . Изобразите АЧХ напряжения на контуре, если его резонансная частота равна  $f_0$ .

4. В схеме, где идеальный источник тока I = 1 А включен параллельно идеальному источнику ЭДС E = 1 В, а параллельно им включено сопротивление R = 2 Ом, определите  $U_r$ . Использовать метод наложения.

5. В Вашем распоряжении селективный вольтметр, измеряющий значение гармонического источника напряжения на частоте  $f_1$ . Что покажет вольтметр, если на его вход подать прямоугольные импульсы разной полярности, амплитудой ±1 В, периодом  $T = 1/f_1$  и скважностью два?

6. Добавьте пропущенное слагаемое в уравнение первого закона Кирхгофа для второго узла схемы:



7. Добавьте пропущенное слагаемое в уравнение второго закона Кирхгофа для контура е, *R*(1), *R*(2), *L*-схемы:



$$U_{R(1)}-U_{R(2)}-\ldots=e$$

8. Реальный источник электрической энергии, вольт-амперная характеристика которого задается уравнением

$$U = E - I \cdot Ri,$$

где U – напряжение на зажимах источника, E – ЭДС, I – ток,  $R_i$  – внутреннее сопротивление, может быть представлен схемами замещения:



9. Укажите участки статических вольт-амперных характеристик элементов, на которых статическое и дифференциальное сопротивления совпадают:



 Приведите выражение закона Ома для участка цепи, не содержащего источника ЭДС (φ – потенциал):

a) 
$$I = (\varphi_a - \varphi_b)/R;$$
  
b)  $I = U_{ab} \cdot R;$   
c)  $I = U_{ab} \cdot R;$   
c)  $I = U_{ab}/R;$   
c)  $I = U_{ab}/R$ 

11. Вынужденная составляющая напряжения на емкости в приведенной схеме после коммутации равна:

$$e(t) = \begin{cases} E_1 & npu & t < 0; \\ E_2 & npu & t \ge 0; \end{cases}$$
  
a)  $E_1;$  6)  $E_2;$  b)  $E_1 + E_2;$  d) 0





12. Свободная составляющая на емкости в приведенной схеме (см. задание 11) определяется выражением:  $e(t) = \begin{cases} E_1 & npu & t < 0; \\ E_2 & npu & t \ge 0; \end{cases}$ 

a) 
$$\sum_{i=1}^{2} A_{i} \cdot e^{p_{i}t}$$
; 6)  $A_{1} \cdot e^{p_{1}t}$ , где  $p_{1} = 1/RC$ ;  
B)  $A_{1} \cdot e^{p_{1}t}$ , где  $p_{1} = -1/RC$ ; г)  $A_{1} \cdot t \cdot e^{p_{1}t}$ , где  $p_{1} = -1/RC$ .

13. Укажите соответствие между графиками изменения ЭДС при ее коммутации и графиками напряжения на емкости в цепи, где источник ЭДС e(t) нагружен последовательно соединенными R и C (№ 14):

2-я группа:



14. Укажите соответствие между графиками изменения ЭДС при ее коммутации и графиками токов в цепи, где источник ЭДС e(t) нагружен последовательно соединенными R и C (№ 14).



35



15. Правильное соответствие между терминами, используемыми при анализе переходного процесса и определяющими их математическими выражениями, имеет вид:

1-я группа	2-я группа
1. Линейное однородное	
дифференциальное урав-	a) $a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0$
нение	
2. Характеристическое уравнение	$5) X = \sum_{i=1}^{n} A_i e^{p_i t}$
3. Свободная составля-	$d^n x d^{n-1} x dx$
ющая решения для не-	B) $a_n \frac{dt^n}{dt^n} + a_{n-1} \frac{dt^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dt}{dt} + a_0 x = 0$
кратных корней	
	$\Gamma) \ a_n \frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = f(t)$
	д) $X = e^{p_k t} \sum_{j=1}^n A_j t^{j-1}$

16. Между видами преобразования Лапласа и их математическими выражениями действуют соотношения:

1-я группа	2-я группа
1. Прямое преобразование Лапласа	a) $a(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma_0 - j\omega}^{\sigma_0 + j\omega} e^{pt} A(P) dP$
2. Обратное преобразование Лап- ласа	6) $A(P) = \int_{0}^{\infty} e^{-pt} a(t) dt$
	B) $a(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A(P) dP$
	$\Gamma) A(P) = \int_{0}^{t} a(t)dt$
17. В приведенной схеме электрической цепи осуществляется ком-

мутация  $e(t) = \begin{cases} 0 \text{ B} & npu \quad t < 0 \\ 10 \text{ B} & npu \quad t \ge 0 \end{cases}$  при следующих параметрах элементов:  $R_1 = 1 \text{ Om}, R_2 = 4 \text{ Om}, L = 1 \text{ Гн}, C = 10^{-6} \text{ }\Phi.$  Тогда установившееся значение тока  $i_1$  равно \_\_\_\_\_ A.



18. В приведенной схеме электрической цепи осуществляется коммутация  $e(t) = \begin{cases} 10 \text{ В } npu & t < 0 \\ 20 \text{ В } npu & t \ge 0 \end{cases}$  при следующих параметрах элементов:  $R_1 = 4 \text{ Om}, R_2 = 1 \text{ Om}, L = 1 \text{ Гн}, C = 10^{-6} \text{ Ф.}$ 

Тогда установившееся значение *U*<sub>R1</sub> равно \_\_\_\_\_ В.



19. Значение переходной характеристики h(0) при воздействии e(t) = 1(t) для приведенной цепи равно \_\_\_\_\_.



20. Характеристика, представленная на рисунке, является:

а) переходной характеристикой входного сопротивления;

б) переходной характеристикой передачи по напряжению;

в) импульсной характеристикой передачи по току;

г) импульсной характеристикой передачи по напряжению.



21. При определении установившихся значений токов и напряжений в приведенной цепи постоянного тока необходимо использовать ее схему замещения:





22. Составляющая падения напряжения на сопротивлении *R* в схеме из-за действия идеального источника электрического тока при использовании метода наложения равна В.



23. Значение эквивалентного источника ЭДС  $E_{\Im}$ , рассчитываемого для приведенной схемы для участка *АВ* по методу эквивалентного генератора, равно \_\_\_\_\_ В.



24. Значение внутреннего электрического сопротивления  $R_{\Im}$  эквивалентного источника напряжения, рассчитанного для схемы  $N_{\Im}$  23 по методу эквивалентного генератора, равно \_\_\_\_\_ Ом.

25. Комплексная амплитуда гармонической функции во времени  $a(t) = A_m \cos(\omega t + \Psi)$  равна:

а)  $A_m e^{j(\omega t + \Psi)}$  при t = 0; 6)  $A_m e^{j\Psi}; B$ )  $A_m e^{j\omega t}; \Gamma$ )  $A_m$ .

26. Комплексная амплитуда гармонического напряжения  $u = 30\cos 10^6 t$  равна \_\_\_\_\_ В.

27. Комплексная амплитуда гармонического тока *i* = 5 cos[314*t* + (π/6)] равна:
а) 5*e*<sup>*j*(314*t*+π/6)</sup>; б) 5*e*<sup>*j*314*t*</sup>; в) 5*e*<sup>*j*π/6.
</sup>

28. Идеальный пассивный элемент является \_\_\_\_\_, если через него протекает ток  $i(t) = 1\cos(314t + 30^\circ)$  и падает напряжение  $u(t) = 2\cos(314t + 30^\circ)$ .

29. Идеальным элементам *R*, *L*, *C* линейной цепи соответствуют при гармоническом воздействии векторные диаграммы тока и напряжения:

1-я группа: 1. *R* 2. *L* 3. *C*  2-я группа:



30. Модуль входного сопротивления последовательной *LR*-цепи (R = 4 Ом, L = 3 мГн), к которой приложено напряжение

 $u(t) = 1\cos 1000t$ , paben \_\_\_\_\_ Ом.

31. Начальная фаза тока в электрической цепи, находящейся под гармоническим воздействием  $u(t) = 1\cos(1000t - 45^\circ)$ , при R = 5 кОм,  $C = 2 \cdot 10^{-7}$  Ф равна \_\_\_\_\_ градусов.





32. Варианты пассивных линейных двухполюсников, составленных из идеальных элементов *R* и *C*, соотносятся с представленными ам-

плитудно-частотными характеристиками их входных сопротивлений следующим образом:

1-я группа:

- 1. Последовательная *RC*-цепь.
- 2. Параллельная *RC*-цепь.



33. Напряжение и ток двухполюсника, не содержащего источников энергии, изменяется по гармоническому закону  $u = \sqrt{2}U\cos(\omega t + \Psi_u)$ ,  $i = \sqrt{2}I\cos(\omega t + \Psi_i)$ . Тогда активная мощность  $P_A$  равна:

- a)  $U \cdot I \cos(\Psi_u \Psi_i) = U \cdot I \cos\varphi;$

- в)  $U \cdot I$ ; г)  $U \cdot Ie^{j\varphi}$ ; д)  $U \cdot I\cos(\Psi_u \Psi_i) + U \cdot I\cos(2\omega t + \Psi_u + \Psi_i)$ .

34. Элемент Z<sub>11</sub> матрицы, используемой в методе контурных токов при анализе цепи, равен:





35. Элемент *Y*<sub>12</sub> матрицы, используемой в методе узловых напряжений при анализе схемы, равен:

a) 
$$1/j\omega C_1 + 1/R_1$$
;  
b)  $-(1/j\omega C_1 + 1/R_1)$ ;  
b)  $-1/R_1 - 1/(R_2 + 1/j\omega C_2)$   
r)  $-1/R_1$ .



36. Эквивалентная индуктивность электрической цепи, нагружающей источник гармонической ЭДС при  $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 300$  мкГн, равна \_\_\_\_\_ мкГн.

;

37. Какие из приведенных схем обеспечивают опережающий фазовый сдвиг выходного гармонического сигнала относительно входного?



38. Какие из приведенных схем обеспечивают запаздывающий фазовый сдвиг выходного гармонического сигнала относительно входного?



39. На входе схемы действует выходное напряжение  $U_{\rm BX}(t) = U_m \sin \omega t$ ,  $\tau = RC$ . Чему равно выходное напряжение U(t)?



B) 
$$U(t) = \frac{U_m}{\sqrt{1 + 1/(\omega\tau)^2}} \sin(\omega t + \arctan(1/\omega\tau));$$
  
r) 
$$U(t) = U_m \sqrt{1 + (1/\omega\tau)^2} \sin(\omega t + \arctan(1/\omega\tau))$$

40. На входе схемы действует входное напряжение  $U_{\rm BX}(t) = U_m \sin \omega t$ ,  $\tau = RC$ . Чему равно выходное напряжение U(t)?

a) 
$$U(t) = \frac{U_m R}{R + 1/j\omega C} \sin \omega t;$$
  
b) 
$$U(t) = \frac{U_m}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \sin(\omega t - \arctan \omega\tau);$$
  
c) 
$$U(t) = \frac{U_m}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \sin(\omega t + \arctan (1/\omega\tau));$$
  
c) 
$$U(t) = U_m \sqrt{1 + (1/\omega\tau)^2} \sin(\omega t + \arctan (1/\omega\tau)).$$

41. Чему равно значение тока в схеме ( $\tau = RC$ )?



a) 
$$I = \frac{U_0 \sqrt{1 + (\omega \tau)^2}}{\omega C}$$
; 6)  $I = \frac{U_0}{R \sqrt{1 + (1/\omega \tau)^2}}$ ; B)  $I = \frac{U_0 R}{C}$ ;  
r)  $I = \frac{U_0}{R}$ ;  $I = \frac{U_0}{R \sqrt{1 + (\omega \tau)^2}}$ .

42. На входе схем действует единичная функция. В каких схемах значение переходной характеристики h(t), при t = 0, равно 0?



43. На входе схем действует единичная функция. В каких схемах значение переходной характеристики h(t), при t = 0, равно 1?



44. На входе схем действует единичная функция. В каких схемах значение переходной характеристики h(t), при  $t >> \tau$ , будет асимптотически приближаться к 1?



45. На входе схем действует единичная функция. В каких схемах значение переходной характеристики h(t), при  $t >> \tau$ , будет асимптотически приближаться к 0?



46. На входе схем действует единичная функция. В каких схемах значение переходной характеристики h(t), при  $t >> \tau$ , будет асимптотически приближаться к 0 < A < 1?



47. Какое выражение соответствует выходному напряжению в схеме в момент времени t, если источник тока I начал работать в момент времени t = 0?



48. Какое из дифференциальных уравнений соответствует схеме  $(\tau = RC)$ ?



49. Какое из дифференциальных уравнений соответствует схеме  $(\tau = RC)$ ?



# 4. Краткое руководство по эксплуатации виртуальными измерительными приборами *NI ELVIS*



#### 4.1. Начало работы

Рис. 4.1. Общий вид установки с ноутбуком

Для включения питания *NI ELVIS* нажмите кнопки «1, 2, 3» как показано на рис. 4.1, при этом возле кнопок «1» и «3» должны загореться индикаторы.

Запустите программное обеспечение *NI ELVIS*. Вызов программного модуля осуществляется двойным щелчком левой кнопки мыши по пиктограмме *NI ELVIS* на рабочем столе или выбором в меню «Старт»: *Start*  $\rightarrow$  All *Program Files*  $\rightarrow$  *National Instruments*  $\rightarrow$  *NI ELVIS* 3.0  $\rightarrow$  *NI ELVIS*. После инициализации открывается панель комплекта виртуальных измерительных приборов – рис. 4.2. Панель инструментов интерактивна, а вызов соответствующего измерительного прибора осуществляется нажатием на кнопку панели.

Метрологические характеристики измерительных приборов приведены в «Руководстве пользователя» [9]. Данное руководство устанавливается вместе с программным обеспечением и вызывается следующим образом: меню Start  $\rightarrow$  All Program Files  $\rightarrow$  National Instruments  $\rightarrow$  NI ELVIS 3.0  $\rightarrow$  NI ELVIS User Manual.



Рис. 4.2. Панель измерительных приборов NI ELVIS

#### 4.2. Цифровой мультиметр (Digital Multimeter – DMM)

Мультиметр имеет два способа подключения:

1. Через макетную плату.

2. Через разъёмы штекерного типа на передней панели рабочей станции.

Для работы с мультиметром подключите две однополюсных вилки к токовым входам *DMM* на лицевой панели рабочей станции. Два других конца подключите к одному из резисторов. Выберите *Digital Multimeter* из панели инструментов, после чего на экране появится окно (рис. 4.3).

Необходимо учитывать, что при отсутствии внешнего сигнала мультиметр показывает напряжение и ток, которые присутствуют внутри самой установки *NI ELVIS*. При включении кнопки *Null* мультиметр запоминает эти значения напряжения и тока с целью коррекции результата измерения.

NI ELVIS - Digital Multimeter	_ <b>_</b> ×
	8
Null value: -941,78 µV DC	
-23,427 <b>mV</b>	DC
PERFECT PROPERTY PROFESSION (% PS	۹)
	() (1 (1 (1 (1 (1 (1 (1 (1 (1 (1 (1 (1 (1
Function	
VOC 20 10 1 100m	Run Cingle
	Run Single
Rando	
Range	HELP ?
1 2	3

Рис. 4.3. Лицевая панель мультиметра. Элементы и функции мультиметра:1 – выбор диапазона измерений; 2 – выбор режима измерений;3 – непрерывные (циклические) и однократные измерения; 4 – коррекция нуля – необходимо включать при работе амперметра и вольтметра

При переключении тумблера «*MANUAL*» (элемент 5 на рис. 3.1) в положение «ручной режим» (загорается лампочка) на экране *Digital Multimeter* появляется надпись *FGEN in MANUAL mode* и в этом режиме не доступны следующие режимы измерений:

- измерение сопротивления;
- измерение емкости;
- измерение индуктивности, как показано на рис. 4.4.

NAT INST	IONAL RUMEN	ITS'	=GEN in	MANUAL	mode		
		-0	67	35	mV	DC	
			1		% F	5	
	1 1 1				1 1 101	Ē	
			<u> </u>				
V⇔	۷∼	A=	A∼	6	-1F	[0005] +	+ ))
V= Functio	V~ on	A=	Å∼	6	ΗF	•	+ )))
V= Functio	<b>V∼</b> on 20	<b>A=</b> 10	<b>A</b> ∼ 1	100m	4 F	Run	+ )) Null Sinale

Рис. 4.4. Лицевая панель мультиметра. Режим «FGEN in MANUAL mode»

#### Измерение напряжения постоянного тока (DC Voltage)

На вход вольтметра *NI ELVIS* сигнал может подаваться с макетной платы или с разъемов панели управления самой рабочей станции, как показано на рис. 4.5. Оба соединения активны даже при отключенном питании макетной платы.



Рис. 4.5. Входы мультиметра на панели управления станции NI ELVIS

Входы *DMM*:

1 – токовые входы;

2 – входы для измерения напряжения.

Для измерения напряжения постоянного тока необходимо выбрать режим, как показано на рис. 4.6.

Предел измерений необходимо выбирать исходя из априорной информации, если ее нет, включите автопредел (*Auto*).

FGEN in MANUAL mode								
		-0	.63	35	mV	D	C	
			1.1.1.		, % P	5		۲
N	WA.	A	40.	0	46	086	-	1
	· ·		A V	7.7	7.5	ToonT		
Functio	on							Marill
Function	<b>on</b> 20	10	1	100m		Ru	n	Single
Function	<b>on</b> 20	10	1	100m		Ru	m	Single

Рис. 4.6. Лицевая панель мультиметра. Режим «DC VOLTAGE»

## Измерение напряжение переменного тока (AC Voltage)

Для измерения напряжения переменного тока необходимо выбрать режим, как показано на рис. 4.7.

NI ELVIS	- Digital	Multim	eter							
NAT	FGEN in MANUAL mode									
		2,	31	8	m\	/ A	С			
a esta e					181 %	=S		۹		
V=	٧~)	A≕	A~	Ω	4 F	<u>ത്ത</u>	*	<b>)</b> )		
Functio	on							Null		
VAC	14	7	700m	70m		Ru	m	Single		
Auto						G	2	2+		
Range								HELP ?		

Рис. 4.7. Лицевая панель мультиметра. Режим «AC Voltage»

Стоит заметить, что при измерении переменного напряжения значения диапазонов изменяются.

### Измерение постоянного и переменного тока (Current DC and AC)

Для измерения постоянного тока необходимо выбрать режим, как показано на рис. 4.8, для измерения переменного тока – рис. 4.9.



Рис. 4.8. DMM, режим Current DC

Рис. 4.9. DMM, режим Current AC

## Измерение активного сопротивления (Resistance)

Для измерения активного сопротивления необходимо выбрать режим, как показано на рис. 4.10.

NI ELVIS - Digital Multimeter	
NATIONAL INSTRUMENTS	ć
0,743 <b>mA AC</b>	
%F5	۲
	+
Function	
Ohms 3,0M 300,0k 30,0k 3,0k Run	Single
Auto = = = = (72)	2+
Range	Luci n la

Рис. 4.10. Лицевая панель мультиметра. Режим «Resistance»

## Измерение емкости (Capacitance)

Для измерения емкости необходимо выбрать соответствующий режим, как показано на рис. 4.11.

NI ELVIS - Digital M	lultimeter	
		5
33	97,72 <b>pF</b>	
		es 🌖
		<b>New Jack 1</b>
V= V~ A		100001 🖶 >>))
Function	Electrolytic 🕖	Null
Farad 500,0u <mark>50</mark>	<mark>.0n</mark> 500,0p	Run Single
Auto 🔳 📕		C2 1/+
Range		HELP ?

Рис. 4.11. Лицевая панель мультиметра. Режим «Capacitance»

## Измерение индуктивности (Inductance)

Для измерения индуктивности необходимо выбрать соответствующий режим, как показано на рис. 4.12.

NI ELVIS	- Digita	al Multi	meter				
<b>NAT</b> INST	TONAL RUME	ITS.					8
		(	4	.0	uH	$\mathbf{D}$	
							۲
V=	۷∼	A≃	A∼	n	+6	[000]	+ >))
Functi	on						Null
Henry						Run	Single
Auto						4	2+
Range							HELP ?

Рис. 4.12. Лицевая панель мультиметра. Режим «Inductance»

### Проверка работоспособности диода (Diode test)

Для проверки работоспособности диода выберите режим работы мультиметра, как показано на рис. 4.13.

	VIS NAT	- Digita IONAL RUMEN	al Multi	meter					_	
				3,5	55	v				
				,			0	PE		2)
v	=	۷∼	A⇔	A~	D	٩F	ത്ത	*	<b>v)</b>	
Fur	ncti	or							Null	
VD At	⊂ uto	10	-				Ru	in La	Single	
Rai	nge	!				1	,		HELF	?

Рис. 4.13. Лицевая панель мультиметра. Режим «Diode test, OPEN»

Если в окне высвечивается надпись «*OPEN*», это означает, что диод подключен обратной полярностью (наоборот) или диод неработоспособен. Появление надписи «*GOOD*» означает, что диод работоспособен, как показано на рис. 4.14.

NI ELVIS	- Digita	l Multi	meter					
NAT	IONAL RUMEN	ITS"						8
			0,0	3	V			
						G	00	
V=	۷~	A≃	A~	c	41	ത്ത	*	<b>)</b> )
Functi	on							Null
VDC	10					Ru	n	Single
Auto							5	2+
Range						88.00		HELP ?

Рис. 4.14. Лицевая панель мультиметра. Режим «Diode test, GOOD»

# Проверка целостности электрических проводников – «прозвонка» (Audible continuity)

При переключении на режим на экране появится надпись «*OPEN*», как показано на рис. 4.15.

NI ELVIS	- Digita	al Multi	meter					_ <u> </u>
<b>NAT</b> INST	IONAL RUMEN	ITS'						8
		С	PE	Ν				
								۹
V=	v∿	A=	A∿	Q	41-	0000	*	<u>))</u>
 Functi	on							Mul
Ohms						Ru	n	Single
Auto		-		-			2	2+
Range								HELP ?

Рис. 4.15. Лицевая панель мультиметра. Режим «Audible continuity, OPEN»

Это означает, что в цепи присутствует разрыв.

Появление на экране определенного значения, к примеру «5 *Ohms*», означает, что целостность цепи не нарушена и ее сопротивление равно 5 Ом, как показано на рис. 4.16.



Рис. 4.16. Лицевая панель мультиметра. Режим «Audible continuity»

## 4.3. Осциллограф (SCOPE)

Разъемы для подключения к осциллографу находятся на лицевой панели *NI ELVIS* (элемент 7, рис. 3.1).

Лицевая панель виртуального прибора показана на рис. 4.17.



Рис. 4.17. Лицевая панель осциллографа

Назначение элементов управления осциллографа:

- 1 кнопка запуска циклических (непрерывных) измерений;
- 2 кнопка запуска однократных измерений;
- 3 информация о текущих результатах измерения:
- *RMS* среднеквадратическое значение сигнала;
- *Freq* частота;
- *Vp-p* размах напряжения;
- dT разница по времени между точками C1 и C2;
- С1, С2 значение напряжений в точках;
- 4, 5 канал А и канал В осциллографа;
- 6 кнопка для вывода сигнала на экран;
- 7 кнопка вывода на экран результата измерения (3);

8 – выбор источника:

- *BNC/Board CH A* – выбор канала *A* на плате;

- АСНО нулевой канал;
- ACH1, ACH2, ACH5 первый, второй и пятый каналы;

*– FGEN FUNC\_OUT* – выходной сигнал функционального генератора;

– *FGEN SYNC\_OUT* – ТТЛ-сигнал той же частоты, что и выходной сигнал функционального генератора;

- *DMM Voltage* - выходной канал цифрового мультиметра.

9 – ручка регулирования смещения сигнала по оси *Y*;

10 – ручка регулирования масштаба напряжения по оси *Y*;

11 – возврат сигнала на исходное значение;

12 – значение масштаба напряжения по оси *Y*;

13 – режим измерения: *AC* – переменное напряжение; *DC* – постоянное напряжение;

14 – ручка регулирования масштаба времени по оси Х;

15 – значение масштаба времени по оси Х;

16 – вход сигнала запуска осциллографа;

17 – ручной выбор точек измерения (точки С1, С2);

18 – кнопка сохранения результатов измерения.

Для смещения графика по оси *У* вниз или вверх необходимо использовать ручку 9, рис. 4.18.



Рис. 4.18. Лицевая панель осциллографа. Смещение по оси У

Чтобы вернуть график на исходную позицию, можно воспользоваться кнопкой 11, рис. 4.19.



Рис. 4.19. Лицевая панель осциллографа. Установка смещения на 0

Чтобы изменить развертку по оси *Y*, пользуйтесь ручкой регулирования 10, рис. 4.20.



Рис. 4.20. Лицевая панель осциллографа. Развертка по оси У

Для развертки по оси *X* воспользуйтесь ручкой регулирования 14, рис. 4.21.



Рис. 4.21. Лицевая панель осциллографа. Развертка по оси Х

#### 4.4. Функциональный генератор (Function Generator – FGEN)

Регулировать значение частоты и амплитуды можно как с лицевой панели прибора установки *NI ELVIS* (см. рис. 4.22), так и с панели виртуального прибора (рис. 4.23).



Рис. 4.22. Функциональный генератор (FUNCTION GENERATOR – FGEN)



Рис. 4.23. Лицевая панель генератора. Общий вид

Назначение элементов управления генератора:

1 – кнопка запуска генератора;

2 – индикатор работы функционального генератора в ручном режиме;

3 – кнопка выбора предела частоты (тумблер 1 на лицевой панели прибора);

4, 5 – регулятор точной настройки значения частоты (ручка 4 на лицевой панели прибора);

6 – выбор формы сигнала (тумблер 6 на лицевой панели прибора);

7, 8 – регулирование максимального значения частоты (ручка 7 на лицевой панели прибора);

9, 10 – установка напряжения смещения;

11 – настройки частоты выборки при формировании цифрового сигнала;

12 – настройка режима:

- *Simple* – простая;

– UltraFine – точная.

Настроив параметры генерируемого сигнала, можно просмотреть и измерить параметры полученного сигнала с помощью встроенного осциллографа (см. пункт 4.3), рис. 4.24.



Рис. 4.24. Просмотр и измерение параметров сигнала генератора на осциллографе

#### 4.5. Регулируемые источники питания (Variable Power Supplies)

Программное обеспечение регулируемых источников питания (*Variable Power Supplies – VPS*) позволяет изменять напряжения на их выходах: для источника отрицательного напряжения – от –12 до 0 В; для источника положительного напряжения – от 0 до +12 В, как изображено на рис. 4.25.



Рис. 4.25. Лицевая панель регулируемых источников питания (VPS)

С помощью виртуальной панели прибора мы можем настраивать постоянное напряжение. При нажатии на кнопку *RESET* значение обнуляется.

Аналогичные действия возможно проделать вручную, переключив тумблер в положение *MANUAL*, как показано на рис. 4.26.



*Рис. 4.26. Органы управления Variable Power Supplies:* 1 – тумблер переключения; 2 – индикатор ручного режима

## 4.6. Анализатор амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик – АЧХ/ФЧХ (Bode Analyzer)

На анализаторе АЧХ/ФЧХ мы можем устанавливать частотный диапазон прибора, а также выбирать шкалу отображения – линейную или логарифмическую, как показано на рис. 4.27.

Элементы управления анализатора:

- 1 начальное значение частоты;
- 2 шаг;
- 3 конечное значение частоты;
- 4 максимальное значение амплитуды;
- 5 полярность сигнала (нормальная и обратная);
- 6 кнопка запуска;
- 7 кнопка сохранения результатов;
- 8 выбор диапазона значений по оси У;
- 9 курсор (маркер).



Рис. 4.27. Анализатор Боде (Bode Analyzer). Общий вид лицевой панели

С помощью меню 8 мы можем менять масштаб графиков АЧХ и ФЧХ, как показано на рис. 4.28 и 4.29.



Рис. 4.28. Изменение масштаба. Вариант 1



Рис. 4.29. Изменение масштаба. Вариант 2

С помощью курсора (9) можно получать показания отдельных точек графика, рис. 4.30.



Рис. 4.30. Анализатор Боде. Использование курсора для измерений

## 4.7. Анализатор спектра сигнала (Dynamic Signal Analyzer – DSA)

С помощью данного прибора можно определить спектральные составляющие сигнала и отфильтровать его. Панель виртуального прибора показана на рис. 4.31.



Рис. 4.31. Анализатор спектра сигнала (DSA). Общий вид

Элементы управления анализатора:

- 1 выбор источника входного сигнала;
- 2 диапазон напряжения;
- 3 развертка по частоте;
- 4 вычисление средних значений:
- *none*;
- RMS;
- vector;
- peak hold.
- 5 разрешение;
- 6 весовая обработка данных:
- linear;
- *exponential*.

- 7 настройки окна;
- 8 число средних;
- 9 настройки триггера;
- 10, 13 выбор единиц измерения;
- 11 кнопка перезапуска;
- 12 маркер;
- 14 настройка шкалы (ручная, автоматическая);
- 15 кнопки управления масштабом;
- 16 кнопка сохранения результатов;
- 17 кнопка смещения сигнала по оси Х;
- 18 кнопка запуска.

### 4.8. Анализатор вольтамперных характеристик двухполюсников (Two-wire Current-Voltage Analyzers)

Для определения вольтамперной характеристики (BAX) двухполюсников (например, диода) необходимо выбрать *Two-wire Current-Voltage Analyzers*, как показано на рис. 4.32.



Рис. 4.32. Анализатор вольтамперных характеристик двухполюсников (Two-wire Current-Voltage Analyzers). Общий вид

Элементы управления анализатора ВАХ двухполюсников:

- 1 выбор диапазона по оси напряжения (ось *X*);
- 2 выбор шага;

- 3 выбор диапазона по оси тока (ось У);
- 4 кнопка запуска;
- 5 кнопка сохранения результатов;
- 6 автонастройка;
- 7 масштабирование;
- 8 курсор (маркер).

Для масштабирования графика можно воспользоваться кнопками 7, как показано на рис. 4.33.



Рис. 4.33. Анализатор вольтамперных характеристик двухполюсников. Масштабирование графика

# 4.9. Анализатор вольтамперных характеристик четырехполюсников (Three-wire Current-Voltage Analyzers)

Для определения вольтамперной характеристики четырехполюсников (например – биполярный транзистор *n*–*p*–*n*-типа) необходимо выбрать *Three-wire Current-Voltage Analyzers*, как показано на рис. 4.34.

- Элементы управления анализатора ВАХ четырехполюсников:
- 1 выбор начальной точки;
- 2 выбор числа кривых;
- 3 выбор шага;
- 4 выбор диапазона по оси напряжения (ось *X*);
- 5 выбор шага;
- 6 выбор предельного значения тока коллектора;

- 7 кнопка запуска;
- 8 кнопка сохранения;
- 9-автонастройка;
- 10 масштабирование;
- 11 курсор (маркер).





#### 4.10. Сохранение результатов работы

Результаты измерения, полученные с помощью виртуальных приборов (осциллограф, анализатор АЧХ и ФЧХ, анализатор спектра, анализаторы двух- и четырехполюсников), можно сохранить в различных форматах (\*.*txt*, \*.*xls* и т. п.). Для этого на панели виртуального прибора необходимо нажать соответствующую кнопку, рис. 4.35.



Рис. 4.35. Вид кнопки сохранения результатов измерения

После нажатия кнопки появляется окно сохранения результатов, рис. 4.36. Далее выбираем директорию, в которую необходимо сохранить результаты.

Сохранить как					<u>?</u> ×
Папка:	DI ELVIS 3.0		•	G 🖸 📴 🖽	•
Недавние документы ССС Рабочий стол Рабочий стол Мои документы Мой компьютер	Source Code Waveforms 0.txt 5.txt NIELVISHelp.txl				
Сетевое	<u>И</u> мя файла:			•	ОК
окружение	<u>Т</u> ип файла:	Custom Pattern (*.txt)		-	Отмена

Рис. 4.36. Выбор папки и создание файла для сохранения результата измерения

#### 5. Лабораторные работы цикла

#### Лабораторная работа № 1

#### Ознакомление с работой в программно-аппаратной среде *NI ELVIS*

#### Цель работы

Получить первоначальные навыки выполнения лабораторных работ по аналоговой электронике в программно-аппаратной среде NI ELVIS.

#### Задачи работы

1. Изучить с целью дальнейшего использования в лабораторном цикле разделы книги № 1 «Введение в *NI ELVIS*».

2. Ознакомиться с инструкцией по охране труда в лабораториях кафедры КИСМ ЭФФ.

3. Подготовиться и практически освоить предложенную программу работ по аналоговой электронике и защитить ее.

#### Основные элементы измерительной системы

1. Учебная лаборатория *NI ELVIS*, использующая программноаппаратную среду для генерирования различных воздействий в электронные цепи и выполнения измерений их откликов (рис. 5.1).

2. Лабораторный макет по аналоговой электронике кафедры КИСМ для построения схем, выбранных для исследований (рис. 3.3).



Рис. 5.1. Рабочая станция учебной лаборатории NI ELVIS

## Программа лабораторной работы



Осуществите запуск программного обеспечения NI ELVIS и его инициализацию (рис. 5.2)

Рис. 5.2. Запуск и инициализация NI ELVIS

# Выполните измерения параметров различных электронных компонентов

1. Выберите *Digital Multimeter* (цифровой мультиметр) среди набора интерактивных инструментов, которые выполнены в *LabVIEW*, рис. 5.3.

NI ELV	NI ELVIS - Digital Multimeter										
NA INS	TIONA	L ENTS						Ð			
	100.12 <b>kOhms</b>										
V=	٧~	A=	A~	Δ	٩F	<u>ano</u>	*	<b>))</b>			
Functi	on							Null			
Ohms	зм	300k	30k	3k		R	un	Single			
Auto						C	23	2+			
Range		· ••						HELP ?			

Рис. 5.3. Цифровой мультиметр (DMM)

2. Измерьте с помощью *DMM* значения различных сопротивлений лабораторного макета, например *R*1, *R*3, *R*4. С этой целью соедините выбранный резистор с токовыми входами *DMM* – *current-HI* и *current-LO*, а цифровой вольтметр переведите в режим омметра, нажав кнопку « $\Omega$ ».

Проведите измерения и заполните следующие строчки:

*R*1 = \_\_\_\_\_ кОм, (номинал 2,2 кОм);

*R*3 = \_\_\_\_\_ кОм, (номинал 20 кОм);

*R*4 = \_\_\_\_\_ кОм, (номинал 100 кОм).

3. Измерьте с помощью *DMM* значения различных конденсаторов лабораторного макета, например *C*1, *C*10. С этой целью соедините выбранный конденсатор с токовыми входами *DMM – current-HI* и *current-LO*, а цифровой вольтметр переведите в режим измерения емкостей, нажав соответствующую кнопку «——».

Проведите измерения и заполните строчку:

*C*1 = \_\_\_\_ нФ, (номинал 1,0 мкФ); *C*10 = \_\_\_\_ нФ, (номинал 47 нФ).

## Освойте процесс получения вольт-амперных характеристик (BAX) двухполюсников и четырехполюсников

1. Соберите схему для снятия ВАХ двухполюсников (сначала резистора *R*1, потом диодов: *VD*1 – кремниевого точечного диода, *VD*2 – диода Шоттки, *VD*3 – кремниевого стабилитрона).

Снятие ВАХ осуществляется с помощью анализатора ВАХ двухполюсников (*Two Wire Current Voltage Analyzers*), рис. 5.4.



*Рис. 5.4. Анализатор ВАХ двухполюсников* Обобщенная схема эксперимента приведена на рис. 5.5.



Рис. 5.5. Схема эксперимента для снятия ВАХ двухполюсников (резисторов и диодов)

При получении ВАХ диодов необходимо следить за их включением (прямым или обратным), а также за грамотным выбором пределов изменения напряжения (*Start*, *Stop*, полярность), чтобы не вызывать превышения токов по сравнению с обозначенными на виртуальной панели предельными значениями.

Сохраните данные по ВАХ в виде файла с целью дальнейшего использования и распечатки для отчета.

2. Соберите схему для снятия выходных ВАХ биполярного транзистора *VT*1 – рис. 5.6.



Рис. 5.6. Схема эксперимента для снятия выходных BAX транзистора в программно-аппаратной среде NI ELVIS

3. В меню запуска инструментов NI ELVIS выберите функцию Threewire Current-Voltage Curve Tracer (трехпроводной вольтамперный анализатор), рис. 5.7.

При получении выходных ВАХ транзистора необходимо задать количество кривых в характеристиках и следить за грамотным выбором пределов изменения выходного напряжения, чтобы не вызывать превышения токов коллектора по сравнению с обозначенными на виртуальной панели предельными значениями.


Рис. 5.7. Трехпроводной вольтамперный анализатор

Сохраните данные выходных ВАХ транзистора в виде файла с целью дальнейшего использования и распечатки для отчета.

4. Соберите схемы для снятия входных ВАХ биполярного транзистора *VT*1 – рис. 5.8.



Рис. 5.8. Схемы для снятия входных ВАХ транзистора в программно-аппаратной среде NI ELVIS: а)  $U_{K\Im} = 0$  B; б)  $U_{K\Im} = +5$  B

5. В меню запуска инструментов *NI ELVIS* выберите функцию *Two Wire Current-Voltage Analyzer* (двухпроводной вольтамперный анализатор).

Входные характеристики транзистора получайте для двух значений выходного напряжения  $U_{K\Im} = 0$  В (рис. 5.8, *a*) и  $U_{K\Im} = +5$  В (рис. 5.8, *б*). При снятии ВАХ обратите внимание на правильное взаимное расположение полученных характеристик.

Сохраните данные входных ВАХ транзистора в виде файлов с целью дальнейшего использования и распечатки для отчета.

## Создайте и исследуйте схему делителя напряжения постоянного тока

1. Соберите схему делителя на резисторах R3 и R4 – рис. 5.5. При сборке схемы входное напряжение  $U_{BX} = +5$  В делителя подайте на его вход (на резистор R3) через дополнительные клеммы, расположенные левее клеммы *CURRENT HI*, чтобы иметь возможность в дальнейшем измерить входное напряжение с помощью *DMM*, подсоединив в эту точку потенциальный вход вольтметра *VOLTAGE HI* (на схеме показано пунктиром).



Рис. 5.5. Схема исследования резистивного делителя напряжения постоянного тока

2. Выберите *Digital Multimeter* (цифровой мультиметр) среди набора интерактивных инструментов, которые выполнены в *LabVIEW*.

3. Измерьте, используя *DMM*, входное  $U_{BX}$  и выходное  $U_{BbIX}$  напряжения делителя. Рассчитайте выходное напряжение, зная  $U_{BX} = +5$  В и значения резисторов делителя, измеренные ранее (см. стр. 71). Насколько хорошо совпадают теоретические и экспериментальные данные?

# Создайте и исследуйте схему делителя с изменяющимися значениями выходного напряжения, используя Variable Power Supply

1. Соберите схему делителя на резисторах *R*3 и *R*4 – рис. 5.5, в котором вместо источника +5 В используйте перестраиваемый источник пи-

тания (*Variable Power Supply*). С этой целью отсоедините провод от клеммы +5 В и присоедините его к выводу *Supply*+.

2. Выберите перестраиваемый источник питания (*Variable Power* Supply – VPS) среди набора интерактивных инструментов, которые выполнены в *LabVIEW*, рис. 5.9.



Рис. 5.9. Перестраиваемый источник питания

3. Изменяя значения источника VPS как  $U_{BX}$  от 0 до +12 В через 2 В, получите и зафиксируйте значения Uвых, используя DMM.

4. Введите массив полученных данных в *Excel*, с помощью которого рассчитайте коэффициенты передачи делителя по напряжению и обработайте их как массив случайных чисел.

# Создайте и исследуйте схему делителя с изменяющимися значениями выходного напряжения, используя переменное сопротивление R22

1. Соберите делитель на резисторах R22 и R23 – рис. 5.6.

2. Измерьте, используя DMM, входное  $U_{\rm BX}$  и выходное  $U_{\rm BbIX}$  напряжения делителя для различных положений движка потенциометра R22.

3. Убедитесь в возможностях изменения выходного напряжения и коэффициента передачи делителя напряжения.

## Проверка последовательной RC-цепи с помощью функционального генератора и осциллографа

1. Соберите схему последовательной *RC*-цепи (рис. 5.10), источником питания для которой является функциональный генератор *FGEN*, а входной и выходной сигналы будут просматриваться каналами *A* и *B* осциллографа *SCOPE*.



Рис. 5.10. Схема исследования последовательной RC-цепи

2. Из меню запуска инструментов *NI ELVIS* выберите функцию *Function Generator* (Функциональный генератор), рис. 5.11.

		1.82 kHz	
On 🔁		MANUAL	MODE BASIC
€ 1799.£0 Hz	<ul> <li>I Hz</li> <li>I0 Hz</li> <li>100 Hz</li> <li>1 kHz</li> <li>10 KHz</li> <li>100 KHz</li> </ul>	Peak Amplitude	DC Offset

Рис. 5.11. Функциональный генератор

3. Выберите функцию *Oscilloscope* (Осциллограф) из меню запуска инструментов *NI ELVIS*, рис. 5.12.

4. Рассчитайте частоту среза *RC*-цепи:

$$f_{\rm CP} = \frac{1}{6,28 \cdot R \cdot C}.$$

Установите близкое к рассчитанной частоте среза значение на функциональном генераторе в режиме генерации синусоидального напряжения с амплитудным значением 1 В.



Рис. 5.12. Осциллограф

5. Измерьте значения входного и выходного напряжений (осциллограф способен измерять различные параметры сигнала, такие как частота, пиковая амплитуда и т. д.). Эта возможность активируется нажатием на кнопку *MEAS* для каждого из каналов. Результаты измерений можно увидеть в нижней части экрана осциллографа.

6. Сопоставьте между собой полученные значения и сделайте вывод о правильности выполненной работы.

7. На экране осциллографа измерьте фазовый сдвиг между сигналами в каналах *A* и *B* на этой частоте. Совпадает ли он с известным теоретическим значением для цепи первого порядка?

8. Уменьшайте частоту генератора по отношению к частоте среза цепи. Что происходит с изменением модуля коэффициента передачи и фазовым сдвигом цепи? Зафиксируйте полученные данные.

9. Увеличивайте частоту генератора по отношению к частоте среза цепи. Что происходит с изменением модуля коэффициента передачи и фазовым сдвигом цепи? Зафиксируйте полученные данные.

Мы подготовились, чтобы в дальнейшем понять *Bode*-анализ электрических схем.

## АЧХ/ФЧХ RC-цепи

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) или амплитудный отклик – это зависимость коэффициента усиления схемы, выраженного

в децибелах, от десятичного логарифма частоты. Фазово-частотная характеристика (ФЧХ) или фазовый отклик – это зависимость разности фаз между входным и выходным сигналами от десятичного логарифма частоты.

1. Проведите следующие изменения в схеме, рис. 5.10, – выходные разъемы *FGEN* необходимо присоединить к входам исследуемой схемы, а также к контактам *ACH*1+. Выход схемы подается на контакты *ACH*0+.

2. Выберите функцию *Bode Analyzer* (Анализатор Боде) из меню запуска инструментов *NI ELVIS*, рис. 5.13.



Рис. 5.13. Анализатор Боде

- 3. Установите:
- начальную частоту start = 100 Hz;
- конечную *stop* = 35 kHz;
- число шагов на декаду (*Steps per decade*) *Steps* = 10;
- шкалу *Y* в режим *Auto*.

4. Используйте опции из меню *Display*, чтобы выбрать формат отображения и курсоры для считывания значений частотных характеристик.

5. Нажмите кнопку запуска Run.

6. Зафиксируйте полученные данные, так как обе ИПУ – Oscilloscope и Bode Analyzer – содержат кнопку Log. При нажатии на эту кнопку данные, изображенные на графиках, будут записываться в текстовый файл на жесткий диск. Эти данные можно использовать для дальнейше-го исследования с помощью Excel, LabVIEW, DIAdem или других про-грамм анализа и построения данных.

## Визуализация переходной характеристики RC-цепи

Для этого произведите следующие изменения в схеме рис. 5.10.

1. Удалите проводник, по которому подавалось переменное напряжение с выхода *FUNC OUT* генератора *FGEN*, и замените его проводником, присоединенным к выходу *SUPPLY*+ перестраиваемого источника питания *VPS* (*Variable Power Supply*). Установите значение на выходе источника, равное +5 В. Вместо конденсатора *C*10 используйте конденсатор  $C1=1 \text{ мк}\Phi$ , а прежний резистор замените резистором R14=220 кОм. Выходное напряжение цепи подайте на контакт *ACH*0+.

2. Закройте программное обеспечение *NI ELVIS* и запустите *LabVIEW*. Из библиотеки ВП *NI ELVIS* выберите *RC Transient*. В данной программе используются ВПП *LabVIEW* для включения и выключения источника питания через каждые 5 секунд с одновременным отображением напряжения на конденсаторе на развертке осциллограмм *LabVIEW*.

Такой тип возбуждения схемы – прямоугольным сигналом – позволяет четко увидеть этапы зарядки и разрядки простейшей RC-цепи. Произведение R3 на C называют постоянной времени цепи и обозначают буквой  $\tau$ . Используя законы Кирхгофа, легко показать, что выходное напряжение при заряде емкости имеет следующую зависимость:

 $U_{\rm BbIX} = U_0(\exp(-t/\tau)),$ 

а напряжения при ее разряде

 $U_{\rm BbIX} = -(U_0 - U_{\rm BbIX}(t_{\rm H}) \cdot (\exp(-t/\tau)).$ 

Инициализация перестраиваемого источника питания приводит в состояние готовности *NI ELVIS* и выбирает для последующей работы линию с положительным потенциалом источника питания.

Следующий ВП задает выходное напряжение в этой линии равным +5 В. Затем в первом кадре структуры последовательности происходит последовательное измерение 50 значений напряжения на конденсаторе с интервалом 1/10 секунды. В цикле с фиксированным числом итераций ВП *Analog Input Multiple Point* (Аналоговый ввод заданного количества точек) считывает 100 значений напряжения с частотой 1000 выборок в секунду, возвращая массив этих значений.

Затем этот массив поступает в ВП *Mean* (Усреднение), который возвращает среднее значение по 100 точкам. С помощью терминала локальной переменной среднее значение поступает на развертку осциллограмм (зарядка и разрядка *RC*-цепи). В следующем кадре напряжение источника питания устанавливается равным 0 В, а в последнем кадре снова происходит измерение 50 усредненных значений, но уже в цикле разрядки конденсатора.

## Контрольные вопросы к лабораторной работе

1. Каким образом включается и выключается аппаратура лабораторного комплекса, работающего в среде *NI ELVIS*?

2. Как выбрать и инициировать приборы и устройства (Digital Multimeter, Two-Wire Current Voltage Analyzers, Three-wire Current Voltage Curve Tracer, Variable Power Supply, Function Generator, Oscilloscope, Bode Analyzer) среди набора интерактивных инструментов, которые выполнены в LabVIEW?

3. Изобразите схему, которая используется для измерения значений сопротивлений резисторов.

4. Приведите на одном графике вольт-амперные характеристики маломощных кремниевого диода и диода Шоттки. Укажите ожидаемые значения токов и напряжений.

5. Какая схема используется для снятия ВАХ диодов?

6. Изобразите схему, с помощью которой снимаются выходные ВАХ транзистора.

7. По каким схемам снимаются входные ВАХ транзистора при различных значениях его выходного напряжения?

8. Как можно регулировать напряжение постоянного тока?

9. Приведите схемы регулирования напряжения постоянного тока с помощью *Variable Power Supply*, с помощью делителя напряжения с переменным сопротивлением (потенциометром).

10. Изобразите ожидаемые АЧХ и ФЧХ исследуемой *RC*-цепи.

11. Чему равен фазовый сдвиг между входным и выходным напряжениями исследуемой *RC*-цепи на частоте среза? 12. На входе схемы действует напряжение  $U_{\rm BX}(t) = U_m \sin \omega t$ ,  $\tau = RC$ .

Чему равно выходное напряжение U(t)?

a) 
$$U(t) = \frac{U_m R}{R + 1/j\omega C} \sin \omega t$$
;

6) 
$$U(t) = \frac{U_m}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}} \sin(\omega t - \arctan(\omega \tau));$$

B) 
$$U(t) = \frac{U_m}{\sqrt{1 + 1/(\omega \tau)^2}} \sin(\omega t + \arctan(1/\omega \tau));$$

Γ) 
$$U(t) = U_m \sqrt{1 + (1/\omega\tau)^2 \sin(\omega t + \arctan(1/\omega\tau))}$$

13. Какое из дифференциальных уравнений соответствует схеме  $(\tau = RC)$ ?



14. Какие из приведенных схем обеспечивают опережающий фазовый сдвиг выходного гармонического сигнала относительно входного?



в) 2 и 3; г) 1; д) 2.

15. Как сохраняются полученные при экспериментах данные?



#### Исследование диодных схем

#### Цель работы

1. Овладеть методикой снятия вольт-амперных характеристик (BAX) нелинейных элементов.

2. Освоить расчет основных параметров диодов, характеризующих их как нелинейные элементы.

3. Получить практические навыки исследования схем лабораторной работы.

#### Задачи работы

1. Подготовиться к лабораторной работе, т. е. знать и понимать процессы, происходящие в исследуемых схемах.

2. Проработать разделы порядка выполнения работы, отвечая по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?

3. Ответить на контрольные вопросы методических указаний.

4. Качественно обработать полученные экспериментальные данные, подготовить и защитить отчет.

### Краткие сведения для подготовки к лабораторной работе

Отличительным свойством выпрямительных диодов является их вентильное свойство, т. е. способность проводить ток при прямом включении и практически не проводить при обратном.

Как известно, ВАХ диода нелинейная, поэтому в любой точке ВАХ имеют место свои значения статического и дифференциального сопротивлений:

$$R_{\rm CT} = \left(\frac{U}{I}\right)_A, \ R_{\rm CT} > R_{\rm A}, \ R_{\rm A} \approx \left(\frac{\Delta U}{\Delta I}\right)_A$$

Вентильные свойства выпрямительных диодов широко используются в схемах выпрямителей и ограничителей напряжения. В лабораторной работе исследуются схемы однополупериодного выпрямителя, работающего на активную или емкостную нагрузку, и схемы последовательного и параллельного ограничителя.

Пусть прямое включение диода реализовано в схеме, изображенной на рис. 5.7. В соответствии с алгоритмом построения нагрузочной прямой ее уравнение имеет вид:

$$I = \frac{E1}{R} - \frac{1}{R}U$$

Тогда она расположится на ВАХ диода следующим образом (см. рис. 5.14) и будет перемещаться параллельно самой себе при изменениях *E*1. Абсцисса рабочих точек показывает

значение напряжения U, падающего на диоде.

Если на рис. 5.14 вместо источника напряжения постоянного тока включить источник гармонического напряжения, то напряжение  $U_R$  будет повторять форму тока I(t) (рис. 5.15), причем амплитуда  $U_R$  в первом приближении будет отличаться от  $E_m$  на



Рис. 5.14. Прямое включение диода

значение порядка  $E_0$  (рис. 5.16), а угол отсечки  $\Theta$  тока I и напряжения  $U_R$  будет меньше 90°.



Рис. 5.15. Графические построения на ВАХ диода выпрямителя с активной нагрузкой

Приняв в качестве модели диода схему замещения при кусочнолинейной аппроксимации ВАХ, для входного гармонического сигнала получим расчетную схему (рис. 5.16).

Тогда для положительной полуволны  $E_{\sim}$ :

$$I = \frac{E(t) - E_0}{R + R_{\mu}}, U_R = I \cdot R \approx E(t) - E_0$$
 при  $R >> R_{\mu}.$ 





Рис. 5.16. Схема замещения выпрямителя с активной нагрузкой при кусочно-линейной аппроксимации ВАХ диода

Итак, в указанном режиме работы диода – в режиме большого сигнала – нелинейность и вентильные свойства диода проявляются в отсечке тока, когда ток в цепи практически отсутствует на отрицательной полуволне входного гармонического сигнала и на части его положительной полуволны.

Может сложиться впечатление, что в цепи с диодами форма тока и напряжения на резисторе *R* всегда несинусоидальная при синусоидальном входном воздействии. Однако это не так в случае работы диода в режиме малого сигнала. Такой режим имеет место тогда, когда, например, с помощью источника напряжения постоянного тока рабочая точка выведена на линейный участок, а источник напряжения переменного тока изменяет токи и напряжения в окрестностях рабочей точки (см. рис. 5.17). В этом случае любая нелинейность может быть линеаризована как касательная к ВАХ в рабочей точке. Форма же переменных составляющих тока и напряжений в схеме практически гармоническая, несмотря на нелинейность ВАХ и вентильные свойства диода. Как известно, в режиме малого сигнала при низкочастотном воздействии моделью диода является его дифференциальное сопротивление в рабочей точке.



Рис. 5.17. Режим «малого сигнала» выпрямительного диода

Увеличение частоты входного сигнала требует использования ВЧмоделей диода. Инерционные свойства диода, ухудшающие его вентильные свойства, целесообразно просмотреть при исследовании схем диодных выпрямителей или ограничителей, повышая частоту генератора гармонического сигнала.

Схема однофазного выпрямителя, работающего на активную нагрузку, используется редко, так как создает сильно пульсирующий ток в нагрузке. Если простота однофазной схемы заставляет отдать ей предпочтение по сравнению с многофазными, то используют схему с дополнительным конденсатором фильтра – рис. 5.18.

В реальных схемах выпрямителей резистор R2 отсутствует. В приведенной схеме он поставлен, чтобы наблюдать на осциллографе ток диода (используем вход *CHB*+). Выходное напряжение (на нагрузке) просматриваем, используя *CHA*+. Синхронизированные временные диаграммы напряжения и тока для низкочастотного входного сигнала генератора (*FGEN*) показаны на рисунке 5.19.



Рис. 5.18. Однофазный выпрямитель, работающий на активно-емкостную нагрузку



Рис. 5.19. Временные диаграммы работы однофазного выпрямителя с активно-емкостной нагрузкой

Как видно из рисунка, диод открывается только на положительной полуволне напряжения с генератора, когда сравняются входное и выходное напряжения. Напряжение на нагрузке, а значит и ток через нее, при фиксированных параметрах элементов схемы пульсируют около среднего значения тем меньше, чем меньше время, в течение которого емкость разряжается на нагрузку, т. е. выше частота генератора. С другой стороны, при фиксированной частоте генератора пульсации уменьшаются при увеличении емкости фильтра.

С повышением частоты инерционные свойства диода, ухудшающие его вентильные свойства, приведут к искажениям преобразовательной характеристики выпрямителя.

Наряду с различными схемами выпрямителей вентильные свойства диодов широко используются в других схемах и, в частности, в ограничителях.

Такие схемы используются, когда требуется направленно исказить гармонический сигнал, чтобы резко обогатить спектр и получить возможность выделить нужную гармоническую составляющую, отсутствующую во входном сигнале. Но наиболее часто ограничители применяются для целей защиты электрических цепей, чтобы в нужном месте схемы значение сигнала не превышало заданного значения.

Обратимся вновь к схеме рис. 5.17, но диод поставим в режим большого сигнала, т. е. в отличие от ранее рассмотренного режима установим амплитуду  $E_{\sim}$  больше  $E_1$ . Тогда на части отрицательной полуволны переменного сигнала диод закроется и не будет пропускать ток, защитив при этом нагрузку R.

В ходе лабораторной работы будет исследоваться другая схема последовательного ограничителя сигналов.

В практике аналоговой электроники широкое распространение также получили кремниевые стабилитроны, разработанные для стабилизации напряжения постоянного тока.

Чтобы осуществить такую стабилизацию, на ВАХ элемента должен находиться участок, на котором при значительных изменениях тока изменения напряжения были бы незначительными. Такими свойствами (малого дифференциального сопротивления) обладают участки ВАХ кремниевых диодов, где при обратном включении развивается тот или иной вид пробоя *p*-*n*-перехода с током, ограниченным внешним резистором.

Простейший аналоговый стабилизатор напряжения постоянного тока – параметрический стабилизатор – изображен на рис. 5.20.



Рис. 5.20. Схема параметрического стабилизатора положительного напряжения

Суть процесса стабилизации заключается в том, что любое изменение входного напряжения  $E_1$  и/или сопротивления нагрузки  $R_{\rm H}$  приводят к изменениям общего тока и перераспределению токов между диодом и нагрузкой. При этом  $U_{\rm H} = U_{\rm CT}$  практически не изменяется, благодаря работе стабилитрона на участке ВАХ с малым дифференциальным сопротивлением и изменением падения напряжения на резисторе R.

Среди параметров, характерных для стабилизаторов напряжения, наиболее распространенными являются:

– нестабильность выходного напряжения по сети (line regulation) – процентное изменение выходного напряжения в ответ на изменение входного напряжения:

$$K_{L} = Line Reg. = \frac{U_{O(hi-in)} - U_{O(lo-in)}}{U_{O(nom-in)}} \cdot 100 \%,$$

где использованы сокращения: O - out, hi - high, lo - low, in - input, т. е. речь идет об изменении выходного напряжения при высоком и низком уровнях входного, отнесенного к выходному напряжению при номинальном входном;

нестабильность выходного напряжения по нагрузке (load regulation) – процентное изменение выходного напряжения в ответ на изменение тока в нагрузке от половины до полного номинального значения:

$$K_{L} = Load Reg. = \frac{U_{O(full load)} - U_{O(half load)}}{U_{O(rated load)}} \cdot 100 \%,$$

где  $U_{O(rated load)}$  – номинальное выходное напряжение на холостом ходу при номинальном  $U_{in(nom)}$ ;

– общий КПД (overall efficiency), показывающий разработчику, сколько тепла будет выделяться внутри изделия и потребуется ли в физической конструкции какой-либо теплоотвод:

КПД = 
$$\frac{P_{out}}{P_{in}}$$
.

При определении указанных параметров стабилизатора на макете находим соответствие: входные напряжения  $U_{in}(E_1)$  изменяются с помощью перестраиваемого источника (Variable Power Supply), выходное напряжение  $U_{out} = U_{CT}$ .

# Программа лабораторной работы

#### Исследование схем однополупериодного выпрямителя

1. Осуществите запуск программного обеспечения *NI ELVIS* и его инициализацию.

2. Соберите схему для снятия ВАХ диодов: *VD*1 – кремниевого точечного диода, *VD*3 – кремниевого стабилитрона. Сохраните данные по ВАХ в виде файлов с целью дальнейшего использования и распечатки для отчета. Пункт выполняется, если утеряны данные, полученные в лабораторной работе № 1. 3. Соберите схему однополупериодного выпрямителя, работающего на активную нагрузку (рис. 5.18, отключив емкость *C*10). В качестве источника переменного напряжения используйте генератор *FGEN*, используя выводы *FGEN* и *Ground*. Установите на генераторе амплитуду гармонического сигнала  $E = U_{\text{BX}_{24}} = 2,5$  В и частоту f=1 кГц.

4. Инициируйте генератор и осциллограф и пронаблюдайте временные диаграммы выходного напряжения (*CHA*+) и тока диода (*CHB*+) выпрямителя. Измерьте осциллографом амплитуды сигналов и определите период входного напряжения и временной интервал ненулевого тока диода. Определите угол отсечки тока Θ. Данные зафиксируйте для их дальнейшей обработки. Временные диаграммы входного напряжения и полученных сигналов синхронизируйте.

5. Переберите схему выпрямителя, заменив кремниевый диод VD1 на диод Шоттки VD2. Снова проделайте предыдущих два пункта. Почему изменился угол отсечки? Сделайте выводы.

6. Изменяйте частоту гармонического напряжения с генератора и пронаблюдайте на повышенных частотах (десятки и сотни килогерц) проявляются ли инерционные свойства диода. Зафиксируйте временные диаграммы выходного напряжений и тока диода и синхронизируйте их с входным гармоническим сигналом.

7. Соберите схему однополупериодного выпрямителя, работающего на активно-емкостную нагрузку, восстановив схему (см. рис. 5.18) и частоту генератора f = 1 кГц. При сборке схемы используйте также четыре соединенные друг с другом гнезда макета.

8. Пронаблюдайте временные диаграммы выходного напряжения (*CHA*+) и тока диода (*CHB*+) выпрямителя. Зафиксируйте и синхронизируйте их с входным гармоническим сигналом. Как, по-вашему, Вы исследуете хороший выпрямитель?

9. Изменяйте частоту гармонического напряжения с генератора и пронаблюдайте, как с увеличением частоты изменяется амплитуда пульсаций. Полученные данные (об амплитудах пульсаций), как минимум на трех частотах, зафиксируйте. Если на выходном напряжении пульсации плохо наблюдаются, то закройте вход канала *A* осциллографа и увеличьте чувствительность по этому каналу.

10. Установите частоту генератора  $f = 1 \ \kappa \Gamma \mu$ , а вместо емкости C10 установите емкость  $C2 = 10 \ \text{мк} \Phi$ . Почему резко снизились пульсации выходного напряжения? Полученные данные для двух значений емкостей зафиксируйте.

11. Установите f = 10 кГц и снимите зависимость  $U_{\text{Bbix}} = f(U_{\text{BX}_{\sim}})$ , изменяя амплитуду входного напряжения генератора *FGEN*  $U_{\text{BX}_{\sim}}$  от 2,5

до 1,1 В через 0,2 В. Значения *U*вых получайте или в виде данных измерителя канала *CHA*+ осциллографа, или инициируя вместо осциллографа цифровой вольтметр *DMM*. Сформируйте массив данных и сохраните их для дальнейшего использования.

#### Исследование работы схемы последовательного ограничителя

1. Соберите схему последовательного ограничителя, изображенную на рис. 5.21.



Рис. 5.21. Схема последовательного диодного ограничителя

2. Инициируйте генератор, регулируемый источник питания (*Variable Power Supplies*) и осциллограф. Установите амплитуду гармонического сигнала  $E_{\sim} = 2,5$  В на частоте f = 1 кГц и значение напряжения  $E_1$  источника SUPPLY+, равное 1 В.

3. Исследуйте работу схемы последовательного ограничителя, изучив временные диаграммы сигналов на входе и выходе при различных значениях и полярности подпирающего напряжения  $E_1$  (два-четыре значения по выбору). Почему различаются эти сигналы и их значения?

4. Рассчитайте коэффициент передачи по напряжению ограничителя для переменных сигналов. Сохраните для отчета полученные в ходе экспериментов файлы синхронизированных сигналов. Сравните результаты теоретических и экспериментальных исследований.

## Исследование работы схемы параметрического стабилизатора

1. Соберите схему параметрического стабилизатора, изображенную на рис. 5.22, в режиме холостого хода.

2. Инициируйте для питания схемы параметрического стабилизатора источник *VPS* положительной полярности и цифровой вольтметр *DMM* для измерения выходного напряжения.

3. Измерьте коэффициент нестабильности выходного напряжения KL, считая, что номинальное выходное напряжение имеет место при E1 = 10 B, а максимальное и минимальное значения фиксируются при E1 = 12 B и E1 = 8 B соответственно.



Рис. 5.22. Схема параметрического стабилизатора напряжения

4. Подключите к выходу стабилизатора нагрузку R21 и измерьте коэффициент нестабильности выходного напряжения  $K_L$ , повторив предыдущий пункт.

5. Измените схему стабилизатора (рис. 5.22). Полную нагрузку реализуйте подключением резистора R23 = 5,1 кОм, а при половинной нагрузке используйте сопротивление R21 = 10 кОм. Измерьте коэффициент нестабильности выходного напряжения по нагрузке (load regulation). Значение  $U_{O(rated \ load)}$  получите как номинальное выходное напряжение на холостом ходу при номинальном  $U_{in(nom)}=10$  В.

6. Сравните нестабильности выходных напряжений от вариаций *E*1 в режимах холостого хода и под половинной нагрузкой. Сделайте заключение.

7. Установите номинальное входное напряжение E1 = 10 В и замерьте выходное напряжение параметрического стабилизатора на холостом ходу (U1) и под нагрузкой R21 (U2). Рассчитайте  $R_{\text{Bbix}}$  стабилизатора.

## Контрольные вопросы

1. Как по ВАХ диода определить значения  $E_0$  и  $R_{\rm Д}$  схемы замещения диода при кусочно-линейной аппроксимации (рис. 5.9)?

2. Определите *R*<sub>CT</sub> и *R*<sub>д</sub> в выбранной Вами рабочей точке по ВАХ диода.

3. Изобразите ожидаемую зависимость  $R_{CT} = f(I)$ .

4. Изобразите ожидаемую зависимость  $R_{II} = f(I)$ .

5. Что такое режим малого сигнала?

6. Почему в режиме малого сигнала формы входного и выходного сигналов практически совпадают?

7. Поясните работу схемы выпрямителя, работающего на активную нагрузку, используя временные диаграммы сигналов.

8. Почему в схеме выпрямителя с активной нагрузкой угол отсечки тока диода меньше 90°?

9. Поясните работу схемы выпрямителя, работающего на активноемкостную нагрузку, используя временные диаграммы сигналов.

10. Что можно сделать, чтобы уменьшить амплитуду пульсаций выходного напряжения?

11. С какой целью используются ограничители напряжения?

12. Как работает схема последовательного ограничителя напряжения (использовать временные диаграммы сигналов)?

13. Как изменится диаграмма выходного сигнала, если в схеме последовательного ограничителя поменять полярность источника *E*1?

14. Какая ветвь ВАХ стабилизатора обычно используется с целью стабилизации напряжения?

15. Почему для стабилизации напряжения используется область пробоя *p*-*n*-перехода стабилитрона?

16. Как в заявленной рабочей точке определить статическое и дифференциальное сопротивления стабилитрона?

17. Приведите графические построения на ВАХ стабилитрона для схемы (рис. 5.20), поясняющие работу стабилизатора при изменениях E1, когда  $R_{\rm H}$  = const.

18. Приведите графические построения на ВАХ стабилитрона для схемы (рис. 5.20), поясняющие работу стабилизатора при изменениях  $R_{\rm H}$ , когда  $E1 = {\rm const.}$ 

19. Что необходимо предпринять в схеме параметрического стабилизатора напряжения, чтобы уменьшить коэффициент нестабильности выходного напряжения *K*<sub>L</sub>? 20. Выведите формулу для расчета выходного сопротивления *R*<sub>вых</sub> параметрического стабилизатора.

21. Различным полупроводниковым диодам соответствует свое условное обозначение в схемах. Укажите правильное соответствие.

1-я группа	2-я группа
1. Стабилитрон односторонний	a) — 🖂 —
2. Туннельный диод	б) — 🖂 —
3. Диод. Основное обозначение	B) ->
4. Диод Шоттки	Г) — <del>Д</del> (1
5. Варикап (диод емкостной)	д) — 11
6. Светодиод	e) — 🔁 —
7. Фотодиод	ж) — Э—

22. На рисунке изображена вольтамперная характеристика (ВАХ) диода для двух температур Т1 и Т2 > Т1. Тогда участки ВАХ при прямом и обратном включении соответствуют:



a) 1 и 3 для T1; б) 1 и 4 для T2; в) 2 и 3 для T1; г) 2 и 4 для T2.

23. Различным типам полупроводниковых диодов малой мощности соответствует своя характеристика при прямом включении:

1-я группа:1. Диод Шоттки.

2. Кремниевый диод.

2-я группа:





24. Какая из временных диаграмм соответствует работе схемы при входном гармоническом сигнале, если при  $U_{\partial} \ge 0$  его сопротивление равно 0, а при  $U_{\partial} < 0$  его сопротивление равно  $\infty$ ?





25. Нагрузочная прямая на ВАХ диода указанной схемы пересекает ось токов на уровне мА.





26. Среднее за период значение напряжения на нагрузке при гармоническом входном напряжении, если максимальное напряжение на нагрузке –  $U_{\rm HM}$ , а угол отсечки тока – 90°, равно





Rн

a) *R*;

б) дифференциальному сопротивлению прямо смещенного стабилитрона  $r_{\partial}$ ;

в) дифференциальному сопротивлению обратно смещенного стабилитрона  $R_{\partial}$ ;

г) 
$$R //r_{\partial} = Rr_{\partial} /(R + r_{\partial});$$
 д)  $R //R_{\partial} = RR_{\partial} /(R + R_{\partial}).$ 

28. Максимальное значение входного напряжения стабилизатора  $U_{BX}$   $\frac{R}{0,5 \text{ к}}$   $U_{BbIX}(=U_{CT})$ при  $U_{CT} = 10 \text{ B}; I_{CT. MAKC} = 30 \text{ MA};$  $R_{H} = 1 \text{ кОм}; R = 0,5 \text{ кОм}$ равно B.

29. Какое допустимое обратное напряжение должен иметь диод, чтобы он не пробился при отключении нагрузки? Действующее напряжение на вторичной обмотке трансформатора  $U_2$ :



30. Какая из приведенных временных диаграмм соответствует изображенной схеме?





Требования к отчету

Отчет должен содержать схемы и результаты эксперимента, обработанные в соответствии с целями работы.

## Лабораторная работа № 3

## Исследование режимов биполярного транзистора

## Цель работы

1. Получение практических навыков схемного введения биполярного транзистора в заданный режим покоя.

2. Определение основных свойств транзистора в усилительном и ключевых режимах.

3. Овладение методикой работы в учебной лаборатории в программно-аппаратной среде *NI ELVIS*.

#### Задачи исследования

1. Подготовка к лабораторной работе, т. е. формирование знаний и пониманий процессов, происходящих в исследуемых схемах.

2. Проработка разделов порядка выполнения работы. Поиск ответов по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?

3. Снятие вольтамперной характеристики (BAX) биполярного транзистора VT1, используя анализатор (*Three-wire Current Voltage* Analyzers) и сохранение данных для отчета.

4. Приобретение навыков исследования режимов работы транзистора с привлечением регулируемого источника питания (Variable Power Supplies), цифрового мультиметра (Digital Multimeter – DMM), функционального генератора (FGEN) и осциллографа (Scope).

5. Обработка полученных экспериментальных данных, подготовка и защита отчета.

## Краткие сведения из теории

## Усилительный режим биполярного транзистора

Усилительный режим реализуется тогда, когда эмиттерный переход транзистора открыт, а коллекторный переход закрыт. Такой режим транзистора обычно устанавливается в усилительных каскадах различных усилителей. Режимом покоя усилителя назовем состояние, которое устанавливается после переходного процесса при включении источника питания, когда сигнал от источника сигнала в схему не поступает.

По завершении переходного процесса на всех элементах схемы (и через все элементы) образуются установившиеся значения постоянных напряжений (и протекают установившиеся значения постоянных токов).

Для усилительного элемента – биполярного транзистора – значения токов и напряжений характеризуют положение рабочей точки на семействах вольт-амперных характеристик (ВАХ) транзистора – входных и выходных.

Выбор рабочей точки как исходного режима работы усилительного каскада важен по многим причинам:

1. Безопасность работы транзистора – рабочая точка выбирается так, чтобы ток и напряжение коллектора и базы не выходили за пределы максимально допустимых значений. Область безопасной работы транзистора (ОБР, *SOA*) на выходных ВАХ определяет границы его надежной работы без захода в область одного из видов пробоя.

2. Необходимость обеспечения линейного режима работы транзистора для требуемых максимальных значений переменных напряжений и токов на нагрузке.

3. Требования к получению желаемых энергетических соотношений: коэффициентов использования токов, напряжений, КПД.

4. Необходимость обеспечения желаемого класса работы транзистора (*A*, *AB*, *B*, *C*) – в данной работе класс *A*, когда отсутствует отсечка коллекторного тока.

Основным элементом усилительного каскада является управляемый элемент (УЭ) – биполярный транзистор n-p-n-типа с коллекторной нагрузкой *R* по постоянному току (рис. 5.23).

Совместно с напряжением питания  $E = E_{\rm K}$  эти элементы образуют выходную цепь каскада. Усиливаемый сигнал  $U_{\rm BX}$ , принятый для простоты синусоидальным (рис. 5.23, *a*), подается на вход УЭ. Выходной сигнал  $U_{\rm BbIX}$  снимается с выхода УЭ. Он создается в результате изменения сопротивления УЭ и, следовательно, тока *I* в выходной цепи под воздействием входного напряжения. Процесс усиления основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения *E* в энергию переменного напряжения в выходной цепи за счет изменения сопротивления УЭ по закону, задаваемому входным сигналом.

Ввиду использования для питания источника постоянного напряжения E ток I в выходной цепи каскада является однонаправленным (рис. 5.23,  $\delta$ ).



Рис. 5.23. Принцип построения (а) и временные диаграммы (б) усилительного каскада

При этом переменный ток и напряжение выходной цепи (пропорциональные току и напряжению входного сигнала) следует рассматривать как переменные составляющие суммарных тока и напряжения, накладывающиеся на их постоянные составляющие  $I_{\Pi}$  и  $U_{\Pi}$  (рис. 5.23,  $\delta$ ).

Связь между переменными и постоянными составляющими должна быть такой, чтобы амплитудные значения переменных составляющих не превышали постоянных составляющих, т. е.  $I_{\Pi} \ge I_m$  и  $U_{\Pi} \ge U_m$ . Если эти условия не будут выполняться, то ток *I* в выходной цепи на отдельных интервалах будет равен нулю, что приведет к искажению формы выходного сигнала. Таким образом, для обеспечения работы усилительного каскада при переменном входном сигнале в его выходной цепи должны быть созданы постоянные составляющие тока  $I_{\Pi}$  и напряжения  $U_{\Pi}$ . Задачу решают путем подачи во входную цепь каскада, помимо усиливаемого сигнала, соответствующего постоянного напряжения  $U_{\rm BXn.}$ 

Таким образом, усилительные свойства каскадов основываются на следующем. При подаче на управляемый элемент напряжения входного сигнала в токе выходной цепи создается переменная составляющая, вследствие чего на управляемом элементе образуется аналогичная составляющая напряжения, обычно превышающая переменную составляющую напряжения на входе. Усилительные свойства проявляются тем сильнее, чем больше сказывается влияние входного сигнала на выходной ток управляемого элемента и чем сильнее проявляется воздействие изменения тока в выходной цепи на изменение напряжения на управляемом элементе (т. е. чем выше сопротивление R).

Анализ каскада по постоянному току проводят графоаналитическим методом, основанным на использовании соответствующих построений и расчетных соотношений. Графические построения проводятся с использованием выходных (коллекторных) характеристик транзистора (рис. 5.24, *a*). Удобство метода заключается в наглядности нахождения связи параметров режима покоя каскада ( $U_{\rm K\Pi}$  и  $I_{\rm K\Pi}$ ) с амплитудными значениями его переменных составляющих (выходного напряжения  $U_{\rm BbIXm}$  и тока  $I_{\rm Km}$ ), являющихся исходными при расчете каскада.



*Рис. 5.24. Графическое определение режима покоя каскада ОЭ* на коллекторной (а) и базовой (б) характеристиках транзистора

На выходных характеристиках (рис. 5.24, *a*) проводят так называемую линию нагрузки каскада по постоянному току, представляющую собой геометрические места точек (a, б), координаты  $U_{K\mathcal{P}}$  и  $I_K$  которых соответствуют возможным значениям точки покоя каскада.

Аналитическая зависимость

$$U_{\rm K\Im\Pi} = E_{\rm K} - I_{\rm K\Pi} \cdot R$$

является графическим уравнением прямой. В связи с этим построение линии нагрузки каскада по постоянному току удобно провести по двум точкам, характеризующим режим холостого хода (точка а) и короткого замыкания (точка б). Для точки а:  $I_{\rm K\Pi} = 0$ ,  $U_{\rm K\Im\Pi} = E_{\rm K}$  и для точки б:  $U_{\rm K\Im\Pi} = 0$ ,  $I_{\rm K\Pi} = E_{\rm K}/R$ .

Выбрав по входной (базовой) характеристике  $I_{\rm b} = f(U_{\rm b})$  транзистора (рис. 5.24, б) необходимое значение тока базы покоя  $I_{\rm b}$ , определим координаты точки П пересечения соответствующей выходной характеристики при  $I_{\rm b} = I_{\rm b}$ .

В реальных усилительных каскадах на их выходах может подключаться нагрузка *RL*.

Если учесть, что сопротивление источника питания  $E_{\rm K}$  по переменному току также близко к нулю, то окажется, что сопротивление каскада по переменному току определяется сопротивлениями или резистора R, или резисторов R и RL, включенных параллельно, т. е.  $R_{\rm H~} = R \parallel RL$ . Таким образом, при подключенном RL сопротивление нагрузки каскада по постоянному току ( $R_{\rm H} = R$ ) больше, чем по переменному току –  $R_{\rm H~} = R \parallel RL$ .

Другими словами, в этом случае нагрузочная прямая по переменному току на выходных ВАХ транзистора пойдет круче к оси напряжения, чем по постоянному току, что и отражено на рис. 5.24.

Если нагрузка *RL* не подключается, т. е. реализуется режим холостого хода, то нагрузочные прямые постоянному и переменному токам для рассматриваемой схемы совпадают. Как отмечалось выше, при подключении нагрузки *RL* необходимо строить нагрузочную прямую переменному току. Эта прямая всегда проходит через рабочую точку П. Вторую точку «в», через которую пройдет прямая, расположим на оси напряжений, т. е. при нулевом токе коллектора. Ее координаты:

$$U_{\mathrm{K} \ni \Pi} + I_{\mathrm{K} \Pi} \cdot R_{\sim}$$

где  $U_{K \ni \Pi}$  и  $I_{K \Pi}$  – напряжение и ток рабочей точки режима покоя.

При подаче на вход каскада напряжения  $U_{\rm BX}$  в базовой цепи транзистора создается переменная составляющая тока  $I_{\rm b}$  (рис. 5.24,  $\delta$ ). Так как ток коллектора через коэффициент  $\beta$  пропорционально зависит от тока базы, в коллекторной цепи транзистора создаются переменная составляющая тока  $I_{K\sim}$  (рис. 5.24, *a*) и переменное выходное напряжение  $U_{BbIX}$ , связанное с током  $I_{K\sim}$  линией нагрузки по переменному току. При этом линия нагрузки по переменному току характеризует изменение мгновенных значений тока коллектора  $I_K$  и напряжения на транзисторе  $U_{K\Im}$  или, как говорят, перемещение рабочей точки. Рабочая точка перемещается вверх от точки покоя «П» по нагрузочной прямой переменного тока при положительной полуволне входного напряжения и вниз – при отрицательной полуволне. Очевидно, для исключения искажений выходного сигнала необходимо, чтобы рабочая точка при перемещении вверх по линии нагрузки не заходила в область нелинейных начальных участков выходных характеристик, а при перемещении вниз – в область начальных токов коллектора  $I_{K0(\Im)} = I_{K0}^*$ . Работа каскада без искажений выходного сигнала достигается за счет обеспечения соответствующего значения входного сигнала и правильного выбора режима (точки) по-коя.

Для исключения возможных искажений усиливаемого сигнала параметры режима покоя должны удовлетворять следующим условиям (рис. 5.24, *a*):

$$U_{\rm KHI} > U_{\rm BHX \ max} + \Delta U_{\rm KH}, I_{\rm KHI} > I_{\rm Kmax} + I_{\rm K0(3) \ max}$$

где  $\Delta U_{\rm K\Im}$  – напряжение на коллекторе, соответствующее области нелинейных начальных участков выходных характеристик транзистора;  $I_{\rm KO(\Im)\ max}$  – тепловой ток коллектора в схеме ОЭ, соответствующий максимальной температуре.

Меняя положение рабочей точки за счет изменения напряжения регулируемого источника питания (Variable Power Supplies) рабочей станции NI ELVIS и изменяя значение входного напряжения с помощью функционального генератора (Function Generator – FGEN), можно с помощью цифрового вольтметра (DMM) и осциллографа (Scope) провести анализ влияния режима покоя на параметры выходного сигнала.

Возможные геометрические построения в координатных осях выходных ВАХ транзистора иллюстрирует рис. 5.25.

Сопоставляя рис. 5.24 и 5.25, легко понять, что для рабочей точки П2 при увеличении входного сигнала произойдет сначала ограничение отрицательной полуволны выходного напряжения, а для П3 – положительной.

Симметричного ограничения полуволн синусоиды, а значит и максимальной амплитуды выходного напряжения лучше всего достичь, если режим покоя характеризуется рабочей точкой П1.



Рис. 5.25. Различные положения рабочих точек на выходных ВАХ

Следует понять, что максимальная амплитуда отрицательной полуволны определяется максимальной разностью в координатах рабочей точки и остаточным напряжением транзистора  $\Delta U_{\text{K}\Im}$  (рис. 5.24, *a*). Максимальная амплитуда положительной полуволны определяется значениями тока покоя в рабочей точке и сопротивлением каскада по переменному току.

Таким образом, выбор расположения рабочей точки на выходных ВАХ транзистора и соответствующий расчет режима покоя на постоянном токе должен быть тесно увязан с требованиями, предъявляемыми к каскаду по переменному току.

Чтобы рассчитать параметры и характеристики усилительного каскада в линейном режиме на переменном токе, необходимо знать параметры транзистора в окрестности рабочей точки режима покоя.

На практике часто пользуются *h*-параметрами транзистора, которые характеризуют его как активный линейный четырехполюсник.

Расчет этих параметров по конечным приращениям токов и напряжений вблизи рабочей точки транзистора для схемы ОЭ (общий эмиттер) проводится следующим образом:

$$h_{11\Im} = \left| \frac{\Delta U_{B\Im}}{\Delta I_{B}} \right| U_{K\Im} = \text{const}; \quad h_{21\Im} = \left| \frac{\Delta I_{K}}{\Delta I_{B}} \right| U_{K\Im} = \text{const};$$
$$h_{12\Im} = \left| \frac{\Delta U_{B\Im}}{\Delta U_{K\Im}} \right| I_{B} = \text{const}; \quad h_{22\Im} = \left| \frac{\Delta I_{K}}{\Delta U_{K\Im}} \right| I_{B} = \text{const}.$$

Параметры  $h_{119}$  и  $h_{129}$  схемы с ОЭ на семействе входных характеристик в рабочей точке A (обязательно указывайте координату рабочей точки) находят по формулам в соответствии со следующими графическими построениями (рис. 5.26):

$$h_{11} = \left| \frac{\Delta U_{\text{F3}}}{\Delta I_{\text{F}}} \right|_{U_{\text{K3}}=\text{const}} = \frac{U_D - U_C}{I_D - I_C};$$
$$h_{12} = \left| \frac{\Delta U_{\text{F3}}}{\Delta U_{\text{K3}}} \right|_{I_{\text{F3}}=\text{const}} = \frac{AB}{|U_{\text{K32}} - U_{\text{K31}}|}$$



Рис. 5.26. Графические построения для определения h-параметров

В рабочей точке A на выходных характеристиках, например, так определяют параметры  $h_{213}$  и  $h_{223}$ :

$$h_{219} = \left| \frac{\Delta I_{\rm K}}{\Delta I_{\rm b}} \right|_{U_{\rm K9}} = \text{const} = \frac{AD}{I_{\rm 52} - I_{\rm 51}}$$
$$h_{229} = \left| \frac{\Delta I_{\rm K}}{\Delta U_{\rm K9}} \right|_{I_{\rm 5}} = \text{const} = \frac{BC}{AB}.$$

При исследовании биполярного транзистора в усилительном режиме следует уяснить, что это управляемый нелинейный элемент, у которого изменение входного тока (базы) приводит к изменениям выходного тока (коллектора или эмиттера). Кроме того, биполярный транзистор является усилительным элементом, т. е. мощность, выделяемая в выходной цепи существенно больше мощности во входной цепи. Это происходит за счет энергии источников питания.

#### Ключевые режимы работы

К этим режимам относятся режим отсечки и режим насыщения биполярного транзистора. Первый реализуется, когда оба перехода транзистора закрыты, т. е. находятся в обратном включении, а второй – когда переходы открыты.

Транзисторные ключи (ТК) являются одним из наиболее распространенных элементов импульсных устройств. Главное назначение транзистора, работающего в ключевом режиме – замыкание и размыкание цепи, его усилительные свойства в этом режиме отсутствуют. Разомкнутому состоянию ключа соответствует режим отсечки транзистора (транзистор заперт), а замкнутому – режим насыщения (транзистор открыт).

Ключевой каскад содержит источник питающего напряжения, нагрузочный (в простейшем случае резистор *R*) и ключевые элементы. При одном состоянии ключевого элемента ток в цепи нагрузки минимален, при другом – принимает максимальное значение. Электронный ключ можно считать известной аналогией механического ключа (см. рис. 5.27).



*Рис. 5.27. Механический эквивалент ТК Рис. 5.28. ВАХ ключа* 

Ключ К замыкается и размыкается под действием внешней силы Р. Сопротивление идеального ключа в замкнутом состоянии равно нулю, а в разомкнутом – бесконечности, то есть его вольт-амперная характеристика (ВАХ) совпадает с осями координат (рис. 5.28). В действительности даже механический ключ (рубильник, выключатель) является неидеальным. Он имеет сопротивление r во включенном и конечное сопротивление утечки *R* в выключенном состоянии.

ВАХ такого ключа уже не совпадает с осями координат, а имеет угол наклона к осям (рис. 5.29).

Существенным отличием электронных ключей является смещение их ВАХ относительно начала координат на величину  $I_P$  и  $U_3$  соответственно, где *I*<sub>P</sub> – ток разомкнутого ключа – остаточный ток, а *U*<sub>3</sub> – падение напряжения – остаточное напряжение в замкнутом состоянии ключа.



Рис. 5.29. ВАХ реального транзисторного ключа

Принципиальная схема простейшего транзисторного ключа изображена на рис. 5.30.



Рис. 5.30. Транзисторный ключ ОЭ

Входной сигнал  $E_6$ , задающий базовый ток транзистора, играет ту же роль, что и сила P в схеме рис. 5.27, а сам транзистор VT1 играет роль ключевого элемента K. Управляемой является коллекторная цепь с источником питания  $E_K$  и нагрузкой в виде  $R_K$ . Транзистор n-p-n-типа включен по схеме с ОЭ.

При действии отрицательного входного сигнала транзистор запирается. А при действии положительного сигнала он открывается и может быть насыщен.

На выходной характеристике транзистора (рис. 5.31) запертое состояние транзистора (режим отсечки) отмечено зоной РО, а режим насыщения – зоной РН.

Рассмотрим сначала режим отсечки транзистора в схеме простейшего ТК. В этом режиме оба перехода смещены в обратном направлении, и ток транзистора (как входной, так и выходной) мал и равен  $I_{K0}$ (рис. 5.32)



Рис. 5.31. Режимы РО и РН на ВАХ транзистора

Условие надежного запирания транзистора по модулю  $E_6$  имеет вид  $R_6 \leq (E_6/I_{K0 \text{ max}})$ , т. е. неравенство должно выполняться во всем диапазоне рабочих температур, включая и максимальную температуру  $t_{\text{max}}$ , при которой ток  $I_{K0}$  максимален и равен  $I_{K0 \text{ max}}$ .

Напряжение на нагрузке  $R_{\rm K}$  определяется как:  $U_{\rm H} = I_{\rm K0} \cdot R_{\rm K}$ . Так как значение  $I_{\rm K0}$  мало, то им пренебрегают и можно считать, что  $U_{\rm K9} = E_{\rm K}$ .



Рис. 5.32. Схема замещения ТК с транзистором в режиме отсечки

Практически обеспечить надежное запирание транзистора можно и в режиме неглубокой отсечки, когда  $E_6 = 0$ . Несмотря на то, что токи транзистора несколько возрастают, в первом приближении можно считать, что  $U_{K3} = E_K$ . На выходной характеристике транзистора режиму глубокой отсечки соответствует точка 1, а режиму неглубокой отсечки – точка 2. Приближенно значение токов на границе режима отсечки можно оценить как:

$$\begin{cases} I_{\ni} = \beta I_{\mathrm{K}0} \\ I_{\mathrm{K}} = (1+\beta)I_{\mathrm{K}0} \\ I_{\mathrm{E}} = -I_{\mathrm{K}0} \end{cases}$$

где  $\beta$  – коэффициент усиления передачи по току.

Теперь подадим положительное напряжение  $E_6$ . По мере увеличения напряжения транзистор отпирается и входит в усилительный режим. Начинает протекать базовый ток  $I_6 > 0$  и пропорциональный ему коллекторный ток  $I_K$ , а потенциал коллектора, соответственно, уменьшается. Ввиду того, что токи эмиттера и коллектора приблизительно равны ( $I_K \approx I_9$ ), перенесем входную характеристику  $I_9 = f(U_{69})$  на выходную:  $I_K = f(U_{K9})$ .

В точке 3 при токе базы  $I_{55}$  напряжения  $U_{K3}$  и  $U_{53}$  становятся равными; инжекция коллектора начинает препятствовать дальнейшему увеличению коллекторного тока и этот ток остается далее практически неизменным. Такой максимальный ток коллектора называют током насыщения и обозначают  $I_{KH}$ . Соответственно и режим двойной инжекции, характерный для открытого состояния ключа, называют режимом насыщения транзистора. Ток насыщения  $I_{KH}$  протекает через транзистор и резистор  $R_{K}$  и равен:

$$I_{\rm KH} = (E_{\rm K} - U_{\rm KH})/R_{\rm K} ,$$

где  $U_{\rm KH}$  – остаточное напряжение на транзисторе в открытом состоянии.

Остаточное напряжение  $U_{\rm KH}$ , являющееся существенным параметром транзистора в импульсном режиме работы, должно быть минимальным. Поэтому в первом приближении, ввиду относительно малого остаточного напряжения по сравнению с  $E_{\rm K}$ , транзистор может быть замещен эквипотенциальной точкой, рис. 5.33.



Рис. 5.33. Схема замещения ТК с транзистором в режиме насыщения

Расчет тока *I*<sub>кн</sub> для приведенной схемы (рис. 5.33) производится по приближенной формуле:

$$I_{\rm KH} = E_{\rm K}/R_{\rm K} \, .$$

Условие насыщения транзистора имеет вид:

$$I_{\rm KH} \leq \beta \cdot I_{\rm B}$$

Оно определяется не значениями токов (как видно из формулы), а их соотношением и может иметь место при весьма малых токах (поряд-ка микроампер и меньше).

Для простого ТК ток базы в режиме насыщения по закону Ома

$$I_{\rm b} = E_{\rm b}/R_{\rm b}.$$

Подставляя токи базы и коллектора ( $I_{\rm b}, I_{\rm KH}$ ) в условие насыщения, получим:

$$\frac{E_{\rm K}}{R_{\rm K}} \le \beta \frac{E_{\rm B}}{R_{\rm B}}$$

откуда

$$R_{\rm b} \leq \beta \frac{E_{\rm b}}{E_{\rm K}} R_{\rm K}$$

Это неравенство является критерием насыщения транзистора простейшего ТК.

Удобно иметь не только критерий насыщения, но и количественную характеристику «глубины» насыщения. Такой параметр называется степенью насыщения. Степень насыщения транзистора оценивается коэффициентом *S*, смысл которого состоит в следующем. Из условия насыщения  $I_{\rm KH} \leq \beta \cdot I_{\rm b}$  получаем, что для насыщения транзистора при заданном токе  $I_{\rm KH}$  достаточно создать ток базы  $I_{\rm bH} = I_{\rm KH}/\beta$ . Этот ток называют базовым током насыщения. Естественно, что транзистор будет насыщен и при  $I_{\rm b} > I_{\rm bH}$ .

Отношение  $I_{\rm b}/I_{\rm bh} = S$  и называют степенью насыщения транзистора или коэффициентом насыщения *S*.

Используя *S* и критерий насыщения для нашего простейшего ТК, получим:

$$R_{\rm E} = \beta \cdot E1 \cdot R_{\rm K} / (S \cdot E_{\rm K}).$$

Обычно стараются обеспечить *S* от 1,5 до 3; при больших коэффициентах насыщения статические состояния ключа также обеспечиваются, однако при этом снижается быстродействие ключевого каскада.
#### Порядок выполнения работы

#### Получите ВАХ транзистора VT1

Пункт выполняется при утере информации о ВАХ транзистора, полученной в лабораторной работе № 1.

1. Соберите схему для снятия выходных ВАХ биполярного транзистора *VT*1 (рис. 5.34).



*Рис. 5.34. Схема эксперимента для снятия выходных ВАХ транзистора* в программно-аппаратной среде NI ELVIS

2. В меню запуска инструментов *NI ELVIS* выберите функцию *Three-wire Current Voltage Analyzer* (трехпроводной вольтамперный анализатор).

При получении выходных ВАХ транзистора необходимо задать количество кривых в характеристиках и следить за грамотным выбором пределов изменения выходного напряжения, чтобы не вызывать превышения токов коллектора по сравнению с обозначенными на виртуальной панели предельными значениями.

Сохраните данные выходных ВАХ транзистора в виде файла с целью дальнейшего использования и распечатки для отчета.

3. Соберите схемы для снятия входных ВАХ биполярного транзистора. Входные характеристики получайте для двух значений выходного напряжения  $U_{K2} = 0$  В (рис. 5.35, *a*) и  $U_{K2} = +5$  В (рис. 5.35, *б*).

4. В меню запуска инструментов *NI ELVIS* выберите функцию *Two-wire Current Voltage Analyzer* (двухпроводной вольтамперный анализатор).

При снятии ВАХ обратите внимание на правильное взаимное расположение полученных характеристик.



Рис. 5.35. Схемы для снятия входных BAX транзистора в программно-аппаратной среде NI ELVIS: а)  $U_{K9} = 0$  B; б)  $U_{K9} = +5$  B

Сохраните данные входных ВАХ транзистора в виде файлов с целью дальнейшего использования и распечатки для отчета.

# Исследование усилительного режима транзистора Регулирование координат рабочей точки покоя

1. Соберите схему эксперимента (рис. 5.36).



Рис. 5.36. Схема эксперимента для измерения координат рабочих точек транзистора

Обращаем внимание на то, что вывод +9 *V* резистора *R*7 должен быть присоединен к источнику питания +9 *V* лабораторного макета!

2. Вызовите из меню *NI ELVIS* регулируемый источник питания (*VPS*), цифровой мультиметр (*DMM*) в режиме измерения напряжения постоянного тока ( $V_{=}$ ) и осциллограф (*Scope*) при открытом его входе.

3. Включите питание макетной платы на лицевой панели станции. На виртуальной панели источника *VPS* осуществите сброс напряжения источника *VPS* на нуль, используя *Reset* или установив 0,00 В в окне. При этом транзистор *VT*1 закрыт, и напряжение на коллекторе транзистора должно быть близко к напряжению +9 В, выдаваемому стабилизатором макетной платы станции.

4. На выходных ВАХ транзистора, полученных ранее, постройте нагрузочную прямую по постоянному току.

5. Произведите расчет ориентировочных значений *Supply*+ для трех рабочих точек с координатами  $U_{K\ni1} = 2$  B,  $U_{K\ni2} = 5$  B,  $U_{K\ni3} = 7$  B, используя приближенную формулу:

$$Supply + = I_{\rm F} \cdot R4 + 0.6$$

6. На виртуальной панели источника VPS изменяйте значения Supply+ до получения значений  $U_{K\ni1}$ ,  $U_{K\ni2}$ ,  $U_{K\ni3}$ . Полученные данные по координатам рабочих точек зафиксируйте как Supply+1, Supply+2, Supply+3. Необходимо добиться устойчивого понимания, что изменения напряжения Supply+ ведут к изменению координат рабочей точки. При этом изменения положений рабочей точки происходят вдоль нагрузочной прямой по постоянному току.

7. Задайтесь координатой рабочей точки транзистора при  $U_{K32} = 5$  В,  $I_{K} =$ \_\_\_\_, полученного из предыдущего пункта, и определите в окрестностях этой точки значения *h*-параметров транзистора.

8. Зафиксируйте изменения координат рабочей точки с помощью осциллографа. Для этого (рис. 5.36) отключите цифровой мультиметр *DMM* и включите осциллограф. Используйте открытый вход осциллографа *CHA* или *CHB*, включите *Display* (*On*) и *Cursor* (*On*). Грамотно выбрав масштаб, наблюдайте на экране осциллографа изменение координаты  $U_{\rm KЭ}$  рабочей точки при вариации напряжения *Supply*+. Установите последовательно три значения *Supply*+ предыдущего пункта и с помощью курсора определите  $U_{\rm KЭ1}$ ,  $U_{\rm KЭ2}$ ,  $U_{\rm KЭ3}$ . Сравните их с данными предыдущих пунктов.

## Исследование усилительного режима транзисторного каскада

1. Постройте на выходных ВАХ транзистора три нагрузочные прямые по переменному току, соответствующие включенной дополнительной нагрузке *RL* для трех режимов покоя при  $U_{\text{K} \ni 1} = 2 \text{ B}$ ,  $U_{\text{K} \ni 2} = 5 \text{ B}$ ,  $U_{\text{K} \ni 2} = 7 \text{ B}$ . 2. Для каждой рабочей точки определите максимальную амплитуду и действующее значение выходного гармонического напряжения при выключенной и включенной нагрузке *RL*. Полученные значения занесите в верхнюю строку табл. 3.

3. Соберите схему эксперимента (без *RL*), рис. 5.37.



Рис. 5.37. Схема усилительного каскада ОЭ на биполярном транзисторе

4. Установите рабочую точку, инициируя *VPS*, с координатой  $U_{K \ni 2} = 5$  В, учитывая требуемое значение *Supply*+<sub>2</sub>. На коллектор транзистора включите осциллограф *Scope* при открытом входе.

Обращаем внимание на то, что вывод +9 V резистора R7 должен быть присоединен к источнику питания +9 V лабораторного макета!

Таблица 3

Значение	Значение $U_{K\Im}$					
<i>U</i> вых max, В	$U_{\mathrm{K}\Im1} = 2 \mathrm{B}$		$U_{\text{K} \ni 2} = 5 \text{ B}$		$U_{\mathrm{K}\Im3} = 7 \mathrm{B}$	
	<i>R</i> 7	<i>R</i> 7, <i>RL</i>	<i>R</i> 7	<i>R</i> 7, <i>RL</i>	<i>R</i> 7	<i>R</i> 7, <i>RL</i>
Теоретическое						
Практическое						

5. Выберите из меню функциональный генератор *FGEN*. Установите частоту гармонического сигнала 1 кГц, значение 10 мВ. Проверьте включение питания макетной платы. Просмотрите выходной сигнал на экране осциллографа. С помощью включенного курсора определите значение выходного сигнала. Определите коэффициент усиления каскада. Сравните полученное значение с теоретически рассчитанным, ис-

пользуя ранее определенные *h*-параметры для этой рабочей точки. За-полните табл. 3.

6. При желании вызовите анализатор спектра DSA и определите состав спектра по гармоникам. Рассчитайте коэффициент гармоник  $K_{\Gamma}$  по формуле:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{n} U_i^2}}{U_1},$$

где  $U_1$  – значение первой гармоники,  $U_i$  – значения гармоник, начиная со второй.

7. Подключите дополнительную нагрузку *RL* и повторите действия предыдущих двух пунктов. Сравните полученные значения выходных напряжений и коэффициентов усиления. Сделайте выводы.

8. Установите выходное напряжение *FGEN*, равным 20 мВ. Сравните полученную осциллограмму с предыдущей, зафиксируйте и объясните появления отсечки выходного напряжения (если она появилась). Сделайте выводы.

9. Устанавливайте последовательно выходное напряжение *FGEN* 30 мВ, 40 мВ, 50 мВ ... и повторите предыдущий пункт.

10. Установите рабочую точку с координатой  $U_{K\ni3} = 7$  В. Повторите действия, аналогичные проделанным ранее, с рабочей точкой  $U_{K\ni2} = 5$  В.

11. Установите рабочую точку с координатой  $U_{\rm K31} = 2$  В. Повторите действия, аналогичные проделанным ранее, с рабочей точкой  $U_{\rm K32} = 5$  В.

12. Выберите на основании проделанного анализа координату рабочей точки, с которой можно получить максимальную амплитуду выходного гармонического напряжения без отсечки. Зафиксируйте это значение с помощью осциллографа и сравните со значением, полученным при графических построениях на ВАХ транзистора с нагрузочными прямыми, определяемыми *R7* и *RL*.

13. Какую рабочую точку в режиме покоя целесообразно выбрать, если будут усиливаться однополярные входные сигналы: а) положительной полярности; б) отрицательной полярности? Установите эти точки, переведите *FGEN* на требуемую форму сигнала, посмотрите и измерьте выходной сигнал. Сделайте выводы.

# Исследование ключевого режима транзистора Исследование режима отсечки

1. Соберите схему, изображенную на рис. 5.38.

2. Установите значение управляющего напряжения Supply- = -5 B, обеспечив режим глубокой отсечки. С помощью вольтметра DMM или осциллографа с открытым входом измерьте напряжение на коллекторе транзистора. Убедитесь, перебросив вольтметр или осциллограф на вывод +9 V, что эти напряжения очень мало отличаются друг от друга, так как через R7 протекает ток  $I_{K0}$ .



Рис. 5.38. Схема транзисторного ключа ОЭ

3. Постепенно уменьшая (по модулю) управляющее напряжение до нуля с помощью *VPS* и измеряя коллекторное напряжение, подтвердите, что оно сохраняет высокий уровень порядка напряжения источника питания. Другими словами, подтвердите, что в режиме отсечки транзистор потерял свои усилительные свойства, а на его выходе формируется логическая единица, когда на входе действует логический нуль.

#### Исследование режима насыщения

1. Переключите полярность напряжения управления в схеме, рис. 5.38, установив на входе вместо Supply- источник Supply+ = 0 В.

2. Постепенно увеличивая управляющее напряжение с помощью *VPS* и измеряя коллекторное напряжение, удостоверьтесь, что транзистор работает в усилительном режиме, когда увеличение  $U_{\rm E9}$  ведет к уменьшению  $U_{\rm K9}$ . Значения  $U_{\rm E9}$  и  $U_{\rm K9}$  измеряйте, используя вольтметр или осциллограф с открытым входом. Порядка 5-ти групп данных ( $U_{\text{БЭ}}$ ,  $I_{\text{Б}}$ ,  $U_{\text{КЭ}}$ ,  $I_{\text{K}}$ ) получите и зафиксируйте в табл. 2. При этом последняя группа данных должна соответствовать условию:  $U_{\text{БЭ}} = U_{\text{КЭ}}$ , а рассчитанные токи коллектора и базы приблизительно являются токами насыщения  $I_{\text{КН}}$  и  $I_{\text{БH}}$ .

3. Удостоверьтесь, что в режиме насыщения транзистор практически потерял свои усилительные свойства. С этой целью рассчитаем и реализуем за счет увеличения напряжения с *VPS* токи базы, соответствующие степеням насыщения *S*, равными 1, 2, 3, 4, 5, фиксируя также напряжения  $U_{\text{КЭн}}$ . Данные занесите в табл. 3. При анализе табличных данных подтвердите, что на выходе схемы формируется низкий уровень напряжения, что соответствует логическому нулю.

## Исследование ключа ОЭ

1. Переберите схему рис. 5.38, заменив в ней источник сигнала управления. Вместо источника VPS подключите функциональный генератор FGEN. Вместо резистора R7 поставьте более высокоомный резистор R15 = 10 кОм, чтобы ввести транзистор в режим насыщения при ограниченных амплитудных возможностях FGEN (2,5 В) по сравнению с VPS (12 В), так как используемый транзистор имеет коэффициент усиления порядка 50, а R3 = 20 кОм оставлен в схеме.

2. Выберите из меню *FGEN*, установите прямоугольную *Waveform*, установите частоту 1 kHz, нулевое значение *DC Offset* и амплитуду импульсов *Peak Amplitude*, равную 2,5 В.

3. Подключите *Scope* каналом *СНА*+ к входу схемы, а каналом *СНВ* + к выходу ключа ОЭ.

4. Просмотрите и зафиксируйте временные диаграммы. Сделайте выводы.

## Контрольные вопросы

## По объекту исследования:

1. Изобразите семейство входных и выходных характеристик биполярного *n*-*p*-*n*-транзистора.

2. При каких напряжениях на переходах транзистора реализуется усилительный режим? Чем он характеризуется?

3. Какие области можно выделить на выходной ВАХ транзистора в схеме ОЭ?

4. Что называется режимом покоя и рабочей точкой транзистора?

5. Чем надо руководствоваться при выборе рабочей точки режима покоя в каскаде для усиления гармонического сигнала?

6. За счет чего образуется отсечка выходного напряжения?

7. Как влияет изменение сопротивления нагрузки по переменному току на максимальное значение выходного напряжения?

8. На холостом ходу (без нагрузки *RL*) отсечки в выходном напряжении не наблюдалось. При нагрузке *RL* появилась отсечка. Почему?

9. Каждый режим работы биполярного транзистора схемотехнически обусловлен соответствующими падениями напряжений на его переходах:

1-я группа:

1. Режим насыщения.

2. Нормальный, активный, усилительный режим.

3. Режим отсечки.

2-я группа:



Найдите соответствие между элементами двух групп.

10. Каждой схеме включения для усилительного режима *n*-*p*-*n*-транзистора можно поставить в соответствие семейства ВАХ:

- 1-я группа:
- 1. ОЭ, входные характеристики.
- 2. ОЭ, выходные характеристики.
- 3. ОБ, входные характеристики.
- 4. ОБ, выходные характеристики.
- 2-я группа:





12. В каких режимах может работать транзистор в схеме?

а) только в нормальном усилительном режиме;

б) только в режиме насыщения;

в) в инверсном усилительном и режиме отсечки;

г) в нормальном усилительном режиме и в режиме насыщения;

д) только в режиме отсечки.



14. Рассчитайте координаты точек пересечения декартовых осей нагрузочной прямой постоянного тока на выходных характеристиках транзистора (указывайте ненулевые

значения физических величин):

а) 10 В, 2 мА;

- б) 20 В, 1 мА; в) 9 В, 1 мА;
- г) 20 В, 20/11 мА;
- д) 9 В, 20/11 мА.



15. В чем отличие электронного ключа от механического?

16. Что является остаточным током в транзисторном ключе?

17. Какая из приведенных схем замещения может быть использована, если транзистор находится в режиме отсечки? В режиме насыщения?



18. В каком случае транзистор *p*–*n*–*p*-типа находится в более глубо-кой отсечке?



19. Что произойдет со степенью насыщения *S* в схеме ключа ОЭ, если увеличить сопротивление *R*3?

20. Найти ток базы для введения транзистора *p*-*n*-*p* в режим насыщения.

#### Вопросы по работе с установкой NI ELVIS:

1. Какие индикаторы отображают готовность макетной платы *ELVIS* к работе?

2. Укажите все возможные способы ввода/вывода исследуемого сигнала при работе с установкой *ELVIS*.

3. Какие источники (уровни напряжения) можно использовать для обеспечения работы собранных электрических схем (непосредственно с установки)?

4. В каких режимах возможно осуществлять управление генератором и источниками питания установки *ELVIS*?

5. Возможен ли режим одновременной работы *DMM* и осциллографа?

6. Разрешено ли использовать одновременно режимы измерения тока и напряжения *DMM*? 7. Какое предварительное действие необходимо выполнить для того, чтобы *DMM* производил измерения более точно?

8. Какой прибор *ELVIS* используется для исследования характеристик двухполюсника?

9. Какой прибор *ELVIS* используется для исследования параметров транзистора? Какого типа транзистор можно исследовать при помощи данного устройства?

10. Какой прибор используется для спектрального исследования сигнала, как это осуществить? Какие входы *ELVIS* при этом могут быть задействованы?

## Требования к отчету

Отчет должен содержать:

– цель работы;

- исследуемые электрические схемы;

 таблицы с результатами измерений, графиками и необходимыми графическими построениями на них;

– расчеты и значения величин, полученных при обработке экспериментальных данных;

– выводы.

#### Исследование усилительного каскада ОЭ

## Цель работы

Овладение методикой исследования частотных свойств усилительного каскада в программно-аппаратной среде *NI ELVIS*.

#### Задачи исследования

1. Подготовка к лабораторной работе, т. е. формирование знаний и пониманий процессов, происходящих в исследуемой схеме.

2. Проработка разделов порядка выполнения работы. Поиск ответов по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?

3. Приобретение навыков исследования усилительного каскада в частотной области (АЧХ, ФЧХ) с использованием функционального генератора (*FGEN*), осциллографа (*Scope*) и Боде-анализатора (*Bode Analyzer*).

4. Сравнение частотных и фазовых характеристик каскада при различных значениях его элементов.

5. Обработка полученных экспериментальных данных, подготовка и защита отчета.

## Краткие сведения из теории

Типовая схема усилительного каскада ОЭ изображена на рис. 5.39.



Рис. 5.39. Принципиальная схема усилительного каскада ОЭ

#### Назначение элементов каскада

Резисторы *R*1, *R*2 используются для задания режима покоя каскада. Поскольку биполярный транзистор управляется током, ток покоя управляемого элемента (в данном случае ток  $I_{\rm KII}$ ) создается заданием соответствующей величины тока базы  $I_{\rm EII}$ . Резистор *R*1 предназначен для создания цепи протекания тока  $I_{\rm EII}$ . Совместно с *R*2 резистор *R*1 обеспечивает исходное напряжение на базе  $U_{\rm EII}$  относительно зажима «–» источника питания. Резистор  $R_{\Im}$  является элементом отрицательной обратной связи, предназначенным для стабилизации режима покоя каскада при изменении температуры. Конденсатор С<sub>Э</sub> шунтирует резистор  $R_{\ni}$  по переменному току, исключая проявление ООС в каскаде по переменным составляющим.

Резистор  $R_{\rm K}$  является коллекторной нагрузкой, по которой протекает ток покоя  $I_{\rm K\Pi}$  и часть переменной составляющей коллекторного тока.

Название схемы «с общим эмиттером» означает, что вывод эмиттера транзистора по переменному току в большей части диапазона частот практически является общим для входа и выхода каскада.

## Частотные характеристики каскада

Важными показателями каскада являются его коэффициент усиления по напряжению  $K_U$ , входное  $R_{\rm BX}$ , выходное  $R_{\rm BbIX}$  сопротивления. Задача определения этих показателей решается при расчете усилительного каскада по переменному току. Анализируя АЧХ или ФЧХ усилительного каскада, необходимо для линейного его режима рассчитать зависимость коэффициента усиления по напряжению от частоты при неизменных значениях амплитуды входного сигнала. Из-за наличия в схеме реактивностей коэффициент будет комплексным. Зависимость модуля даст выражение для АЧХ, а фазового сдвига – для ФЧХ.

Ручной метод расчета основан на замене транзистора и всего каскада его линеаризованной схемой замещения по переменному току.

Упрощенная эквивалентная схема каскада, справедливая для всего диапазона частот усилителя, приведена на рис. 5.40.

Полный анализ такой системы без привлечения компьютерных программ сложен и не позволяет четко выявить влияние каждого реактивного элемента на частотную и фазовую характеристики каскада. Поэтому весь рабочий диапазон частот усилителя условно разбивается на области нижних, средних и высоких частот и анализ ведется по соответствующей каждой области частот эквивалентной схеме.



Рис. 5.40. Схема замещения каскада ОЭ с линеаризованной моделью транзистора

#### Область средних частот (ОСЧ)

В этой области можно без существенной погрешности пренебречь влиянием всех реактивностей, т. к. в области СЧ емкости  $C_{P1}$ ,  $C_{P2}$  и  $C_{3}$ уже не влияют из-за малости их сопротивлений, а емкости  $C_{K}$  и  $C_{H}$  еще не влияют, так как сопротивления их еще относительно велики. При этом эквивалентная схема принимает вид, приведенный на рис. 5.41, где  $r_{3}$ ,  $r_{5}$ ,  $\beta$  – параметры Т-образной схемы замещения линеаризованного транзистора, включенного по схеме с ОЭ;  $R_{\Gamma}$  – выходное сопротивление источника сигнала;  $R_{5}=R1 || R2$  – эквивалентное сопротивление делителя в цепи базы.



Рис. 5.41. Эквивалентная схема замещения каскада ОЭ в области средних частот

Схема замещения транзистора упрощена ликвидацией  $r_{\rm K}^*$ , шунтирующего генератор тока, которое на практике дает незначительную погрешность. Анализ схемы методами ТОЭ позволит определить коэффициент усиления каскада по напряжению  $R_{\rm BX}$  и  $R_{\rm BbIX}$ :

$$K_0 = -\beta \frac{R_{\rm H} \parallel R_{\rm K}}{h_{119}}, R_{\rm BX} = R_{\rm E} \parallel h_{119}, R_{\rm BbIX} = R_{\rm K}$$

где  $h_{113} = r_{\mathrm{b}} + (1+\beta) \cdot r_{\mathrm{3}}$ .

#### Область нижних частот (ОНЧ)

Благодаря увеличению сопротивления емкости (разделительных  $C_{P1}$ ,  $C_{P2}$  и блокировочного  $C_{\Im}$ ) с понижением частоты усиление каскада уменьшается. Следствием этого является завал на АЧХ в ОНЧ, т. е. постепенное уменьшение усиления каскада по сравнению с средними частотами. Учет влияния емкостей при «ручных» методах анализа осуществляется отдельно для каждой емкости, при этом все остальные на расчетных эквивалентных схемах закорачиваются, т. е. как бы имеют бесконечно большую емкость.

#### Учет влияния разделительных конденсаторов

Из рис. 5.42 видно, что влияние разделительных емкостей порознь может быть рассчитано по единой схеме (рис. 5.43). Согласно этой схеме влияние  $C_{P1}$  учитывается при параметрах левой цепи  $E_{\Gamma}$ ,  $R_{\Gamma}$ , а для правой –  $R_{BX}$ . Для  $C_{P2}$  – E,  $R_{BbIX}$ , и  $R_{H}$  соответственно. Тогда для каждой емкости уравнение нормированной АЧХ имеет вид:

$$\frac{\left|\dot{K}_{\rm H}\right|}{K_0} = \frac{1}{\sqrt{1+1/(\omega \cdot \tau_{\rm H})^2}},$$

где  $\tau_{\rm H}$  – постоянная времени,  $\tau_{\rm H1} = C_{\rm P1}(R_{\Gamma} + R_{\rm BX})$ ,  $\tau_{\rm H2} = C_{\rm P2}(R_{\rm BbIX} + R_{\rm H})$ ,  $R_{\rm BX} = R_{\rm F} \parallel h_{113}$ ,  $R_{\rm BbIX} = R_{\rm K}$ ,  $K_0$  – модуль коэффициента усиления каскада в области средних частот.



Рис. 5.42. Схема замещения в ОНЧ

Рис. 5.43. Обобщенная схема

Уравнение для ФЧХ легко получить из приведенного выражения, если вернуться к комплексу коэффициента усиления на нижних часто-

тах и рассчитать значение фазового сдвига как арктангенс отношения мнимой и вещественной частей.

Анализируя уравнения для АЧХ, приходим к выводу, что завал ФЧХ в ОНЧ на фиксированной частоте тем меньше, чем больше значение постоянной времени. Эта закономерность носит общий характер для любых линейных искажений: частотных и фазовых при частотном анализе и спада вершины прямоугольного импульса на переходной характеристике.

Техническая реализация увеличения постоянной времени обычно осуществляется за счет увеличения емкости соответствующего конденсатора.

Этот путь приводит к увеличению габаритов схемы. Рациональным решением по устранению линейных искажений в ОНЧ является построение усилителей без разделительных конденсаторов и блокировочной емкости. Другими словами, целесообразно использовать усилитель постоянного тока (УПТ).

Для исследуемой схемы, зная номиналы элементов каскада и режим работы транзистора, можно на каждой частоте из ОНЧ рассчитать спад усиления из-за  $C_{P1}$  и  $C_{P2}$ .

## Учет блокировочной емкости СЭ

Его можно осуществить по схеме (рис. 5.41), если вместо  $r_{\Im}$  (ОСЧ) принять при анализе в ОНЧ  $z_{\Im} = r_{\Im} + \frac{R_{\Im}}{1 + j \cdot \omega \cdot R_{\Im} \cdot C_{\Im}}$ . Тогда после преобразований получим нормированную АЧХ:

$$\frac{\left|\dot{K}_{H}\right|}{K_{0}} = \frac{\sqrt{1 + (\omega \cdot C_{\Im} \cdot R_{\Im})^{2}}}{\sqrt{(1 + S \cdot R_{\Im})^{2} + (\omega \cdot C_{\Im} \cdot R_{\Im})^{2}}},$$

где:  $S = \beta/h_{113}$  – крутизна транзистора.

Уравнение для ФЧХ можно также получить из приведенного выражения, если вернуться к комплексу коэффициента усиления на нижних частотах и рассчитать значение фазового сдвига как арктангенс отношения мнимой и вещественной частей.

Анализируя полученное выражение, можно для линейных искажений придти к тем же выводам. Все виды искажений уменьшаются при увеличении постоянной времени цепи с блокировочным конденсатором.

Если получаемые при этом габариты каскада пользователя не удовлетворяют, то приходится убирать из схемы конденсатор, вводя при этом отрицательную обратную связь, которая резко изменяет значения параметров каскада и, прежде всего, уменьшает коэффициент усиления по напряжению.

## Область верхних частот (ОВЧ)

В этой области частот эквивалентная схема замещения примет вид, представленный на рис. 5.44.



Рис. 5.44. Эквивалентная схема замещения каскада в ОВЧ

Чтобы понять, почему усиление каскада падает с увеличением частоты сигнала, проделаем мысленный эксперимент, учитывая порознь влияющие факторы.

1. Пусть у гипотетического транзистора отсутствует инерционность, т.е.  $C_{\rm K}^* = 0$  и  $|\dot{\beta}| = \beta$ . Тогда при любой частоте в ОВЧ ток генератора тока неизменен. Но модуль сопротивления  $|z_{\rm s}|$ , на котором выделяется выходное напряжение  $U_{\rm Bыx}$ , будет падать с увеличением частоты из-за влияния  $C_{\rm H}$ . Значит, с увеличением частоты будет наблюдаться падение усиления и тем больше, чем больше постоянная времени  $\tau_{\rm B} = (R_{\rm K} || R_{\rm H}) \cdot C_{\rm H}$  и чем больше  $C_{\rm H}$  при фиксированных  $R_{\rm K}$  и  $R_{\rm H}$ .

2. Пусть у гипотетического каскада  $C_{\rm H} = 0$  и инерционность транзистора определяется только  $|\dot{\beta}|$ , а  $C_{\rm K}^* = 0$ . Тогда весь ток идет в выходную цепь. Однако ток генератора  $|\dot{\beta}| \cdot I_5$  падает с увеличением частоты. Значит, с увеличением частоты будет падение усиления, появляется завал на АЧХ и тем больше, чем сильнее падает  $|\dot{\beta}|$ . Чтобы уменьшить этот завал, нужно взять транзистор с большей частотой единичного усиления  $f_{\rm T}$ , т. е. более высокочастотный и дорогой. 3. Пусть  $C_{\rm H} = 0$ , а инерционность транзистора представлена только  $C_{\rm K}^* \neq 0$ . Тогда с увеличением частоты все большая часть тока генератора будет отвлекаться на  $C_{\rm K}^*$  и меньшая – на выходную цепь. Значит, чтобы завал на АЧХ был незначительным, необходимо выбрать транзистор с меньшей  $C_{\rm K}^*$ , т. е. более высокочастотный и дорогой.

В первом приближении для ОВЧ рассматриваемого каскада

$$\dot{K}_{\rm B} = \frac{K_0}{1 + j\omega\tau_{\rm B}}, \ M_{\rm B} = \sqrt{1 + (\omega\tau_{\rm B})^2},$$

где  $\tau_{\rm B} = f(\tau_{\rm T}, C_{\rm K}, R \sim, C_{\rm H}...)$  – эквивалентная постоянная времени в области верхних частот.

Анализ полученного выражения, в отличие от рассмотренных выше случаев, показывает, что все виды линейных искажений – частотных и фазовых в ОВЧ, времени установления на переходной характеристике – уменьшаются при уменьшении постоянной времени каскада.

Как уже отмечалось, это потребует минимизации емкости нагрузки, в том числе емкости монтажа, а также применения более высокочастотного транзистора, а значит и более дорогого.

Другими словами, за все нужно платить.

## Частотные и фазовые искажения каскада

Неравномерность АЧХ в полосе частот усилителя может быть выражена через коэффициенты частотных искажений  $M_{\rm H} = \frac{K_0}{|\dot{K}_{\rm H}|}$  на ниж-

ней рабочей частоте в ОНЧ и  $M_{\rm B} = \frac{K_0}{|\dot{K}_{\rm B}|}$  на верхней частоте в ОВЧ.

Другими словами, коэффициенты частотных искажений  $M_{H1}$  из-за влияния  $C_{P1}$ ,  $M_{H2}$  из-за влияния  $C_{P2}$  и  $M_{H3}$  из-за влияния  $C_3$  могут быть рассчитаны как обратные выражения, полученные в пунктах «Учет влияния разделительных конденсаторов» (стр. 123) и «Учет блокировочной емкости» (стр. 124) соответственно. Если коэффициенты частотных искажений выражены в относительных единицах, то общий коэффициент искажений выражается как их произведение. При децибельном исчислении общие искажения определяются суммой частных частотных искажений.

Суммарный фазовый набег рассчитывается как сумма фазовых набегов, обусловленных каждой из разделительных емкостей и блокировочного конденсатора.

#### Получение АЧХ и ФЧХ усилительного каскада

Автоматизация процесса получения указанных характеристик в программно-аппаратной среде *NI ELVIS* осуществляется за счет использования Боде-анализатора.

Полнофункциональный анализатор АЧХ/ФЧХ (*Bode Analyzer*) в *NI ELVIS* реализован путем развертки по частоте тестового (в нашем случае гармонического) сигнала и измерения сигналов модулем вводавывода. Вы можете устанавливать частотный диапазон прибора, а также выбирать шкалу отображения – линейную или логарифмическую.

В анализаторе АЧХ/ФЧХ для формирования стимулирующего воздействия используется функциональный генератор *FGEN*, а для измерения стимулирующего воздействия и реакции на него используются каналы аналогового ввода *ACH*0 и *ACH*1. На макетной плате гнездо *FUNC OUT* необходимо подключить к входу исследуемой схемы и к каналу *ACH*1. Выход схемы подсоедините к каналу *ACH*0.

## Определение R<sub>BX</sub> и R<sub>BЫX</sub>

Аналитическое определение входного и выходного сопротивлений каскада в области средних частот было проведено выше по тексту. Для понимания широко используемого на практике метода воспользуемся схемой, изображенной на рис. 5.45.



Рис. 5.45. Схема, поясняющая методы экспериментального определения входного и выходного сопротивлений каскада

## **Определение** *R*<sub>BX</sub>

Для нахождения входного сопротивления дополнительно используют резистор R1 с нормированным значением сопротивления (R = 2,2 кОм). Обеспечив линейный режим работы усилителя, зафиксируйте значение  $U_{\text{BЫX1}}$ . Не меняя значение  $E_{\sim}$ , подключаем источник сигнала к резистору R1 и зафиксируем  $U_{\text{BЫX2}}$ . Зная усиление  $K_0 = U_{\text{BЫX1}}/E_{\sim}$ , находим  $U_{\text{BЫX2}} = K_0 \frac{R_{\text{BX}}}{R1 + R_{\text{BX}}}$ ,  $E_{\sim} = \frac{U_{\text{BЫX1}} \cdot R_{\text{BX}}}{R1 + R_{\text{BX}}}$ . Из последнего выражения можно определить  $R_{\text{BX}}$ .

## Другой вариант определения R<sub>BX</sub>

Если Вы будете выполнять этот пункт, то Вам потребуется дополнительная информация из «Руководства пользователя *NI ELVIS*».

Программно-аппаратная среда *NI ELVIS* позволяет автоматизировать измерение входного сопротивления схемы за счет использования анализатора импеданса.

Анализатор импеданса *NI ELVIS* – это виртуальный прибор, предназначенный для измерения параметров импеданса некоторого исследуемого устройства.

 $NI \; ELVIS$  определяет импеданс с использованием возбуждения исследуемого объекта (*Device under Test – DUT*) синусоидальным сигналом, вырабатываемым функциональным генератором *FGEN* на контакте *CURRENT HI*. Результат воздействия на объект синусоидальным сигналом измеряется на контактах *CURRENT HI* и *CURRENT LO*.

Анализатор импеданса сразу показывает измеренные значения фазы, модуля, активного и реактивного сопротивления исследуемого устройства.

#### **Определение** *R*<sub>вых</sub>

Определение выходного сопротивления можно осуществить, используя режим холостого хода и нагрузку RL = 2,4 кОм. В первом эксперименте  $U_{BbIX1} = E_{BbIX}$ . Во втором при включении RL напряжение  $U_{BbIX2}$  снижается за счет работы делителя, состоящего из  $R_{BbIX}$  и  $R_{H}$ . Оба эксперимента дают систему из двух уравнений, решение которой позволяет определить  $R_{BbIX}$ .

## Порядок выполнения работы

#### Начало работы

1. Включите питание для *NI ELVIS*.

2. Запустите программное обеспечение *NI ELVIS*; после инициализации откройте панель комплекта виртуальных измерительных приборов.

3. Осуществите вызов цифрового вольтметра *DMM*.

#### Анализ режима покоя

Соберите на макетной плате часть схемы усилительного каскада (рис. 5.49), обеспечивающей режим работы транзистора по постоянному току.



Рис. 5.46. Схема для исследования режима покоя транзистора. Сопротивление R6 подбирается при настройке режима каскада на каждом макете; его номинал лежит в пределах 2,4...3,3 кОм

1. Последовательно измерьте с помощью цифрового вольтметра напряжение питания схемы, а также напряжения на коллекторе, базе и эмиттере транзистора.

2. Рассчитайте падение напряжения на коллекторном сопротивлении и определите ток покоя в рабочей точке транзистора.

3. Определите значение напряжения между коллектором и эмиттером транзистора *U*кэ.

4. Используйте выходную ВАХ транзистора, полученную при выполнении первой лабораторной работы (заготовьте дома при подготовке к лабораторной работе), и на ней проставьте рабочую точку по координатам, полученным в предыдущих двух пунктах.

5. Проведите на выходной ВАХ нагрузочную прямую по постоянному току и проверьте, прошла ли она через рабочую точку.

## Определение максимальных значений выходного гармонического напряжения

Теоретическая оценка (проводится дома при подготовке к лабораторной работе):

1. Проведите через рабочую точку на выходных ВАХ транзистора нагрузочные прямые по переменному току для двух случаев: на холостом ходу и с подключенной нагрузкой *RL*.

2. Определите теоретическое значение максимальной амплитуды выходного гармонического напряжения для двух выше обозначенных построений, как максимальное расстояние, выраженное в вольтах, между точкой пересечения нагрузочной прямой и координатой точки покоя или этой координатой и остаточным напряжением транзистора.

3. Полученные значения используйте как верхний предел амплитуды выходного гармонического сигнала, при котором реализуется линейный режим работы усилительного каскада.

Экспериментальное определение:

1. Соберите схему усилительного каскада ОЭ, изображенную на рис. 5.47, установив режим холостого хода.



*Рис. 5.47. Схема усилительного каскада ОЭ. При использовании Bode Analyzer вход FUNC OUT необходимо присоединить с ACH1+* 

2. Отключите цифровой вольтметр и вызовите из меню генератор *FGEN* и осциллограф *Scope*, установив ему режим открытого входа.

3. Восстановите данные по значениям  $h_{113}$  и  $h_{213}$ , полученные при выполнении пункта «Регулирование координат рабочей точки покоя»

(см. стр. 110) лабораторной работы №3 «Исследование режимов биполярного транзистора». Рассчитайте коэффициенты усиления по напряжению на холостом ходу и с нагрузкой *RL* (выполняется дома при подготовке к лабораторной работе).

4. Определите ориентировочные значения амплитуд входного напряжения, учитывая ранее полученные оценки амплитуд выходного напряжения.

5. Активизируйте функциональный генератор *FGEN*. Установите частоту гармонического сигнала 1 кГц и рассчитанное ранее значение входного сигнала.

6. Активизируйте осциллограф в режиме открытого входа и просмотрите выходной сигнал на экране осциллографа. С помощью включенного курсора определите значение выходного сигнала. Сравните полученное значение с ранее рассчитанным значением.

7. Подключите сопротивление нагрузки. Проделайте аналогичные действия. С помощью включенного курсора определите значение выходного сигнала. Сравните полученное значение с ранее рассчитанным значением.

8. Постепенно, используя возможности генератора по дискретности изменения его гармонического напряжения, увеличивайте входное напряжение каскада. Наблюдайте появление отсечки в выходном сигнале. Зафиксируйте, где сначала появляется отсечка: сверху или снизу? Или отсечка симметричная? Поясните результаты эксперимента.

9. Проделайте аналогичные действия, когда усилительный каскад работает на холостом ходу.

10. При желании вызовите анализатор спектра *DSA* и определите состав спектра выходного сигнала по гармоникам. Рассчитайте коэффициент гармоник  $K_{\Gamma}$  по формуле:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{n} U_i^2}}{U_1},$$

где  $U_1$  – значение первой гармоники;  $U_i$  – значения гармоник, начиная со второй.

11. Пронаблюдайте, как при увеличении отсечки нарастают число и амплитуды гармонических составляющих выходного напряжения и увеличивается коэффициент гармоник *К*<sub>Г</sub>.

## Исследование АЧХ и ФЧХ усилительного каскада ОЭ

#### Получение характеристик базового варианта

1. В схеме усилительного каскада, изображенной на рис. 5.47, нагрузку *RL* подключите через конденсатор *C*4, а конденсатор нагрузки *C*6 должен быть отключен.

2. При использовании анализатора Боде на макетной плате гнездо *FUNC OUT* генератора *FGEN* необходимо подключить к входу исследуемой схемы и к каналу *ACH*1+. Выход схемы подсоедините к каналу *ACH*0+.

3. Вызовите из меню *NI ELVIS* анализатор Боде и установите начальное значение частоты 5 *Hz*, конечное значение частоты 35 *kHz* и число шагов за декаду изменения частоты -5.

4. Амплитуду входного сигнала, получаемую на выходе *FUNC OUT* генератора *FGEN* и обеспечивающую линейный режим работы усилительного каскада во всей полосе рабочих частот, выберите на основании ранее проведенного эксперимента в разделе «Экспериментальное определение максимальных значений выходного гармонического напряжения» (см. стр. 130).

5. Уточнение диапазона значений по оси *Y* (*Gain Linear*) при необходимости осуществляйте, исходя из значения коэффициента усиления каскада в области средних частот, который Вы получили при выполнении раздела «Экспериментальное определение максимальных значений выходного гармонического напряжения» (см. стр. 130).

6. Запустите программу кнопкой запуска *Run*, получите характеристики. Из-за большой погрешности вычисления функции арктангенса наблюдается на ФЧХ резкое изменение фазы при переходе к области средних частот. Разделите всю область частот на две части, вырезав частоты, на которых наблюдается резкое изменение фазы.

7. Определите конечное значение частоты для исследования характеристик в ОНЧ и ОСЧ. Начальное значение частоты – 5 Гц. Запустите программу кнопкой запуска *Run*, получите характеристики.

8. Определите начальное значение частоты для исследования характеристик в ОСЧ и ОВЧ. Конечное значение частоты – 35 кГц. Запустите программу кнопкой запуска *Run*, получите характеристики.

9. При необходимости получения значений коэффициентов усиления или фазового сдвига каскада на разных частотах используйте *Cursors*. Сохранение результатов осуществляйте кнопкой *Log* на виртуальной панели *Bode Analyzer*. Сохраните графики для отчета.

## Исследование изменений характеристик каскада из-за влияния выходного разделительного конденсатора

1. Проведите теоретическую оценку изменения усиления и фазового сдвига в ОНЧ при различных разделительных конденсаторах (расчет произвести дома при подготовке к лабораторной работе).

2. В схеме усилительного каскада, изображенной на рис. 5.47, вместо конденсатора *C*4 нагрузку *RL* подключите через конденсатор *C*3, а конденсатор нагрузки *C*6 должен быть отключен.

3. Получите характеристики каскада, используя программу исследований предыдущего подраздела. Сравните полученные характеристики с характеристиками базового варианта. Сформируйте выводы относительно влияния разделительного конденсатора на характеристики каскада, если емкость изменилась в 10 раз.

## Исследование изменений характеристик каскада из-за подключения к выходу каскада дополнительной емкости нагрузки

1. При подготовке к лабораторной работе рассчитайте, как изменится модуль сопротивления нагрузки в исследуемой схеме на частоте 35 кГц, если к параллельно включенным *RL* и *R*7 в исходном состоянии дополнительно присоединить *C*6.

2. В схеме усилительного каскада, изображенной на рис. 5.47, нагрузку *RL* вновь подключите через *C*4, и параллельно ей установите дополнительную емкость C6 = 47 nF.

3. Получите характеристики каскада, используя выше приведенную программу исследований. Сравните полученные характеристики с характеристиками базового варианта. Сформируйте выводы относительно влияния емкости нагрузки.

# Исследование изменений характеристик каскада из-за введения отрицательной обратной связи

1. При подготовке к лабораторной работе уясните, что произойдет с характеристиками при введении последовательной отрицательной обратной связи по току за счет отключения блокировочного конденсатора *C*5.

2. Учитывая резкое уменьшение модуля коэффициента усиления по напряжению до значения порядка  $|K_0| = (RL || R7)/R8$  в ОСЧ, необходимо почти на два порядка увеличить *Peak Amplitude* на выходе *FUNC OUT* 

генератора *FGEN* на панели *Bode Analyzer*. Необходимо быть уверенным, что при выбранной Вами амплитуде входного сигнала усилитель работает в линейном режиме. Если Вы не уверены, то временно воспользуйтесь *FGEN* и *Scope*.

3. Получите характеристики каскада, используя выше приведенную программу исследований. Сравните полученные характеристики с характеристиками базового варианта. Сформируйте выводы относительно влияния обратной связи на характеристики исследуемого каскада.

## Определение R<sub>BX</sub> и R<sub>BЫX</sub>

1. Вернитесь к схеме базового варианта каскада.

2. Отключите *Bode Analyzer*. Вызовите из меню *NI ELVIS* генератор *FGEN* и осциллограф *Scope*.

3. Используйте метод определения сопротивлений, иллюстрированный рис. 5.45. По полученным в процессе подготовки к лабораторной работе формулам рассчитайте сопротивления и сравните их с теоретическими значениями, так же найденными при подготовке к занятию.

## Контрольные вопросы

1. Объясните назначение элементов каскада.

2. Какие требования предъявляются к значениям элементов каскада, обеспечивающих стабильность координаты рабочей точки в режиме покоя?

3. Каково назначение разделительных конденсаторов?

4. Поясните назначение блокировочного конденсатора С5.

5. Как используется информация, полученная при измерениях значений величин, характеризующих режим покоя?

6. Поясните алгоритм построения нагрузочных прямых по постоянному и переменному токам.

7. Как можно снять АЧХ каскада?

8. Какими причинами обусловлены частотные и фазовые искажения в ОНЧ, ОВЧ?

9. Почему после удаления из схемы С5 наблюдается уменьшение усиления каскада?

10. Объясните методику определения  $R_{\rm BX}$ . Как рассчитать ожидаемое значение  $R_{\rm BX}$  по схеме каскада?

11. Объясните методику определения  $R_{\rm BbIX}$ . Как рассчитать ожидаемое значение  $R_{\rm BbIX}$  по схеме каскада? 12. Каждый параметр линеаризованного усилителя определяется соответствующим набором возмущения и отклика:

1-я группа:

1. Коэффициент усиления по напряжению.

2. Входное сопротивление.

3. Выходное сопротивление.

2-я группа:

a) 
$$R_{\rm BX} = U_{\rm BX} / I_{\rm BX};$$

б) 
$$K = U_{\text{BЫX}} / U_{\text{BX}};$$

B) 
$$R_{\text{BbIX}} = U_{\text{BbIX XX}} / I_{\text{BbIX K3}};$$

$$\Gamma) K_p = P_{\rm BbIX} / P_{\rm BX};$$

д) 
$$R_{\rm BX} = U_{\rm BbIX} / I_{\rm BX}$$
.

Найдите правильное соответствие между элементами групп.

13. Классические характеристики для коэффициента усиления по напряжению при использовании метода комплексных амплитуд определяются следующим образом:

1-я группа:

- 1. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ).
- 2. Фазочастотная характеристика (ФЧХ).
- 3. Амплитудная характеристика (AX).

2-я группа:

a) 
$$U_{\text{BbIX}} = \Phi(U_{\text{BX}})|_{f=\text{ const}};$$

6) 
$$U_{\text{BbIX}} = \Phi(\varphi_K) \big|_{f = \text{const}};$$

B) 
$$\varphi_K = \Phi(U_{\rm BX})|_{f=\text{ const}};$$

$$\left. \Gamma \right) \left. \varphi_K = \Phi(f) \right|_{U_{\rm BX} = \text{ const}};$$

д) 
$$\left| \dot{K} \right| = \Phi(f) \Big|_{U_{\text{nv}} = \text{ const}}.$$

Найдите правильное соответствие между элементами групп.

14. Нормированные АЧХ соответствуют следующим типам усилителей:

1-я группа:

- 1. Усилитель переменного напряжения.
- 2. Усилитель постоянного тока.
- 3. Избирательный усилитель (полосовой фильтр).



Найдите правильное соответствие между элементами групп.

15. Определите, в каких схемах каскадов на холостом ходу нагрузочные прямые по постоянному и переменному токам (в ОСЧ) совпадают:





16. Процессы в усилителе постоянного тока (УПТ) описываются линейным дифференциальным уравнением первого порядка. Тогда действительны следующие определения его характеристик:

1-я группа:

1. АЧХ.

2. ФЧХ.

3. Переходная характеристика.

2-я группа:

a) 
$$\left| \dot{K} \right| = K_{(0)} \sqrt{1 + (1/\omega\tau)^2}$$
;

6) 
$$φ_K = -\operatorname{arctg}\omega \tau$$
;

B) 
$$h(t) = e^{-t/\tau};$$

Γ) 
$$\left| \dot{K} \right| = K_{(0)} / \sqrt{1 + (\omega \tau)^2};$$

α) 
$$\varphi_{\kappa} = \arctan(1/\omega\tau)$$
; e)  $h(t) = 1 - e^{-t/\tau}$ .

Найдите правильное соответствие между элементами групп.

17. Введена ли в схеме отрицательная обратная (ОС) связь? Если да, то какая?

a) OC нет;

б) последовательная ОС по току;

в) последовательная ОС по напряжению;

г) параллельная ОС по току;

д) параллельная ОС по напряжению.



а) нелинейными элементами – транзисторами;

б) линейными элементами – резисторами;

в) реактивными линейными элементами;

г) искажения гармонического сигнала не возникают.



19. Составьте расчетную схему каскада для области средних частот (ОСЧ). Тогда коэффициент усиления по напряжению без учета дифференциального сопротивления коллекторного перехода транзистора равен:



г) S/(b + c); д) S/(S + c). Обозначения: a = 1/(R1 || R2);  $b = 1/h_{113}$ ; c = 1/R3; S -крутизна тран-

20. Выведите формулы для расчета коэффициента усиления по напряжению в ОСЧ для исследуемого усилительного каскада.

21. Значение блокировочного конденсатора в схеме увеличили в 10 раз. Что произойдет с частотными искажениями в ОНЧ? С фазовыми?

22. Определение вида ОС в схемах осуществляется исключительно:

а) для интереса;

б) 3;

a) b/(b + S);

B) S/(b + S);

зистора.

f(b + S)/(b + S + c);

б) для отображения этой информации в технической документации;в) для исключения самовозбуждения усилителя;

г) чтобы узнать, как изменяются характеристики и параметры усилителя с ОС по сравнению с характеристиками и параметрами исходного усилителя.

23. В каких схемах введена последовательная противосвязь по то-ку?

а) во всех;

в) 1 и 3; г) 1 и 2; д) 2 и 3.



## Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- исследуемые электрические схемы;

 таблицы с результатами измерений, графиками и необходимыми графическими построениями на них;

– расчеты и значения величин, полученных при обработке экспериментальных данных;

- выводы.

## Лабораторная работа № 5

## Передача импульсных сигналов в резистивном усилительном каскаде

## Цель работы

Овладение методикой исследования в программно-аппаратной среде *NI ELVIS* переходных искажений импульсных сигналов в резистивном усилительном каскаде.

#### Задачи исследования

1. Подготовка к лабораторной работе, т. е. формирование знаний и пониманий процессов, происходящих в исследуемой схеме.

2. Проработка разделов порядка выполнения работы. Поиск ответов по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?

3. Приобретение навыков исследования переходных искажений импульсных сигналов в усилительном каскаде с использованием функционального генератора (*FGEN*) и осциллографа *Scope*.

4. Обработка полученных экспериментальных данных, подготовка и защита отчета.

## Краткие сведения из теории

Свойства усилителя в импульсном режиме работы удобно описывать переходной характеристикой. Также как при частотном методе анализа, где рассматриваются вносимые усилителем линейные частотные и фазовые искажения, при анализе искажений импульсного сигнала различают искажения:

– при передаче фронта единичной входной функции 1(t), т. е. искажения в области малых времен (OMB), когда усилитель неправильно передает участки сигналов с большими производными;

– при передаче вершины импульса, представленного суммой единичных функций, причем вторая (отрицательная) задержана относительно первой на время длительности импульса. Данные искажения происходят на вершине импульса, т. е. в области больших времен (ОБВ), где на импульсе находится участок сигнала с малой производной. Нахождение переходной характеристики h(t), как реакции усилителя на единичную функцию 1(t), обычно осуществляется с помощью операторного метода анализа переходных процессов.

Считая, что этот метод освоен Вами в курсе «Электротехника», напомним важное для данной работы свойство преобразования Лапласа – значения функции времени a(t) при t = 0, т. е. в ОМВ и  $t = \infty$ , т. е. в ОБВ могут быть найдены с помощью предельных соотношений для изображения A(p) передаточной функции:

$$a(t=0) = \lim_{\substack{p \to \infty; \\ Re(p) > 0}} pA(p); \ a(t=\infty) = \lim_{p \to 0} pA(p).$$

Понимая комплексное число *р* как комплексную частоту, приходим к выводу, что анализ каскада в области низких частот частотного метода и анализ в ОБВ временного метода должны осуществляться по одной расчетной схеме. В первом случае (ОНЧ) определяются линейные частотные и фазовые искажения, во втором – искажения по передаче вершины импульсного сигнала.

Аналогично одна и та же расчетная схема ответственна за линейные частотные и фазовые искажения в области верхних частот и линейные переходные искажения в ОМВ при передаче фронтов импульсов.

## Передача фронта импульса

Как известно, при анализе линейных искажений резистивного каскада (рис. 5.48) с нагрузкой в цепи коллектора может быть использована упрощенная схема замещения, изображенная на рис. 5.49.



Рис. 5.48. Схема резистивных каскадов для исследования переходных искажений



Рис. 5.49. Эквивалентная схема замещения резистивного каскада с нагрузкой в цепи коллектора

Чтобы понять, почему при подаче на вход каскада единичной функции фронт выходного сигнала затягивается, проделаем мысленный эксперимент, учитывая порознь влияющие на этот процесс факторы.

1. Пусть у гипотетического транзистора отсутствует инерционность, т. е.  $C_{\rm K}^* = 0$  и  $|\dot{\beta}| = \beta$ . Тогда идеализированный транзистор передаст скачок выходного коллекторного тока без искажения. Однако напряжение на емкости скачком измениться не может, и в первый момент времени напряжение на нагрузке будет равняться нулю, а затем плавно изменилось бы во времени в зависимости от значения постоянной времени нагрузки.

2. Пусть у гипотетического каскада C6 = 0 и инерционность транзистора определяется только  $|\dot{\beta}|$ , а  $C_{\rm K}^* = 0$ . Тогда весь ток генератора тока идет в выходную коллекторную цепь. Если операторное выражение зависимого генератора тока  $|\dot{\beta}| \cdot I_{\rm b}$  описывается звеном первого порядка, то ток во времени изменяется по экспоненциальному закону. Значит, в начальный момент времени выходное напряжение будет равно нулю, а затем меняется по экспоненте. Чтобы уменьшить время установления от этого фактора, нужно взять транзистор с большей частотой единичного усиления  $f_{\rm T}$ , т. е. более высокочастотный и дорогой.

3. Пусть C6 = 0, а инерционность транзистора представлена только  $C_{\rm K}^* \neq 0$ . Тогда в начальный момент времени напряжение на  $C_{\rm K}^*$  скачком измениться не может, т. е. в этот момент емкость будет закорочена, и весь ток генератора тока пойдет через нее. Ток в нагрузке будет отсутствовать, и выходное напряжение будет равно нулю. Значит, чтобы время установления на переходной характеристике было незначительным, необходимо выбрать транзистор с меньшей  $C_{\rm K}^*$ , т. е. более высокочастотный и дорогой.

В первом приближении комплексный коэффициент усиления резистивного каскада равен:

$$\dot{K}_{\rm B} = \frac{K_0}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau_{\rm B}},$$

где  $K_0 = -\beta \frac{R_{\rm H} || R_{\rm K}}{h_{113}}$  – коэффициент усиления в ОСЧ;  $\tau_{\rm B}$  – эквивалент-

ная постоянная времени, являющаяся функцией граничной частоты транзистора, емкости его коллекторного перехода и активной и реактивной составляющими нагрузки, т. е.  $\tau_{\rm B} = f(\tau_{\rm T}, C_{\rm K}, R \sim, C_{\rm H}...)$ .

Тогда изображение  $K(p) = \frac{K_0}{1 + p\tau_B}$  и нормированная (относительно

К<sub>0</sub>) переходная характеристика имеет вид:

$$h(t) = 1 - e^{-t/\tau_{\rm B}}$$

В этом случае выброс ( $\delta$ ) на переходной характеристике h(t) отсутствует и линейные искажения в ОМВ определяются временем установления  $t_y$ , т. е. интервалом, в течение которого h(t) изменяется от уровня 0,1 до уровня 0,9 своего установившегося значения:  $t_y \approx 2,2\tau_B$ .

Таким образом, любое увеличение постоянной времени  $\tau_{\rm B}$ , например, из-за дополнительного шунтирования нагрузки конденсатором *C*6 приведет к увеличению  $\tau_{\rm B}$ , а затем  $t_{\rm Y}$ . Аналогичная картина ухудшения передачи фронтов импульсов будет наблюдаться, если использовать транзистор с худшими частотными свойствами: с большей емкостью коллекторного перехода *C*к и меньшей граничной частотой  $f_{\rm T}$ .

Чтобы экспериментально просматривать фронты входного и выходного сигналов, необходимо использовать самые быстрые развертки осциллографа. При этом можно судить о качестве фронтов сигнала, генерируемого генератором *FGEN* учебного комплекса *NI ELVIS*, и исследуемого усилительного каскада.

## Передача вершины импульса

Искажения в ОБВ рассматривают раздельно для каждой цепи, влияющей на передачу вершины импульса, т. е. для каждого из разделительных конденсаторов исследуемой схемы.

Учет влияния каждой из разделительных емкостей производится по обобщенной схеме, изображенной на рис. 5.50.



Рис. 5.50. Схема замещения каскада для расчета переходных искажений в ОБВ из-за наличия разделительных конденсаторов (общая — слева и обобщенная для любого из них — справа)

В этой схеме влияние  $C_{P1} = C2$  учитывается при параметрах левой части схемы –  $e_{\Gamma}$  и  $R_{\Gamma}$ , а правой –  $R_{BX}$ .

В зависимости от вида исследуемой схемы: с коллекторной нагрузкой или нагрузкой в цепи эмиттера (эмиттерного повторителя)  $C_{P2}$  равен или C4, или C5. Тогда влияние  $C_{P2}$  учитывается при параметрах схемы  $E, R_{BbIX}$  и RL.

Тогда для каждой цепи с разделительным конденсатором справедлива одна и та же обобщенная схема.

Чтобы понять, почему при подаче на вход каскада импульса длительностью  $t_{\rm H}$  имеет место спад вершимы импульса, обратимся опять к коммутационным законам электротехники.

Когда проходит передний фронт входного импульса, в обобщенной схеме замещения разделительная емкость закорочена и ток в цепи максимальный. В дальнейшем по мере зарядки емкости ток в цепи экспоненциально уменьшается, а значит, экспоненциально уменьшается и выходное напряжение схемы, обуславливая спад вершины импульса.

Тогда нормированное изображение передаточной функции имеет вид:

$$\frac{K(p)}{K_0} = \frac{p \cdot \tau_{\rm H}}{1 + p \cdot \tau_{\rm H}},$$

где  $\tau_{\rm H}$  – постоянная времени,  $\tau_{\rm H1} = C_{\rm P1} \cdot (R_{\Gamma} + R_{\rm BX}); \tau_{\rm H2} = C_{\rm P2} \cdot (R_{\rm BbIX} + R6);$  $R_{\rm BX} = R1 \parallel R2 \parallel h_{119}; R_{\rm BbIX} = R7$  – для схемы с коллекторной нагрузкой.
Для эмиттерного повторителя:  $R_{\rm BX} = R1 \parallel R2$ ;  $R_{\rm BbIX} = 1/S$ , где  $S = \beta/h_{113}$  – крутизна биполярного транзистора.

В этом случае уравнение переходной характеристики для каждой из цепей равно:

$$h(t) = e^{-t/\tau_{\rm H}}$$

Известно, что спад вершины  $\Delta$  импульса длительностью  $t_{\rm H}$  равен:  $\Delta = 1 - h(t_{\rm H}) \approx t_{\rm H} / t_{\rm H}.$ 

В первом приближении общий спад равен сумме частных спадов.

Таким образом, спад вершины  $\Delta$  может улучшаться или при уменьшении длительности импульса  $t_{\rm H}$  (увеличении частоты следования), или за счет установки цепей с большой постоянной времени  $\tau_{\rm H}$ . Последнее требование, к сожалению, обычно исполняется за счет увеличения значения емкости разделительных конденсаторов, что нежелательно по многим соображениям.

По возможности лучшим решением по ликвидации искажений при передаче вершины импульса является устранение в схеме всех разделительных емкостей, т. е. переход к усилителям постоянного тока.

## Порядок выполнения работы

## Начало работы

1. Включите питание для NI ELVIS.

2. Запустите программное обеспечение *NI ELVIS*; после инициализации откройте панель комплекта виртуальных измерительных приборов.

3. Осуществите вызов из меню генератора *FGEN* и осциллографа Scope, установив ему режим открытого входа.

4. Кнопкой *Waveforms* переведите генератор *FGEN* в режим выдачи сигналов в виде последовательности прямоугольных импульсов. Установите амплитуду импульсов 1 В и нулевое смещение, используя *Peak Amplitude* и *DC Offset*.

5. Установите чувствительность осциллографа по оси *Y* канала *B* на уровне 2 В на деление с помощью управления по *Scale*.

## Просмотр импульсных сигналов

1. Соберите схему резистивного усилительного каскада с нагрузкой в цепи коллектора, охваченного последовательной противосвязью по току, используя рис. 5.48. Подключите нагрузку *RL* к разделительному конденсатору С4 (при подготовке к лабораторной работе рассчитайте коэффициент усиления каскада по напряжению).

2. Для просмотра входного напряжения, подаваемого с генератора *FGEN*, используйте канал *A* осциллографа с управлением *Source* в режиме *FGEN FUNC OUT*. После выполнения этого пункта Вы должны заметить следующее: на самой быстрой развертке видно, что выдаваемые *FGEN* сигналы неидеальны и имеют конечные длительности фронтов. Замерьте их.

3. Просмотр выходных сигналов осуществляйте или с коллектора транзистора, или с сопротивления нагрузки *RL*.

4. В первом случае вход осциллографа по каналу *В* должен быть открытым, так как в режиме покоя там присутствует постоянная составляющая напряжения порядка 5 В. Во втором случае вход может быть закрыт и можно в несколько раз поднять чувствительность осциллографа.

5. Изменяйте частоту следования последовательности прямоугольных импульсов с генератора, не забывая грамотно управлять разверткой и синхронизацией осциллографа, и просмотрите, как проявляются искажения при передаче фронтов и вершин импульсов. Если искажения фронтов импульсов мало заметны по сравнению с теми, что выдает генератор, то подключите в исследуемой схеме емкость нагрузки *C*6.

6. По результатам проведенного эксперимента запомните:

– частоту, на которой лучше всего исследовать искажения фронта импульсов;

– декаду частот, на которых лучше всего исследовать искажения при передаче вершины импульсов.

## Исследование линейных искажений в ОМВ при передаче фронта импульса

Резистивный каскад с последовательной обратной связью по току:

1. Используйте прежнюю схему эксперимента.

2. Установите выбранную Вами частоту следования сигналов функционального генератора *FGEN*.

3. Получите на канале *В* осциллографа изображение переднего (заднего) фронта импульса, выделяемого на нагрузке *RL*, используя максимальную скорость развертки сигнала, регулируемую ручкой *TIMEBASE* или устанавливаемую в окне.

4. Проведите измерения времени установления импульса, пользуясь масштабной сеткой, без емкости нагрузки С6 и с ней. Сделайте выводы

о качестве передачи фронтов импульсного сигнала через усилитель в исследованных условиях работы.

# Резистивный каскад с последовательной 100%-й обратной связью по напряжению (эмиттерный повторитель)

1. Измените схему эксперимента. Правый вывод емкости *C*4 заземлите, тем самым заземляя коллектор транзистора по переменному току.

2. Нагрузку *RL* подключите через емкость *C*5 к эмиттеру транзистора.

3. Повторите пункты методики по просмотру и измерению фронтов импульсных сигналов для нового резистивного каскада, уменьшив их амплитуду до 0,5 В (почему?). Выполните сравнение полученных данных, учитывая, что при подготовке дома к работе Вы могли сопоставить значения постоянных времени для двух исследуемых схем.

# Исследование линейных искажений в ОБВ при передаче вершины импульса

Резистивный каскад с последовательной обратной связью по току:

1. Соберите схему резистивного усилительного каскада с нагрузкой в цепи коллектора, охваченного последовательной противосвязью по току, используя рис. 5.48. Подключите нагрузку *RL* к разделительному конденсатору *C*4.

2. Установите выбранную Вами частоту следования сигналов функционального генератора *FGEN* из определенной ранее декады частот. Установите амплитуду входного импульса 1 В.

3. Определите составляющую спада вершины импульса из-за влияния цепи с разделительным конденсатором C2, подав на вход осциллографа сигнал с коллектора транзистора и используя открытый вход *Scope*.

4. Перебросьте вход осциллографа на нагрузку, включенную через разделительный конденсатор *С*3. Определите спад вершины импульсно-го сигнала из-за цепей с двумя разделительными конденсаторами.

5. Используя домашнее определение постоянных времени цепей и соответствующих спадов вершин, найдите, соответствует ли суммарный спад экспериментально полученным спадам из-за *C*2 и *C*3. По какому закону определяется общий спад через отдельные его составляющие?

6. Перебросьте вход осциллографа на нагрузку, включенную через разделительный конденсатор C4 = 10C3. Определите спад вершины им-

пульсного сигнала из-за цепей с двумя разделительными конденсаторами.

7. Используя домашнее определение постоянных времени цепей и соответствующих спадов вершин, найдите, соответствует ли суммарный спад экспериментально полученным спадам из-за *C*2 и *C*4.

8. Переберите схему каскада и подайте на вход осциллографа сигнал с коллектора транзистора, используя открытый вход *Scope*.

9. Измените частоту последовательности входных импульсов (5÷10 точек в декаде частот) и определите значение спада на каждой частоте. Подчиняются ли полученные экспериментальные данные теории? Сведите данные в таблицу и постройте график.

*Резистивный каскад с последовательной 100%-й обратной связью* по напряжению (эмиттерный повторитель):

1. Переберите схему эксперимента. Правый вывод емкости *C*4 заземлите, тем самым заземляя коллектор транзистора по переменному току.

2. Нагрузку *RL* подключите через емкость *C*5 к эмиттеру транзистора.

3. Установите выбранную Вами частоту следования сигналов функционального генератора *FGEN* из определенной ранее декады частот. Установите амплитуду входного импульса 0,5 В.

4. Определите составляющую спада вершины импульса из-за влияния цепи с разделительным конденсатором *C*2, подав на вход осциллографа сигнал с эмиттера транзистора и используя открытый вход *Scope*. Почему один и тот же конденсатор дает разные значения спадов вершин в разных схемах?

5. Перебросьте вход осциллографа на нагрузку, включенную через разделительный конденсатор *С*5. Определите спад вершины импульсно-го сигнала из-за цепей с двумя разделительными конденсаторами.

6. Зная закон суммирования спадов, найдите спад вершины импульсов из-за разделительного конденсатора *С*5. Сличите полученное значение с тем, что Вы получили дома. Сделайте выводы.

## Контрольные вопросы

1. На основе коммутационных законов объясните появление линейных искажений при передаче фронтов прямоугольного импульса.

2. Объясните, почему цепи с разделительным конденсатором вызывают линейные искажения при передаче вершины импульса. 3. Проиллюстрируйте использование операторного метода при определении h(t) и  $t_y$ , если  $\dot{K} = K_0 / (1 + j \cdot \omega \cdot t \cdot \beta)$ .

4. Используя операторный метод, найдите значение h(t) и  $\Delta$ , если  $\dot{K} = K_0 / (1 + j / \omega t_H)$ .

5. Как на экране осциллографа определить  $t_y$ ?

6. Как на экране осциллографа определить Δ?

7. На входе схем действует единичная функция. В каких схемах значение переходной характеристики h(t) равно 1, при t = 0?



8. На входе схем действует единичная функция. В каких схемах значение переходной характеристики h(t), при  $t >> \tau$ , будет асимптотически приближаться к 1?



7. Какое из дифференциальных уравнений соответствует схеме  $(\tau = RC)?$   $U_{BX}(t)$   $U_{BX}(t)$   $U_{BX}(t)$   $U_{BX}(t)$   $U_{T}$  U(t) 10. Какое из дифференциальных уравнений соответствует схеме  $(\tau = RC)$ ?





11. Время установления на переходной характеристике – это интервал времени, в течении которого она изменяется от установившегося значения в пределах:

a) от 0 до1; б) от 0,1 до 1; в) от 0,1 до 0,9; г) от 1 до 0,1; д) от 0,9 до 0; е) от 1 до 0.

12. Выброс на переходной характеристике усилительного каскада при передаче фронтов прямоугольных импульсов всегда отсутствует, если процессы в усилителе описываются линейными дифференциальными уравнениями \_\_\_\_\_ порядка.

13. Составьте расчетную схему каскада для области больших времен. Докажите, как изменится спад вершины прямоугольного импульса при неизменной емкости *C*, если варьировать параметры элементов схемы:

- а) увеличится, если уменьшить *R*1;
- б) уменьшится, если увеличить R1;
- в) не изменится при изменении R1;
- г) не изменится при изменении *R*и;
- д) увеличится при увеличении *R*и.

14. Составьте расчетную схему предыдущего каскада для области малых времен. Время установления при передаче фронтов прямоугольного импульса каскадом уменьшится, если:

a) увеличить *R*1;

б) уменьшить *R*и;



в) выбрать транзистор с большей крутизной *S*;

г) выбрать транзистор с меньшей инерционностью;

д) увеличить емкость C;

е) уменьшить *R*1.

## Требования к отчету

Отчет должен содержать:

– цель работы;

- схемы и результаты эксперимента;

- теоретические расчеты искажений;

- сравнение результатов теории и эксперимента;

– выводы.

## Лабораторная работа № 6

### Типовые схемы включения операционных усилителей

## Цель работы

Овладение методикой исследования в программно-аппаратной среде *NI ELVIS* параметров и характеристик типовых схем операционных усилителей.

## Задачи исследования

1. Подготовка к лабораторной работе, т. е. формирование знаний и пониманий процессов, происходящих в исследуемой схеме.

2. Проработка разделов порядка выполнения работы. Поиск ответов по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?

3. Приобретение навыков исследования параметров и характеристик типовых схем операционных усилителей с использованием:

– функционального генератора (FGEN) и осциллографа Scope;

– регулируемого источника питания (Variable Power Supplies – DPS);

– цифрового мультиметра (*Digital Multimetr – DMM*);

– анализатора амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик – АЧХ/ФЧХ (*Bode Analyzer*).

4. Обработка полученных экспериментальных данных, подготовка и защита отчета.

## Краткие сведения из теории

Операционным называется усилитель, предназначенный для выполнения математических операций при использовании его в схемах с обратной связью. Однако область применения операционных усилителей (ОУ), выполненных в виде микросхем, значительно шире. Поэтому в настоящее время под ОУ принято понимать микросхему, которая представляет из себя усилитель постоянного тока. Такой усилитель позволяет строить узлы аппаратуры, функции и технические характеристики которой зависят только от свойств цепи обратной связи, в которую он включен. Таким образом, ОУ предназначены для проведения различных линейных и нелинейных операций над входными сигналами, а применение глубоких обратных связей позволяет обеспечивать высокое качество таких преобразований.

ОУ, согласно классификации по ГОСТ 4.465–86, делятся на универсальные (общего применения), прецизионные (инструментальные), регулируемые (микромощные) и т. д.

С другой стороны, в зависимости от соответствий входного и выходного сопротивлений ОУ с сопротивлениями источника сигнала и нагрузки различают усилители: с потенциальным или токовым входом, с токовым выходом. В зависимости от возможности получать амплитуду выходного сигнала до уровня напряжения примененного источника питания различают усилители типа *rail-to-rail* и т. д.

В справочной литературе обычно описывают следующие основные параметры ОУ:

 коэффициент усиления по напряжению: отношение изменения выходного напряжения к вызвавшему его изменению входного дифференциального напряжения;

 частота единичного усиления: значение частоты входного сигнала, при котором значение коэффициента усиления напряжения падает до единицы;

 максимальное выходное напряжение: максимальное значение выходного напряжения, при котором искажения не превышают заданного значения;

 скорость нарастания выходного напряжения: отношение его изменения от 10 до 90 % от своего номинального значения ко времени, за которое произошло это изменение;

 напряжение смещения: значение напряжения, которое необходимо подать на вход ОУ, чтобы выходное напряжение было равно нулю;

- входные токи: токи, протекающие через входные контакты ОУ;

- разность входных токов;
- дрейф напряжения смещения;
- дрейф разности входных токов;

 максимальное входное дифференциальное напряжение: напряжение, прикладываемое между входами ОУ, превышение которого ведет к выходу параметров за установленные границы или к разрушению микросхемы;

– максимальное синфазное входное напряжение: наибольшее значение напряжения, прикладываемого одновременно к обоим входам ОУ

относительно нулевого потенциала, превышение которого нарушает работоспособность микросхемы;

 коэффициент ослабления синфазного сигнала: отношение коэффициента усиления напряжения, приложенного между входами ОУ, к коэффициенту усиления общего для обоих входов напряжения;

– выходной ток: максимальное значение выходного тока ОУ, при котором гарантируется работоспособность микросхемы.

В измерительных устройствах необходимо усиливать с малыми искажениями слабые электрические сигналы, сопровождаемые значительным уровнем синфазных, температурных и других помех.

Прецизионный усилитель, используемый для этих целей, должен обладать не только очень большими значениями коэффициентов усиления и подавления синфазного сигнала, но и малым напряжением смещения нуля и его дрейфом, малыми уровнями шумов, большим входным сопротивлением.

В лабораторной работе использован операционный усилитель OP-07 (российский аналог КР140УД17), который является прецизионным усилителем прямого усиления и широко используется в схемотехнике измерительных устройств. Наиболее полная информация об операционном усилителе OP-07 приводится в *DATA SHEET*, предоставляемых фирмами-изготовителями. Часть сведений об этом ОУ приведена в Приложении А.

Операционный усилитель КР140УД17 имеет внутреннюю схему частотной коррекции и может работать в диапазоне питающих напряжений от 3 до 18 В каждой полярности при симметричном (двухполярном) питании, которое в основном и будет использовано в лабораторном цикле.

Предварительно познакомимся с важнейшими правилами, которые в первом приближении определяют поведение ОУ, охваченного петлей глубокой ООС и работающего в линейном режиме, когда его входы и выход не перегружены. Они справедливы почти для всех случаев.

## Правило 1

Так как дифференциальное входное напряжение стремится к нулю, то входы ОУ эквипотенциальны.

## Правило 2

Входы ОУ ток не потребляют.

## Правило 3

По выходу ОУ близок к источнику ЭДС.

Таким образом, ОУ является источником ЭДС, управляемым ЭДС на входе.

В зависимости от вида ООС различают инвертирующее и неинвертирующее включения ОУ.

## Инвертирующее включение ОУ

В инвертирующем усилителе (рис. 5.51) входной сигнал и сигнал обратной связи противоположного знака суммируются с помощью резисторов *R*1 и *R*2. Как известно, такая обратная связь называется параллельной по входу. Что касается обратной связи по выходу, то она является по напряжению, так как напряжение обратной связи

 $U_{\rm OC} = \beta_{\rm OC} \cdot U_{\rm BbIX}$ при  $\beta_{\rm OC} = R1 / (R1 + R2) = {\rm const}$ пропорционально  $U_{\rm BbIX}$ .



Рис. 5.44. Типовая схема инвертирующего усилителя

Зная вид обратной связи и помня правила 1 и 2, можно определить основные параметры инвертирующего усилителя – коэффициент усиления, входное и выходное сопротивления.

Воспользуемся вышеперечисленными правилами для получения формулы коэффициента усиления.

1. Потенциал точки *A* равен потенциалу точки *B* и также равен потенциалу земли. Поэтому в литературе точку *A* называют «виртуальная земля», «квазиземля» или «виртуальный нуль», «квазинуль».

2. Тогда  $U_{R1} = U_{BX}$ , а  $U_{R2} = U_{BbIX}$ .

3. Согласно правилу 2 и первому закону Кирхгофа получим:

$$U_{\rm BX}/R1 = -U_{\rm BMX}/R2$$

Отсюда коэффициент усиления инвертирующего усилителя  $K_{\rm HH} = U_{\rm BMX}/U_{\rm BX} = -R2/R1$  .

Еще проще можно найти входное сопротивление усилителя. Так как  $U_{\rm A} = 0$ , то  $R_{\rm BX\,H} = R1$ .

Не столь наглядно определяется выходное сопротивление. В этом случае следует воспользоваться постулатами теории обратной связи (OC): если по выходу отрицательная OC (OOC) по напряжению, то выходное сопротивление инвертирующего усилителя равно:

$$R_{\rm BbIX \, \text{\tiny H}} = R_{\rm BbIX \, \text{\tiny OY}} / (1 + K_{\rm y} \cdot \beta_{\rm OC}),$$

где  $R_{\text{BbIX OY}}$  – выходное сопротивление ОУ,  $K_{\text{Y}}$  – коэффициент усиления ОУ.

Заметим, что с позиций теории ОС можно подтвердить полученные выше выражения для  $K_{\rm UH}$  и  $R_{\rm BX \, II}$ .

В ОУ без ОС, начиная с некоторой частоты  $\omega_{CP1}$  (рис. 5.52), наблюдается спад коэффициента усиления. Одной из причин этого спада является то, что ОУ для сигналов, поступающих от источника с конечным выходным сопротивлением, представляет собой емкостную нагрузку. Поэтому ОУ эквивалентен фильтру низких частот.



Рис. 5.52. Амплитудно-частотные характеристики инвертирующих усилителей с разной глубиной обратной связи

При введении ООС АЧХ усилителя зависит от параметров элементов цепи ОС. Так, для коэффициента усилителя, охваченного цепью ОС с коэффициентом передачи  $\beta$ ос2 или  $\beta$ ос3, происходит уменьшение коэффициента усиления и повышение частоты среза в (1 +  $K_y$ · $\beta$ ос) раз.

Действительно

$$K_{\rm y}(j\omega) = K_{\rm y}(0) / (1 + j \cdot \omega \cdot \tau_1), \qquad (1)$$

где  $\tau_1 = 1/\omega_{CPL} K_y(0)$  – коэффициент усиления ОУ на постоянном токе.

Подставляя (1) в формулу

$$K_{\rm UH}(j\omega) = K_{\rm y}(j\omega) / (1 + K_{\rm y}(j\omega)\beta_{\rm OC}),$$

получим:

$$K_{\rm MH}(j\omega) = \frac{1/\beta_{\rm OC}}{\left[1 + j\omega \frac{\tau_1}{1 + K_{\rm y}(0)\beta_{\rm OC}}\right]}.$$

Следовательно, для такого усилителя частота среза, определяемая из условия

$$\omega_{\rm CP} \cdot \frac{\tau_1}{1 + K_{\rm y}(0)\beta_{\rm OC}} = 1,$$

увеличивается пропорционально глубине ОС и полоса пропускания расширяется.

Для усилителей с АЧХ, характеризуемых (1), справедливо следующее утверждение: произведение коэффициента усиления на полосу пропускания (определяется на уровне 3 дБ) – величина постоянная, т. е.

$$K_{\rm UH\ \omega cp} = {\rm const}$$

Поэтому увеличение коэффициента усиления *К*<sub>ИН</sub> приводит к сужению полосы пропускания и наоборот.

Полученные выражения являются базовыми и для неинвертирующего усилителя.

Изображенная на рис. 5.51 схема инвертирующего включения ОУ не является принципиальной. Скорее всего это схема для переменных составляющих тока и напряжения, так как в ней отсутствуют цепи питания усилителя.

Как отмечалось выше, в лабораторной работе в основном будет использовано симметричное, двухполярное питание, которое может быть получено или от встроенных в макет стабилизаторов напряжения на +9 V и -9 V, или от регулируемых (*VPS*) источников: *SUPPLY* + и *SUPPLY* – .

Первый вариант (рис. 5.53) будет использован при исследовании амплитудной характеристики схем с ОУ, так как регулируемые источники *NI ELVIS* являются источниками входного напряжения.



Рис. 5.53. Инвертирующее включение ОУ с двухполярными источниками по 9 В

Как известно, амплитудной характеристикой (AX) является зависимость выходного напряжения схемы от входного. Так как исследуется схема инвертирующего включения ОУ, то вид идеализированной AX будет соответствовать рис. 5.54, а наклон AX на линейном участке определяется коэффициентом усиления по напряжению, т. е. зависит от номиналов используемых резисторов в цепи обратной связи.



Рис. 5.54. Типичный вид амплитудной характеристики инвертирующего включения ОУ для двухполярного и симметричного питания

При использовании двухполярных напряжений питания ограничение значений максимального выходного напряжения в схемах с такими ОУ происходит на уровне (0,8÷0,9) от значений источников питания. Если модули напряжений питания одинаковы, то изломы на АХ будут симметричными. Для разных значений модулей уход с линейного режима работы схемы в нелинейный будет ассиметричным.

Второй вариант (рис. 5.55) двухполярного питания может быть применен для исследования схем на максимальную амплитуду выходного гармонического сигнала при использовании на входе напряжения, получаемого с функционального генератора *FGEN* с его выхода *FUNC OUT*.



Рис. 5.55. Инвертирующее включение ОУ с двухполярными источниками питания от NI ELVIS: SUPPLY+ и SUPPLY-

Если для всех мгновенных значений входного сигнала ОУ работает в линейном режиме, то выходной сигнал также будет практически гармоническим (рис. 5.56).



Рис. 5.56. Работа ОУ в линейном режиме

Когда на некоторых участках входное напряжение переводит ОУ в нелинейный режим работы, то на выходном напряжении формируется отсечка: симметричная при симметричной АХ (рис. 5.57) и несимметричная в противном случае.



Рис. 5.57. Формирование отсечки выходного напряжения при заходе усилителя в нелинейный режим работы

Использование двухполярного источника питания не является единственно возможным. Схема с однополярным питанием, например, реализуется тогда, когда один из входов ОУ, куда подключается источники питания, заземляется.

Представим, что в схемах, изображенных на рис. 5.53 или 5.55, оставлен только источник питания положительной полярности. Здесь входное напряжение привязано не к средней точке источников питания, как это обычно делается в случае двухполярного питания ОУ, а к отрицательному полюсу источника питания.

Эта схема не работает, если входное напряжение положительно, поскольку выходное напряжение должно в этом случае становиться отрицательным, а отрицательного источника питания здесь нет.

Наиболее естественно использовать однополярное питание ОУ тогда, когда источник входного сигнала имеет постоянную составляющую, желательно на уровне половины примененного в схеме питания.

На рис. 5.58 и 5.59 представлены примеры схем подключения источника смещения при однополярном питании ОУ.



Рис. 5.58. Дифференциальный усилитель

Схема на рис. 5.58 представляет собой дифференциальный усилитель, а на рис. 5.59 – неинвертирующий сумматор.



Рис. 5.59. Неинвертирующий сумматор

В общем случае связь между входными и выходными напряжениями в этих схемах можно представить уравнением  $U_{out} = k \cdot U_{in} + b$ . Этому уравнению соответствует график амплитудной характеристики схемы с ОУ в виде прямой линии (рис. 5.60).



Рис. 5.60. График амплитудной характеристики схем с ОУ с подключением источника смещения

Приведенные на рисунках схемы, при грамотном их использовании, позволяют передавать знакопеременные входные напряжения на выход при линейном режиме работы ОУ, т. е. практически без искажений. Однако, как нетрудно заметить, в выходном напряжении будет присутствовать постоянная составляющая, что не всегда желательно для пользователя.

## Неинвертирующий усилитель

Неинвертирующий усилитель является второй базовой схемой усилителя на основе ОУ. Основное применение такого усилителя – построение усилителя со сравнительно большим входным сопротивлением и без инверсии входного напряжения.

Такие свойства неинвертирующего усилителя во многом обусловлены использованием последовательной ООС по напряжению. В отличие от инвертирующего включения рассматриваемый усилитель в типовом включении содержит три резистора (рис. 5.61), из которых R3 необходим для обеспечения режима работы входного каскада ОУ по постоянному току. Наличие R3 приводит к ограничению максимального входного сопротивления неинвертирующего усилителя:  $R_{\rm BX}$  нин = R3. Значение сопротивления R3 варьируется в пределах десятки кОм– десятки МОм в зависимости от того, какие транзисторы – биполярные или полевые – используются во входных каскадах ОУ. Заметим, что при работе неинвертирующего усилителя в режиме усилителя постоянного тока от источника входного сигнала с гальванической связью нет необходимости в R3. Тогда входное сопротивление неинвертирующего усилителя определяется в основном синфазным входным сопротивлением  $Z_{C\Phi}$  ОУ и может достигать величины порядка  $10^{12}$  Ом и выше. Однако с увеличением частоты из-за частотозависимости Zcф и входной емкости ОУ входной импеданс неинвертирующего усилителя уменьшается.



Рис. 5.61. Типовая схема неинвертирующего усилителя

Для получения выражения коэффициента усиления воспользуемся ранее изученными правилами. Согласно первому правилу  $U_{\rm BX} = U_A$ . Из второго правила следует:

$$U_A = U_{\rm Bbix} \cdot \frac{R1}{R1 + R2}$$

Тогда коэффициент усиления неинвертирующего усилителя

$$K_{\rm HИH} = U_{\rm BMX} / U_{\rm BX} = 1 + \frac{R2}{R1}$$

Как видно из выражения, на основе неинвертирующего включения ОУ нельзя выполнить операционный делитель. К тому же, в отличие от инвертирующего усилителя, в рассматриваемой схеме операционный усилитель работает с большой синфазной составляющей, равной входному сигналу. Это сужает функциональные возможности неинвертирующего ОУ.

Выходное сопротивление неинвертирующего усилителя определяется аналогично, как и для инвертирующего включения, так как в обоих случаях ООС по выходу – по напряжению.

Существенным достоинством неинвертирующего усилителя является возможность получения большого значения коэффициента усиления практически независимо от входного сопротивления. Однако необходимо принять меры по уменьшению влияния напряжения смещения. Сравнительно легко данная проблема решается в усилителях переменного сигнала, где по постоянному току можно выполнить 100%-ю обратную связь (рис. 5.62).

![](_page_163_Figure_1.jpeg)

Рис. 5.62. Усилитель переменного сигнала с ОУ в неинвертирующем включении

На основе неинвертирующего усилителя можно выполнить повторитель напряжения. На рис. 5.63 представлен наиболее часто применяемый вариант усилителя с единичным коэффициентом усиления. В литературе он встречается под названием буферного усилителя, так как обладает изолирующими свойствами – большим входным импедансом и малым выходным.

![](_page_163_Figure_4.jpeg)

Рис. 5.63. Повторитель напряжения на ОУ

## Порядок выполнения работы

## Начало работы

1. Включите питание для *NI ELVIS*.

2. Запустите программное обеспечение *NI ELVIS*; после инициализации откройте панель комплекта виртуальных измерительных приборов.

3. Осуществите вызов из меню регулируемых источников питания *VPS* (*SUPPLY*+ и *SUPPLY*-) и осциллографа *Scope*, установив ему режим открытого входа.

## Снятие амплитудных характеристик для схем инвертирующего включения ОУ

1. Соберите схему, изображенную на рис. 5.53 и реализующую функцию инвертора (в результате домашней подготовки к лабораторной работе Вы должны знать, какой резистор вместо R2 нужно использовать, если вместо R1 подключается R15 = 10 кОм).

2. Подключите вход схемы к источнику *SUPPLY*+, а выход – к осциллографу.

3. Измените входное напряжение от 0 до 9 В через 1 В и получите массив данных части амплитудной характеристики.

4. Подключите вход схемы к источнику *SUPPLY*– и измените входное напряжение от 0 до –9 В через 1 В и получите другой массив данных части амплитудной характеристики. Используйте полученные данные для формирования таблицы в отчете и для построения характеристики.

5. Соберите схему, изображенную на рис. 5.53 и реализующую усилитель с коэффициентом усиления -10 (в результате домашней подготовки к лабораторной работе Вы должны знать, какой резистор вместо *R*2 нужно использовать, если вместо *R*1 подключается *R*15 = 10 кОм).

6. Получите данные по выше изложенной методике, предварительно дома скорректировав значения верхнего предела входного напряжения и его шаг изменения. Постройте амплитудную характеристику. Определите уровень входного напряжения, при котором начинается переход работы с линейного режима в нелинейный. Зафиксируйте полученные данные.

7. Соберите схему, изображенную на рис. 5.53 и реализующую схему операционного делителя напряжения с коэффициентом передачи -0,1 (в результате домашней подготовки к лабораторной работе Вы должны знать, какой резистор вместо *R*2 нужно использовать, если вместо *R*1 подключается *R*15 = 10 кОм).

8. Получите данные по выше изложенной методике, предварительно дома скорректировав значения верхнего предела входного напряжения и его шаг изменения. Постройте амплитудную характеристику.

9. Сформируйте выводы относительно поведения амплитудных характеристик схем с различными значениями коэффициента усиления.

## Экспериментальное подтверждение правила 1 о том, что входы ОУ эквипотенциальны

Переставьте вход осциллографа в точку суммирования схемы - на инверсный вход ОУ. Измерьте напряжение. Сформулируйте вывод: на каком резисторе схемы выделяется входное напряжение, а на каком выделяется выходное?

## Определение максимального значения амплитуды выходного гармонического напряжения в усилителе с различными цепями питания

Усилитель с двухполярным питанием:

1. Соберите схему, изображенную на рис. 5.55 и реализующую усилитель с коэффициентом усиления –10. На выходах *SUPPLY* + и *SUPPLY* – источников *VPS* установите одинаковые напряжения равное 9 В.

2. Осуществите вызов из меню генератора FGEN.

3. Кнопкой *Waveforms* переведите генератор *FGEN* в режим выдачи гармонических сигналов с частотой 1 kHz. Установите нулевое смещение, используя управление по *DC Offset*.

4. Измените амплитуду входного напряжения (*Peak Amplitude*) и, используя осциллограф с открытым входом, добейтесь получения максимальной амплитуды выходного сигнала, когда на нем не просматривается ограничение. Установите и зафиксируйте значение входного и выходного напряжений.

Проверьте качество своей работы: насколько соответствуют значения входного и выходного сигналов, полученных в предыдущем пункте и в разделе «Снятие амплитудных характеристик для схем инвертирующего включения ОУ» (см. стр. 165) при снятии амплитудной характеристики усилителя. Сделайте выводы.

5. Измените напряжение питания (+U = 5 В), получаемое с выхода *SUPPLY*+. Проделайте два предыдущих пункта.

6. Измените напряжение питания (-U = 5 В), получаемое с выхода SUPPLY-. Повторите выше изложенную методику эксперимента. Составьте общую таблицу, сформируйте выводы по зависимости максимальной амплитуды выходного напряжения от значений напряжений источников двухполярного питания. Усилитель с однополярным питанием:

1. Соберите схему, изображенную на рис. 5.63 и реализующую усилитель с коэффициентом усиления -1 по входному сигналу, поступающему с выхода *FUNC OUT* генератора *FGEN* (вместо обозначенных на рисунке резисторов используйте резисторы *R*15 и *R*12).

2. Осуществите вызов из меню генератора *FGEN*. Кнопкой *Waveforms* переведите генератор *FGEN* в режим выдачи гармонических сигналов с частотой 1 kHz. Установите амплитуду напряжения (*Peak Amplitude*), равную нулю. Установите нулевое смещение, используя управление по *DC Offset*.

3. Рассчитайте (домашнее задание) коэффициент передачи напряжения смещения, поступающего с выхода *SUPPLY*+ регулируемого источника *VPS* на неинвертирующий вход ОУ, при линейном режиме его работы. Вызовите из меню регулируемый источник *VPS*. Установите на выходе *SUPPLY*+ напряжение смещения, обеспечивающее на выходе ОУ напряжение, равное половине напряжения источника питания, при нулевом сигнале *FUNC OUT*.

4. Вызовите из меню осциллограф в режиме открытого входа. Просмотрите и измерьте значение напряжения на выходе ОУ. Соответствует ли оно ожидаемому значению?

5. Измените амплитуду входного напряжения (*Peak Amplitude*) и добейтесь получения максимальной амплитуды выходного сигнала, когда на нем не просматривается ограничение. Измерьте и зафиксируйте значения входного и выходного напряжений. Соответствуют ли они ожидаемым значениям?

6. Начните изменять напряжение смещения, или используя управление по *DC Offset* генератора, или управляя напряжением *SUPPLY*+ регулируемого источника *VPS*. Зафиксируйте изменения постоянной составляющей выходного сигнала ОУ и появление возможных ограничений гармонического сигнала на его выходе. Разберитесь в исследуемых процессах и зафиксируйте полученные данные. Сделайте выводы.

7. Желающие могут разработать дома план эксперимента исследования работы ОУ при однополярном питании (рис. 5.59) и провести его на лабораторном занятии.

## Исследование АЧХ и ФЧХ инвертирующего ОУ

## Усилитель:

1. Соберите схему, изображенную на рис. 5.64 и реализующую усилитель с коэффициентом усиления –10 по входному сигналу, посту-

пающему с выхода *FUNC OUT* генератора *FGEN* (вместо обозначенных на рисунке резисторов используйте резисторы *R*15 и *R*13).

2. Вызовите из меню источники *VPS* и установите напряжения источников питания для OV: SUPPLY + = +9 V, SUPPLY - = -9 V.

![](_page_167_Figure_2.jpeg)

Рис. 5.64. Схема для исследования ФЧХ и ФЧХ инвертирующего ОУ

3. Вызовите из меню *NI ELVIS* анализатор Боде и установите начальное значение частоты – 100 Hz, конечное значение частоты – 35 kHz и число шагов за декаду изменения частоты – 5.

4. Амплитуду входного сигнала, получаемую на выходе *FGEN FUNC OUT* и обеспечивающую линейный режим работы ОУ во всей полосе рабочих частот, выберите на основании ранее проведенного эксперимента по исследованию амплитудной характеристики усилителя.

5. Запустите программу кнопкой запуска *Run*, получите характеристики. При необходимости получения значений коэффициентов усиления или фазового сдвига каскада на разных частотах используйте *Cursors*. Сохранение результатов осуществляйте кнопкой *Log* на виртуальной панели *Bode Analyzer*. Сохраните графики для отчета.

## Инвертор:

1. Соберите схему, изображенную на рис. 5.64 и реализующую усилитель с коэффициентом усиления -1 по входному сигналу, поступающему с выхода *FGEN FUNC OUT* анализатора Боде (вместо обозначенных на рисунке резисторов используйте резисторы *R*15 и *R*12).

2. Уточните амплитуду входного сигнала, получаемую на выходе *FGEN FUNC OUT* и обеспечивающую линейный режим работы ОУ во всей полосе рабочих частот.

3. Запустите программу исследования, а затем сохраните массив данных и графики.

Делитель:

1. Соберите схему, изображенную на рис. 5.64 и реализующую делитель напряжения с коэффициентом передачи –0,1.

2. Уточните амплитуду входного сигнала, получаемую на выходе *FGEN FUNC OUT* и обеспечивающую линейный режим работы ОУ во всей полосе рабочих частот.

3. Запустите программу исследования, а затем сохраните массив данных и графики.

## Исследование АЧХ и ФЧХ неинвертирующего ОУ

1. Соберите схему, изображенную на рис. 5.65 и реализующую усилитель напряжения с коэффициентом передачи +11. Выберите значения резисторов в цепи обратной связи.

![](_page_168_Figure_6.jpeg)

Рис. 5.65. Схема для исследования ФЧХ и ФЧХ неинвертирующего ОУ

2. Уточните амплитуду входного сигнала, получаемую на выходе *FGEN FUNC OUT*, обеспечивающую линейный режим работы ОУ во всей полосе рабочих частот и среднеквадратическое значение выходного напряжения, близкое к одному вольту.

3. Запустите программу исследования, а затем сохраните массив данных и графики.

4. Переберите схему, изображенную на рис. 5.65 и реализующую усилитель напряжения с коэффициентом передачи +2.

5. Уточните амплитуду входного сигнала, запустите программу исследования, а затем сохраните массив данных и графики.

6. Переберите схему, изображенную на рис. 5.65 и реализующую усилитель напряжения с коэффициентом передачи +1,1.

7. Уточните амплитуду входного сигнала, запустите программу исследования, а затем сохраните массив данных и графики.

8. Сформулируйте выводы по проведенным экспериментам.

## Контрольные вопросы

1. Как определить верхнюю границу частотного диапазона инвертирующего усилителя?

2. Каким образом можно измерить и уменьшить напряжение смещения усилителя?

3. Приведите схему эксперимента для доказательства инверсии переменного сигнала усилителя с помощью осциллографа.

4. Какие параметры усилителя изменятся, если уменьшить напряжение питания?

5. Сравните выходное сопротивление на постоянном токе усилителя, инвертора и делителя.

6. Как определить верхнюю границу частотного диапазона неинвертирующего усилителя?

7. Приведите схему эксперимента для доказательства неинвертирующего свойства усилителя переменного сигнала.

8. Сравните входное и выходное сопротивления неинвертирующего усилителя и повторителя.

9. Установите соответствие между элементами двух множеств: электронных схем и видов обратных связей (во всех схемах выходное напряжение снято с выхода ОУ).

1) 1-а, 2-б, 3-в, 4-г;

- 2) 1-а, 2-б, 3-в, 4-в;
- 3) 1-г, 2-г, 3-б, 4-б;
- 4) 1-в, 2-г, 3-а, 4-б;
- 5) 1-a, 2-a, 3-a, 4-a.

![](_page_170_Figure_0.jpeg)

10. Соответствие между элементами множества определений параметров ОУ и элементами множества его параметров следующее:

1-я группа:

1. Отношение изменения выходного напряжения к вызвавшему его изменению входного напряжения.

2. Отношение коэффициента усиления дифференциального сигнала к коэффициенту усиления синфазного сигнала, выраженное в децибелах.

2-я группа:

- а) коэффициент усиления синфазного сигнала;
- б) коэффициент усиления дифференциального сигнала;
- в) коэффициент ослабления синфазного сигнала.

11. Приведено изображение следующей характеристики ОУ:

![](_page_170_Figure_10.jpeg)

12. Приведено изображение следующей характеристики ОУ:

![](_page_171_Picture_1.jpeg)

13. К линейным функциональным устройствам на ОУ относятся схемы, выполняющие, например, следующие преобразования:

а) умножение входного сигнала на константу;

б) умножение двух входных сигналов;

- в) фильтрацию;
- г) интегрирование;
- д) ограничение.

14. Положение об эквипотенциальности входов идеализированного ОУ имеет важные следствия для его неинвертирующего включения:

а) выходное напряжение всегда меньше входного;

б) синфазный сигнал равен входному напряжению;

в) входное напряжение выделяется на резисторе R1;

г) выходное напряжение выделяется на резисторе *R*2.

## Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- схемы и результаты эксперимента;
- теоретические расчеты искажений;
- сравнение результатов теории и эксперимента;
- выводы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

# ANALOG DEVICES

#### FEATURES

- Low Vos Drift ..... 0.6µV/°C Max
- Ultra-Stable vs Time ..... 1.0µV/Month Max
- Low Noise ...... 0.6µVp-p Max
- Wide Input Voltage Range ..... ± 14V
- Wide Supply Voltage Range  $\dots \pm 3V$  to  $\pm 18V$
- Fits 725, 108A/308A, 741, AD510 Sockets
- 125° C Temperature-Tested Dice

#### **ORDERING INFORMATION**<sup>†</sup>

T, = +25	C	PACKAGE					
ν <sub>ος</sub> ΜΑ: (μV)	х то-99	CERDIP 8-PIN	PLASTIC 8-PIN	LCC 20-CONTACT	TEMPERATURE		
25	OP07AJ*	OP07AZ*		-	MIL		
75	OP07EJ	OP07EZ	OP07EP	-	COM		
75	OP07J*	OP07Z*		OP07RC/883	MIL		
150	OP07CJ	OP07CZ	OP07CP	_	XIND		
150	-	-	OP07CS <sup>11</sup>	-	XIND		
150	OP07DJ	-	OP07DP	-	XIND		

\* For devices processed in total compliance to MIL-STD-883, add /883 after part number. Consult factory for 883 data sheet.

Burn-in is available on commercial and industrial temperature range parts in

CerDIP, plastic DIP, and TO-can packages. For availability and burn-in information on SO and PLCC packages, contact tt. your local sales office.

#### **GENERAL DESCRIPTION**

The OP-07 has very low input offset voltage (25µV max for OP-07A) which is obtained by trimming at the wafer stage. These low offset voltages generally eliminate any need for external nulling. The OP-07 also features low input bias current (±2nA for OP-07A) and high open-loop gain (300V/mV for OP-07A). The low offsets and high open-loop gain make the OP-07 particularly useful for high-gain instrumentation applications.

The wide input voltage range of ±13V minimum combined with high CMRR of 110dB (OP-07A) and high input impedace provides high accuracy in the noninverting circuit configuration. Excellent linearity and gain accuracy can be maintained

#### SIMPLIFIED SCHEMATIC

## **Ultralow Offset Voltage Operational Amplifier**

**OP07** 

even at high closed-loop gains.

Stability of offsets and gain with time or variations in temperture is excellent. The accuracy and stability of the OP-07, even at high gain, combined with the freedom from external nulling have made the OP-07 a new industry standard for instrumentation and military applications.

The OP-07 is available in five standard performance grades. The OP-07A and the OP-07 are specified for operation over the full military range of -55°C to +125°C; the OP-07E is specified for operation over the 0°C to +70°C range, and OP-07C and D over the -40°C to +85°C temperature range.

The OP-07 is available in hermetically-sealed TO-99 metal can or ceramic 8-pin Mini-DIP, and in epoxy 8-pin Mini-DIP. It is a direct replacement for 725, 108A, and OP-05 amplifiers; 741-types may be directly replaced by removing the 741's nulling potentiometer. The OP-207, a dual OP-07, is available for applications requiring close matching of two OP-07 amplifiers. For improved specifications, see the OP-77/OP-177.

#### **PIN CONNECTIONS**

![](_page_172_Figure_26.jpeg)

![](_page_172_Figure_27.jpeg)

## **OP07**

#### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 1)

Supply Voltage	±22V
Differential Input Voltage	±30V
Input Voltage (Note 2)	±22V
Output Short-Circuit Duration	Indefinite
Storage Temperature Range	
J, RC and Z Packages65°C	to +150°C
P Package65°C	to +125°C
Operating Temperature Range	
OP-07A, OP-07, OP-07RC55°C	to +125°C
OP-07E04	C to +70°C
OP-07C, OP-07D40°	C to +85°C
Lead Temperature (Soldering, 60 sec)	+300°C
Junction Temperature (Tj)	+150°C

PACKAGE TYPE	⊖ <sub>JA</sub> (Note 3)	ejc	UNITS	
TO-99 (J)	150	18	°C/W	
8-Pin Hermetic DIP (Z)	148	16	°C/W	
8-Pin Plastic DIP (P)	103	43	°C/W	
20-Contact LCC	98	38	°C/W	
8-Pin SO (S)	158	43	°C/W	

NOTES:

Absolute maximum ratings apply to both DICE and packaged parts, unless otherwise noted.

For supply voltages less than ±22V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.
Θ<sub>i,k</sub> is specified for worst case mounting conditions, i.e., Θ<sub>i,k</sub> is specified for device in socket for TO, CerDIP, P-DIP, and LCC packages; Θ<sub>i,k</sub> is specified for device soldered to printed circuit board for SO package.

#### ELECTRICAL CHARACTERISTICS at V<sub>S</sub> = ± 15V, T<sub>A</sub> = 25°C, unless otherwise noted.

				OP-07A			<b>OP-07</b>		
PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	UNITS
Input Offset Voltage	Vos	(Note 1)	-	10	25	-	30	75	¥۷
Long-Term Input Offset Voltage Stability	∆V <sub>OS</sub> /Time	(Note 2)	-	0.2	1.0	-	0.2	1.0	μV/Mo
Input Offset Current	los			0.3	2.0	-	0.4	2.8	nA
Input Bias Current	1 <sub>B</sub>		-	±0.7	±2.0	-	±1.0	±3.0	nA
Input Noise Voltage	enp-p	0.1Hz to 10Hz (Note 3)	-	0.35	0.6	-	0.35	0.6	μV <sub>p-p</sub>
Input Noise Voltage Density	e <sup>n</sup>	f <sub>O</sub> = 10Hz (Note 3) f <sub>O</sub> = 100Hz (Note 3) f <sub>O</sub> = 1000Hz (Note 3)	Ξ	10.3 10.0 9.6	18.0 13.0 11.0	Ξ	10.3 10.0 9.6	18.0 13.0 11.0	nV/√Hz
Input Noise Current	inp-p	0.1Hz to 10Hz (Note 3)	-	14	30	-	14	30	pA <sub>p-p</sub>
Input Noise Current Density	i <sub>n</sub>	f <sub>O</sub> = 10Hz (Note 3) f <sub>O</sub> = 100Hz (Note 3) f <sub>O</sub> = 100Hz (Note 3)	=	0.32 0.14 0.12	0.80 0.23 0.17	=	0.32 0.14 0.12	0.80 0.23 0.17	pA√√Hz
Input Resistance — Differential-Mode	R <sub>IN</sub>	(Note 4)	30	80	-	20	60	-	мΩ
Input Resistance — Common-Mode	RINCM		-	200	-	-	200	-	GN
Input Voltage Range	IVR		±13	±14		±13	±14	-	v
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = \pm 13V$	110	126	-	110	126	-	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 3V$ to $\pm 18V$		4	10	-	4	10	μV/V
Large-Signal Voltage Gain	Avo	$\begin{split} &R_L \!\geq\! 2 k \Omega,  V_O \!=\! \pm 10 V \\ &R_L \!\geq\! 500 \Omega,  V_O \!=\! \pm 0.5 V, \\ &V_S \!=\! \pm 3 V \; (Note\; 4) \end{split}$	300 150	500 400	-	200 150	500 400	-	V/mV
Output Voltage Swing	vo	R <sub>L</sub> ≥ 10kΩ R <sub>L</sub> ≥2kΩ R <sub>L</sub> ≥ 1kΩ	± 12.5 ± 12.0 ± 10.5	±13.0 ±12.8 ±12.0	Ξ.	±12.5 ±12.0 ±10.5	±13.0 ±12.8 ±12.0	Ξ	v
Slew Rate	SR	$R_L \ge 2k\Omega$ (Note 3)	0.1	0.3	-	0.1	0.3	-	V/µs
Closed-Loop Bandwidth	BW	A <sub>VCL</sub> = +1 (Note 3)	0.4	0.6	-	0.4	0.6	-	MHz
Open-Loop Output Resistance	Ro	$V_0 = 0, I_0 = 0$	-	60	-	-	60	-	n
Power Consumption	Pd	$V_S = \pm 15V$ , No Load $V_S = \pm 3V$ , No Load	=	75 4	120 6	-	75 4	120 6	mW
Offset Adjustment Range		$R_p = 20k\Omega$	_	±4	-	-	±4	-	mV
and hits an analysis of the second									

NOTES:

 OP-07A grade V<sub>OS</sub> is measured approximately one minute after applica-tion of power. For all other grades V<sub>OS</sub> is measured approximately 0.5 seconds after application of power.

Excluding the initial hour of operation, changes in V<sub>OS</sub> during the first 30 operating days are typically  $2.5\mu V$  — refer to typical performance curves. Parameter is sample tested.

2. Long-Term Input Offset Voltage Stability refers to the averaged trend line of V<sub>03</sub> vs. Time over extended periods after the first 30 days of operation. Sample tested.
Guaranteed by design.

**OP**07

	SYMBOL	CONDITIONS	OP-07A			OP-07			
PARAMETER			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	UNITS
Input Offset Voltage	Vos	(Note 1)	-	25	60	-	60	200	μV
Average Input Offset Voltage Drift With-									
out External Trim	TCVOS	(Note 2)	-	0.2	0.6	-	0.3	1.3	μV/°C
With External Trim	TCVOSn	Rp=20kΩ (Note 3)	-	0.2	0.6	-	0.3	1.3	μV/*C
Input Offset Current	los		-	0.8	4	-	1.2	5.6	nA
Average Input Offset Current Drift	TCIOS	(Note 2)	-	5	25	-	8	50	pA/*C
Input Bias Current	IB		-	±1	±4	-	±2	±6	nA
Average Input Bias Current Drift	TCIB	(Note 2)	-	8	25	_	13	50	pA/°C
Input Voltage Range	IVR		±13	±13.5	· _	±13	±13.5	-	v
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = \pm 13V$	106	123	-	106	123		dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 3V$ to $\pm 18V$	-	5	20	-	5	20	μ٧/٧
Large-Signal Voltage Gain	Avo	$R_L \ge 2k\Omega$ , $V_O = \pm 10V$	200	400		150	400	-	V/mV
Output Voltage Swing	Vo	$B_1 \ge 2k\Omega$	±12	±12.6	-	±12	±12.6	-	V

#### TRICAL CHARACTERISTICS at V. - +15V -55°C < T. < +125°C unless otherwise noted ---

NOTES:

1. OP-07A grade  $V_{DS}$  is measured approximately one minute after application of power. For all other grades  $V_{OS}$  is measured approximately 0.5 seconds after application of power.

Sample tested.
Guaranteed by design.

#### TYPICAL OFFSET VOLTAGE TEST CIRCUIT

![](_page_174_Figure_8.jpeg)

#### OPTIONAL OFFSET NULLING CIRCUIT

![](_page_174_Figure_10.jpeg)

#### TYPICAL LOW-FREQUENCY NOISE TEST CIRCUIT

![](_page_174_Figure_12.jpeg)

#### **BURN-IN CIRCUIT**

![](_page_174_Figure_14.jpeg)

#### **TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS**

![](_page_175_Figure_2.jpeg)

![](_page_175_Figure_3.jpeg)

![](_page_175_Figure_4.jpeg)

MAXIMUM ERROR vs SOURCE RESISTANCE

![](_page_175_Figure_6.jpeg)

MAXIMUM ERROR vs SOURCE RESISTANCE

![](_page_175_Figure_8.jpeg)

INPUT BIAS CURRENT vs

TEMPERATURE

OP-07C

**OP-07E** 

50

100

4

¥ 3

CURRENT

BIAS

INNUT

0

30

30

VS = = 15V

OP-07

OP-07A

-50

0

TEMPERATURE ("C)

MAXIMUM ERROR VS SOURCE RESISTANCE

![](_page_175_Figure_10.jpeg)

![](_page_175_Figure_11.jpeg)

10 20

0

DIFFERENTIAL INPUT VALUE (VOLTS)

-10

-30

-30 -20

![](_page_175_Figure_12.jpeg)

![](_page_175_Figure_13.jpeg)

#### **TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS**

![](_page_176_Figure_2.jpeg)

![](_page_176_Figure_3.jpeg)

![](_page_176_Figure_4.jpeg)

![](_page_176_Figure_5.jpeg)

**CMRR vs FREQUENCY** 130 111 120 OP-070 110 110 100 CWRR 90 70 60 10 10 1.0 10

100 1k FREQUENCY (Hz)

**OPEN-LOOP** FREQUENCY RESPONSE

![](_page_176_Figure_9.jpeg)

**PSRR vs FREQUENCY** 

![](_page_176_Figure_11.jpeg)

**CLOSED-LOOP RESPONSE** FOR VARIOUS **GAIN CONFIGURATIONS** 

![](_page_176_Figure_13.jpeg)

**OPEN-LOOP GAIN vs** POWER SUPPLY VOLTAGE

![](_page_176_Figure_15.jpeg)

MAXIMUM OUTPUT SWING **vs FREQUENCY** 

![](_page_176_Figure_17.jpeg)

#### **TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS**

![](_page_177_Figure_2.jpeg)

![](_page_177_Figure_3.jpeg)

![](_page_177_Figure_4.jpeg)

UNTRIMMED OFFSET VOLTAGE vs TEMPERATURE

![](_page_177_Figure_6.jpeg)

![](_page_177_Figure_7.jpeg)

![](_page_177_Figure_8.jpeg)

OFFSET VOLTAGE STABILITY vs TIME

![](_page_177_Figure_10.jpeg)

#### **TYPICAL APPLICATIONS**

#### HIGH SPEED, LOW VOS, COMPOSITE AMPLIFIER

![](_page_177_Figure_13.jpeg)

![](_page_177_Figure_14.jpeg)

![](_page_177_Figure_15.jpeg)

## **OP07**

#### **TYPICAL APPLICATIONS**

#### HIGH-STABILITY THERMOCOUPLE AMPLIFIER

![](_page_178_Figure_3.jpeg)

#### **APPLICATIONS INFORMATION**

OP-07 series units may be substituted directly into 725, 108A/308A\* and OP-05 sockets with or without removal of external compensation or nulling components. Additionally, the OP-07 may be used in unnulled 741-type sockets. However, if conventional 741 nulling circuitry is in use, it should be modified or removed to enable proper OP-07 operation. OP-07 offset voltage may be nulled to zero through use of a potentiometer (see offset nulling circuit diagram).

'TO-99 Package only

#### PRECISION ABSOLUTE-VALUE CIRCUIT

![](_page_178_Figure_8.jpeg)

PINOUTS SHOWN FOR J, P, AND Z PACKAGES

The OP-07 provides stable operation with load capacitance of up to 500pF and  $\pm$  10V swings; larger capacitances should be decoupled with a 50 $\Omega$  decoupling resistor.

Stray thermoelectric voltages generated by dissimilar metals at the contacts to the input terminals can degrade drift performance. Therefore, best operation will be obtained when both input contacts are maintained at the same temperature, preferably close to the package temperature.

## Лабораторная работа № 7

# Функциональное применение операционных усилителей (линейные преобразования сигналов)

## Цель работы

Овладение методикой исследования в программно-аппаратной среде *NI ELVIS* характеристик и параметров схем на ОУ, обеспечивающие различные линейные преобразования входных сигналов.

## Задачи исследования

1. Подготовка к лабораторной работе, т. е. формирование знаний и пониманий процессов, происходящих в исследуемой схеме.

2. Проработка разделов порядка выполнения работы. Поиск ответов по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?

3. Приобретение навыков исследования схем с ОУ с использованием функционального генератора (*FGEN*), анализатора Боде (*Bode Analyzer*) и осциллографа (*Scope*).

4. Обработка полученных экспериментальных данных, подготовка и защита отчета.

## Краткие сведения из теории

Типовые схемы включения операционных усилителей обычно демонстрируют линейные преобразования сигналов, связанные с масштабированием выходного напряжения относительно входного. При этом в зависимости от схемы включения ОУ (инвертирующее, неинвертирующее) коэффициент передачи схемы по напряжению может быть как положительным, так и отрицательным.

Умножение входного сигнала на константу не является единственным представителем среди линейных преобразований сигналов. В различных областях аналоговой электроники широко востребованы и другие линейные преобразования. Такие, например, как суммирование и вычитание, интегрирование и дифференцирование, фильтрация (фильтры нижних, верхних частот, полосовые), преобразования напряжение-ток и ток-напряжение и т. д.
В предлагаемой Вашему вниманию лабораторной работе Вы можете провести исследование схем с примерами таких преобразований, используя различные схемы включения ОУ.

## Сумматор на ОУ

Схема суммирования двух входных сигналов представлена на рис. 5.66.



Рис. 5.66. Сумматор на операционном усилителе

Так как входы ОУ, работающего в линейном режиме, эквипотенциальны, то точка суммирования  $\sum$  (инвертирующий вход ОУ) находится практически под нулевым потенциалом (квазиземля).

Тогда напряжение  $U_1$  выделяется на сопротивлении R3, а напряжение  $U_2$  падает на R15, и каждое из напряжений и сопротивлений по закону Ома задает свой ток, который по первому закону Кирхгофа суммируется и создает выходное напряжение  $U_{BbIX}$  (со знаком минус) на сопротивлении R12. Другими словами, выходное напряжение равно:

$$U_{\rm BMX} = -R12 \cdot \left(\frac{U_1}{R3} + \frac{U_2}{R15}\right) = \left(-\frac{R12}{R3}\right) \cdot U_1 + \left(-\frac{R12}{R15}\right) \cdot U_2$$

Как видим, в идеальном случае коэффициенты передачи по каждому из входных напряжений можно независимо изменять, включая вместо сопротивлений *R*3 и *R*15 сопротивления других номиналов. Одновременно изменить коэффициенты усиления по обоим входам можно, если вместо *R*12 включить другое сопротивление. Учитывая номиналы используемых резисторов, данная схема, работая в линейном режиме, реализует преобразование:

$$U_{\rm BMX} = -0, 5 \cdot U_1 - 1, 0 \cdot U_{2m} \cdot \sin(\omega t).$$

Здесь амплитуда и частота гармонического сигнала задается генератором *FGEN*.

## Интегратор на ОУ

Простая схема интегратора на ОУ изображена на рис. 5.67.



Рис. 5.67. Интегратор на инвертирующем ОУ. Внимание! В макете вместо обозначенного номинала 47 nF конденсатора С7 установлен конденсатор с емкостью 1 мкФ

При работе идеализированного ОУ в линейном режиме его входы эквипотенциальны, а точка суммирования – квазиземля. Поэтому весь ток, протекающий через резистор, течет и по емкости, создавая со знаком «минус» выходное напряжение. Тогда

$$U_{\rm BMX} = (-\frac{1}{C7}) \cdot \int (\frac{U_{\rm BX}(t)}{R15}) \cdot dt = (-\frac{1}{\tau}) \cdot \int U_{\rm BX}(t) \cdot dt,$$

где  $\tau = R1 \cdot C7$  – постоянная времени.

Если учесть конечное значение коэффициента усиления реального ОУ, то можно обнаружить, что качество интегрирования будет улучшаться, когда уменьшается время интегрирования.

Проводя же частотный анализ схемы, получаем в идеализированном случае для модуля коэффициента передачи по напряжению (АЧХ) выражение:

$$K(\omega) = \frac{\omega_0}{\omega}$$

где  $\omega_0$  – частота квазирезонанса,  $\omega_0 = \frac{1}{\tau}$ .

Как видно из выражения для АЧХ, интегратор обладает свойствами фильтра нижних частот, у которого усиление падает с повышением час-

тоты со скоростью 20 дБ на декаду. Что касается ФЧХ, то для идеализированного интегратора сдвиг между входным и выходным напряжениями составляет 90°, т. е. оба сигнала находятся в квадратуре.

Если учесть конечное значение коэффициента усиления реального ОУ, то приведенная схема является фильтром нижних частот первого порядка и асимптотически приходит к функции интегрирования на частотах, многократно превышающих частоту среза.

Так как в приведенной схеме интегратора для стабилизации режима отсутствует отрицательная обратная связь по постоянному току, то при исследованиях одиночной схемы такая связь искусственно вводится за счет шунтирования емкости C7 цепью, состоящей из последовательно соединенных высокоомных сопротивлений R18 и R19, средняя точка которых по переменному току заземляется емкостью C8.

При экспериментальных исследованиях схемы убедиться в том, что она выполняет функцию интегрирования, можно различными способами, учитывающими вышеперечисленные свойства линейного преобразования.

Можно, например:

– подать на вход последовательность разнополярных прямоугольных импульсов и, сохраняя линейный режим работы ОУ, убедиться, используя генератор *FGEN* и осциллограф *Scope*, что на выходе получаются треугольные импульсы;

– исследовать АЧХ схемы на частотах, превышающих частоту среза и убедиться, имеет ли место обратно пропорциональная зависимость модуля усиления от частоты. С этой целью полезно привлечь или анализатор Боде, или генератор и осциллограф, в том числе в режиме вариации частоты с помощью управления *Frequency Sweep*;

исследовать ФЧХ схемы на частотах, превышающих частоту среза, и найти значения фазового сдвига с помощью анализатора Боде.

## Активные фильтры на ОУ

Электрическими фильтрами являются устройства, предназначенные для выделения из сигналов составляющих одних частот (полоса прозрачности фильтра) и подавления других (полоса непрозрачности).

## Фильтр нижних частот (ФНЧ) первого порядка

Фильтры нижних частот пропускают на выход сигналы на частотах ниже частоты среза и имеют зону непрозрачности на частотах ее пре-

вышающих. Таким образом, они выделяют из всего диапазона частот только низшие составляющие.

Схема ФНЧ первого порядка на инвертирующем усилителе приведена на рис. 5.68.



Рис. 5.68. Фильтр нижних частот первого порядка

Используя идеализированную модель ОУ, определяем комплексный коэффициент передачи фильтра по напряжению:

$$K(j\omega) = \frac{K_{(0)}}{(1+j\omega\tau)},$$

где  $K_{(0)} = -\frac{R12}{R15}$  – передача схемы на постоянном токе, а  $\tau = R12 \cdot C10$  –

постоянная времени (для приведенной схемы на рис. 5.68).

Тогда для АЧХ получим:

$$\left| \dot{K} \right| = K_{(0)} / \sqrt{1 + (\omega \tau)^2}$$
,

а для ФЧХ

$$\varphi_{K} = 180 - \arctan(\omega \tau)$$
.

Известно, что для цепей ФНЧ первого порядка полезно использовать понятие частоты среза, т. е. частоты, на которой модуль коэффициента передачи уменьшается в корень из двух раз по сравнению с  $K_{(0)}$  или на 3 децибела, если усиление на постоянном токе выражено в децибелах.

Тогда частота среза  $\omega_{cp} = 1/\tau$  и при фиксированном значении емкости может изменяться сопротивлением, включенным ей параллельно. При таком подходе независимое изменение усиления на постоянном токе реализуется установкой резистора другого номинала, чем у *R*15. Правда, тогда будет изменяться входное сопротивление схемы.

Из приведенного выражения для АЧХ видно, что на частотах, значительно превышающих частоту среза, затухание усиления происходит со скоростью 20 дБ на декаду. Таким образом, такие (относительно высокочастотные) составляющие спектра входного сигнала будут давиться на выходе тем больше, чем больше они превышают частоту среза. Чтобы добиться большего эффекта, последнюю нужно уменьшить, увеличивая постоянную времени, например, за счет увеличения сопротивления резистора. Однако при этом возникает противоречие – возрастает инерционность работы ФНЧ.

Анализ поведения схемы в частотной области можно осуществить, используя генератор и осциллограф, в том числе в режиме свипирования частоты сигналов, а также применяя анализатор Боде.

Изменение показателей спектрального состава входного и выходного сигналов можно пронаблюдать, вызвав из меню *NI ELVIS* анализатор *Dynamic Signal Analyze*r (*DSA*) и подавая на вход схемы сигналы прямоугольной или треугольной форм с *Function Generator*. Происходящие при этом изменения формы выходного сигнала относительно входного можно пронаблюдать там же или на осциллографе.

## Фильтр верхних частот (ФВЧ) первого порядка

В отличии от ФНЧ фильтр верхних частот выделяет из спектра входного сигнала его высшие составляющие, т. е. зона прозрачности ФВЧ простирается на частотах, превышающих частоту среза. Большинство схем активных ФВЧ используют глубокие противосвязи с применением определенного вида частотно-зависимых цепей, которыми охвачен ОУ.

В лабораторном цикле, на базе дифференцирующей *RC*-цепи и повторителя напряжения на ОУ исследуется простая схема ФВЧ первого порядка, которая приведена на рис. 5.69.



Рис. 5.69. Фильтр верхних частот первого порядка

Считая, что коэффициент усиления по напряжению повторителя равен единице, имеем следующее выражение для комплексной передачи схемы:

$$K(j\omega) = \frac{j\omega\tau}{(1+j\omega\tau)},$$

где  $\tau = R15 \cdot C10$  – постоянная времени.

Тогда для АЧХ имеем:

$$|K| = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{\left(\omega\tau\right)^2}\right) \cdot 0.5},$$

а для ФЧХ

 $\varphi_{\rm K} = \arctan(1/\omega\tau)$ .

Вводя также частоту среза  $\omega_{cp} = 1/\tau$ , понимаем, что на частотах, много меньших частоты среза, имеет место зона непрозрачности фильтра, когда на АЧХ наблюдается завал с предельной скоростью спада усиления 20 дБ на декаду. С другой стороны, в области прозрачности ФВЧ его передача асимптотически приближается к единице.

В отличие от ФНЧ первого порядка, в данной схеме фазовый сдвиг опережающий, с предельным значением +90°, когда частота сигнала стремится к нулю.

Исследование указанных характеристик  $\Phi B \Psi$  можно провести, используя анализатор Боде, а качественный просмотр возникающих изменений при изменениях частоты сигнала реализуется на осциллографе при изменении частоты генератора *FGEN* (режим *Frequency Sweep*).

#### Избирательный усилитель на цепи Вина

Активные фильтры, на выходе которых выделяются частоты спектра входного сигнала в полосе частот, расположенные между их нижними и верхними значениями, обычно называются полосовыми. В радиотехнической литературе схемы усилителей, реализующих подобные свойства, часто называются избирательными. В полосе пропускания таких усилителей коэффициент усиления обычно изменяется незначительно, как правило, в пределах 3-х децибел. Для избирательных усилителей высокой добротности полоса их пропускания мала относительно центральной частоты зоны прозрачности – частоты резонанса или квазирезонанса.

Первое наименование отражает способы построения избирательных усилителей за счет использования избирательных нагрузок, как правило, в виде различных колебательных систем (например, параллельных контуров) высокой добротности.

К сожалению, резко нарастающие габариты LC-систем не позволяют их эффективно использовать при снижении резонансной частоты. Возникает необходимость замены используемого для этих целей базиса: вместо LC-цепей нужно применить RC-цепи. Но пассивные RC-цепи принципиально обладают добротностью меньше единицы. Этот факт не позволяет применять такие цепи как нагрузки усилительных элементов или усилителей, т. е. реализовать такой же принцип, который используется для LC-нагрузок.

Реализация высокодобротного избирательного усилителя *RC*-типа может осуществляться за счет введения в широкополосный усилитель частотно-зависимой обратной связи.

В избирательных усилителях с положительной обратной связью используются *RC*-цепи, имеющие на частоте квазирезонанса нулевой фазовый сдвиг и максимальный коэффициент передачи по напряжению. В этом случае любая такая цепь имеет комплексный коэффициент передачи в виде:

$$\dot{\mathbf{A}} = \frac{\mathbf{A}_0}{1 + j \cdot Q \cdot Y},$$

где A<sub>0</sub> – коэффициент передачи на частоте квазирезонанса  $\omega_0$ ;

*Q* – добротность цепи;

 $Y = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}$  – относительная расстройка.

К таким цепям относится цепь Вина (Г-образный четырехполюсник), на базе которой и построен избирательный усилитель, изображенный на рис. 5.70. В приведенной цепи Вина сопротивления R16 = R17 = R, а C12 = C13 = C. Обозначив через Z1 сопротивление последовательной части, а через Z2 сопротивление параллельной части цепи, получите при домашней подготовке коэффициент ее передачи по напряжению как отношение напряжения на неинверсном входе ОУ к выходному напряжению усилителя.

Введя понятие постоянной времени  $\tau = R \cdot C$  и определив частоту квазирезонанса, на которой передача цепи вещественна ( $\omega_0 = 1/\tau$ ), сведите выражение к выше обозначенному виду. Тогда модуль коэффициента передачи цепи на частоте квазирезонанса  $A_0 = 1/3$ , фазовый сдвиг равен нулю, а ее добротность также равна 1/3.

Итак, сама цепь Вина обладает малой избирательностью и имеет «тупой» резонанс из-за чрезвычайно низкой добротности. Как отмечалось выше, чтобы повысить эквивалентную добротность избирательного усилителя на цепях подобного вида, их необходимо включить в цепь положительной обратной связи операционного усилителя.



Рис. 5.70. Избирательный усилитель с Г-образной RC-цепью

Однако в этом случае легко потерять устойчивость его работы, так как при выполнении условий возникновения колебаний схема становится автогенератором. Эти условия известны. Первое условие – это баланс фаз, когда при наличии двух обратных связей в схеме превалирует вещественная положительная обратная связь с нулевым фазовым набегом по петле обратной связи на частоте квазирезонанса. Это условие необходимое, но не достаточное. Чтобы исследуемая схема потеряла устойчивость и превратилась в автогенератор одновременно необходимо, чтобы усиление по петле этой обратной связи превышало единицу.

Попытаемся определить петлевое усиление для схемы ИУ, изображенной на рис. 5.70.

Для напряжения на неинвертирующем входе усиление с введенной отрицательной обратной связью равно:

$$K_{\rm HИH} = 1 + \frac{R23}{R22} \, .$$

Тогда петлевое усиление на частоте квазирезонанса

$$T = K_{\text{нин}} \cdot A_0 > 1$$
, когда  $R23 > 2 \cdot R22$ .

Реализовав данное условие при помощи движка потенциометра *R*22, схема ИУ станет автогенератором и на выходе ее сформируется периодический сигнал, даже если напряжение, подаваемое с генератора, равно нулю. Необходимо также понимать, что в приведенных расчетах к значению сопротивления *R*22 нужно добавлять внутреннее сопротивление генератора *FGEN* порядка 50 Ом.

Таким образом, чтобы исследовать схему в режиме избирательного усилителя, необходимо изменить положение движка потенциометра так, чтобы  $R23 < 2 \cdot R22$ . И чем ближе Вы подойдете к равенству указанного выражения, тем больше схема ИУ будет иметь эквивалентную добротность.

Действительно, если операционный усилитель работает в линейном режиме, то его входы эквипотенциальны. Рассчитав напряжения на инвертирующем и на неинвертирующем входах ОУ и приравняв их между собой, можно получить:

$$U_{\rm BX} \cdot \gamma + U_{\rm BbIX} \cdot \beta = U_{\rm BbIX} \cdot A$$
,

где  $\gamma = R23/(R22 + R23)$  – коэффициент передачи входного напряжения на инвертирующий вход ОУ в режиме короткого замыкания его выхода, а  $\beta = R22/(R22 + R23)$  – коэффициент отрицательной обратной связи, т. е передача выходного напряжения на инвертирующий вход ОУ при коротком замыкании входа ИУ.

Приведя выражение для комплексного коэффициента передачи ИУ к выше обозначенному виду для избирательных цепей, находим, что эквивалентная добротность ИУ равна:

$$Q_{3} = \frac{\beta}{(\beta - A_{0})} = 3 \cdot \frac{R22}{(2 \cdot R22 - R23)}$$

Так, если  $R23 = 1,9 \cdot R22$ , то эквивалентная добротность избирательного усилителя составит 30, что и следовало доказать!

## Преобразователь напряжения в ток

Речь идет о преобразователях, являющихся по выходу стабилизаторами тока, когда ток в нагрузке не зависит от изменяющегося сопротивления нагрузки. В случае использования для этих целей операционных усилителей с глубокими обратными связями реализуются такие их виды, которые приводят к повышению выходного сопротивления схемы, т. е. ведут выход преобразователя к генератору тока.

Наиболее просто реализовать генератор тока, управляемый входным, стабильным напряжением, для незаземленной нагрузки. Схема такого преобразователя напряжение-ток с глубокой параллельной противосвязью по току приведена на рис. 5.71.

При работе ОУ в линейном режиме его входы эквипотенциальны. Последнее утверждение означает, что весь ток, задаваемый входным напряжением и сопротивлением *R*15, протекает через нагрузки *R*11 или *R*12, или *R*13.

Таким образом, для идеализированного ОУ

## $I_{\rm H} = (Supply+)/R15$

и не зависит от сопротивления нагрузки, что означает реализацию по выходу схемы генератора тока. При анализе такой схемы необходимо сохранять линейный режим работы ОУ для всех обозначенных выше нагрузок и принятого значения входного напряжения *Supply+*. Как это сделать, если задано значение  $I_{\rm H}$ ?



Рис. 5.71. Преобразователь напряжения в ток. Пунктир означает, что при исследованиях схемы сопротивление нагрузки, представленное резисторами R11, R12, R13, может меняться

#### Порядок выполнения работы

#### Начало работы

1. Включите питание для *NI ELVIS*.

2. Запустите программное обеспечение *NI ELVIS*; после инициализации откройте панель комплекта измерительных приборов.

## Исследование схемы сумматора

1. Вызовите из меню *NI ELVIS* регулируемые источники питания *VPS* (*SUPPLY*+ и *SUPPLY*–), генератор *FGEN* и осциллограф *Scope*, установив режим открытого входа.

2. Соберите схему сумматора, изображенную на рис. 5.66, изменив ее так, чтобы реализовать уравнение:

$$U_{\text{Bbix}} = (-5 \cdot U_1) - (10 \cdot U_{2m} \cdot \sin(\omega t)).$$

3. Определите предельные значения амплитуды гармонического сигнала  $U_{2m}$ , которые при разных значениях  $U_1$  еще гарантируют линейный режим работы сумматора. Выполняя расчеты, используйте данные, полученные ранее при снятии амплитудной характеристики в лабораторной работе «Типовые схемы включения операционного усилителя». Расчеты провести для следующих значений  $U_1$ : +1,0 B; +0,5 B; +0,0 B; -1,0 B; -0,5 B. Данные свести в таблицу.

\*Данный пункт выполняется при подготовке к работе.

4. Установите у генератора частоту гармонического сигнала 1 kHz с нулевым напряжением смещения. Поставьте напряжение *Supply*+, равное +1,0 В. Последовательно с выбранным шагом увеличивая амплитуду переменного напряжения до рассчитанного предельного значения, просмотрите, как работает сумматор, и с помощью курсора измерьте на выходном напряжении его максимальное отрицательное значение. Исследование следует закончить при появлении отсечки на выходном напряжении. Сравните полученное значение с использованным ранее при домашних расчетах. Сделайте выводы.

5. Повторите предыдущий пункт для других значений  $U_1$ . Не забудьте при переключении на источник *Supply*- немного изменить правило измерения значения выходного сигнала с помощью курсора осциллографа.

6. Соберите сумматор, на выходе которого получается напряжение  $U_{\text{вых}} = 2 - 3 \cdot \sin(\omega \cdot t)$ . Подтвердите работу схемы экспериментально.

7. Используя возможности генератора, исследуйте схему сумматора, у которого при  $U_1 = +3$  В и  $U_{2m} = 2$  В любое мгновенное значение выходного напряжения положительно. Какое уравнение выходного напряжения у Вас получилось?

## Исследование интегратора на инвертирующем ОУ

1. Вызовите из меню генератор *FGEN* и осциллограф *Scope*, установив ему режим открытого входа.

2. Соберите схему интегратора, изображенную на рис. 5.67.

3. Определите частоту квазирезонанса, определяемую значениями сопротивления R1 и емкости C7. Обратите внимание на то, что в макете вместо обозначенного номинала 47 нФ конденсатора C7 установлен конденсатор с емкостью 1 мкФ.

4. Установите частоту, близкую к рассчитанному значению. Переключите *FGEN* на генерацию последовательности прямоугольных импульсов с амплитудой 2,5 В с нулевым напряжением *DC Offset*. Просмотрите на осциллографе входное и выходное напряжения схемы. Почему выходное напряжение имеет треугольную форму?

5. Измерьте с помощью курсора наименьшее и наибольшее значения напряжения на его нарастающем участке, а также временной интервал нарастания напряжения. Определите скорость нарастания напряжения. Чем она определяется, исходя из аналитической зависимости для выходного напряжения интегратора?

6. Проведите дополнительные исследования, чтобы доказать правильность Ваших выводов относительно скорости нарастания, изменяя амплитуду входных импульсов с генератора *FGEN* (3 значения) или изменяя значение сопротивления интегратора (3 значения сопротивления получайте последовательным включением резисторов *R*1, *R*23, *R*21), оставаясь в линейном режиме работы ОУ. Зафиксируйте временные диаграммы сигналов. Экспериментальные данные по скорости нарастания сведите в таблицу. Сличите теоретические и экспериментальные данные. Сделайте выводы.

7. Переключите генератор в режим генерации гармонического напряжения, поставив его в режим *Frequency Sweep* при тех же параметрах: стартовая частота – частота квазирезонанса; конечная частота – частота в пять раз большая частоты квазирезонанса; шаг – частота квазирезонанса.

8. Запустите генератор и удостоверьтесь, что Вы понимаете, как работает схема интегратора при его частотном анализе. Прокомментируйте в отчете эту часть эксперимента относительно закона изменения АЧХ и значения фазового сдвига в условиях, когда частота сигнала изменяется на декаду, начиная с частоты квазирезонанса.

9. Переведите генератор в обычный режим генерации гармонического сигнала и, начиная с частоты квазирезонанса с шагом, равным этой частоте. Измеряя с помощью осциллографа значения выходного напряжения, рассчитайте коэффициент передачи и определите фазовый сдвиг между сигналами (*Scope* по каналу *B* поставьте в режим *AC*). Другими словами, готовьте данные для построения АЧХ и ФЧХ интегратора в декадном частотном диапазоне. Совпадают ли полученные Вами данные с прогнозируемыми? Сделайте выводы по результатам эксперимента.

## Исследование схемы ФНЧ первого порядка

1. Вызовите из меню генератор *FGEN* и осциллограф *Scope*, установив ему режим открытого входа.

2. Соберите схему фильтра, изображенную на рис. 5.68, изменив ее путем включения вместо R12 другого резистора в цепи обратной связи так, чтобы K(0) = -10 (домашняя проработка).

3. Определите частоту среза собранного ФНЧ. Данные о частоте среза и усилении на постоянном токе используйте для грамотной (домашней) установки параметров, определяющих работу генератора, а в дальнейшем и анализатора Боде при сохранении линейного режима операционного усилителя. Для этого ориентируйтесь на ранее полученные данные по амплитудной характеристике схем на ОУ.

4. Установите на виртуальной панели генератора амплитуду гармонического напряжения, близкую к максимально возможной, которая гарантирует линейный режим работы ОУ даже на самой низкой частоте сигнала с генератора.

5. Подготовьтесь к работе генератора в режиме сканирования частоты сигнала в заданных пределах и указанным шагом (режим *Frequency Sweep*). Установите начальную частоту порядка 2/3 от частоты среза, конечную частоту порядка  $10 \cdot f_{CP}$ , а шаг равным  $f_{CP}$ . Кнопкой *Start/Stop* запустите режим свипирования частоты и просмотрите за правильностью работы схемы фильтра.

6. Перейдите к режиму исследования АЧХ и ФЧХ с привлечением анализатора Боде, если схема работала правильно. Вызовите из меню анализатор Боде.

7. На виртуальной панели анализатора установите прежние значения частот, а число шагов за декаду должно составлять 5 или 10.

8. При использовании, например, режима *Default* по *Y-Scale* в интересах исследуемой схемы измените масштабы по осям АЧХ и ФЧХ, используя домашние наработки по значениям: K(0) в дБ,  $\varphi(0)$  в градусах, а также значений модуля коэффициента передачи и фазы  $\varphi$  на частоте 10: $f_{CP}$ . На обеих характеристиках измените также частотный масштаб: слева 10 Hz, справа 1000 Hz.

9. Запустите в работу анализатор, сравните полученные характеристики с ожидаемыми. Сохраните экспериментальные данные и графики АЧХ и ФЧХ.

## Исследование схемы ФВЧ первого порядка

1. Соберите схему фильтра, изображенную на рисунке 5.69.

2. Установите на виртуальной панели генератора амплитуду гармонического напряжения, равную 2,5 В.

3. Определите частоту среза собранной схемы ФВЧ.

4. На виртуальной панели анализатора установите начальную частоту, приблизительно равную  $0,1:f_{CP}$ , конечную частоту 10 kHz и число шагов 5–10. На обеих характеристиках измените частотный масштаб: слева 10 Hz, справа 10000 Hz. Задайте автоматический режим работы по *Y-Scale*.

5. Запустите в работу анализатор, сравните полученные характеристики с ожидаемыми. Сохраните экспериментальные данные и графики АЧХ и ФЧХ.

## Исследование избирательного усилителя с цепью Вина

1. Вызовите из меню генератор *FGEN* и осциллограф *Scope*, установив ему режим открытого входа.

2. Проведите анализ цепи Вина (домашняя проработка). Определите частоту квазирезонанса *RC*-цепи по параметрам ее сопротивлений и емкостей. Найдите значения модуля и фазового сдвига передачи цепи на частоте квазирезонанса. Теоретически определите добротность цепи по ожидаемому виду АЧХ и ФЧХ.

3. Соберите схему для исследования характеристик цепи Вина с помощью анализатора Боде, изображенную на рис. 5.72.



Рис. 5.72. Схема исследования АЧХ и ФЧХ цепи Вина

4. На виртуальной панели анализатора установите амплитуду гармонического сигнала 2,5 В. Задайте автоматический режим работы по *Y*-*Scale*. Поставьте начальную частоту сигнала 100 Hz, конечную частоту 10000 Hz и число шагов за декаду – 20.Установите также новые значения частот в Hz по осям АЧХ и ФЧХ: слева 100, справа 10000.

5. Запустите в работу анализатор. Сравните полученные характеристики с ожидаемыми. Сохраните экспериментальные данные и графики АЧХ и ФЧХ. По экспериментальным данным уточните частоту квазирезонанса цепи и определите ее добротность. Уточнение значения частоты лучше всего провести по ФЧХ. Добротность определите следующим образом: по нулевому фазовому сдвигу уточните частоту квазирезонанса и значение передачи цепи в децибелах на этой частоте. Затем от полученного значения отнимите 3 дБ и определите нижнюю и верхнюю частоты полосы пропускания, а потом и саму полосу. Добротность получим как отношение частоты квазирезонанса цепи к полосе ее пропускания. Совпали ли у Вас теоретические и экспериментальные данные? Сделайте выводы по проделанному исследованию.

6. Соберите схему избирательного усилителя (рис. 5.70).

7. На виртуальной панели генератора установите нулевую амплитуду входного гармонического напряжения.

8. Переведите движок потенциометра в крайнее правое положение, в котором его сопротивление минимально и коэффициент отрицательной обратной связи схемы гарантированно меньше 1/3, а усилитель переходит в режим генератора, выдавая на выходе периодическое напряжение.

9. Перемещайте движок потенциометра медленно влево и добейтесь срыва колебаний.

10. На виртуальной панели генератора установите амплитуду входного гармонического напряжения, равную 40 мВ. В дальнейшем это значение придется уточнить, так как оно зависит от выбранного Вами положения движка потенциометра, определяющего и усиление, и эквивалентную добротность схемы избирательного усилителя.

11. Подготовьтесь к работе генератора в режиме сканирования частоты сигнала в заданных пределах с заказанным Вами шагом (режим *Frequency Sweep*). Как рекомендованные значения установите начальную частоту 100 Hz, конечную частоту 1000 Hz, а шаг 100 Hz. Кнопкой *Start/Stop* запустите режим свипирования (*Frequency Sweep*) частоты генератора и по осциллографу просмотрите за работой схемы.

12. Схема настроена правильно, если на всех частотах сохраняется линейный режим работы ОУ и при переключении частоты за счет переходных процессов схема не переходит в режим паразитной генерации. При наличии генерации чуть-чуть передвиньте движок потенциометра влево. Если при работе схемы в режиме избирательного усилителя наблюдается отсечка гармонического сигнала, то уменьшите амплитуду напряжения с генератора. Целесообразно так отстроить схему, чтобы при входном напряжении несколько десятков милливольт на ее выходе на частоте, близкой к частоте квазирезонанса, было бы напряжение несколько вольт.

13. Выключите схему, чтобы перебрать схему эксперимента с использованием анализатора Боде. Удалите генератор и осциллограф. Вызовите из меню анализатор Боде.

14. Установите по ранее проведенному эксперименту амплитуду гармонического сигнала. Задайте автоматический режим работы по *Y*-*Scale*.

15. Поставьте начальную частоту сигнала 100 Hz, конечную частоту 10000 Hz и число шагов за декаду 20.Установите также новые значения частот в Hz по осям АЧХ и ФЧХ: слева 100, справа 10000.

16. Включите схему. Запустите в работу анализатор, сравните полученные характеристики с ожидаемыми. Сохраните экспериментальные данные и графики АЧХ и ФЧХ. По экспериментальным данным уточните частоту квазирезонанса избирательного усилителя и определите его максимальное усиление и эквивалентную добротность.

17. Выключите схему. Измерьте значение сопротивления потенциометра, добавьте к нему 50 Ом (внутреннее сопротивление генератора *FGEN*), измерьте также значение резистора *R*23, рассчитайте коэффициент отрицательной обратной связи и оцените значение эквивалентной добротности. Насколько оно близко к полученному ранее значению по проведенному эксперименту? Во сколько раз эквивалентная добротность избирательного усилителя больше добротности используемой цепи Вина?

18. Передвиньте еще движок потенциометра влево, чтобы получить другое значение эквивалентной добротности. Повторите выше приведенный эксперимент и обработку его данных. Сделайте выводы по результатам проведенных исследований.

## Исследование схемы преобразователя напряжения в ток

7. Вызовите из меню регулируемый источник питания *VPS* (*SUPPLY*+) и цифровой вольтметр *DMM*.

7. Соберите схему преобразователя, изображенную на рис. 5.72. В качестве нагрузки сначала используйте сопротивление *R*13. Определение тока нагрузки в дальнейшем осуществляйте путем измерения напряжения с помощью вольтметра на контрольном сопротивлении *R*1.

7. Установите значение напряжения *Supply*+ вблизи максимально возможного, используя домашнюю проработку по обеспечению при этом линейного режима работы ОУ для наибольшей нагрузки 100 кОм. После установки напряжения источника *VPS* его значение уточните с помощью вольтметра. Определите ожидаемое значение тока генератора тока и зафиксируйте его.

7. Измеряя напряжения на контрольном резисторе при разных значениях сопротивлений нагрузки, пересчитывайте их в значения тока в

нагрузке. Составьте таблицу и постройте график, рассчитайте погрешности между ожидаемыми и реальными значениями тока.

7. Проведите оценочные расчеты выходного сопротивления преобразователя на основе полученных данных. Сделайте выводы.

## Контрольные вопросы

1. В схемах на ОУ для обеспечения преобразований над входными сигналами устанавливаются дополнительные цепи, каждая из которых имеет свое функциональное назначение:

1-я группа:

- 1. Цепи питания.
- 2. Цепи смещения.
- 3. Цепи коррекции.

2-я группа:

- a) обеспечение требуемого функционального преобразования входного сигнала;
- б) установление требуемого режима покоя ОУ;
- в) обеспечение устойчивости работы ОУ;
- г) обеспечение симметричного или несимметричного питания ОУ.

2. Платой за обеспечение устойчивости работы схем на ОУ за счет установки цепей внутренней или внешней коррекции является полосы пропускания.

3. К линейным функциональным устройствах на ОУ относятся схемы, выполняющие, например, следующие преобразования:

а) умножение входного сигнала на константу;

б) умножение двух входных сигналов;

- в) фильтрацию;
- г) интегрирование;
- д) ограничение.

4. Положение об эквипотенциальности входов идеализированного ОУ при его инверсном включении имеет важные следствия:

а) выходное напряжение всегда больше входного;

б) усилитель работает при малом синфазном сигнале;

в) входное напряжение выделяется на резисторе  $R_1$ ;

г) выходное напряжение выделяется на резисторе  $R_2$ .

5. Положение об эквипотенциальности входов идеализированного ОУ для его неинверсного включения имеет важные следствия:

а) выходное напряжение всегда меньше входного;

б) синфазный сигнал равен входному напряжению;

в) входное напряжение выделяется на резисторе  $R_1$ ;

г) выходное напряжение выделяется на резисторе  $R_2$ .

6. Найдите правильное соответствие между элементами двух множеств – видами включения ОУ (1-я группа) и реализующими их схемами (2-я группа):

1-я группа:

- 1. Инвертирующее.
- 2. Неинвертирующее.
- 3. Дифференциальное.

2-я группа:



7. Правильное соответствие между схемами на ОУ (1-я группа) и видами линейных преобразований над входными сигналами (2-я группа) имеет вид:

1-я группа:



2-я группа:

а) интегратор;

б) преобразователь «ток в напряжение»;

в) преобразователь «напряжение в ток».

г) умножитель входного сигнала на положительную константу.

8. Коэффициент усиления по напряжению для линейного режима работы идеализированного ОУ при среднем положении движка потенциометра равен \_\_\_\_\_.



9. Рассчитайте  $U_{\text{BbIX}} = f(U_1, U_2)$ , используя идеальную модель операционного усилителя. Обозначьте правильный ответ:

- a)  $U_{\text{BbIX}} = (1 + (R_2/R_1)) \cdot (U_2 U_1);$
- б)  $U_{\text{BbIX}} = -(R_2/R_1) \cdot (U_2 U_1);$

B)  $U_{\text{BbIX}} = (R_2/R_1) \cdot (U_2 - U_1);$ 

Γ)  $U_{\text{BbIX}} = (1 + (R_2/R_1)) \cdot (U_1 - U_2);$ 

д) 
$$U_{\text{BbIX}} = [(R_2/R_1)/(1 + (R_2/R_1))] \cdot (U_2 - U_1).$$

10. Рассчитайте ток схемы преобразователя напряжение-ток, текущий по резистору *R*, используя модель идеального операционного усилителя:

a) U<sub>BbIX</sub>/(10 кОм); б) U<sub>BbIX</sub>/[(10 кОм) + R]; в) U<sub>BbIX</sub>/R; г) E/[(10 кОм) + R]; д) E/R.

11. Рассчитайте ток, протекающий через резистор R2 = 1,21 кОм преобразователя напряжение-ток, используя модель идеального ОУ:

a)  $E/R_2$ ; 6)  $(E - 1,22)/R_1$ ; B)  $1,22/R_2$ ;  $\Gamma$ )  $E/(R_1 + R_2)$ ;  $\pi$ )  $1,22/R_1$ .







12. Рассчитайте коэффициент передачи по напряжению схемы, используя модель идеального операционного усилителя:





13. Выходное напряжение схемы на идеализированном ОУ при  $U_1 = 1$  B,  $U_2 = 2$  B,  $R_2 = 5 \cdot R_1$  равно \_\_\_\_\_ B.



14. Выберите значения модулей коэффициентов усиления по входам *U*<sub>1</sub>, *U*<sub>2</sub>, *U*<sub>3</sub>:

- a) 2;
- б) 5;
- в) 1.



15. Рассчитайте значение модуля коэффициента передачи по напряжению интегратора на частоте квазирезонанса.

16. Докажите, что на частотах, превышающих частоту квазирезонанса, скорость изменения АЧХ интегратора приближается к 20 дБ на декаду. 17. Как рассчитать частоту среза ФНЧ первого порядка?

18. Каким образом в ФНЧ первого порядка независимо изменять частоту среза и коэффициент усиления по напряжению на постоянном токе?

19. Как грамотно отмасштабировать оси АЧХ при использовании анализатора Боде в режиме *Default* по *Y-Scale*, если известна частота среза и есть желание максимально полезно использовать выделенное для характеристики поле графика?

20. Какую полезную информацию можно получить, если при анализе работы ФНЧ на прямоугольном входном сигнале просматривать спектры входного и выходного сигналов с помощью анализатора спектра?

21. Даны две схемы фильтров первого порядка: ФНЧ и ФВЧ. Различаются ли у них частоты среза, если использованы одинаковые элементы? Докажите.

22. Изобразите АЧХ и ФЧХ исследуемых схем ФНЧ и ФВЧ.

23. Как определить частоту квазирезонанса для цепи Вина?

24. Приведите алгоритм определения добротности.

## Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- схемы и результаты эксперимента;
- теоретические расчеты искажений;
- сравнение результатов теории и эксперимента;
- выводы.

## Лабораторная работа № 8

# Функциональное применение операционных усилителей (нелинейные преобразования сигналов)

## Цель работы

Овладение методикой исследования в программно-аппаратной среде *NI ELVIS* характеристик и параметров схем на ОУ, обеспечивающие различные линейные преобразования входных сигналов.

#### Задачи исследования

1. Подготовка к лабораторной работе, т. е. формирование знаний и пониманий процессов, происходящих в исследуемой схеме.

2. Проработка разделов порядка выполнения работы. Поиск ответов по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?

3. Приобретение навыков исследования схем с ОУ с использованием функционального генератора (*FGEN*), источников перестраиваемых напряжений (*VPS*), универсального вольтметра (*DMM*) и осциллографа (*Scope*).

4. Обработка полученных экспериментальных данных, подготовка и защита отчета.

## Краткие сведения из теории

Наряду с линейными преобразованиями входных сигналов в схемотехнике аналоговой электроники широко используются различные нелинейные преобразования.

При нелинейных преобразованиях нарушается известный принцип суперпозиции (наложения), который в предыдущих исследованиях широко использовался, когда можно было просматривать работу схемы на отдельных сигналах, а полная картина складывалась как сумма отдельных процессов.

Что касается аналитического описания работы схем, то в отличии от линейных преобразований, для нелинейных преобразований отсутствует общее решение нелинейных дифференциальных уравнений, что также резко затрудняет анализ таких схем. Таким образом, вся прелесть линейного анализа может быть задействована только для отдельных линейных участков нелинейных функций. Да и то необходимо быть осторожным, так как сумме входных сигналов в общем случае может не соответствовать сумма выходных.

К типовым нелинейным функциям относят различные виды ограничения сигналов: односторонние и двухсторонние, со сдвигом и без такового, выделение модуля сигнала (двухполупериодное выпрямление), произведение двух и более сигналов, их экспоненциальные, логарифмические и любые другие нелинейные зависимости, как гладкие, так и кусочно-линейно-аппроксимированные.

Операционные усилители широко используются для формирования различных нелинейных функций. Чтобы схема на ОУ их выполняла, должен быть применен или нелинейный режим работы ОУ, или нелинейность должна присутствовать в цепи его обратной связи при линейном усилителе, или нелинейными свойствами (должны обладать и те, и другие).

#### Компараторы напряжений на ОУ

Компараторами называются устройства сравнения значений двух аналоговых сигналов. Результаты сравнения в простейшем случае индицируются различными уровнями выходных напряжений. Для компараторов в интегральном исполнении (в сериях 521; 554; 597 и др.) эти уровни соответствуют логическим уровням нуля и единицы для различных логик.

#### Нуль-компаратор

Одна из возможных схем нуль-компаратора изображена на рис. 5.73.



Рис. 5.73. Нуль-компаратор на ОУ

Известно, что операционный усилитель имеет конечное значение дифференциального коэффициента усиления и его амплитудная характеристика приведена на рис. 5.74.



Рис. 5.74. Типичный вид амплитудной характеристики ОУ для двухполярного и симметричного питания

Протяженность линейного участка на амплитудной характеристике чрезвычайно мала. Так, при усилении ОУ, равному 100 000, и ограничению на уровне ±10 В ширина его будет составлять всего лишь 200 мкВ. Легко видеть, что при увеличении коэффициента усиления этот участок еще суживается, а для идеализированного ОУ, у которого усиление стремится к бесконечности, ширина стремится к нулю. Последнее означает, что переключение идеального усилителя будет происходить при нулевом дифференциальном входном напряжении. Амплитудная характеристика такого нуль-компаратора приведена на рис. 5.75.



Рис. 5.75. Амплитудная характеристика нуль-компаратора

Если теперь подать на вход компаратора синусоидальный сигнал, то на его выходе будет сформировано прямоугольное знакопеременное напряжение (рис. 5.76).

Конечно, такие красивые графики справедливы только в идеальном случае, когда ОУ к тому же имеет бесконечно большое значение скоро-

сти нарастания. В реальной схеме фронты прямоугольных импульсов будут иметь конечное время установления.



Рис. 5.76. Работа компаратора как преобразователя гармонического сигнала в прямоугольный

Естественно, что преобразовательная характеристика нулькомпаратора будет меняться, если поменять местами входы ОУ. Как в этом случае будет выглядеть амплитудная характеристика такого компаратора?

## Компараторы с ненулевым опорным напряжением

Преобразовательная характеристика компаратора будет также изменена, если подпереть один из входов ОУ источником ЭДС-смещения той или иной полярности.

К примеру, если в схеме рис. 5.73 на инвертирующий вход относительно земли включен источник E положительной полярности, то переключение выходного напряжения будет происходить также при нулевом дифференциальном входном сигнале ОУ, т. е. при входном напряжении компаратора, равном значению E (рис. 5.77).

Из рисунка ясно, что при синусоидальном входном напряжении на выходе образуется сигнал прямоугольной формы, но с разными длительностями участков положительной и отрицательной полярности.



Рис. 5.77. Амплитудная характеристика компаратора с напряжением смещения на инвертирующем входе ОУ

## Компараторы с гистерезисом

Такие компараторы в литературе еще называются компараторами с защелкой. Природа их появления такова. При неизменном опорном напряжении во всех выше обозначенных схемах компараторов малейшие изменения входного напряжения в окрестностях значения опорного напряжения будут приводить к многочисленным изменениям сигнала на выходе, что не всегда удовлетворяет потребностям пользователя.

Очень часто требуется, чтобы компаратор принял решение, например, о превышении входного напряжения относительно опорного и не менял бы его, если входное напряжение стало бы меньше на определенное пользователем значение.

Таким образом, речь идет о наличии на амплитудной характеристике компаратора гистерезиса (рис. 5.78).



Рис. 5.78. Амплитудная характеристика компаратора с гистерезисом

Реализация амплитудной характеристики компаратора с гистерезисом осуществляется за счет введения в схему с ОУ положительной обратной связи, например, как это показано на рис. 5.79.



Рис. 5.79. Компаратор с гистерезисом

Пояснить работу такой схемы можно следующим образом. Пусть при включении источников питания схемы E1 и E2 за счет переходного (регенеративного) процесса из-за наличия положительной связи на выходе ОУ установится напряжение, близкое к значению E1 = +9 В. Тогда с учетом передачи по напряжению цепи обратной связи

$$\gamma = R22/(R22 + R23)$$

на неинвертирующем входе ОУ установится напряжение, например, 1 В. При нулевом входном напряжении схема поддерживает указанное выше выходное напряжение, близкое к *E*1 (точка 1).

При увеличении входного напряжения положительной полярности переключение выходного напряжения на уровень, близкий по значению к E2 = -9 B, произойдет при Uвх = 1 B (точка 2). Дальнейшее повышение входного напряжения не приведет к изменениям выходного напряжения (область 3). Как только на выходе схемы установится отрицательное напряжение, так на инвертирующем входе ОУ будет действовать напряжение –1 B. Последнее означает, что область 3 продолжится до входного напряжения –1B, при котором компаратор сработает (точка 4), и его выходное напряжение вновь станет положительным и близким к значению +9 B (область 5).

Указанные рассуждения подтверждают, что на амплитудной характеристике действительно присутствует гистерезис, в данном примере шириной в 2 В, характеризующийся неоднозначностью установки выходного напряжения от значения входного напряжения в зоне гистерезиса, т. е. зависимостью уровня выхода от предыстории работы схемы. Если теперь на входе компаратора будет действовать гармоническое напряжение, то выходной сигнал будет соответствовать изображенному сигналу на рис. 5.80.



Рис. 5.80. Временные диаграммы сигналов компаратора с гистерезисом

#### Операционные выпрямители

В этом разделе речь пойдет о выпрямителях среднего значения, построенных с использованием ОУ, на выходе которых постоянная составляющая после фильтрации с использованием ФНЧ пропорциональна среднему значению выпрямленного входного напряжения.

Работа подобных выпрямителей, как правило, основывается на том, что при одной полярности входное напряжение с некоторым масштабным коэффициентом подается на выход, а при другом – выходное напряжение поддерживается равным нулю (однополупериодный выпрямитель) или инвертированному входному напряжению (двухполупериодный выпрямитель). В последнем случае, если обеспечено равенство масштабных коэффициентов для прямого и инвертированного входных сигналов, то устройство может применяться в качестве формирователя модуля входного сигнала: выходное напряжение оказывается пропорциональным абсолютному значению входного. В данной работе реализованы по разным выходам схемы: два однополупериодных выпрямителя (положительной полярности – выход 1, отрицательной полярности – выход 2) и один двухполупериодный выпрямитель – выход 3 (рис. 5.81).

В отличие от первых двух выходов третий выход – симметричный, т. е. не имеет общего соединения с землей, а поэтому недоступный наблюдению на этом лабораторном макете, так как на нем выводы *СНА*– и *СНВ*– уже соединены с землей. Тем не менее, на этом выходе формируется модуль входного напряжения и реализуется амплитудная характеристика следующего вида – рис. 5.82.



Рис. 5.81. Схема выпрямителя на ОУ



Рис. 5.82. Амплитудная характеристика схемы выделения модуля входного сигнала

Для упрощения анализа схемы считаем ОУ и диоды идеальными.

В этом случае для положительной полуволны входного синусоидального напряжения диод VD5 закрыт и на схеме замещения может быть представлен разрывом цепи, а диод VD6 – открыт и замещается закороткой (рис. 5.83).

Из приведенной схемы следует, что на первом выходе схемы напряжение отсутствует, так как оно снимается с точки суммирования, имеющей потенциал квазиземля из-за эквипотенциальности входов ОУ.

В это же время второй выход однополупериодного выпрямителя снимается с выхода ОУ. Значит  $U_{\text{вых2}} = -(R10/R23)$ , и мы наблюдаем на

выходе почти удвоенную по амплитуде полуволну отрицательной полярности.



Рис. 5.83. Схема замещения выпрямителя для входного напряжения положительной полярности

Для отрицательной полуволны входного напряжения схема замещения изображена на рис. 5.84.



Рис. 5.84. Схема замещения выпрямителя для входного напряжения отрицательной полярности

Рассуждая аналогично, имеем:  $U_{\rm BbIX2} = -(R9/R23)$ , а на первом выходе будет нулевое напряжение. Тогда становятся понятны временные диаграммы, изображенные на рис. 5.85 и поясняющие работу выпрямителя.



Рис. 5.85. Временные диаграммы работы выпрямителя на ОУ

Одной из важных характеристик выпрямителей является их преобразовательная характеристика в виде зависимости постоянной составляющей выходного напряжения от значений (действующих или амплитудных) входного синусоидального напряжения. В нашем случае в качестве ФНЧ, позволяющего ослабить гармоники (их можно просмотреть и проанализировать на анализаторе спектра *Dynamic Signal Analyzer* – *DSA*), присутствующие в спектре  $U_{\rm BbIX}$ , и качественно измерить выходное постоянное напряжение, выступает инерционность цифрового вольтметра *DMM* или измерителя осциллографа *Scope*. Необходимо проверить, насколько линейна такая характеристика исследуемой схемы выпрямителя.

## Формирователи нелинейных функций на ОУ

Выше отмечалась многочисленность подобных функциональных преобразований входных сигналов. В лабораторном цикле мы ограничимся исследованиями лишь некоторых из них.

Усилители с ограниченным размахом выходного напряжения используются в формирователях сигналов, цепях защиты, устройствах управления и контроля и т. д.

Если ограничение не вызвано самим ОУ (смотри его амплитудную характеристику и ранее проведенные исследования), то основными элементами усилителей-ограничителей на ОУ являются цепи с диодами или стабилитронами, включенные в отрицательную обратную связь усилителя.

Можно считать, что получение амплитудных характеристик в виде согласованного набора прямолинейных отрезков открывает путь формирования произвольной нелинейной зависимости между входным и выходным напряжениями за счет использования кусочно-линейной аппроксимации требуемой нелинейной функции.

В качестве примера рассмотрим схему простейшего усилителяограничителя (рис. 5.86). В этой схеме стабилитрон открывается, когда падение напряжения на резисторе в цепи обратной связи становится равным напряжению стабилизации, и в дальнейшем выходное напряжение не изменяется, несмотря на вариации входного напряжения.



Рис. 5.86. Усилитель-ограничитель с постоянными уровнями ограничения

Если открывается полупроводниковый диод, то выходное напряжение также практически стабилизируется на уровне около 0,7 В даже при изменениях входного напряжения.

Аналогично, при прямых напряжениях на диоде, меньших приблизительно 0,6 В, и тем более при обратном его включении, диод закрыт. В указанных выше ситуациях усиление схемы определяется сопротивлениями резисторов *R*12 и *R*15, стоящих в цепи обратной связи.

Такой усилитель-ограничитель характеризуется приведенной на рис. 5.87 амплитудной характеристикой, в первом приближении имеющей три прямолинейных участка, формирующей выходное напряжение с несимметричными уровнями ограничения.



Рис. 5.87. Амплитудная характеристика и временные диаграммы напряжений усилителя-ограничителя

## Простой логарифмический усилитель на ОУ

Формирование нелинейных функций при использовании кусочнолинейной аппроксимации применяется тогда, когда нет возможности использовать в схеме элементы или цепи с аналогичной или обратной зависимостью их BAX.

Если такая возможность существует, то открывается путь получения «гладких» нелинейных функций за счет включения таких элементов или цепей в обратную связь ОУ. Пусть, например, нелинейный элемент (НЭ), ВАХ которого имеет вид U = f(I), включен в цепь обратной связи между выходом и инвертирующим входом ОУ (рис. 5.88).

Так как через нелинейный элемент протекает ток  $I = U_{\text{BX}}/R$ , то

$$U_{\rm BbIX} = -U = -F(I) = -F(U_{\rm BX}/R)$$

Полученное выражение означает, что выходное напряжение является функцией от входного по такой же зависимости, по какой напряжение нелинейного элемента зависит от его тока. Значит, чтобы спроектировать схему логарифмического усилителя, необходимо в качестве нелинейного элемента включить p-n-переход, для которого, как известно, при малых токах напряжение  $U \cong m \cdot \varphi_T \cdot \ln(I/I_0)$ . В этом выражении m – коэффициент, зависящий от материала;  $\varphi_T$  – температурный потенциал, равный при комнатной температуре приблизительно 25 мВ; I – ток перехода, задаваемый в схеме входным напряжением и сопротивлением R;  $I_0$  – тепловой ток.



Рис. 5.88. Формирователь нелинейных функций с нелинейным элементом в цепи отрицательной обратной связи

В простых схемах логарифмических усилителей в качестве *p*–*n*-перехода используется полупроводниковый диод. В этом случае предпочтение следует отдать диоду Шоттки (рис. 5.89).



Рис. 5.89. Логарифмический усилитель на ОУ

Так как логарифмы не существуют для отрицательных значений, то рабочей областью на амплитудной характеристике является четвертый

квадрант декартовой плоскости, а входное напряжение должно быть положительной полярности.

Ошибки логарифмирования в этой схеме обусловлены многими факторами. Они вызываются влиянием сопротивления базы p-nперехода, нарушающего логарифмический закон между током и напряжением. Влияет также неидеальность ОУ и, прежде всего, его входные токи и напряжение смещения. Погрешность обуславливается и температурным дрейфом выходного напряжения из-за зависимостей от температуры обратного (теплового) тока диода и дрейфом параметров ОУ.

## Порядок выполнения работы

1. Включите питание для NI ELVIS.

2. Запустите программное обеспечение *NI ELVIS*; после инициализации откройте панель комплекта виртуальных измерительных приборов.

## Исследование схем компараторов напряжения

Исследование нуль-компаратора:

1. Соберите на основе домашней подготовки к работе схему нулькомпаратора, аналогичную схеме, изображенной на рис. 5.73, но имеющей в отличие от нее вид амплитудной характеристики, показанной на рис. 5.90.



Рис. 5.90. Амплитудная характеристика нуль-компаратора

2. Вызовите из меню регулируемые источники питания (*VPS*) и подключите источник *Supply*+ к входу компаратора, а его выход присоедините к каналу *CHB*+ осциллографа, также вызвав его из меню приборов.

3. Произведите измерение напряжения срабатывания компаратора. С этой целью обнулите с помощью *Reset* значение напряжения источника *Supply*+ и зафиксируйте значение выходного напряжения компаратора. Затем увеличивайте напряжение *Supply*+ с шагом (инкрементом), воз-

можным для источника. Если при напряжении несколько десятков милливольт компаратор не срабатывает, то необходимо вместо источника *Supply*+ подключить источник *Supply*-. Если компаратор сработал при использовании источника *Supply*+, то снова обнулите его, а затем увеличивайте его напряжение от нуля с шагом 10 милливольт до момента срабатывания компаратора. Это напряжение в первом приближении соответствует напряжению срабатывания компаратора. При необходимости аналогичную процедуру необходимо произвести с напряжением источника *Supply*-. Почему у реального нуль-компаратора напряжение срабатывания не равно нулю? Отразите ответ по этому вопросу в отчете. Соответствуют ли полученные данные заказанной амплитудной характеристике?

4. Изучаем временные диаграммы сигналов компаратора, поясняющие его работу. Переберите схему, подав на вход сигнал с генератора. Установите частоту 1 kHz, амплитуду 2,5 В. Просмотрите и зафиксируйте временные диаграммы компаратора при двух режимах: генерации синусоидального и треугольного напряжений. Подтверждают ли временные диаграммы требуемый вид амплитудной характеристики и полученное ранее напряжение срабатывания. Если имеет место существенное несовпадение результатов, то объясните причины их расхождений.

Исследование компаратора с ненулевым опорным напряжением:

1. Соберите схему компаратора, изображенную на рис. 5.91.



Рис. 5.91. Схема компаратора
2. Инициируйте для определения напряжения срабатывания компаратора виртуальные лицевые панели регулируемого источника *VPS* и осциллографа *Scope*. Обнулите с помощью *Reset* значение напряжения источника *Supply*+.

3. Установите значение опорного напряжения на инвертирующем входе ОУ равное +1 В, изменяя сопротивление потенциометра *R*22 и используя канал *СНА*+ осциллографа (при измерении привлекайте курсор).

4. Определите значение выходного напряжения компаратора и зафиксируйте его. Поясните, почему оно такое в проведенном эксперименте.

5. Установите значение напряжения *Supply*+ несколько ниже, чем 1 В, учитывая результаты исследований, только что проведенных по схеме нуль-компаратора. Следите, чтобы при этом компаратор не сработал.

6. Повышайте с возможно меньшим шагом напряжение *Supply*+ до момента срабатывания компаратора и зафиксируйте напряжение срабатывания. Как соотносится это напряжение с выставленным ранее опорным напряжением? Сделайте выводы в отчете.

7. Подключите на вход компаратора генератор и вызовите его из меню. Установите частоту 1 kHz, амплитуду 2,5 В. Просмотрите и зафиксируйте временные диаграммы компаратора при двух режимах: генерации синусоидального и треугольного напряжений. Подтверждают ли временные диаграммы требуемый вид амплитудной характеристики и полученное ранее напряжение срабатывания. Если имеет место существенное несовпадение результатов, то объясните причины их расхождений.

Исследование схемы компаратора с гистерезисом:

1. Соберите схему компаратора, изображенную на рис. 5.79.

2. Вызовите из меню регулируемые источники питания (VPS) и осциллограф Scope. Обнулите с помощью Reset значение напряжения источника Supply+ и зафиксируйте значение выходного напряжения компаратора. Временно подключите канал CHB+ осциллографа к инвертирующему входу операционного усилителя и с помощью потенциометра R22 установите напряжение +1 В или –1 В (используйте при измерениях курсор канала) в зависимости от значения выходного напряжения.

3. Проведите эксперимент, чтобы снять амплитудную характеристику усилителя. При этом воспользуйтесь методикой мысленного эксперимента, изложенной в теоретическом разделе. В ходе эксперимента используйте источники *Supply*+ и *Supply*–. Измерение значений входного и выходного напряжений осуществляйте, используя курсоры осциллографа. Полученные данные занесите в таблицу. Определите напряжения срабатывания компаратора и рассчитайте ширину зоны гистерезиса.

4. Измените с помощью потенциометра *R*22 напряжение на инвертирующем входе ОУ (значение напряжения выберите сами). Проведите эксперимент, используя методику предыдущего пункта. Определите напряжения срабатывания компаратора и рассчитайте ширину зоны гистерезиса. Чем определяются напряжения срабатывания компаратора и ширина зоны гистерезиса?

5. Соберите схему компаратора, изображенную на рис. 5.92. По изложенной выше методике проведите исследование схемы, определив ее амплитудную характеристику и изучив временные диаграммы сигналов при входном гармоническом напряжении, полученном с генератора. Результатами исследований являются: расчетные выражения, определяющие работу схемы, теоретические и экспериментальные значения напряжений срабатывания и ширина зоны гистерезиса, временные диаграммы сигналов.



Рис. 5.92. Схема компаратора с положительной обратной связью

### Исследование схемы операционного выпрямителя

1. Соберите схему операционного выпрямителя, изображенную на рисунке 5.81.

2. Вызовите из меню генератор *FGEN* и осциллограф *Scope*. Установите частоту гармонического сигнала 1 kHz и амплитуду 2,5 B. Какова ожидаемая амплитуда сигналов, которые будут наблюдаться на выходах выпрямителя? Определите и зафиксируйте эти значения.

3. Получите временные диаграммы сигналов, действующие на входе и выходах (Вых. 1 и Вых. 2) выпрямителя, используя дважды два

канала *СНА*+ и *СНВ*+ осциллографа. В отчете объедините и синхронизируйте полученные временные диаграммы сигналов.

4. Получите данные по преобразовательной характеристике двухполупериодного выпрямителя  $U_{\rm BMX=} = f(U_{\rm BX-})$ , изменяя амплитуду входного гармонического напряжения ( $U_{\rm BX-}$ ) от 2,5 до 1 В с интервалом 0,1 В и измеряя постоянную составляющую выходного напряжения ( $U_{\rm BMX=}$ ) с помощью вольтметра постоянного тока. Не забудьте отключить осциллограф, чтобы избежать конфликтов на измерительных каналах *NI ELVIS*. Полученные данные сведите в таблицу, постройте график и сделайте выводы о линейности характеристики.

## Исследование ограничителя на ОУ

1. Соберите схему ограничителя, изображенную на рис. 5.86.

2. Вызовите из меню регулируемые источники питания (VPS) и осциллограф Scope.

3. Получите данные по амплитудной характеристике ограничителя, изменяя входное напряжение от 1 до 7 В с интервалом в 1 В источника *Supply*+ и измеряя выходное напряжение с помощью измерителей осциллографа. Затем используйте источник *Supply*- и продолжите исследования, изменяя входное напряжение от –1 до –7 В с интервалом в –1 В. Полученные данные сведите в таблицу, постройте график и сделайте выводы о соответствии эксперимента и теории.

4. Отключите регулируемые источники питания (*VPS*), и вместо них на вход схемы подайте максимальное по амплитуде напряжение (2,5 В) гармонического колебания на частоте 1 kHz с генератора *FGEN*.

5. Определите по осциллограмме выходного напряжения, почему не работает стабилитрон *VD*3, так как на ней отсутствует ограничение на соответствующем уровне его стабилизации.

6. Переберите схему ограничителя, обращая внимание на резисторы R11, R12, R13, которые можно поставить в цепь обратной связи ограничителя так, чтобы стабилитрон VD3 пробивался ( $U_{\rm CT}$  приблизительно (5,1÷5,6) В в разных макетах) и участвовал при ограничении выходного сигнала. Установите нужный резистор R в схему.

7. Получите временные диаграммы входного гармонического и выходного двухсторонне-ограниченного напряжений. Определите, соответствуют ли они изложенной выше теории работы схемы ограничителя.

## Исследование логарифмического усилителя на ОУ

1. Соберите схему логарифмического усилителя, изображенную на рис. 5.89.

2. Вызовите из меню регулируемые источники питания (*VPS*) и универсальный вольтметр *DMM*.

3. Установите *VPS* напряжение  $U_{BX} = 0$  В и запишите значение выходного напряжения  $U_{BbIX}$  в память *DMM*, как напряжение нуля, нажав кнопку *Null* на *DMM*.

4. Регулируя входное напряжение *VPS*, заполните следующую таблицу:

Таблица 2

$U_{\rm BX},{ m B}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$U_{\rm BbIX},{ m B}$							
$U_{\rm Bbix  PAC4},  { m B}$							

5. Для расчета значений  $U_{\rm BbIX. \ PACY}$  воспользуйтесь следующим соотношением:

$$U_{\rm Bbix} = -m \cdot \varphi_{\rm T} \cdot \ln \left( \frac{U_{\rm BX}}{I_0 \cdot R} \right),$$

где m = 1, 1 - коэффициент, зависящий от материала;

 $\phi_{\rm T} = (25 \div 30) \, {\rm MB} - {\rm температурный потенциал;}$   $I_0 = 2 \, {\rm MkA} - {\rm тепловой ток;}$  $R = R_{15}.$ 

## Контрольные вопросы

1. Какие функции, обозначенные ниже и реализуемые в устройствах на ОУ, относятся к нелинейным функциям:





2. Определите соответствие между названиями устройств на ОУ (1-я группа) и видами функций (2-я группа), отображенных по порядку в вопросе 1.

1-ая группа:

1. Схема выделения модуля (двухполупериодный выпрямитель гармонических сигналов).

2. Двухсторонний ограничитель.

3. Нуль-компаратор.

4. Логарифматор.

2-ая группа:

функции: а) б) в) г)

3. Выберите условия, при которых может быть обеспечено нелинейное преобразование входного сигнала в схемах с ОУ:

a) при линейном режиме работы ОУ и линейных элементах в цепях обратной связи;

б) при линейном режиме работы ОУ и нелинейных элементах в цепях обратной связи;

в) при нелинейном режиме работы ОУ и линейных элементах в цепях обратной связи;

г) при нелинейном режиме работы ОУ и нелинейных элементах в цепях обратной связи.



a)  $U_{\text{BbIX}} = f(U_{\text{BX}}/R);$  6)  $U_{\text{BbIX}} = -f(U_{\text{BX}}/R);$ b)  $U_{\text{BbIX}} = K_{\text{BbIX}} = -f(U_{\text{BX}}/R);$  5. Установите правильное соответствие между схемами на идеализированных ОУ и видами, осуществляемых в них нелинейных преобразований:

1-я группа:

1. Схема выделения модуля (двухполупериодный выпрямитель гармонических сигналов).

2. Двухсторонний ограничитель.

3. Нуль-компаратор.

2-я группа:



6. Выберите из предложенных вариантов амплитудных характеристик (AX) схемы ту, которая соответствует ее работе с идеальным операционным усилителем?



е) АХ отсутствует

Uвx

7. На входе схемы действует гармонический сигнал.

Какую функциональную задачу решает схема?

а) однополупериодное выпрямление для получения отрицательного выходного напряжения;



б) однополупериодное выпрямление для получения положительного выходного напряжения;

в) двухполупериодное выпрямление для получения отрицательного выходного напряжения;

г) двухполупериодное выпрямление для получения положительного выходного напряжения.

8. В схеме генератора прямоугольных импульсов по инверсному входу выполняется функция компаратора с гистерезисной амплитудной характеристикой. Выберите из предложенных характеристик правильную и поясните свой выбор.





9. Как изменятся временные диаграммы сигналов, поясняющих работу операционного выпрямителя, если вместо резистора R23 с сопротивлением 5,1 кОм установить резистор R15 = 10 кОм? Приведите исправленные диаграммы напряжений.

10. В схеме усилителя-ограничителя, изображенной на рис. 5.84, убрали резистор *R*12. Как теперь будет выглядеть амплитудная характе-

ристика схемы? Приведите для измененной схемы временные диаграммы входного гармонического напряжения и выходного напряжения.

11. В схеме формирователя нелинейной зависимости выходного сигнала от входного, в отличие от изображенной на рис. 5.88, нелинейный элемент (НЭ) и резистор R поменяли местами. Функциональная зависимость элемента между его током и падением напряжения на нем осталась прежней. Докажите, какая будет зависимость выходного напряжения от входного.

12. Какую функцию над входным сигналом выполняет схема, изображенная на рисунке? Выведите условие, при выполнении которого переключается выходное напряжение.



13. Приведите схему нуль-компаратора, которая реализует следующий вид амплитудной характеристики.



14. Приведите схему компаратора, которая реализует следующий вид амплитудной характеристики.



## Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- схемы и результаты эксперимента;
- теоретические расчеты искажений;
- сравнение результатов теории и эксперимента;
- выводы.

## Лабораторная работа № 9

# Автогенераторы периодических колебаний на операционных усилителях

### Цель работы

Овладение методикой исследования в программно-аппаратной среде *NI ELVIS* схем автогенераторов на ОУ, генерирующих гармонические и прямоугольные колебания.

### Задачи исследования

1. Подготовка к лабораторной работе, т. е. формирование знаний и пониманий процессов, происходящих в исследуемой схеме.

2. Проработка разделов порядка выполнения работы. Поиск ответов по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?

3. Приобретение навыков исследования схем с ОУ с использованием функционального генератора (*FGEN*), осциллографа (*Scope*), анализатора амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик – АЧХ/ФЧХ (*Bode Analyzer*) и анализатора спектра (*Dynamic Signal Analyzer* – *DSA*).

4. Обработка полученных экспериментальных данных, подготовка и защита отчета.

### Краткие сведения из теории

Исследуемые в этой лабораторной работе схемы принципиально отличаются от всех ранее анализируемых схем лабораторного цикла по аналоговой электронике. Отличительной особенностью изучаемых ранее схем, какие бы они не были пассивные или активные и какие бы преобразования они не выполняли, было то, что они требовали наличия на их входах сигналов. Другими словами, все схемы осуществляли определенные линейные или нелинейные преобразования над входными или выходными сигналами, причем пассивные схемы осуществляли их без привлечения источников питания.

В этой лабораторной работе Вы исследуете другой класс схем – это генераторы электрических сигналов, которые сами служат источниками измерительных, синхронизирующих и управляющих сигналов для схем аналоговых, импульсных и цифровых устройств. В отличие от различ-

ных усилительных и преобразовательных схем, если исключить у генераторных схем задачи их управления, синхронизации, модуляции и т. п., в генераторах отсутствует входы, куда ранее в предыдущих схемах извне подавался сигнал.

Существует следующее определение: генератором электрических сигналов называется устройство, посредством которого энергия источника питания преобразуется в электрические колебания определенной формы с заданной амплитудой и частотой. Однако такое определение подойдет и для усилительных устройств. На наш взгляд, необходимо добавить, что такое преобразование осуществляется исключительно за счет внутренних ресурсов схемы и при отсутствии традиционного входа и входного сигнала на нем. Говоря по существу, процессы в любой схеме усилителя или преобразователя входных сигналов описываются дифференциальным уравнением с правой частью. Процессы же в автогенераторах при указанных выше ограничениях будут описываться однородными дифференциальными уравнениями, т. е. с правой нулевой частью. Из этого четко подтверждается предыдущий вывод: параметры сигналов в генераторе определяются параметрами элементов его схемы.

В общем случае автогенератор генерирует сигналы произвольной формы. Но наиболее часто возникает потребность в сигналах гармонической и прямоугольной форм. Такие автогенераторы и будут исследоваться в данной лабораторной работе.

### Задачи исследования

При исследовании любой схемы автогенератора возникает следующий состав вопросов:

1. При каких условиях возникают колебания в исследуемой схеме автогенератора?

2. По какому закону нарастают колебания от их возникновения до стационарной амплитуды?

3. Как определить стационарное (установившееся) значение выходного напряжения автогенератора?

4. Насколько устойчивы параметры установившегося выходного напряжения автогенератора и прежде всего его частоты и амплитуды? Другими словами, речь идет о стабилизации частоты и амплитуды напряжения автогенератора.

Указанные задачи являются классическими. Они могут быть дополнены вопросами, специфическими для конкретной исследуемой схемы.

## RC-автогенератор синусоидальных колебаний с цепью Вина

## О составе автогенератора

Прежде всего, Вас должен заинтересовать ответ на вопрос: «А что должно обязательно входить в состав схемы любого автогенератора гармонических колебаний?». Рассуждения на этот счет могут быть следующими.

Раз в идеальном случае автогенератор должен генерировать синусоидальные колебания на одной избранной пользователем частоте, то в составе схемы мы должны обнаружить линейную избирательную цепь и избирательный усилитель на ней построенный.

Чтобы обеспечить условия неустойчивости такого усилителя, последний должен быть охвачен цепью положительной обратной связи на частоте квазирезонанса и, к тому же, иметь на этой частоте петлевое усиление, превышающее единицу. Если эти условия имеют место, то будут нарастать колебания в автогенераторе по тому или иному закону.

Однако в линейной схеме нарастание колебаний будет происходить до бесконечности, так как линейные элементы не изменяют своих параметров от значений тока или напряжения. Значит, в составе схемы любого автогенератора должна присутствовать нелинейность, которая и возьмет на себя ответственность за получение требуемой стационарной амплитуды гармонического колебания.

Но и это еще не все. Если заинтересоваться стабилизацией значения (действующего, амплитудного, средневыпрямленного) выходного напряжения автогенератора, то в схеме можно различить дополнительную цепь отрицательной обратной связи по выбранному интегральному или амплитудному значению сигнала, реализующую формирование отрицательной производной коэффициента передачи усилителя генератора от значения выходного напряжения.

Схема *RC*-автогенератора синусоидальных колебаний с цепью Вина изображена на рис. 5.93.

Анализируя схему *RC*-автогенератора, находим в ее составе избирательную цепь, которую можно исследовать на ее частотные свойства, рис. 5.94. Найденная цепь и носит название «цепь Вина».



Рис. 5.93. Автогенератор синусоидальных колебаний с цепью Вина



Рис. 5.94. Цепь Вина и схема исследования ее АЧХ и ФЧХ

Как видно из рис. 5.93, кроме цепи Вина в составе автогенератора находится неинвертирующий усилитель на ОУ (обозначен на схеме пунктиром). Цепь и неинвертирующий усилитель образуют петлю положительной обратной связи на частоте квазирезонанса, когда передача цепи вещественна, а фазовый сдвиг равен нулю. С другой стороны, неинвертирующий усилитель образуется, когда ОУ охватывается цепью последовательной отрицательной обратной связью по напряжению через сопротивления R23 и R22. Г-образный четырехполюсник, как цепь положительной обратной связи, и четырехполюсник (рис. 5.93) из R23 и R22, как цепь отрицательной обратной связи, образуют мостовую схему, баланс которой зависит от значения сопротивления R22 (рис. 5.95). При разбалансировке моста в ту или иную сторону изменяется фаза входного дифференциального напряжения ОУ на противоположную.



Рис. 5.95. Мостовая схема в RC-автогенераторе

Избирательный усилитель в схеме автогенератора просматривается в следующем виде (рис. 5.96).



Рис. 5.96. Избирательный усилитель с Г-образной RC-цепью Вина и схема его исследования

В схеме приведенного избирательного усилителя условие баланса фаз выполняется. Действительно, фазовый набег определяется как сумма фазовых сдвигов, вносимых цепью Вина и схемой на ОУ при его неинвертирующем включении. Но, как известно, при обозначенных ограничениях оба фазовых сдвига равны нулю. Для того чтобы схема превратилась в автогенератор, выполнение условия баланса фаз является необходимым, но не достаточным. Для этого петлевое усиление вдоль цепи положительной обратной связи автогенератора должно превышать единицу. Это произойдет, когда  $R23 > 2 \cdot R22$ .

Действительно, петлевое усиление будет больше единицы, т. е.  $T = K_{\text{нин}} \cdot A_0 > 1$ , при коэффициенте передачи цепи Вина на частоте квазирезонанса  $A_0 = 1/3$ , когда коэффициент передачи по напряжению не-инвертирующего усилителя  $K_{\text{нин}} = 1 + R23/R22$  будет больше трех.

И, наконец, попытаемся разобраться, где в автогенераторе находится нелинейность. В приведенной схеме цепи обратных связей собраны из линейных элементов. Значит, ограничение амплитуды выходных колебаний будет происходить из-за нелинейности амплитудной характеристики ОУ (смотри ранее проведенные исследования амплитудных характеристик).

#### Условия возникновения колебаний

Классическим способом решения этой задачи является составление дифференциального уравнения. Из-за малости амплитуд сигналов при их возникновении дифференциальное уравнение будет линейным (точнее, линеаризованным), несмотря на наличии нелинейности амплитудной характеристики ОУ. Для данной схемы уравнение удобно составлять для напряжения U, действующим на неинвертирующем входе ОУ (рис. 5.93), считая операционный усилитель идеальным.

Ток, протекающий через C13 и R17 цепи Вина, если R16 = R17 = R и C12 = C13 = C, равен:

$$I = \frac{U}{R} + C \cdot \frac{dU}{dt}.$$

Тогда

$$U_{\rm BMX} = U + U_C + U_R = U + U_R + R \cdot C \cdot \frac{dU}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int \left(\frac{U}{R} + C \cdot \frac{dU}{dt}\right) \cdot dt \,.$$

С другой стороны,

$$U_{\rm BMX} = U \cdot K_{\rm HMH}.$$

Учитывая полученные выражения, имеем дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2U}{dt^2} + \frac{3 - K_{\text{HUH}}}{\tau} \cdot \frac{dU}{dt} + \omega_0^2 \cdot U = 0,$$

где  $\tau = R \cdot C$  – постоянная времени;  $\omega_0 = \frac{1}{\tau}$  – частота квазирезонанса цепи Вина.

Характеристическое уравнение принимает вид:

$$a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 = 0$$
,

где  $a_2 = 1; a_1 = \frac{(3 - K_{\text{нин}})}{\tau}; a_0 = \omega_0^2$ , а его решение (корни) равно:

$$p_{1,2} = -\frac{a_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a_1}{2}\right)^2 - a_0}$$
.

Согласно полученным корням автогенератор будет неустойчивым, если при  $a_2 > 0$   $a_1$  – отрицательно. Последнее происходит, когда

$$K_{\rm HИH} = 1 + \frac{R_{23}}{R_{22}} > 3,$$

т. е. при  $R_{23} > 2 \cdot R_{22}$ , что и было использовано ранее.

Другими словами, любая система, а в нашем случае автогенератор, будет неустойчивой, если хотя бы один корень ее характеристического уравнения находится в правой части комплексной плоскости, т. е. имеет отрицательную вещественную часть. Именно в этом случае с течением времени амплитуда колебаний в линейной схеме будет неограниченно нарастать.

Обратим Ваше внимание, что анализ дифференциального уравнения на устойчивость «в малом» (по Ляпунову) приводит к широко используемым условиям неустойчивости, уже ранее нами использовавшимися.

Действительно, условие  $K_{\text{нин}} > 3$  легко переводится в условие, когда петлевое усиление  $T = K_{\text{нин}} \cdot A_0 > 1$ , учитывая что передача цепи Вина на частоте квазирезонанса  $A_0 = 1/3$ .

Во временной области, когда колебания только начали нарастать, и их амплитуда мала, система – линейна. Поскольку за период колебаний энергия, вносимая в колебательную систему, больше теряемой энергии, то амплитуда колебаний нарастает и нас начинает интересовать закон такого нарастания.

## По какому закону могут нарастать колебания в автогенераторе?

К сожалению, для решения этой задачи приходится составлять нелинейное дифференциальное уравнение, строгое решение которого в общем виде отсутствует.

Однако учитывая, что в автогенераторах обычно стараются использовать высокодобротные избирательные усилители, такое уравнение получается специфическим – с относительно малым коэффициентом *a*<sub>1</sub> при первой производной в дифференциальном уравнении второго порядка. Такие уравнения получили название уравнений Ван-дер-Поля. Именно для этих уравнений разработан ряд методов приближенных решений и, в частности, метод медленно меняющихся амплитуд.

Аналитические выкладки можно значительно упростить, если заинтересоваться только законом переходного процесса вблизи момента возникновения колебаний, когда можно воспользоваться линеаризованным дифференциальным уравнением.

Используя полученные в предыдущем разделе значения корней характеристического уравнения, зададимся получением ответа на вопрос: «Какой закон – колебательный или апериодический – может наблюдаться в непосредственной близости к моменту возникновения колебаний?».

Когда  $(a_1/2)^2 \ll (a_0)^2$ , то корни комплексно сопряженные. В этом случае от начала возникновения колебаний переходный процесс развивается как колебательный на частоте, незначительно отличающейся от частоты квазирезонанса цепи Вина (конечно, считая, что на этой частоте ОУ не вносит фазового сдвига, т. е. является идеальным). Однако, если декремент (подкоренное выражение корней характеристического уравнения) станет равным нулю, то, начиная с этого момента, процесс станет апериодическим.

Как нетрудно убедиться на основе простейших выкладок, это произойдет, когда коэффициент усиления по неинвертирующему входу  $K_{\text{нин}}$  будет больше пяти. Ясно, что переходный процесс будет происходить по гармоническому закону с нарастающей по экспоненте амплитудой при условии, если  $3 < K_{\text{нин}} < 5$ . При усилении  $K_{\text{нин}} > 5$  мы должны наблюдать апериодический закон нарастания.

Учитывая, что усиление  $K_{\text{нин}}$  легко изменяется за счет вариации сопротивления потенциометра *R*22, мы можем попытаться пронаблюдать разницу в работе автогенератора в двух указанных выше режимах. Правда, сделать это не так просто.

По мере нарастания амплитуды гармонического напряжения во время переходного процесса, связанного с возникновением колебаний в автогенераторе, из-за влияния нелинейности коэффициент передачи по напряжению падает. С физической точки зрения последнее означает, что введение энергии в колебательную систему автогенератора также уменьшается. Очевидно, что стационарное значение выходного напряжения в автогенераторе наступит при равенстве вносимой и теряемой энергий за период генерируемых колебаний. Такая ситуация будет иметь место, если коэффициент а<sub>1</sub> при первой производной дифференциального или характеристического уравнений станет равным нулю. Таким образом, нарастание колебаний заканчивается в рассматриваемой схеме при условиях, когда наряду с балансом фаз выполняется условие баланса амплитуд:

$$K_{\text{нин}} = 3$$
 или  $K_{\text{нин}} \cdot \mathbf{A}_0 = 1$ ,

где *К*<sub>нин</sub> – передача неинвертирующего усилителя по напряжению по первой гармонике выходного напряжения.

## К определению амплитуды установившихся колебаний

Выше отмечалось, что процесс установления стационарной амплитуды колебаний в автогенераторе обусловлен влиянием нелинейности, обязательно входящей в состав любого автогенератора. Из-за влияния нелинейности амплитудной характеристики схемы неинвертирующего включения ОУ по мере нарастания амплитуды гармонического колебания от периода к периоду возрастают нелинейные искажения выходного сигнала. Искажения формы сигнала особенно становятся заметными, когда амплитуда выходного сигнала достигает предельных значений на амплитудной характеристике схемы на ОУ. В этом случае выходное напряжение имеет явные признаки двухстороннего ограничения.

Чтобы Вы имели возможность самостоятельно осмыслить эти процессы для неинвертирующего включения ОУ, которое имеет место в рассматриваемой схеме автогенератора, приведем временные диаграммы сигналов по аналогичным процессам для инвертирующего включения ОУ. На рис. 5.97 изображается линейный режим работы, а на рис. 5.98 показан нелинейный режим, когда выходной сигнал при своем нарастании имеет явные признаки двухстороннего ограничения.

Для определения стационарной амплитуды выходных колебаний необходимо теоретически или экспериментально получить так называемую колебательную характеристику неинвертирующего усилителя, т. е. зависимость значения первой гармоники выходного напряжения (в общем случае несинусоидального из-за влияния указанной выше нелинейности) от значения входного гармонического напряжения. Мы трансформируем эту зависимость в виде  $K_1 = f(U)$ , где  $K_1$  определяется как отношение значения первой гармоники выходного напряжения к входному гармоническому напряжению U, действующему на неинвертирующем входе ОУ.



Рис. 5.97. Работа ОУ в линейном режиме



Рис. 5.98. Формирование отсечки выходного напряжения при заходе усилителя в нелинейный режим работы

В программно-аппаратной среде *NI ELVIS* измерение первой гармоники в спектре выходного напряжения более точно определяется с помощью анализатора спектра *DSA*.

Однако при относительно малых значениях нелинейных искажений сигнала (коэффициента *THD* при использовании анализатора спектра *DSA*), меньших, например, 10 %, можно без существенной погрешности подменить измерение первой гармоники измерением среднеквадратического (действующего) значения выходного напряжения (с. к. з).

Таким образом, под  $K_1$  в лабораторной работе мы будем подразумевать отношение с. к. з. (*RMS*) выходного напряжения к такому же значению входного. Чтобы не вносить дополнительной погрешности в измерение с. к. з. (*RMS*) напряжений из-за возможного присутствия в них постоянной составляющей, целесообразно определение значений проводить при закрытом входе осциллографа.

Экспериментальную зависимость  $K_1 = f(U)$  получаем, проводя исследования неинвертирующего усилителя как части автогенератора (рис. 5.99).



*Рис. 5.99. Схема для снятия колебательной характеристики неинвертирующего усилителя автогенератора* 

Затем используя условие баланса амплитуд, определяем значение стационарной амплитуды U, как координату точки пересечения кривой колебательной характеристики с линией обратной связи  $1/A_0 = 3$ . Эти построения проведены на рис. 5.100.



Рис. 5.100. Определение амплитуды стационарных колебаний

Обратим внимание, что при указанном виде колебательной характеристики полученное стационарное решение, как правило, является устойчивым. Действительно, если из-за любых дестабилизирующих факторов значение амплитуды U, например, уменьшится, то, возводя перпендикуляр в этой точке, получим значение усиления  $K_1$  больше трех. Тогда петлевое усиление станет больше единицы, и создадутся условия увеличения напряжения до стационарного значения.

Аналогичные рассуждения можно провести для случая первоначального отклонения от стационарной амплитуды в большую сторону. Однако, если при работе автогенератора стационарная точка «проскакивается», то стационарное решение является неустойчивым, а автогенератор работает в режиме прерывистой генерации. Но это уже более высокий пилотаж.

### Стабилизация амплитуды колебаний в автогенераторе

Более конкретно речь идет о стабилизации различных значений стационарных гармонических колебаний. Как известно, такими значениями могут быть амплитудное, действующее (среднеквадратическое), а также средневыпрямленное значения выходного напряжения автогенератора. При изучении устойчивости стационарного напряжения автогенератора было отмечено важное положение о том, что если по какимлибо причинам напряжение уменьшилось (увеличилось), необходимо, чтобы усиление неинвертирующего усилителя автогенератора увеличилось (уменьшилось).

На этом основании можно сделать вывод: для стабилизации выходного напряжения необходимо, чтобы в схеме реализовывалась отрицательная производная коэффициента передачи усилителя по напряжению, т. е. стабилизация напряжения сопряжена с наличием контура отрицательной обратной связи.

Среди возможных технических реализаций отметим две: с использованием в обратной связи инерционно-нелинейного элемента, как правило, малогабаритных ламп накаливания или термисторов или применением различных схем стабилизации с необходимым типом детектора (выпрямителя того или иного значения гармонического колебания) и регулятора на полевом транзисторе.

Примеры построения таких схем изображены на рис. 5.101 и 5.102 соответственно.

Для схемы на рис. 5.101 механизм стабилизации действующего значения выходного напряжения состоит в следующем. Если по какимлибо причинам выходное напряжение уменьшится, то уменьшится ток в цепи отрицательной обратной связи, в том числе и ток, протекающий по лампе накаливания. Как известно, при этом уменьшится ее сопротивление, а значит, и коэффициент отрицательной обратной связи. В свою очередь, это приведет к увеличению коэффициента усиления усилителя, а значит, и выходного напряжения.



Рис. 5.101. Автогенератор с инерционной нелинейностью



*Рис. 5.102. Стабилизация напряжения с использованием регулятора* на полевом транзисторе

Схема, показанная на рис. 5.102, в цепи отрицательной обратной связи содержит схему однополупериодного выпрямителя на VD1 для получения постоянной составляющей отрицательной полярности, которая за вычетом напряжения на стабилитроне VD2 управляет полевым транзистором, работающем в режиме электрически управляемого сопротивления, установленного в местную обратную связь неинвертирующего ОУ.

Стабилизация средневыпрямленного значения выходного напряжения происходит так. Если напряжение генератора уменьшилось, то уменьшилось постоянное напряжение на выходе выпрямителя и на затворе полевого транзистора. Полевой транзистор приоткрылся, сопротивление его канала уменьшилось, что привело к уменьшению глубины противосвязи для ОУ и увеличению усиления неинвертирующего усилителя, а значит, и выходного напряжения. Начав рассуждения с уменьшения выходного напряжения, мы, пройдя по цепи обратной связи, пришли к выводу, что схема стремится возвратить прежний уровень выходного напряжения.

## Автогенераторы прямоугольных колебаний на ОУ

### Общие положения

Прежде чем мы выйдем на конкретные схемы таких автогенераторов импульсных сигналов, подметим ряд особенностей сигналов прямоугольной формы (рис. 5.103).



Рис. 5.103. Разнополярное прямоугольное напряжение

Как видно из рисунка, для импульсного сигнала такой формы можно ввести следующие параметры: T = 1/f – период колебаний; f – частота следования;  $t_{\rm H}$  – длительность импульса;  $t_{\rm II}$  – длительность паузы;  $Q = T/t_{\rm H}$  – скважность. Если длительности импульса и паузы одинаковы, то скважность равна двум и для такого сигнала может быть использован термин «меандр».

Обратим внимание, что обозначенный сигнал является полигармоническим. Как известно, спектр его при разложении в ряд Фурье простирается до бесконечности. Поэтому никому в голову не придет синтезировать его как суммарный сигнал из напряжений гармоник, каждое из которых создается автогенератором соответствующего гармонического колебания.

Легко придти к выводу, что должны быть найдены другие пути создания импульсного генератора. Из рис. 5.103 следует, что идеализированное прямоугольное напряжение содержит участки с большой (бесконечно большой) производной – передний и задний фронты сигнала – и участки с малой (нулевой) производной – вершины импульса и паузы.

Пусть при t = 0 (жирная точка на графике рис. 5.103) была включена схема импульсного генератора. Как видно из рисунка, должен пройти быстрый процесс нарастания напряжения до некоторого максимального уровня  $+U_{\rm M}$ .

Значит, при включении состояние автогенератора должно быть неустойчивым за счет присутствия в схеме эффективно действующей положительной обратной связи. При этом закон формирования фронта может быть и апериодическим, и критическим, и даже колебательным, но относительно быстрым, что косвенно отражает слабую инерционность работы задействованных в регенеративном процессе элементов схемы.

Когда закончится процесс формирования фронта? Когда физически все время существующая в схеме положительная обратная связь, постепенно снижая петлевое усиление за счет нелинейности амплитудной характеристики, практически не «исчезнет» из-за того, что усилительные элементы, находящиеся в петле, потеряют свои усилительные свойства. К примеру, этот произойдет, когда во время регенеративного процесса часть транзисторов из усилительного режима перейдет в режим насыщения, а часть из усилительного режима в режим отсечки.

Итак, быстрые процессы формирования фронтов импульсного сигнала приводят к «выключению» усилительных свойств схемы и к достижению максимальных значений напряжений положительной или отрицательной полярности. Эти же процессы должны запустить «внутренние часы» импульсного автогенератора, ответственные за формирование длительностей импульса и паузы, а значит, периода и частоты следования импульсов.

Такие «часы» в большинстве схем автогенераторов обусловлены процессами перезаряда емкостей, имеющих исходные нулевые условия, доставшиеся им из конечных условий предыдущего аналогичного переходного процесса, так как емкости практически не могут изменить свое напряжение во время относительно очень коротких длительностей фронтов.

Другими словами, один временно устойчивый процесс, например формирования длительности импульса, завершается, когда напряжение на емкости достигает определенного значения, что фиксируется устройством сравнения – компаратором. В этот момент усилительные свойства транзисторов уже восстановились, вновь создаются условия неустойчивости, развивается регенеративный процесс смены состояний, в результате которого мы переходим к другому временно устойчивому состоянию – формированию длительности паузы и т. д.

## Импульсный автогенератор на ОУ

Классическая схема генератора прямоугольных напряжений на ОУ изображена на рис. 5.104.



Рис. 5.104. Схема импульсного автогенератора. Сопротивление R используется, если входное сопротивление осциллографа существенно влияет на процессы заряда и разряда емкости

В схеме автогенератора различаем задающую время RC-цепь, состоящую из R14 и C11 и включенную между выходом и инверсным входом ОУ, а также компаратор с гистерезисом на основе ОУ, охваченный положительной обратной связью через R20 и R21. Схема для исследования этого устройства сравнения изображена на рис. 5.105.



Рис. 5.105. Компаратор напряжений и схема исследования его гистерезисной амплитудной характеристики

Из предыдущей лабораторной работы известно как выглядит амплитудная характеристика такого компаратора (рис. 5.106).



Рис. 5.106. Амплитудная характеристика компаратора с гистерезисом

Коэффициент обратной связи у (рис. 5.106) при элементах, изображенных на рис. 5.105, равен:

$$\gamma = R21/(R20 + R21) \approx 0.15$$
.

Напряжение  $E_1$ , отображающее максимальную амплитуду положительного выходного напряжения для использованного ОУ, составляет приблизительно  $E_1 = 7,5$  В при девятивольтовом питании +U усилителя. Значит, опорное напряжение ( $\gamma \cdot E_1$ ) или ( $-\gamma \cdot E_2$ ) для точек 2 и 4 амплитудной характеристики компаратора составит приблизительно ±1,13 В в зависимости от того, чему равен уровень выходного напряжения:  $E_1 = +7,5$  В для зон 1 и 5 или  $E_2 = -7,5$  В для зоны 3 амплитудной характеристики.

При включении схемы напряжение на емкости скачком измениться не может. Значит, инвертирующий вход ОУ для анализа переходного процесса практически заземлен. Тогда, считая, что инерционность ОУ определяется звеном первого порядка с постоянной времени  $\tau_y$ , т. е., например, звеном типа интегрирующей *RC*-цепи, можно составить дифференциальное уравнение относительно выходного напряжения:

$$\tau_{y} \cdot (\frac{du}{dt}) + (1 - K_{(0)}) \cdot u = 0,$$

где  $K_{(0)}$  – коэффициент усиления ОУ на постоянном токе, а  $\tau_y$  – постоянная времени ОУ, отражающая его инерционные свойства. Так как  $K_{(0)} >> 1$ , то в характеристическом уравнении  $\tau \cdot p - K_{(0)} = 0$  единственный корень находится в правой части комплексной плоскости, что говорит о том, что система неустойчива и будет формироваться фронт импульса, достигая при этом максимального уровня напряжения или  $E_1 = +7,5$  В, или  $E_2 = -7,5$  В.

Пусть установится напряжение  $E_1 = +7,5$  В. Тогда на емкости, т. е. на инвертирующем входе ОУ (смотри схему на рис. 5.102) будет наблюдаться экспоненциальное нарастание положительного напряжения. В этом условно устойчивом состоянии, когда формируется длительность импульса, на неинвертирующем входе ОУ установлено опорное напряжение приблизительно  $\gamma \cdot E_1 = +1,13$  В. Значит, длительность импульса соответствует интервалу времени (пока емкость не будет заряжена до уровня опорного напряжения, когда компаратор сработает от исходного напряжения), с которого емкость начала заряжаться или перезаряжаться. Для первого импульса начальное напряжение на емкости равно нулю, а затем оно будет равно  $-\gamma \cdot E_2$ .

Итак, процесс формирования длительности импульса, начавшись с регенеративного процесса, который завершил процесс формирования паузы, закончится при граничном значении напряжения на емкости  $Uc_{rp} = \gamma \cdot E_1$ , когда дифференциальное входное напряжение компаратора пройдет через нулевое значение. Компаратор при этом сработает, его

выходное напряжение примет уровень  $E_2 = -7,5$  В, что повлечет смену опорного напряжения на  $-\gamma \cdot E_2 = -1,13$  В, а автогенератор войдет в режим формирования паузы, когда емкость, перезаряжаясь от +1,13 В по экспоненте, не прервет этот режим, достигнув напряжения -1,13 В. Указанные процессы подтверждаются временными диаграммами, изображенными на рис. 5.107.

Чтобы рассчитать длительность импульса, определим три характерных точки на диаграмме Uc(t):  $Uc(0) = -\gamma \cdot E_2$  – напряжение на емкости на начало формирования длительности импульса;  $Uc_{rp} = \gamma \cdot E_1$  – напряжение на конце этого интервала;  $Uc(\infty) = E_1$  – напряжение, до которого зарядилась бы емкость, если бы процесс ее заряда не был прерван срабатыванием компаратора. Тогда можно составить уравнение:



$$U_{C}(t) = U_{C(\infty)} - \left[U_{C(\infty)} - U_{C(0)}\right] \cdot e^{-t/\tau}.$$

Рис. 5.107. Временные диаграммы сигналов генератора

Когда  $t = t_{\rm H}$ , напряжение  $U_{C(t_{\rm H})} = U_{C(\rm rp)}$ . Решив полученное уравнение относительно  $t_{\rm H}$ , определите, от чего зависит этот временной интервал при формировании прямоугольного напряжения.

Аналогичные выкладки проведите для определения длительности паузы. После этого легко найти период колебаний и частоту их следования.

### Изменение параметров импульсов автогенератора

Анализ временных диаграмм напряжений автогенератора показывает, что изменение длительности импульсов или паузы можно осуществлять, если изменять постоянную времени цепи для отдельных временных интервалов импульсного напряжения или при неизменных параметрах *RC*-цепи получать для этих интервалов различные значения опорных напряжений.

Первый способ иллюстрирует схема, изображенная на рис. 5.108.



Рис. 5.108. Импульсный автогенератор с возможной регулировкой постоянной времени RC-цепи

Если Вы не используете ни одну из перемычек, подключающих параллельно резистору R14 дополнительную цепь из резистора R4 и одного из диодов, то, как отмечалось выше, длительность и пауза импульса одинаковы, а скважность равна 2. Но если Вы подсоедините цепь с диодом VD5, то перезаряд емкости положительным напряжением произойдет с постоянной времени  $\tau_+ = (R4 || R14) \cdot C$ , а отрицательным – с постоянной  $\tau_- = R14 \cdot C$ . При таком варианте длительность импульса будет короче длительности паузы. Используя другую перемычку, Вы получите противоположные соотношения. Если же включить обе перемычки, то скважность опять станет равной 2, но период и частота импульсов изменится.

Второй способ реализован в схеме на рис. 5.109.

В этой схеме на неинвертирующем входе ОУ происходит суммирование двух напряжений: одно из них ( $U_{BX}$ ) поступает с источника VPS, а другое с выхода операционного усилителя ( $U_{BbIX}$ ), которое будет разнополярным в зависимости от того, формируется ли длительность импульса или паузы. Таким образом, можно получить выражение для опорного напряжения компаратора:

 $U_{rp.} = U_{BX} \cdot (R20 || R21) / (R15 + R20 || R21) + U_{BbIX} \cdot (R15 || R21) / (R20 + R15 || R21)$ , из которого следует возможность установки их разных значений для длительности импульса и паузы.



Рис. 5.109. Импульсный автогенератор с регулировкой опорного напряжения компаратора

### Порядок выполнения работы

#### Начало работы

1. Включите питание для *NI ELVIS*.

2. Запустите программное обеспечение *NI ELVIS*; после инициализации откройте панель комплекта виртуальных измерительных приборов.

## Исследование характеристик цепи Вина

1. Проведите анализ цепи Вина (домашняя проработка). Определите частоту квазирезонанса *RC*-цепи по параметрам ее сопротивлений и емкостей. Найдите значения модуля и фазового сдвига передачи цепи на частоте квазирезонанса. Теоретически определите добротность цепи и ожидаемый вид АЧХ и ФЧХ.

2. Соберите схему для исследования характеристик цепи Вина с помощью анализатора Боде, изображенную на рис. 5.94.

3. Вызовите анализатор Боде.

4. На виртуальной панели анализатора установите амплитуду гармонического сигнала 2,5 В. Задайте автоматический режим работы по *Y-Scale*. Поставьте начальную частоту сигнала 100 Hz, конечную частоту 10000 Hz и число шагов за декаду 20.Установите также новые значения частот в Hz по осям АЧХ и ФЧХ: слева 100, справа 10000.

5. Запустите в работу анализатор. Сравните полученные характеристики с ожидаемыми. Сохраните экспериментальные данные и графики АЧХ и ФЧХ.

6. По экспериментальным данным уточните частоту квазирезонанса избирательной цепи и определите ее добротность следующим образом:

 по нулевому фазовому сдвигу на ФЧХ уточните частоту квазирезонанса и значение передачи цепи в децибелах на этой частоте;

 от полученного значения отнимите 3 дБ и определите нижнюю и верхнюю частоты полосы пропускания, а потом и саму полосу как разность полученных значений.

Добротность определяется как отношение частоты квазирезонанса цепи к полосе ее пропускания. Совпали ли у Вас теоретические и экспериментальные данные? Сделайте выводы по проделанному исследованию.

## Исследование автогенератора гармонических колебаний

Исследование условий возникновения колебаний:

1. Вызовите цифровой мультиметр *DMM*, установив режим *Resistance* измерения сопротивлений.

2. Произведите определение сопротивления резистора R23, а затем найдите и запомните положение движка потенциометра R22, когда его

сопротивление составляет половину сопротивления *R*23 и усиление неинвертирующего усилителя будет равно 3. Найдите также и запомните положение движка потенциометра, когда сопротивление *R*23 в четыре раза больше сопротивления *R*22 и коэффициент усиления неинвертирующего усилителя станет равным 5. Установите также направление вращения движка потенциометра, при котором, например, его сопротивление увеличивается.

3. Соберите схему для исследования моста Вина, изображенную на рис. 5.95.

4. Установите у цифрового мультиметра режим измерения напряжения переменного тока (*AC Voltage*).

5. Вызовите и включите генератор *FGEN*, установите частоту квазирезонанса для цепи Вина и максимальную амплитуду (2,5 В) гармонического напряжения.

6. Установите движок потенциометра *R*22 в положение, когда его сопротивление примерно составляет половину сопротивления *R*23, а затем, вращая движок, сбалансируйте мост. Зафиксируйте значение минимального напряжения. Почему оно не равно нулю? Совпало ли положение движка с исходным (в начале пункта)? При этом отметьте, что разбалансировка моста приводила к увеличению выходного напряжения моста (и к изменению его фазы на обратную) при проходе через точку настройки.

7. Проверьте, что при балансе моста напряжение на выходе цепи Вина и резистивного делителя составляет определенную долю (какую?) от входного напряжения, получаемого с генератора. Чтобы выполнить этот пункт, измените схему: вывод *CURRENT LO* заземлите, а вывод *CURRENT HI* подсоедините к входу или выходам моста. Полученные данные зафиксируйте и сравните их с теоретическими значениями.

Исследование разомкнутой системы автогенератора, получение условий возникновения колебаний в автогенераторе:

1. В схеме автогенератора отсоедините цепь Вина от выхода ОУ для исследования условий возникновения колебаний по поведению АЧХ и ФЧХ петлевого усиления разомкнутой системы. С этой целью соберите схему, изображенную на рис. 5.110, и оставьте в ней соединения, необходимые для использования анализатора Боде.



Рис. 5.110. Схема для исследования АЧХ и ФЧХ петлевого усиления разомкнутой системы автогенератора

2. Вызовите из меню виртуальных приборов анализатор Боде. На виртуальной панели анализатора установите амплитуду гармонического сигнала 2,5 В. Задайте автоматический режим работы по *Y-Scale*. Поставьте начальную частоту сигнала 100 Hz, конечную частоту 10000 Hz и число шагов за декаду 20.Установите также новые значения частот в Hz по осям АЧХ и ФЧХ: слева 100, справа 10000.

3. Установите движок потенциометра *R*22 в положение, когда его сопротивление больше половины сопротивления *R*23, т. е. коэффициент усиления неинвертирующего усилителя меньше 3.

4. Запустите анализатор Боде. На полученной ФЧХ по нулевому фазовому сдвигу определите частоту квазирезонанса, а затем на этой частоте переместитесь на АЧХ петлевого усиления и определите его значение. Если это значение меньше единицы, то, несмотря на выполнение условия баланса фаз, при замыкании петли обратной связи генерация колебаний будет отсутствовать, так как не выполняются необходимые амплитудные соотношения. Выключите питание станции.

5. Переберите схему, замкнув цепь положительной обратной связи, т. е. соберите схему автогенератора, изображенную на рис. 5.93. Вместо анализатора Боде выберите из меню осциллограф. Включите питание станции и убедитесь в отсутствии колебаний.

6. Вернитесь снова к схеме рис. 5.110, но положение движка потенциометра поставьте так, чтобы его сопротивление *R*22 было чуть-чуть меньше половины сопротивления *R*23, т. е. коэффициент усиления неинвертирующего усилителя был бы немного больше 3.

7. Далее проделайте аналогичные действия с анализатором Боде, а затем соберите схему автогенератора (рис. 5.93) и включите осцилло-

граф. Почему генератор заработал? Попытайтесь уменьшить искажения в выходном сигнале. Что при этом получается?

8. Снова вернитесь к схеме рис. 5.110, но положение движка потенциометра поставьте так, чтобы его сопротивление *R*22 было равно чуть меньше одной четверти сопротивления *R*23, т. е. коэффициент усиления неинвертирующего усилителя был бы немного больше 5. Проделайте аналогичные действия, как в предыдущих пунктах.

9. Сформулируйте выводы по выполненному разделу.

Определение стационарной амплитуды колебаний автогенератора:

Проведем исследование колебательной характеристики неинвертирующего усилителя.

1. Соберите схему, изображенную на рис. 5.99. Положение движка потенциометра поставьте так, чтобы его сопротивление *R*22 было чутьчуть меньше половины сопротивления *R*23, т. е. коэффициент усиления неинвертирующего усилителя был бы немного больше 3.

2. Вызовите из меню виртуальных приборов генератор и осциллограф. На лицевой панели генератора установите частоту гармонического сигнала, равную (близкую) к частоте квазирезонанса цепи Вина. Канал *СНА*+ переведите на наблюдение действующего значения входного напряжения. Входы обоих каналов осциллографа закройте, т. е. переведите в режим *AC*.

3. Получите данные исследуемой характеристики, изменяя амплитуду входного напряжения генератора от 0,2 до 2,4 В через 0,2 В. Для каждого уровня входного напряжения регистрируйте действующее значение входного и выходного напряжений, используя измерители осциллографа, а затем рассчитывайте коэффициент усиления как отношение полученных значений. Разработайте вид таблицы, внесите в нее данные, а потом по ним постройте график.

4. Определите по колебательной характеристике действующее значение выходного напряжения, используя линию положительной обратной связи, которая определяется коэффициентом передачи цепи Вина на частоте квазирезонанса.

5. Переберите схему, замкнув цепь положительной обратной связи, т. е. соберите схему автогенератора, изображенную на рис. 5.93. Для наблюдения и измерения действующего значения выходного напряжения используйте осциллограф в режиме *AC*. Сравните значения выходного напряжения, полученные в этом и предыдущем пунктах. Сделайте выводы.

## Импульсный автогенератор

Исследование работы схемы компаратора с гистерезисом:

1. Соберите схему компаратора, изображенную на рис. 5.105.

2. Вызовите из меню регулируемые источники питания (VPS) и осциллограф Scope. Обнулите с помощью Reset значение напряжения источника Supply+ и зафиксируйте значение выходного напряжения компаратора.

3. Проведите эксперимент, чтобы снять амплитудную характеристику усилителя. В ходе эксперимента используйте источники *Supply*+ и *Supply*-. Измерение значений входного и выходного напряжений осуществляйте, используя курсоры осциллографа. Полученные данные занесите в разработанную Вами таблицу. Определите напряжения срабатывания компаратора и рассчитайте ширину зоны гистерезиса.

Исследование процессов в автогенераторе:

1. Соберите схему генератора, изображенную на рис. 5.104.

2. Вызовите из меню осциллограф Scope.

3. Получите временные диаграммы и поясните их ход в отчете. Определите по диаграммам значения опорного напряжения компаратора и выходных напряжений.

Исследование схем с изменением параметров импульсов автогенератора:

1. Для схемы автогенератора, изображенной на рис. 5.108, в ходе домашней подготовки рассчитайте длительность импульса и период импульсов при подключении цепи с диодом *VD*5.

2. Соберите схему такого импульсного генератора и с помощью осциллографа исследуйте временные диаграммы сигналов. Сравните полученные параметры импульсов с расчетными данными.

3. Для схемы автогенератора, изображенной на рис. 5.108, рассчитайте длительность паузы и период импульсов при подключении цепи с диодом *VD*6 (расчеты выполните дома при подготовке к работе).

4. Соберите схему такого импульсного генератора и с помощью осциллографа исследуйте временные диаграммы сигналов. Сравните полученные параметры импульсов с расчетными данными. 5. Для схемы автогенератора, изображенной на рис. 5.108, рассчитайте частоту следования импульсов, если одновременно перемычками включены обе цепи с диодами VD5 и VD6.

6. Соберите схему такого импульсного генератора и, используя временные диаграммы, рассчитайте частоту следования импульсов и сравните их с теоретическим значением.

7. Для схемы автогенератора, изображенной на рис. 5.108, рассчитайте параметры импульсов (в ходе домашней подготовки) при выбранном Вами значении *Supply*+ или *Supply*- (расчеты выполните дома при подготовке к работе).

8. Соберите схему такого импульсного генератора и, используя временные диаграммы, рассчитайте параметры импульсов и сравните их с теоретическим значением.

9. Пронаблюдайте, как изменяются временные диаграммы сигналов и параметры импульсов при изменении напряжения источников *VPS*. Сформулируйте выводы.

## Контрольные вопросы

 Состояние после включения автогенератора будет неустойчивым, если анализ его дифференциального уравнения фиксирует наличие хотя бы одного корня характеристического уравнения, находящегося в части комплексной плоскости.

2. Переходный процесс и определение установившихся значений колебаний в автогенераторе обязательно должен рассматриваться с учетом его \_\_\_\_\_.

3. После анализа дифференциального уравнения автогенератора на условия возникновения колебаний выберите правильные утверждения из списка:

а) баланс фаз – фазовый набег на предполагаемой частоте  $f_0$  по контуру обратной связи, –  $\phi_T = 2 \cdot \pi \cdot n$ ,  $n \in E$ ;

б) баланс амплитуд на частоте  $f_0: |\dot{T}| = 1;$ 

в) модуль петлевого усиления на частоте  $f_0$ :  $|\dot{T}| > 1$ ;

г) годограф вектора петлевого усиления  $\dot{T}$  на комплексной плоскости охватывает точку с координатой (1, j0).
4. Выберите, какие схемы являются автогенераторами гармонических колебаний:







5. Как определить частоту квазирезонанса для цепи Вина теоретически?



6. Как определить частоту квазирезонанса для цепи Вина экспериментально на основе использования данных *Bode Analyzer*? Пусть U<sub>BЫX</sub> генератора временно увеличилось (см. рис. вопроса №
 Выберите пункты, отражающие правильную работу схемы стабилизации амплитуды колебаний:

a) увеличение выходного напряжения приводит к увеличению положительного напряжения между затвором и истоком полевого транзистора (ПТ);

б) увеличение выходного напряжения приводит к увеличению отрицательного напряжения между затвором и истоком ПТ;

в) сопротивление канала ПТ уменьшается;

г) сопротивление канала ПТ увеличивается;

д) глубина отрицательной обратной связи (ООС) увеличивается, что ведет к уменьшению *U*вых;

е) глубина ООС уменьшается, что ведет к уменьшению Ивых.

8. На графиках напряжений генератора импульсной последовательности на ОУ показаны характерные уровни:  $U_{(0)}$ ,  $U_{(\infty)}$ ,  $U_{\Gamma P}$ . При формировании выходного импульса положительной полярности их значения в указанном порядке равны:

a) 
$$-E$$
;  $+E$ ;  $E \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$ ;

$$6) -E \cdot R_1 / (R_1 + R_2); +E; E \cdot R_1 / (R_1 + R_2);$$

B) +E; -E; -E; -E·
$$R_1 / (R_1 + R_2)$$
;

Γ) 
$$E \cdot R_1 / (R_1 + R_2); + E; -E \cdot R_1 / (R_1 + R_2).$$



9. При формировании положительного импульса  $t_{\rm M}$  напряжение на емкости изменяется по закону

$$U_{C}(t) = U_{(\infty)} - [U_{(\infty)} - U_{(0)}] \cdot e^{-t/\tau},$$

где  $U_{(\infty)} = E$ ,  $U_{(0)} = -E \cdot \gamma$ ,  $\gamma = R_1 / (R_1 + R_2)$ ,  $\tau = R \cdot C$ .

В момент  $t_{\rm H}$  напряжение на емкости  $U(t_{\rm H}) = U_{\rm \Gamma P} = E \cdot \gamma$ . Тогда длительность положительного импульса равна:

a) 
$$\tau \cdot \ln \frac{1-\gamma}{1+\gamma}$$
;  
b)  $\tau \cdot \ln \frac{1+\gamma}{1-\gamma}$ ;  
c)  $\tau \cdot \exp[(1-\gamma)/(1+\gamma)]$ ;  
c)  $\tau \cdot \exp[(1+\gamma)/(1-\gamma)]$ .

### Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- схемы и результаты эксперимента;
- теоретические расчеты искажений;
- сравнение результатов теории и эксперимента;
- выводы.

# 6. Обработка результатов измерений.

Работа в *Excel* 

Результаты измерений, полученные в ходе выполнения лабораторной работы, можно визуализировать в виде графических зависимостей, например, в *Microsoft Office Excel*.

Для работы в Excel:

1. Вызовите *Excel* – Пуск  $\rightarrow$  Все программы  $\rightarrow$  *Microsoft Office*  $\rightarrow$  *Microsoft Office Excel*;

2. Откройте сохраненные данные, при необходимости преобразуйте их в таблицу – Файл → Открыть (вызываем необходимый файл);

3. Создайте диаграмму/график – Вставка — Диаграмма.

В Мастере диаграмм (рис. 6.1) выбираем «График». Вид графика выбираем наиболее подходящий под конкретный случай.



Рис. 6.1. Мастер диаграмм – шаг 1 Рис. 6.2. Мастер диаграмм – шаг 2

4. Нажмите кнопку далее и задайте диапазон данных, которые необходимо вывести в виде графика. Для этого нажмите кнопку 1 рис. 6.2. После этого выделите мышкой данные в таблице – диапазон данных будет отображен в окне, рис. 6.3.

Исходные данные - Диапазон:	? 🛛
=Лист1!\$A\$1:\$B\$9	

Рис. 6.3. Исходные данные

Закройте это окно обычным нажатием на крестик в правом углу.

5. Задайте необходимые надписи и другие функции (при необходимости), рис. 6.4.

		r dovinida y	TOULOIX
Заголовки	Оси	Линии сетки	Легенда
сь X (категорий)	тини пини пини пини пини пини пини пини		

Рис. 6.4. Мастер диаграмм – шаг 3

6. Если требуется разместить диаграмму и присвоить ей название, то необходимо выполнить шаг 4 (рис. 6.5). После этого нажмите кнопку «Готово». Результатом будет график (рис. 6.6).

Мастер диа	аграмм (шаг 4 из 4	4): размещение диаграммы 🛛 📔	
Поместить ди	иаграмму на листе: —		
	О отдельном:	Диаграмма1	
	• имеющемся:	Лист1	~
	Отмена	Дазад Далее >	10

Рис. 6.5. Мастер диаграмм – шаг 4



Рис. 6.6. График созданный в Excel 257

7. При необходимости аппроксимировать данные на графике вызывайте линию тренда (рис. 6.7, *a*). Для этого на линии, которую требуется обработать, кликните правой кнопкой мыши и в появившемся окне выберите «Добавить линию тренда».

Линия тренда 🛛 🔀	Линия тренда 🛛 🔀
Тип Параметры	Тип Параметры
Построение линии тренда (аппроксимация и сглаживание) — — — — — — — — — — — — — — — — — — —	Название аппроксимирующей (сглаженной) кривой
ОК Отмена	ОК Отмена
a)	б)

Рис. 6.7. Линия тренда: а) аппроксимация и сглаживание графика; б) параметры

Можно также задать параметры для линии тренда (рис. 6.7, б).

После нажимайте кнопку «ОК» и проверяйте, подходит ли выбранная аппроксимирующая линия или следует выбрать другую, для этого повторите действия пункта 7.

#### 7. Дистанционное образование в программно-аппаратнойсреде *NI ELVIS*

В последние годы получил широкое распространение термин *E-learning*, означающий процесс обучения в электронной форме через сеть *Internet* или *Ethernet* с использованием систем управления обучением.

Популярность этой формы обучения объясняется тем, что она имеет ряд неоспоримых преимуществ по сравнению с традиционной:

- снижаются затраты на обучение;

 у обучаемых появляется возможность учиться в удобное для них время и в удобной форме;

– процесс обучения можно сделать непрерывным, когда при появлении новых учебных материалов предлагается новый курс, не дожидаясь формирования групп и организации очных занятий;

– абсолютное большинство молодых людей не только способны эффективно обучаться электронным способом, естественно при условии наличия качественного и адекватного содержания учебных курсов, но часто предпочитают эту форму обучения в силу современных традиций.

В России система управления обучением (*Learning Management System*) получила название Система дистанционного образования (СДО).

Дистанционное обучение – это далеко не новое явление. Элементы его прослеживаются в заочном обучении, в передачах обучающего телевидения, в возросших по популярности *Web*-технологиях, в проектах «Интернет-книги» и т. д.

Имеется несколько причин все возрастающего интереса к дистанционному обучению через Интернет. Среди них отметим потребность в простой и достоверной информации, в наличии уже сейчас компьютерной технологии удовлетворения потребностей будущих пользователей, в восприятии дистанционного обучения как нового и важного рынка. Например, еще в 2004 году Стенфордский университет (США) предлагает порядка 25 процентов от приблизительно 200 курсов в Интернет. Все эти курсы идентичны тем, что изучаются при очной форме обучении. Таким образом, степень магистра по электротехнике можно получить как в самом университете, так и посредством дистанционного образования через Интернет.

В технологии дистанционного образования пока еще существует множество проблем – педагогических, технологических, финансовых, личностных и законодательных.

Чтобы подтвердить свои силы и возможности, университет, в частности, должен будет представить соответствующую техническую базу, как компьютерную и программную, так и специализированную для обеспечения лабораторных циклов дисциплин.

Лабораторная и экспериментальная база ВУЗов, как правило, в силу финансовых и материальных ограничений морально устаревает. Бурное же развитие современной техники и быстро изменяющиеся условия, в которых должен ориентироваться и разбираться выпускник, заставляет ВУЗы непрерывно адаптироваться к запросам промышленности. Реальная лабораторная и экспериментальная база не в состоянии поддерживать учебный процесс на должном уровне. Следует отметить, что отставание материальной базы от требований жизни является не только вузовской проблемой, но и общей проблемой в промышленности и для различных организаций и фирм, занимающихся разработками новой техники.

Современная технология виртуальных приборов позволяет существенно сократить этот разрыв и сэкономить значительные финансовые ресурсы, не снижая качества обучения. Мировая вузовская практика подтверждает устойчивую и усиливающуюся тенденцию продвижения виртуальных технологий в учебном процессе. Программная среда *Lab-VIEW* компании *National Instruments*, поддерживающая технологию виртуальных приборов и соответствующее аппаратное обеспечение, позволяют модернизировать учебные лаборатории гибким, программноперестраиваемым, измерительным оборудованием или модернизировать имеющиеся средства измерений практически любой сложности, а также внедрять автоматизированные измерительные системы и станции для учебного процесса и комплексных исследований в вузовской науке.

Технология виртуальных приборов и современные средства телекоммуникации позволяют эффективно осуществлять дистанционный учебный эксперимент практически с любой географической точки. Основным препятствием использования дистанционной формы в подготовке инженерных специальностей в технических вузах является невозможность проведения лабораторных практикумов на основе традиционных технологий обучения и устаревшего приборного парка.

Переход на дистанционные формы обучения невозможен без предварительного перевода приборной базы на виртуальные, так как старые или обычные приборы не имеют цифровые интерфейсы и не могут управляться дистанционно на основе сетевых информационных технологий. Перевод учебного процесса на виртуальные приборы и дистанционное обучение дает следующие возможности: 1. Круглосуточная автоматическая работа дистанционной учебной лаборатории (без преподавателя и лаборанта, нет необходимости в лабораторных помещениях и в посадочных местах для студентов и т. п.).

2. Индивидуализация и повышение качества обучения. Студент самостоятельно вынужден будет выполнять лабораторную работу, а не группой в 3-4 человека за одной лабораторной установкой. Появляются качественно новые возможности для самостоятельной работы студентов. Длительность выполнения работы не ограничивается 4-мя академическими часами, а выполняется за то время, которое требуется студенту.

3. Общедоступность дистанционной лаборатории с любой географической точки и в любое время. Расширяется образовательное пространство вуза. Обучение не локализовано пределами учебного здания или вуза. Дистанционный лабораторный практикум студент может выполнять из филиала, общежития или из дома.

Реализованный на базе *NI ELVIS* в Томском политехническом университете цикл лабораторных работ по аналоговой электронике может также использоваться в дистанционном режиме выполнения работ. Для этого сделан первый шаг – лабораторная база переведена на макетную плату, которая позволяет полностью задействовать программное обеспечение, выполненное в среде *LabVIEW*, а также разработано учебное пособие.

Программная среда разработки предоставляет готовые виртуальные приборы и средства для создания и обеспечения виртуальной лаборатории.

При использовании ВП имеется возможность обмениваться данными с другими программами на собственном компьютере или в локальной сети. Для перевода в режим дистанционного управления необходимо обеспечить конфигурацию оборудования и набор необходимых методических указаний.

Сами лабораторные работы могут выполняться как на месте в лаборатории, так и по сети *Internet*. Так как весь цикл работ выполняется на реальном оборудовании, а не моделируется, то реализуется очень важный обучающий принцип – проведение физического эксперимента и получение действительных характеристик исследуемых элементов и схем.

Существуют следующие возможности работы в удаленном режиме (рис. 7.1):

1. Дистанционное наблюдение (мониторинг) – процессы, происходящие в лаборатории, наблюдаются через *Web*-браузер. При этом отсутствует обратная связь и возможность вмешиваться в управление процессом. 2. Дистанционное управление – появляется возможность изменять данные, управлять процессами, отправлять сообщения.

3. Совместная работа – возможна работа сразу нескольких пользователей с одним ВП, которые могут совместно создавать отчеты и общаться между собой.

Достоинством такого способа работы в сети является то, что обучающемуся не обязательно иметь пакет *LabVIEW*, установленный на его компьютере, и нет необходимости осваивать среду программирования, а достаточно использовать так называемые *Remote Panel* – панели ВП, созданные в *LabVIEW* и наблюдаемые в *Web*-браузере. Следовательно, доступ к оборудованию может осуществляться в любое время и не требует личного присутствия экспериментатора в лаборатории, а за происходящим можно наблюдать с помощью *Web*-камеры.



Рис. 7.1. Схема лабораторного эксперимента с удаленным доступом

#### Список рекомендуемой литературы

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высшая школа, 1991. – 652 с.

2. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергоатомиздат, 1988.

3. Прянишников В.А. Электроника. – СПб: Корона принт, 1998.

4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 521 с.

5. Хоровиц Г., Хилл У. Искусство схемотехники: пер. с англ. В 3-х т. – М., 1993.

6. Рыбин Ю.К. Электронные устройства. – Томск: Изд-во «Печатная мануфактура», 2003. – 264 с.

7. Сергеев В.М. Электроника. Ч. 1: Элементная база. Аналоговые устройства: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 128 с.

8. Бакалов В.П. и др. Теория электрических цепей. – М.: Радио и связь, 1998.

9. Комплект виртуальных измерительных приборов для учебных лабораторий *NI ELVIS*. Технические средства / Руководство пользователя. – Режим доступа: <u>http://www.ni.com</u>. Учебное издание

ЦИМБАЛИСТ Эдвард Ильич СИЛУШКИН Станислав Владимирович

## ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛОГОВЫХ СХЕМ В ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ СРЕДЕ NI ELVIS

Учебное пособие

Научный редактор доктор технических наук, профессор М.С. Ройтман

Редактор Д.В.Заремба Компьютерная верстка С.В. Силушкин Дизайн обложки Т.А. Фатеева

Подписано к печати 29.12.2009. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л. 5,8. Уч. -изд. л. 5,3. Заказ экз.





Томский политехнический университет Система менеджмента качества Томского политехнического университета сертифицирована NATIONAL QUALITY ASSURANCE NO CTAHDAPTY ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30 Тел/факс: +7 (3822) 56-35-35, www.tpu.ru