

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки – 27.04.01 Стандартизация и метрология  
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Улучшение метрологических характеристик генераторов электрических сигналов с учетом шумов элементов</b>

УДК 621.371.1:621:53.08

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ81	Орехова Анастасия Сергеевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОАР ИШИТР	Рыбин Юрий Константинович	Д.Т.Н., С.Н.С.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН, ШБИП	Конотопский Владимир Юрьевич	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ООД, ШБИП	Горбенко Михаил Викторович	К.Т.Н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОАР ИШИТР	Муравьев Сергей Васильевич	Д.Т.Н., профессор		

## Планируемые результаты обучения по направлению

### 27.04.01 «Стандартизация и метрология»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для решения комплексных задач метрологического обеспечения, контроля качества, технического регулирования и проверки соответствия с использованием существующих и новых технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения
P2	Выполнять работы по метрологическому обеспечению и техническому контролю, определять номенклатуру измеряемых и контролируемых параметров, устанавливать оптимальные нормы точности и достоверности контроля, выбирать средства измерений и контроля, предварительно оценив экономическую эффективность техпроцессов, кроме того, уметь принимать организационно-управленческие решения на основе экономического анализа
P3	Выполнять работы в области стандартизации и сертификации: по созданию проектов стандартов, методических и нормативных материалов и технических документов, по нормоконтролю и экспертизе технической документации, участвовать в проведении сертификации продукции, услуг, систем качества и систем экологического управления предприятием, участвовать в аккредитации органов по сертификации, измерительных и испытательных лабораторий
P4	Выполнять работы в области контроля и управления качеством: участвовать в оперативной работе систем качества, анализировать оценку уровня брака и предлагать мероприятия по его предупреждению и устранению, участвовать в практическом освоении систем менеджмента качества
P5	Использовать базовые знания в области экономики, проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения комплексной инженерной деятельности; проводить анализ затрат на обеспечение требуемого качества и деятельности подразделения, проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных решений
<i>Универсальные компетенции</i>	
P6	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности
P7	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, демонстрировать ответственность за результаты работы
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, представлять и защищать результаты инженерной деятельности
P9	Ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а также различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду
P10	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки – 27.04.01 Стандартизация и метрология  
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники  
 Период выполнения – (осенний/весенний семестр 2019/2020 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
--------------------------

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН Выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы	10.06.2020
---	------------

Дата контроля	Наименование раздела (модуля)/вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
19.05.2019	Глава 1. Генераторы электрических сигналов	10
23.09.2019	Глава 2. Компьютерное моделирование сложных систем	10
18.10.2019	Глава 3. Шумы элементов генераторов сигналов	10
13.02.2020	Глава 4. Результаты моделирование генератора ГС-50	15
19.03.2020	Глава 5. Моделирование функциональных частей генератора ГС-50	15
20.04.2020	Глава 6. Моделирование генератора ГС-50	20
15.05.2020	Глава 7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
25.05.2020	Глава 8. Социальная ответственность	10

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОАР ИШИТР	Рыбин Юрий Константинович	д.т.н., с.н.с.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОАР ИШИТР	Муравьев Сергей Васильевич	д.т.н., профессор		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки (специальность) – 27.04.01 Стандартизация и метрология  
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Муравьев С.В.  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

<b>Магистерской диссертации</b>
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
8ГМ81	Ореховой Анастасии Сергеевне

Тема работы:

<b>Улучшение метрологических характеристик генераторов электрических сигналов с учетом шумов элементов</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 59-40 от 28.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2020
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектами исследования являются метрологические характеристики генератора прецизионного ГС-50: погрешность уровня выходного напряжения, коэффициент гармоник. Исследования проводятся с помощью программного обеспечения для инженерных вычислений – <i>NI Multisim</i></p>
---	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– введение;</li> <li>– генераторы электрических сигналов;</li> <li>– компьютерное моделирование сложных систем;</li> <li>– шумы элементов генераторов сигналов;</li> <li>– результаты моделирования генератора ГС-50;</li> <li>– моделирование функциональных частей генератора ГС-50;</li> <li>– моделирование метрологических характеристик генератора ГС-50;</li> <li>– финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение;</li> <li>– социальная ответственность;</li> <li>– заключение</li> </ul>
--	--

<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Презентация, выполненная в программе <i>Microsoft Power Point</i></p>
--	--

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский Владимир Юрьевич
Социальная ответственность	Горбенко Михаил Викторович
Раздел, выполненный на английском языке	Пичугова Инна Леонидовна

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

Генераторы сигналов
---------------------

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	27.01.2018 г.
---	---------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОАР ИШИТР	Рыбин Юрий Константинович	Д.Т.Н., С.Н.С.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ81	Орехова Анастасия Сергеевна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
8ГМ81	Ореховой Анастасии Сергеевне

<b>Школа</b>	Инженерная школа информационных технологий и робототехники	<b>Отделение</b>	ОАР
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	27.04.01 Стандартизация и метрология

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>	
1 <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Использовать действующие ценники и договорные цены на потребленные материальные и информационные ресурсы, а также указанную в МУ величину тарифа на эл. энергию
2 <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	—
3 <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Действующие ставки единого социального налога и НДС
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Дать характеристику существующих и потенциальных потребителей (покупателей) результатов ВКР, ожидаемых масштабов их использования
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Разработать проект такого устава в случае, если для реализации результатов ВКР необходимо создание отдельной организации или отдельного структурного подразделения внутри существующей организации
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Построение плана-графика выполнения ВКР, составление соответствующей сметы затрат, расчет цены результата ВКР.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Оценка экономической эффективности использования результатов ВКР, характеристика других видов эффекта
<b>Перечень графического материала (с точным указанием чертежей)</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. «Портрет» потребителя результатов НТИ</li> <li>2. Сегментирование рынка</li> <li>3. Оценка конкурентоспособности технических решений</li> <li>4. Диаграмма FAST</li> <li>5. Матрица SWOT</li> <li>6. График проведения и бюджет НТИ - <u>выполнить</u></li> <li>7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ - <u>выполнить</u></li> <li>8. Потенциальные риски</li> </ol>	

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	01.03.2020
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН ШБИП	Конотопский Владимир Юрьевич	к.э.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
8ГМ81	Орехова Анастасия Сергеевна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
8ГМ81	Ореховой Анастасии Сергеевне

<b>Инженерная школа</b>	Инженерная школа информационных технологий и робототехники	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	Отделение автоматизации и робототехники
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	27.04.01 Стандартизация и метрология

Тема ВКР:

Улучшение метрологических характеристик генераторов сигналов с учетом шумов элементов

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1 Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Улучшение метрологических характеристик генераторов электрических сигналов с учетом шумов элементов на основе компьютерного моделирования проводилось с помощью программного обеспечения для инженерных вычислений <i>NI Multisim</i> . Поэтому объектами исследования являются рабочее место, оборудованное персональным компьютером
---	---

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<b>1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>	- Федеральный закон Российской Федерации от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ; - ГОСТ 12.03.003-2015; - ГОСТ Р 12.019-2009; - СП 52.13330.2016; - СНиП 21-01-97; - СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03; - СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03; - СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03
<b>2 Производственная безопасность:</b> 2.1 Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения 2.2 Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения	- недостаточная освещенность рабочей зоны; - повышенный уровень шума на рабочем месте; - повышенный уровень электромагнитных излучений; - статические физические перегрузки; - нервно-психические перегрузки: умственное перенапряжение, монотонность труда. - поражение электрическим током; - отклонение показателей микроклимата
<b>3 Экологическая безопасность:</b>	В работе проведен анализ негативных воздействий на окружающую среду
<b>4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	- возникновение пожара; - разработка превентивных мер по предупреждению ЧС

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	02.03.2020
--	------------

Задание выдал консультант:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ООД ШБИП	Горбенко Михаил Владимирович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
8ГМ81	Орехова Анастасия Сергеевна		

## Реферат

Магистерская диссертация на 116 страницах, 27 рисунках, 13 таблицах, с 32 источниками, 3 приложениями.

**Ключевые слова:** генератор сигналов, метрологические характеристики, коэффициент гармоник, моделирование, выходное напряжение.

Объектами исследования являются метрологические характеристики генератора сигналов прецизионного ГС-50: погрешность установки выходного напряжения, коэффициент гармоник выходного напряжения.

**Цель работы** состоит в исследовании выходного напряжения генератора на предмет погрешности уровня выходного напряжения и коэффициента гармоник.

В процессе исследования проведено моделирование и исследование генератора синусоидальных колебаний.

В результате исследования с помощью выбранного программного пакета *NI Multisim* было проведено моделирование и исследование метрологических характеристик генератора синусоидальных колебаний со схемой стабилизации амплитуды. Была получена модель с характеристиками, соответствующими реальным характеристикам генератора.

**Степень внедрения:** проведенные исследования будут применимы при разработке модернизированной версии генератора сигналов ГС-50М с меньшим уровнем искажения выходного сигнала.

**Область применения:** проделанная работа может быть применена не только для модернизации генератора сигналов прецизионного ГС-50, но и для модернизации и проектировании прочих низкочастотных генераторов синусоидальных сигналов.

Выпускная квалификационная работа выполнена при помощи текстового редактора *Microsoft Word 2016* и предоставлена на листах А4.



## Содержание

	С.
Обозначения и сокращения.....	12
Введение.....	13
1 Генераторы электрических сигналов.....	16
1.1 Виды генераторов электрических сигналов.....	16
1.2 RC-генераторы низких частот.....	17
1.3 Принцип действия генераторов.....	20
1.4 Генератор сигналов прецизионный ГС-50.....	22
1.5 Метрологические характеристики генератора ГС-50.....	23
1.5.1 Определение коэффициента гармоник выходного напряжения ...	25
1.5.2 Определение нестабильности частоты.....	26
1.5.3 Определение погрешности установки частоты по шкале частот .	26
1.5.4 Определение погрешности установки выходного напряжения ....	26
1.5.5 Описание функциональной блок-схемы генератора ГС-50.....	27
1.6 Задающий генератор в составе генератора ГС-50.....	29
1.6.1 Инвертор на основе операционного усилителя.....	33
1.6.2 Интегратор на основе операционного усилителя.....	34
2 Компьютерное моделирование сложных систем.....	38
2.1 Метод компьютерного моделирования.....	38
2.2 Компьютерное моделирование генератора ГС-50.....	39
3 Шумы элементов генераторов сигналов.....	42
3.1 Общие понятия о шумах элементов электронных систем.....	42
3.1.1 Тепловой шум.....	43
3.1.2 Дробовой шум.....	44
3.1.3 Контактный шум.....	44
3.2 Коэффициент шума.....	45
3.3 Отношение сигнал/шум.....	46
4 Результаты моделирования генератора ГС-50.....	48

4.1	Процесс нарастания амплитуды в колебательном звене генератора ГС-50 .....	48
4.2	Процесс установления стационарного режима в колебательном звене генератора ГС-50 .....	49
5	Моделирование функциональных частей генератора ГС-50 .....	52
5.1	Моделирование инвертора в составе генератора ГС-50 .....	52
5.2	Моделирование интегратора в составе генератора ГС-50 .....	55
6	Моделирование метрологических характеристик генератора ГС-50 .....	60
7	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	64
7.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	65
7.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования .....	65
7.1.2	Анализ конкурентных технических решений .....	65
7.2	Планирование научно-исследовательских работ .....	67
7.2.1	Структура работ в рамках научного исследования .....	67
7.2.2	Определение трудоемкости выполненных работ .....	68
7.2.3	Разработка графика научного исследования .....	68
7.3	Определение бюджета научно-технического исследования .....	70
7.3.1	Расчет материальных затрат научно-технического исследования	71
7.3.2	Расчет заработной платы .....	72
7.3.3	Расчет затрат на социальный налог .....	73
7.3.4	Расчет затрат на электроэнергию .....	74
7.3.5	Расчет амортизационных расходов .....	75
7.3.6	Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов (кроме суточных) .....	76
7.3.7	Расчет прочих расходов .....	76
7.3.8	Расчет общей себестоимости разработки .....	76
7.3.9	Расчет прибыли .....	77
7.3.10	Расчет НДС .....	77
7.3.11	Цена разработки ОКР (НИР) .....	77
7.4	Оценка экономической эффективности проекта .....	78

8	Социальная ответственность .....	79
8.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ...	79
8.2	Производственная безопасность .....	80
8.2.1	Анализ вредных факторов рабочего помещения.....	81
8.2.2	Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в учебной аудитории при проведении исследований.....	81
8.2.3	Анализ вредных факторов.....	82
8.2.3.1	Микроклимат.....	82
8.2.3.2	Шум.....	84
8.2.3.3	Освещение .....	84
8.2.3.4	Повышенный уровень электромагнитных излучений .....	87
8.2.3.5	Психофизические факторы .....	88
8.2.3.6	Вывод .....	89
8.2.4	Анализ опасных факторов.....	89
8.2.4.1	Поражение электрическим током .....	89
8.2.4.2	Опасность возникновения пожара. Короткое замыкание ...	90
8.3	Экологическая безопасность.....	91
8.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	92
8.4.1	Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследования.....	92
8.4.2	Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в аудитории при проведении исследований .....	92
8.5	Выводы по разделу «Социальная ответственность».....	94
	Заключение .....	95
	Список публикаций.....	96
	Список используемых источников:.....	97
	Приложение А (справочное) Signal generators: types, metrological characteristics and operating principle.....	100
	Приложение Б (обязательное) Описание условий возникновения колебаний в колебательной системе задающего генератора.....	114
	Приложение В (обязательное) Электрическая принципиальная схема генератора со схемой стабилизации.....	116

## Обозначения, сокращения

В данной работе применены следующие обозначения и сокращения:

АМВ – автоколебательный мультивибратор;

ЗГ – задающий генератор;

ИОН – источник опорного напряжения;

ИНТ – интегратор;

КОМПАР – компаратор;

НТИ – научно-техническое исследование;

ООС – отрицательная обратная связь;

ОС – обратная связь;

ОУ – операционный усилитель;

ПСЗ – преобразователь средневыпрямленных значений;

ПЭВМ – персональная электро-вычислительная машина;

РЭ – регулирующий элемент;

СИ – средство измерений;

СУ – согласующий усилитель;

У – усилитель;

УО – усилитель-ограничитель;

ФПИ – формирователь прямоугольных импульсов;

ЦОС – цепь обратной связи;

ЧИЦ – частотно-избирательная цепь;

ЧС – чрезвычайная ситуация.

## Введение

На сегодняшний день прогресс измерительной техники определяется, в первую очередь, работой над развитием и модернизацией генераторов измерительных сигналов. Такого типа генераторы являются основополагающими компонентами при проведении экспериментов, направленных на исследование характеристик объектов, обладающих различной физической природой.

Сопоставляя объемы производства зарубежной и отечественной промышленности, а также анализируя текущие тенденции производства измерительных генераторов сигналов, можно сделать вывод, что наибольшее распространение получили именно низкочастотные генераторы сигналов синусоидальной формы волны, о которых пойдет речь в данной работе.

Аналоговые и цифровые генераторы наравне способны формировать измерительные сигналы. В основе формирования, которых лежат колебательные процессы, воспроизводимые генераторами. Вместе с тем, цифровые генераторы сигналов, по сравнению с аналоговыми, зачастую обладают большей функциональностью. В то же время, аналоговые, тем не менее, отличаются лучшими метрологическими характеристиками. В частности, они обладают меньшим коэффициентом нелинейных искажений, меньшим коэффициентом гармоник и большей стабильностью формы выходных колебаний.

В последние годы, даже при достаточно обширном распространении цифровых измерительных приборов, аналоговые генераторы, тем не менее, не сдают своих позиций и продолжают получать развитие, благодаря возможностям современной микроэлектроники.

Анализируя данные по номенклатуре отечественной и зарубежной измерительной техники, можно полагать, что генераторы именно синусоидальных сигналов низкочастотные, наиболее распространены, как в России, так и за рубежом. Это видно по объемам выпущенных за последние

годы ведущими приборостроительными фирмами измерительных генераторов.

Одним из главных достоинств генераторов сигналов синусоидальной формы волны является их способность генерировать выходные сигналы с определенными заданными характеристиками и параметрами. При этом, чем меньше искажений порождает сам генератор, тем достовернее будет выходной сигнал. На практике рекомендуется применять генераторы, имеющие малые нелинейные искажения и малый уровень шума.

На сегодняшний день исследования шумов генераторов, имеющих малые нелинейные искажения, практически не проводились и этот вопрос носит актуальный характер. Это, в том числе относится и к объекту исследования в данной магистерской работе – генератору сигналов прецизионному ГС-50 (далее – генератор ГС-50). Это связано с тем, что только с развитием электроники стало возможным проводить исследование достаточно малых нелинейных искажений, практически на уровне шума.

Цель исследования заключается в компьютерном моделировании метрологических характеристик генератора с учетом шумов элементов в программном пакете *NI Multisim* для исследования влияния шума и нелинейных искажений на получаемый на выходе генератора сигнал.

Для средств измерений, согласно ГОСТ 8.009 [1] характерны следующие метрологические характеристики:

- диапазон установки частоты;
- погрешность установки частоты;
- уровень выходного напряжения;
- неравномерность уровня выходного напряжения;
- значение коэффициента гармоник и др.

Для достижения, поставленной в данной работе, цели был сформулирован целый ряд задач:

- выбрать программное обеспечение для решения поставленной в исследовании цели;

- проанализировать метрологические характеристики генератора.

Из них выделить наиболее влияющие на выходной сигнал;

- провести компьютерное моделирование инвертора, интегратора в составе генератора на предмет исследования выделенных метрологических характеристик с учетом влияния шумов элементов в программном пакете *NI Multisim*;

- провести компьютерное моделирование всего генератора на предмет исследования выделенных метрологических характеристик с учетом влияния шумов элементов в программном пакете *NI Multisim*;

- проанализировать полученные данные по результатам исследования, сделать выводы.

# 1 Генераторы электрических сигналов

## 1.1 Виды генераторов электрических сигналов

Генераторы электрических сигналов являются устройствами, посредством которых энергия источника питания постоянного тока преобразуется в выходные электрические колебания с заданной частотой и формой [2].

Генераторы электрических сигналов в зависимости от принципа их действия разделяют на:

- зависимые (генераторы с внешним воздействием (управлением);
- независимые (генераторы, которые работают в автоколебательном режиме). К независимым генераторам относятся генераторы с самовозбуждением или, иначе, автогенераторы.

Также в измерительной технике различают несколько основных разновидностей генераторов: Г2 – генераторы шумовых сигналов; Г3 – низкочастотные *RC*-генераторы; Г4 – высокочастотные *LC*-генераторы; Г5 – импульсные генераторы; Г6 – генераторы сигналов сложной формы [2].

В идеальном случае на выходе генератора формируется монохроматический сигнал синусоидальной формы с постоянными амплитудой и частотой. Но на практике его невозможно добиться из-за того, что выходной сигнал сопровождается нелинейными искажениями и шумовыми сигналами от радиоэлементов, включенных в цепь [3].

В основе построения большинства генераторов синусоидальной формы волны, лежат частотно-избирательная цепь (*ЧИЦ*) и усилитель (*У*), охваченные обратной связью (*ОС*) через цепь обратной связи (*ЦОС*).

Здесь в качестве *ЧИЦ* могут применяться различные *RC*-цепи, колебательные *RL*-контур и др. [4]. Следует отметить, что усилитель получает питание от источника электрической энергии, чаще всего от источника постоянного напряжения.



Также необходимо заметить, что колебания в данной системе возникают только в том случае, если одновременно выполняются следующие условия:

– *баланс фаз* – общий фазовый сдвиг на частоте колебаний должен равняться 0 или быть кратным  $2\pi$ , что означает, что *ОС* в данной системе на частоте генерации сигнала должна оставаться положительной;

– *баланс амплитуд* – петлевой коэффициент передачи на установившейся частоте колебаний должен быть или равен единице, или в незначительной мере превышать ее [4]. Так, когда петлевой коэффициент равен единице, наступает генерация стационарных колебаний с постоянной неизменяющейся амплитудой.

Отметим, что выполнение этих условий является необходимым, но не достаточным для генерации в стационарном режиме устойчивых автоколебаний синусоидальной формы [2].

## **1.2 RC-генераторы низких частот**

*RC*-генераторы применяют, когда появляется необходимость генерировать сигналы с низкими частотами, в том числе сигналы радиочастотного диапазона до 10 МГц. Обобщенная схема *RC*-генератора с мостом Вина приведена на рисунке 1.

На данной схеме, *RC*-генератор состоит из операционного усилителя, охваченного отрицательной обратной связью (*ООС*) посредством резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , а также охваченного положительной обратной связью (*ПОС*) с помощью частотно-избирательной цепи, образованной  $R_3C_1R_4C_2$  [2].

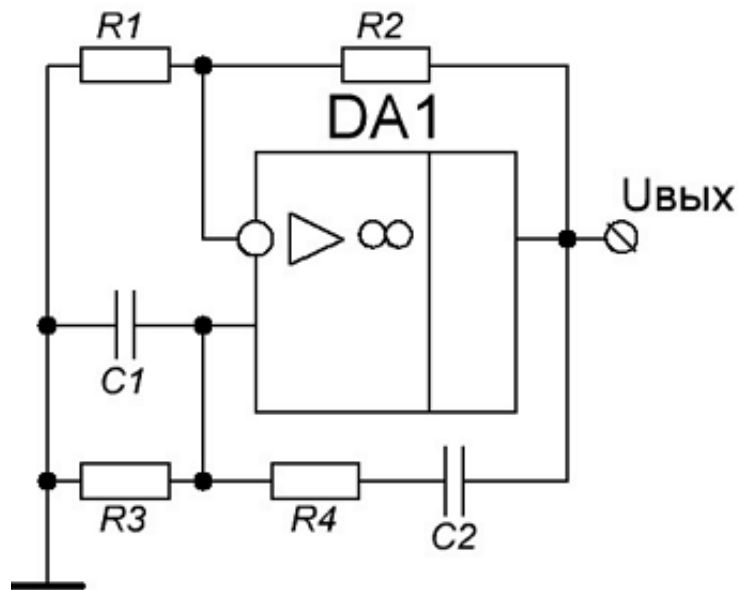


Рисунок 1 – Обобщенная схема  $RC$ -генератора с мостом Вина

Для получения синусоидальных колебаний необходимо ввести цепь отрицательной обратной связи ( $ООС$ ), такую, чтобы обеспечивалось усиление усилителя на уровне чуть большем, чем значение усиления (условие баланса амплитуд).

$RC$ -генератор с мостом Вина обеспечивает выходной сигнал с искажениями порядка 0,05 %. Однако, данный тип генераторов сигналов обладает существенным недостатком. Так, для получения качественного синусоидального сигнала с малыми нелинейными искажениями необходимо всегда обеспечивать в схеме точное соотношение резисторов в цепи отрицательной обратной связи, то есть добиваться, чтобы коэффициент передачи в схеме был равен трем ( $\beta = 1/3$ ). Так, если  $\beta < 1/3$ , то в схеме будут возникать сильные искажения, существенно влияя на форму выходного сигнала. В случае, когда  $\beta > 1/3$ , то после возникновения колебаний их амплитуда постепенно начнет уменьшаться, пока, со временем, не станет равной нулю. Поэтому при проектировании подобных  $RC$ -генераторов повсеместно применяют различные автоматические системы стабилизации амплитуды.

При этом стабилизация амплитуды сигнала на входе может быть достигнута посредством нелинейности, которой обладает усилитель. Так, наступление режима генерации синусоидальных сигналов происходит, когда с увеличением амплитуды сигнала, на выходе операционного усилителя его коэффициент усиления падает, за счет чего, баланс амплитуд достигается при некоторой амплитуде.

В основе большинства систем стабилизации амплитуды лежит свойство нелинейных элементов под действием поступающего на них напряжения изменять свое внутреннее сопротивление. На рисунке 2 показана схема  $RC$ -генератора с мостом Вина на  $OU$  с простейшей системой стабилизации амплитуды.

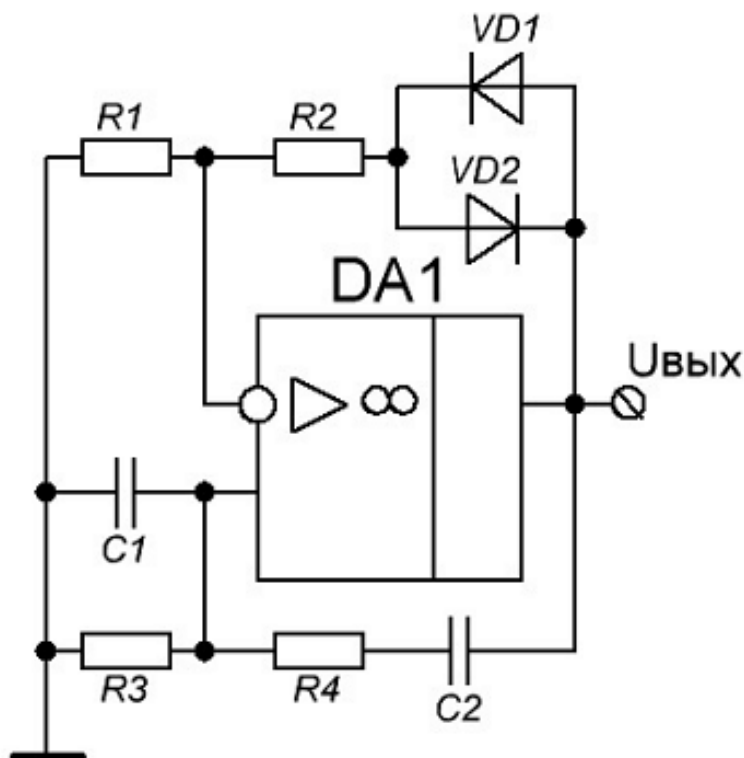


Рисунок 2 – Схема  $RC$ -генератора с мостом Вина на  $OU$  с простейшей системой стабилизации амплитуды

В данной схеме по встречно-параллельной схеме последовательно с резистором  $R2$  включены два диода  $VD1$  и  $VD2$ , за счет чего в схеме

обеспечивается стабилизация амплитуды как отрицательной, так и положительной полуволн синусоидального сигнала.

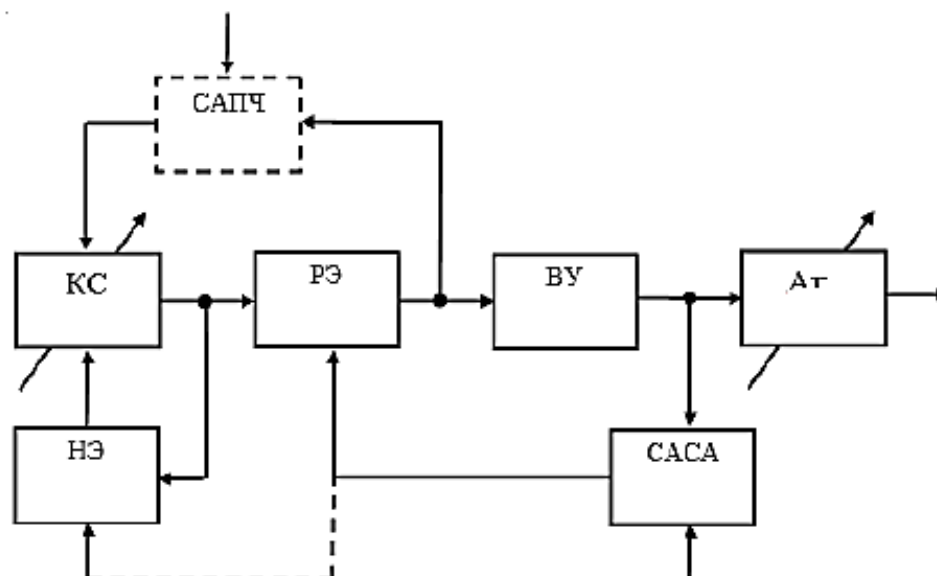
Так, при увеличении амплитуды выходного напряжения, ток, протекающий через диод, возрастает и, как следствие, уменьшается динамическое сопротивление диода, возрастает коэффициент передачи цепи отрицательной обратной связи, за счет чего уменьшается амплитуды выходного сигнала.

При построении данной схемы, также следует учитывать, что величина резистора  $R_2$  должна быть несколько меньшей, чем в схемах без систем стабилизации амплитуды. Так, чтобы выполнялось условие  $\beta < 1/3$ , тем самым будут созданы условия для гарантированного возникновения синусоидальных колебаний.

### **1.3 Принцип действия генераторов**

На рисунке 3 представлена упрощенная блок-схема генератора измерительных сигналов.

Основным блоком представленной схемы является колебательная система. В ней, совместно с нелинейным элементом генератора возникают и формируются колебания заданной формы, амплитуды и частоты. Два эти элемента образуют задающий генератор. В нем создаются условия для возбуждения, установления стационарного режима и стабильности во времени амплитуды и частоты колебаний, превращая их в автоколебания.



*КС* – колебательная система генератора; *НЭ* – нелинейный элемент; *РЭ* – регулирующий элемент; *ВУ* – выходной усилитель мощности; *Ат* – аттенюатор; *САСА* – система автоматической стабилизации амплитуды автоколебаний; *САПЧ* – система автоматической подстройки частоты автоколебаний

Рисунок 3 – Упрощенная блок-схема генератора измерительных сигналов

Обычно выходное напряжение задающего генератора не превышает (1 – 2) В, поэтому далее его усиливают выходным усилителем мощности. С помощью системы автоматической стабилизации амплитуды колебаний и регулирующего элемента на выходе обеспечиваются стабильные автоколебания с «опорным уровнем» переменного напряжения. Его значение задается источником опорного напряжения. Эта же система способна обеспечить и управление изменением амплитуды, изменяя его значение. Но чаще, для этих целей используется многопредельный аттенюатор, включенный на выходе усилителя. Система автоматической подстройки частоты автоколебаний позволяет подстраивать и стабилизировать частоту автоколебаний (на практике не часто входит в состав измерительных генераторов, поэтому на рисунке 3 изображена пунктиром). В прецизионных

генераторах с высокой точностью амплитуды колебаний, таких как генератор ГС-50, нелинейный элемент часто заменяется дополнительным контуром автоматической стабилизации амплитуды, превращая систему стабилизации в двухконтурную.

Все названные системы крайне важны для обеспечения требуемых параметров генерируемых колебаний, но наиболее важной из них является именно колебательная система генератора. Именно в ней зарождаются колебания требуемой формы и частоты. Только эта система, в конечном счете, определяет форму выходного напряжения генератора, потому что другие системы практически не оказывают никаких регулирующих или стабилизирующих воздействий, влияющих на его форму. Поэтому проектированию колебательных систем генераторов уделяют самое пристальное внимание.

#### **1.4 Генератор сигналов прецизионный ГС-50**

Генератор ГС-50 является источником синусоидального сигнала, обладающий прецизионной формой волны. Данный *RC*-генератор предназначается для исследования, испытания и настройки систем и приборов, которые могут применяться в радиоэлектронике, связи, вычислительной и измерительной технике, приборостроении. В генераторе ГС-50 реализуется *RC*-генератор, имеющий дискретную установку частоты и систему стабилизации уровня выходного напряжения. При этом стабилизация амплитуды в нем осуществляется посредством системы автоматического регулирования.

## 1.5 Метрологические характеристики генератора ГС-50

Согласно РМГ-29 [5] метрологической характеристикой называется характеристика одного из свойств средств измерений, которая влияет на результат измерений.

Исходя из положений, установленных в [1], метрологические характеристики средств измерений есть, не что иное, как составная часть исходной информации об этом СИ. Знание достаточной информации о метрологических характеристиках средств измерений на практике необходимо для:

- определения результатов измерений и расчета характеристик инструментальной составляющей погрешности измерений;

- расчета метрологических характеристик каналов измерительных систем, включающих в себя СИ, которые имеют нормированные метрологические характеристики;

- осуществления оптимального выбора СИ,

а также, метрологические характеристики служат в качестве контролируемых характеристик при контроле СИ на соответствии установленным требованиям.

Для генераторов сигналов перечень нормируемых метрологических характеристик средств измерений, по ГОСТ 8.314 [6], состоит из:

- погрешности установки частоты по шкале частот;

- погрешность установки частот по шкале интерполяции;

- нестабильности частоты;

- погрешности установки выходного напряжения;

- погрешности выходного регулятора (делителя, ослабителя) напряжения;

- коэффициента гармоник выходного напряжения.

Так в данной работе будут рассматриваться: погрешность установки выходного напряжения и коэффициент гармоник выходного напряжения.

Генератор ГС-50 способен обеспечивать установку частоты выходного сигнала в диапазоне частот от 10 Гц до 100 кГц включительно.

Установка частоты осуществляется дискретно в следующих поддиапазонах:

- I: от 10 до 100 Гц (настройка через 1 Гц);
- II: от 100 до 1000 Гц (настройка через 10 Гц);
- III: от 1000 до 10000 Гц (настройка через 100 Гц);
- IV: от 10000 до 100000 Гц (настройка через 1000 Гц).

Пределы допускаемой основной погрешности дискретной установки частоты не должны превышать:

- I, II, III поддиапазоны:  $\pm 1 \%$ ;
- IV поддиапазон:  $\pm 1,5 \%$ .

Неравномерность уровня выходного напряжения на выходе «0<sup>0</sup>» в диапазоне частот относительно уровня выходного напряжения на частоте 1 кГц не должна превышать:

- $\pm 1 \%$  в диапазоне от 10 до 20 Гц;
- $\pm 1,5 \%$  в диапазоне от 0,02 до 100,00 кГц.

Коэффициент гармоник выходного сигнала не более:

- I поддиапазон: 0,0003 %;
- II, III поддиапазоны: 0,0002 %;
- IV поддиапазон: 0,0003 %;
- IV поддиапазон: 0,003 % [5].

Известно, что искажение сигнала зависит от следующей суммы:  $THD + Noise$ , где  $THD$  – общий коэффициент гармоник (малое значение);  $Noise$  – шум.



## 1.5.1 Определение коэффициента гармоник выходного напряжения

Генераторы сигналов помимо колебаний основной частоты, так же генерируют нелинейные искажения, так называемые, сигналы напряжения гармоник, являющиеся помехами. С помощью коэффициента гармоник выходного напряжения можно оценить такие гармоники, которые возникают из-за нелинейных искажений сигнала.

Для генераторов общего назначения коэффициент гармоник составляет от 0,3 до 2 %. Высококачественные генераторы имеют коэффициент гармоник в диапазоне от 0,02 до 0,05 % [6].

Используя измеритель нелинейных искажений, селективного вольтметра или анализатора гармоник, определяют коэффициент гармоник выходного напряжения  $K_f$ .

Коэффициент гармонических составляющих (коэффициент гармоник [total harmonic distortion (THD)],  $K_\Gamma$ ) представляет собой отношение среднеквадратичного значения суммы гармонических составляющих  $U_i$  к среднеквадратичному значению основной составляющей  $U_1$  [7], рассчитывается по формуле:

$$K_\Gamma = \sqrt{\sum_{i=2}^{40} \left(\frac{U_i}{U_1}\right)^2}. \quad (1)$$

THD зависит в первую очередь от:

- нелинейных свойств активных элементов – транзисторов;
- схем включения транзисторов в усилительном каскаде;
- схемы построения усилительных каскадов;
- типа, глубины и способа введения обратной связи;
- типа нагрузки и других.

### **1.5.2 Определение нестабильности частоты**

Одним из важнейших свойств генератора сигналов является высокая стабильность частоты генерируемых колебаний. В генераторах используют такие дестабилизирующие факторы, как: непостоянство электрических параметров элементов и деталей; влияния нагрузки, включаемой в выходную цепь генератора; изменение напряжения питания; изменение геометрических размеров деталей колебательных контуров. Снижение данных факторов обеспечивается рациональным конструированием приборов [6]. С помощью частотомера или при помощи частотного компаратора определяют нестабильность частоты на определенных частотах, которые указаны в нормативно-технической документации на каждый конкретный тип генераторов сигналов.

### **1.5.3 Определение погрешности установки частоты по шкале частот**

С помощью частотомера определяют погрешность установки частоты по шкале частот при максимальном выходном напряжении и номинальной нагрузке. Основную погрешность, для генераторов с диапазонно-кварцевой стабилизацией частоты, определяют сравнением с образцовой частотой. У поверяемого/калибруемого генератора отклонение частоты от номинального значения, воспроизводимой стандартом частоты, определяют с помощью частотного компаратора [6].

### **1.5.4 Определение погрешности установки выходного напряжения**

Низкочастотные генераторы обеспечивают достаточно большое выходное напряжение. С помощью измерительных устройств, таких как,

термоэлектрический компаратор или образцовый вольтметр определяют погрешность установки выходного напряжения генератора.

Погрешность установки выходного напряжения генераторов, имеющих в качестве индикатора вольтметр со шкалой, определяют не менее чем в трех отметках шкалы на каждом поддиапазоне вольтметра на опорной частоте генератора и в одной отметке шкалы, соответствующей номинальному выходному напряжению, не менее чем на пяти других частотах диапазона, указанных в нормативно-технической документации на прибор конкретного типа, в том числе на частотах, соответствующих началу и концу диапазона.

Определяемая погрешность у генераторов, имеющих в качестве индикатора выходного напряжения вольтметр с отметкой номинального значения, определяют при установке напряжения на это значение, которое указывают в нормативно-технической документации для генератора конкретного типа на опорной частоте и на крайних частотах диапазона [6].

### **1.5.5 Описание функциональной блок-схемы генератора ГС-50**

На рисунке 4 представлена функциональная блок-схема генератора ГС-50.

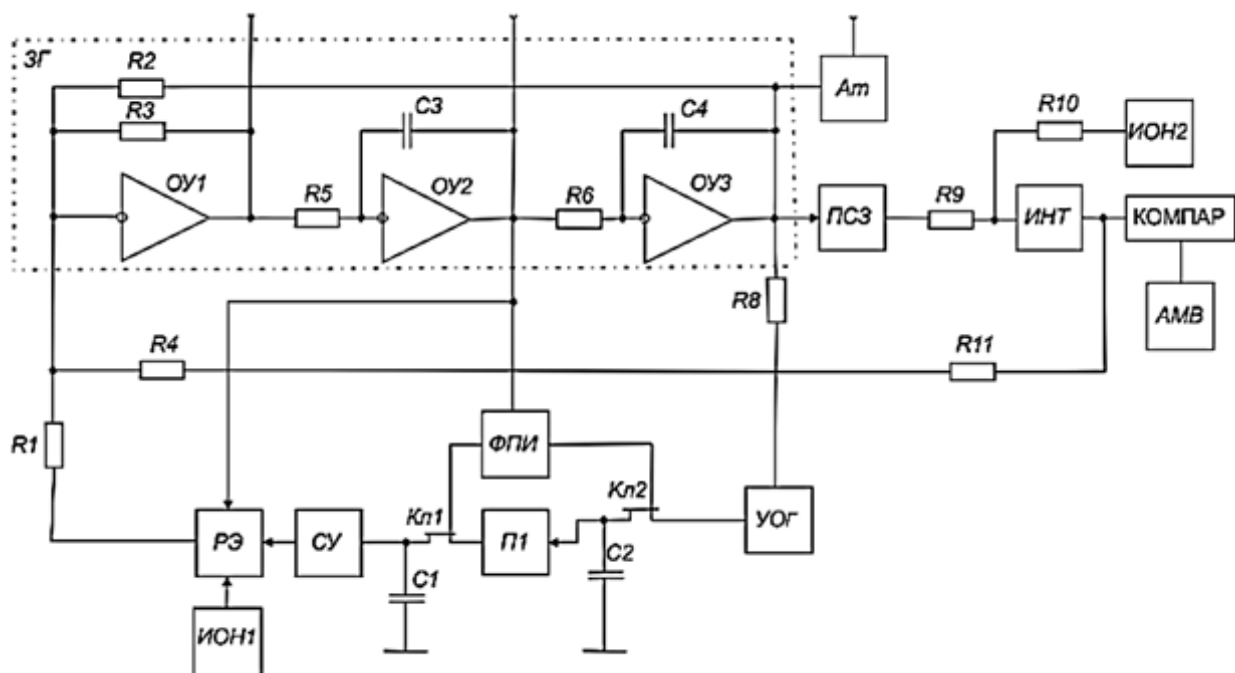


Рисунок 4 – Функциональная блок-схема генератора ГС-50

Генератор ГС-50 основан на задающем генераторе (ЗГ), выполненном по схеме колебательного звена с активной фазирующей цепью, которая основана интегратором и двухконтурной системой стабилизации напряжения на выходе ЗГ. Напряжение переменного тока в данном генераторе с выхода поступает на внутренний контур стабилизации амплитуды, состоящий из: усилителя-ограничителя (УО); электронных ключей на полевых транзисторах (Кл1 и Кл2); повторителя напряжения (П1); запоминающих конденсаторов (С1 и С2); согласующего усилителя (СУ); формирователя прямоугольных импульсов (ФПИ).

Импульсы, образующиеся на выходе усилителя-ограничителя, преобразуются цепью, состоящей из Кл1, Кл2, П1 и ФПИ, конденсаторов С1 и С2 в напряжение постоянного тока с уровнем пропорциональным амплитуде импульсов УО. Полученное усиленное напряжение постоянного тока служит для управления сопротивлением канала одного из дифференциально включенных полевых транзисторов в составе регулирующего элемента (РЭ). Сопротивление второго транзистора,

подключенного к источнику опорного напряжения *ИОН1*, всегда остается постоянным. На основной вход поступает напряжение переменного тока с выхода первого интегратора в составе активной фазирующей цепи, сдвинутое на  $90^\circ$  относительно выходного напряжения *ЗГ*.

Напряжение с выхода задающего генератора также поступает на внешний контур стабилизации амплитуды, включающий в себя: преобразователь средневыпрямленных значений (*ПСЗ*); интегратор (*ИНТ*); источник опорного напряжения (*ИОН2*).

Выпрямленный сигнал отрицательной полярности с выхода *ПСЗ* через резистор *R9* поступает на вход интегратора *ИНТ*, где сравнивается с положительным напряжением источника *ИОН2*. Если появляется рассогласование, сигнал с выхода интегратора производит изменение уровня ограничения усилителя-ограничителя с целью уменьшения рассогласования.

Аттенюатор *Ат* служит для ступенчатого ослабления выходного напряжения прибора от 0 до 60 дБ (через 10 дБ). Для предотвращения срыва колебаний при переключениях частоты предусмотрено быстродействующее устройство запуска, которое включает в себя компаратор *КОМПАР*, а также автоколебательный мультивибратор *АМВ*.

Таким образом к основным функциональным узлам генератора сигналов ГС-50 относятся:

- задающий генератор;
- внутренний контур стабилизации амплитуды;
- внешний контур стабилизации амплитуды;
- аттенюатор;
- быстродействующее устройство запуска.

### **1.6 Задающий генератор в составе генератора ГС-50**

При включении питания в колебательной системе задающего генератора автоматически происходит возникновение электрических

сигналов заданной формы. При этом, под возбуждением колебаний можно понимать непрерывное увеличение их амплитуды от малых значений до достаточно больших. Это крайне важный процесс, без которого колебаний на выходе не будет и выполнение основной функции генератора станет невозможным.

Механизм возникновения колебаний основан на том, что в реальных генераторах активные и пассивные элементы (такие как: транзисторы, резисторы, усилители и диоды) способны создавать на своих внешних выводах напряжения, изменяющиеся по случайному закону. Их также называют внутренними шумами и обычно они имеют достаточно малые значения.

Для нарастания колебаний, как в реальной автоколебательной системе, так и в ее математической модели в систему вводят положительную обратную связь или активный элемент с отрицательным сопротивлением на заранее заданной частоте. Данные действия при проектировании приводят к появлению механизма неустойчивости начального положения равновесия и, как следствие, нарастание амплитуды. Поэтому, делается вывод, что любое, даже самое минимальное напряжение на элементах автоколебательной системы возрастает из-за наличия положительной обратной связи или отрицательного сопротивления активного элемента. Отметим, что здесь имеется в виду именно структурная неустойчивость колебательной системы, для нарастания колебаний в которой достаточно небольшого «начального толчка». Им может быть и скачек напряжения на элементах в момент подачи напряжения питания. Впоследствии скачек напряжения может исчезнуть, а колебания будут по-прежнему нарастать.

При этом, для возникновения периодических колебаний в цепь вводят активный элемент, которым может являться усилитель или элемент с отрицательным сопротивлением для периодического пополнения расходуемой части электрической энергии. Именно наличие в цепи

активного элемента является вторым неизменным условием возникновения в системе колебаний.

Кроме него, в колебательной системе необходимо соблюдать условие неустойчивости переходных процессов. Это означает, что проектирование электрической цепи с активным элементом, должно выполняться так, чтобы любые, даже достаточно малые, начальные напряжения на реактивных элементах или флуктуации электрического напряжения в активной цепи возрастали по амплитуде. Здесь следует отметить, что подобное нарастание напряжений и токов присуще только неустойчивым во времени процессам. Исходя из этого, условие неустойчивости процессов в электрической цепи является важным условием возникновения колебаний.

Также особое внимание стоит обратить на то, чтобы неустойчивый процесс при определенных параметрах электрической цепи допускал периодическую форму, то есть был бы колебательным и при этом повторялся периодически во времени. Отсюда вытекает еще одно условие возникновения колебаний – условие периодической колебательности переходных процессов.

Также колебательный процесс в цепи должен быть управляемым, т. е. всегда должна быть предусмотрена возможность управления переходным процессом, нарастанием или убыванием амплитуды колебаний. Эта управляемость может быть обеспечена самим активным элементом, а также с помощью дополнительного нелинейного элемента типа ограничителя напряжения, лампочки накаливания, термистора или системы автоматической стабилизации амплитуды колебаний. Управляемость колебательной переходной характеристики является пятым условием. И, наконец, периодический процесс в колебательной системе должен быть устойчивым к любым возмущениям, как внешним, так и возникающим в самой системе.

Физически действие всех условий можно объяснить тем, что, раз возникнув под действием каких-либо возмущений, колебания в электрической цепи нарастают и превращаются в незатухающие

периодические колебания определённой формы, амплитуды и частоты независимо от вызвавших их возмущений, т. е. превращаются в автоколебания. Именно эта возможность превращения колебаний в автоколебания переводит колебательную систему в автоколебательную систему, т. е. в автогенератор.

Рассмотрим колебательную систему генератора ГС-50.

На рисунке 5 представлена электрическая схема колебательной системы задающего генератора, состоящего из одного инвертора ( $OY1$ ,  $R1$ ,  $R2$ ) и двух интеграторов ( $OY2$ ,  $R3$ ,  $C1$  и  $OY3$ ,  $R4$ ,  $C2$ ). На схеме также обозначены входные и выходные напряжения.

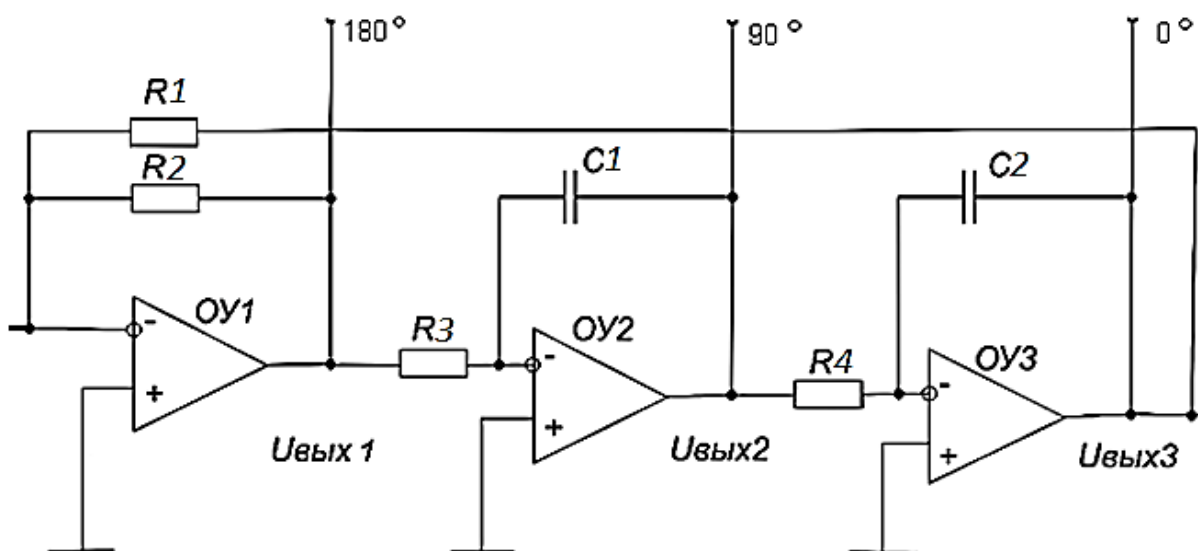


Рисунок 5 – Электрическая схема колебательной системы задающего генератора

В приложении В приведено описание условий возникновения колебаний в колебательной системе задающего генератора.



### 1.6.1 Инвертор на основе операционного усилителя

Инвертор используется в качестве устройства, способного преобразовывать постоянный ток в переменный. При этом величина напряжения изменяется.

Инверторы напряжения применяются, как в виде отдельных устройств, так и входят в состав различных источников и систем бесперебойного питания аппаратуры электрической энергией переменного тока.

Базовая схема инвертора представлена на рисунке 6.

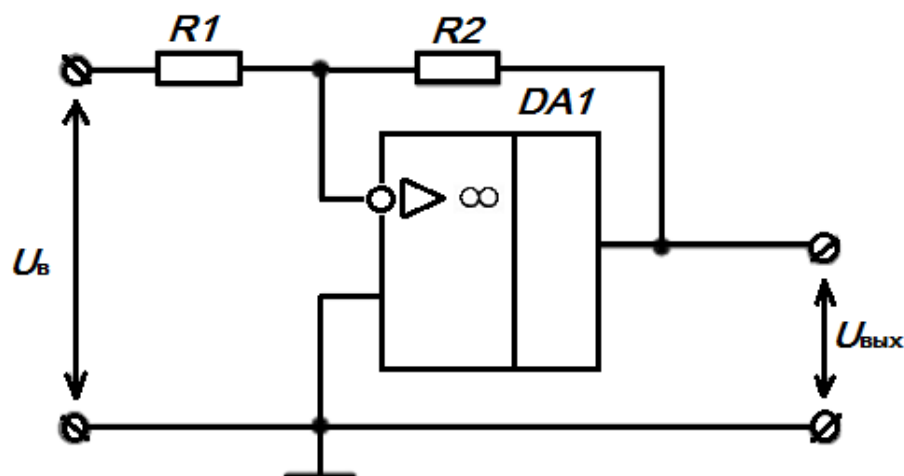


Рисунок 6 – Схема инвертирующего усилителя

Инвертор относится к наиболее простым и часто используемым аналоговым схемам. С помощью всего двух резисторов возможно установить требуемый коэффициент усиления. По определению коэффициент усиления равен:

$$k_y = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}$  – напряжение на выходе инвертора, В;

$U_{\text{ВХ}}$  – напряжение на входе инвертора, В.

Или иначе:

$$k_y = -\frac{I_2 R_2}{I_1 R_1}. \quad (3)$$

Исходя из того, что входное сопротивление инвертирующего входа бесконечно велико ток будет протекать только через цепь  $R_1 \rightarrow R_2$ . Так как два разных тока не могут протекать в одной ветви схемы, следовательно,  $I_1 = I_2$ .

В итоге итоговая формула для определения коэффициента усиления в схеме:

$$k_y = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (4)$$

Известно также, что входной и выходной сигнал отличаются друг от друга на  $180^\circ$ . Иначе говоря, сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ . Изменение знака сигнала на выходе интегратора достигается путем введения по инвертирующему входу  $OY$  параллельной обратной связи по напряжению с помощью резистора  $R_2$ . При этом, неинвертирующий вход операционного усилителя связан с общей точкой входа и выхода схемы (заземлен), а входной сигнал подается на инвертирующий вход  $OY$  через резистор  $R_1$ .

### 1.6.2 Интегратор на основе операционного усилителя

Схемы интеграторов: простой  $RC$ -интегратор и интегратор на основе  $OY$  показаны на рисунках 7 и 8.

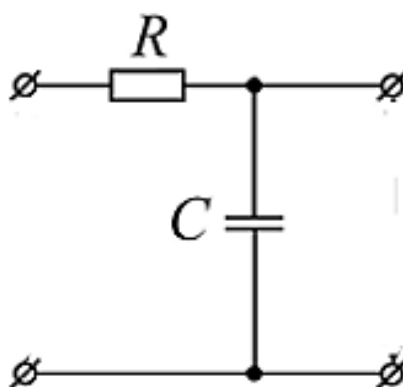


Рисунок 7 – Простой  $RC$ -интегратор

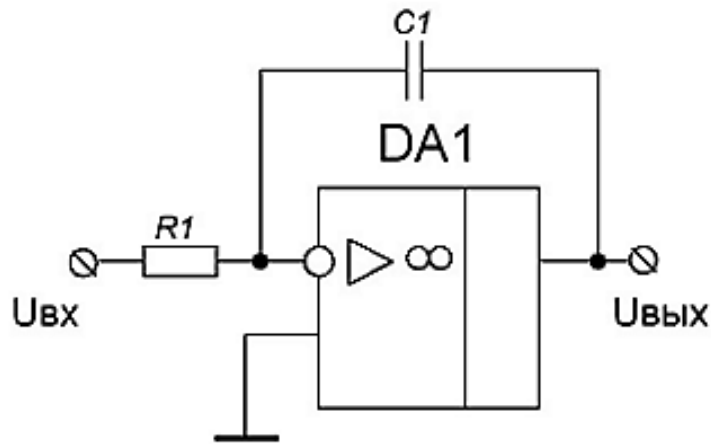


Рисунок 8 – Интегратор на основе *OU*

Простой *RC*-интегратор обладает рядом серьезных недостатков. Во-первых, при прохождении сигнала через *RC*-интегратор происходит ослабление входного сигнала. Во-вторых, *RC*-интегратор имеет высокое выходное сопротивление.

Интегратор на основе *OU* лишён, приведенных выше, недостатков, поэтому на практике применяется чаще. Он состоит из *OU DA1*, входного резистора *R1* и конденсатора *C1*, который обеспечивает обратную связь.

Работа интегратора, вне зависимости от способа его построения, основана на том, что заземлён инвертирующий вход, согласно принципу виртуального замыкания. Так, входной ток  $I_{ВХ}$  протекает через резистор *R1*, в тоже время для уравнивания точки нулевого потенциала, конденсатор будет заряжаться током равным по величине  $I_{ВХ}$ , но с противоположным знаком. В результате, на выходе интегратора будет формироваться напряжение, до которого конденсатор заряжается этим током. Входное сопротивление интегратора будет равно сопротивлению резистора *R1*, а выходное сопротивление будет определяться параметрами *OU*.

Для интегратора существует известное соотношение:

$$U_{ВЫХ} = \frac{1}{R1C1} \int U_{ВХ}, \quad (5)$$

$$\tau = R1C1. \quad (6)$$

Несмотря на то, что интегратор на основе  $ОУ$  не имеет недостатков, присущих простым  $RC$ -интеграторам, тем не менее, он также обладает некоторыми недостатками. Его основным недостатком является явление дрейфа выходного напряжения. В основе данного явления лежит то, что кроме заряда входным током конденсатор  $C1$  заряжается различными токами утечки и смещения  $ОУ$ . Последствия данного недостатка могут привести к насыщению  $ОУ$ , так как появляется напряжение смещения на выходе схемы.

Для устранения данного недостатка можно применить три способа:

- 1) Использовать  $ОУ$ , обладающий малым напряжением смещения.
- 2) Периодически разряжать конденсатор.
- 3) Шунтировать конденсатор  $C1$  сопротивлением  $R_p$ .

Реализация данных способов показана на рисунке 9.

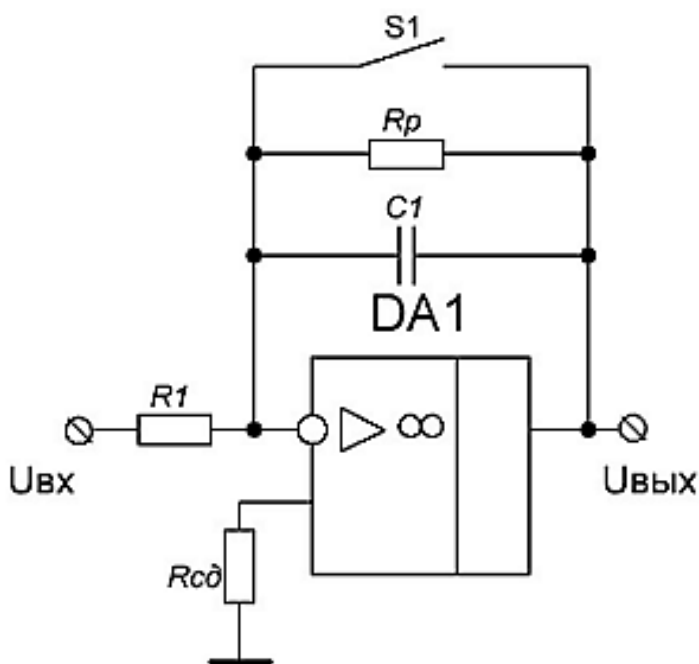


Рисунок 9 – Устранение дрейфа выходного напряжения интегратора

Включение резистора  $R_{сд}$  между землёй и неинвертирующим входом позволяет снизить входное напряжение смещения, за счёт уравнивания падения напряжения на входах  $ОУ$ , величина  $R_{сд} = R1 \parallel R_p$ , либо  $R_{сд} = R1$  (при отсутствии  $R_p$ ) [8].

Величина резистора  $R_p$  выбирается из того, что постоянная времени  $R_p C_1$  должна быть значительно больше, чем период интегрирования, то есть  $R_1 C_1$ :

$$R_p C_1 > 10 R_1 C_1. \quad (7)$$

Конденсаторы, применяемые в интеграторах, должны иметь очень малый ток утечки, особенно если частота интегрирования составляет единицы Герц.

## **2 Компьютерное моделирование сложных систем**

### **2.1 Метод компьютерного моделирования**

Методы компьютерного моделирования (далее – моделирование) уже давно прочно закрепились практически во всех областях науки и техники. В последние годы все чаще заходит речь о компьютерных экспериментах, а также о необходимых для их реализации компьютерных инструментах.

Моделирование следует рассматривать, как метод исследования реальных или гипотетических систем, процессов, которые характеризуют эволюцию данных систем [9]. При этом во время решения задач анализа и синтеза используются компьютерные модели (далее – модели) этих систем, а не они сами.

В общем случае, модель объекта - это какой-либо другой объект, у которого отдельные свойства полностью или частично совпадают со свойствами, которыми обладает исходный объект. Так, модель способна заменить собой исходный объект. При этом, сохраняя только некоторые, наиболее существенные его свойства, которые определяются целями моделирования [10].

Моделирование, в общем случае, представляет собой ряд последовательности следующих этапов:

- 1) Выбор объекта и конкретизация целей моделирования;
- 2) Разработка необходимых критериев соответствия объекта и его модели;
- 3) Непосредственное создание модели;
- 4) Осуществление проверки соответствия модели объекту;
- 5) Применение модели для решения поставленных задач.

Очевидно, что модель любого объекта представляет собой лишь приближение к моделируемому объекту, так как обладает только отдельными, специально отобранными свойствами. Теоретически при

необходимости можно создать модель, максимально приближенную к исходному объекту.

Моделирование стало в последнее время неотъемлемым этапом при проведении исследований и анализа в современной науке [11]. Это связано с тем, что зачастую невозможно провести или повторить эксперимент без значительных затрат на него. Под моделированием будем принимать метод исследования, при котором изучаемый объект, в нашем случае – генератор сигналов, заменяется моделью достаточно точно описывающей его и уже с ней проводятся эксперименты, цель которых заключается в получении информации об объекте.

В данной работе выбрано моделирование, потому что аналитическое решение имеет недостатки, заключающиеся в том, что точное аналитическое решение можно получить только тогда, когда модель достаточно проста и можно легко вычислить ее соотношения и параметры. Ведь на практике, зачастую аналитические решения представляют собой чрезвычайно сложные алгоритмы, требующие огромных компьютерных ресурсов. Сложные системы и объекты, как, например, генератор ГС-50, исключают возможность какого-либо аналитического решения. Тогда и приходит на помощь моделирование. Оно позволяет многократно испытывать объект, меняя нужные входные данные, чтобы обеспечивать определение их влияния на выходные критерии оценки объекта [11].

## **2.2 Компьютерное моделирование генератора ГС-50**

Моделирование способно обеспечивать промежуточный уровень контроля разрабатываемого объекта, генератора ГС-50, между программным обеспечением моделирования и тестированием самого объекта.

Посредством моделирования разрабатывается модель генератора, а затем запускается ее симуляция, которая в полной мере описывает его программные и аппаратные составляющие. При этом, компоненты, из

которых состоит генератор сигналов моделируются в соответствующей программной среде. Такая методика делает возможным с помощью программного обеспечения ускорить выполнение исследования генератора ГС-50.

Для исследования генератора в работе был использован такой программный продукт, как: *National Instruments Multisim* (Далее – *Multisim*). Рассмотрим его далее.

*Multisim* является единственным в мире эмулятором схем, позволяющим создавать наилучшие продукты и, при этом, затрачивая наименьшее количество времени. *Multisim* представляет собой универсальное программное средство, позволяющее строить и, в дальнейшем, тестировать электрические схемы. *Multisim* позволяет создавать интерактивные принципиальные электрические схемы, а затем осуществлять моделирование режимов их работы.

Система схемотехнического моделирования *Multisim* предназначена для моделирования и анализа электрических схем. Работа в реальной лаборатории требует больших временных затрат на подготовку эксперимента. *Multisim* – электронная лаборатория, позволяющая сделать изучение электрических схем более доступным. Ошибки экспериментатора в реальной лаборатории могут привести к большим материальным потерям, в то время как, работая в *Multisim*, пользователь застрахован от случайного поражения током, а приборы не выйдут из строя из-за неправильно собранной схемы.

На данный момент база данных компонентов *Multisim* уже насчитывает более 1200 *SPICE* - моделей элементов от ведущих производителей, среди которых числятся *Analog Devices*, *Linear Technology* и *Texas Instruments* [12].

Основными достоинствами *Multisim* являются:

- простой интерфейс;



- ориентация на компьютерное моделирование электронных схем и систем;

- достаточно высокая точность моделирования;

- быстрота моделирования;

- широкий спектр различных возможностей.

На основании приведенных достоинств *Multisim*, дальнейшее моделирование шумовых характеристик генератора ГС-50 будет проводиться именно в нем.

### **3 Шумы элементов генераторов сигналов**

#### **3.1 Общие понятия о шумах элементов электронных систем**

На клеммах абсолютно всех электронных систем и устройств наблюдаются случайные флуктуации напряжения (или тока), и эти флуктуации обычно носят название – шум. Данный шум присущ самой системе, а не вызван, например, дефектом контактов или каким-либо иным устранимым паразитическим эффектом. Он зарождается в результате случайного поведения носителей заряда внутри электронных составляющих систем [15].

Любой шум может обуславливаться наличием одного и/или более источников. В электронных системах, шумы часто рассматриваются, как вредный фактор, накладывающий ограничения на работу электронных устройств и приборов. Однако шум не всегда является нежелательным. Часто, шум является основным средством, посредством которого, исследуются электрические характеристики самих систем.

Иногда, шум можно рассматривать в качестве электрических сигналов в схеме, отличных от полезных. Искажения, возникающие в схеме в результате воздействия нелинейностей, являются исключением из этого определения. Ведь даже, несмотря на то, что появление таких искажений в схеме крайне нежелательно, их допускается не рассматривать как шумы, до тех пор, пока они, появившись в одной части схемы, не начнут оказывать воздействие на остальные ее части.

Источники шумов делятся на три основные группы. Первая будет включать в себя внутренние источники шумов, которые возникают в результате случайных изменений внутри физических систем. Примерами внутренних шумов можно считать тепловые, дробовые и контактные шумы. Вторая группа представляет собой источники шумов, чье происхождение является искусственным, такие, как двигатели, переключатели, передатчики.

К третьей группе можно отнести источники шумов, являющиеся следствием возмущений природного происхождения, например молниями и всплесками солнечной активности [16].

Чувствительность определяет реакцию схем или приборов на нежелательную электрическую энергию (шум). Порог чувствительности схем и приборов – это максимальная величина шумов, при которой аппаратура будет работать удовлетворительно.

Наиболее распространенными разновидностями шумов являются: тепловой, дробовой и контактный. Подробнее о каждом из них далее.

### 3.1.1 Тепловой шум

Случайные флуктуации скорости носителей заряда, таких как электронов и/или дырок, в резистивном материале приводят к возникновению в схеме теплового шума. Этот механизм хорошо описывается броуновским движением заряда, которое обусловлено тепловой энергией в материале [13].

Тепловые шумы также носят название шумов сопротивления или также могут называться джонсоновскими шумами (по имени открывшего их Дж. Б. Джонсона). Джонсоном [15] в 1928 году было сделано открытие, что непериодическое напряжение имеется во всех проводниках и его величина зависит от изменения температуры. В том же году Найквист [16] определил, что действующее значение напряжения шумов, возникающих в разомкнутой цепи, обусловлено наличием у нее сопротивления и равно:

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{4kT\Delta fR}, \quad (8)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);

$T$  – абсолютная температура, К;

$\Delta f$  – полоса частот шумов, Гц;

$R$  – сопротивление, Ом.

Анализируя формулу (8) можно прийти к выводу, что для уменьшения напряжения, порождённого тепловым шумом, может оказаться полезным минимизировать сопротивление и полосу пропускания системы [17].

### 3.1.2 Дробовой шум

Дробовым шумом называют флуктуации тока, которые вызываются электронами, которые случайно эмитируются, вне зависимости друг от друга, никак не взаимодействуя между собой во время прилета к аноду. Данный шум способен возникать вследствие колебаний тока относительно некоторого среднего значения. Данные Флуктуации обладают случайным характером эмиссии электронов (или дырок) [14].

В 1918 г. У. Шоттки провел теоретический анализ дробовых шумов. В результате было выяснено, что эффективное значение тока этих шумов [18] равно:

$$I_{\text{др}} = \sqrt{2q\bar{I}B}, \quad (9)$$

где  $q$  – заряд электрона ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл);

$\bar{I}$  – среднее значение постоянного тока, А;

$B$  – полоса пропускания, Гц.

### 3.1.3 Контактный шум

Несовершенство контакта между двумя разнородными материалами влияет на возникновение флуктуацией проводимости (переходного сопротивления), что приводит к появлению контактных шумов в схемах. Появление данных шумов всегда обусловлено соединением двух разнородных проводников друг с другом. В транзисторах и диодах также достаточно часто встречаются контактные шумы, возникающие из-за несовершенства контактов этих элементов, а также в композиционных

резисторах, которые содержат множество сплавленных между собой мелких частиц [14].

У реальных резисторов иногда возникают флуктуации сопротивления, которые способны породить дополнительное напряжение шума (которое складывается с постоянно присутствующим напряжением теплового шума), пропорциональное протекающему через резистор постоянному току. Этот шум зависит от многих факторов, в частности от конструкции конкретного резистора, включая резистивный материал и в особенности концевые соединения.

Контактные шумы имеют и другие названия, они зависят от того, в каком элементе схемы возникают шумы. Так, в резисторах они носят название избыточных шумов. Рассматриваемые шумы в электронных лампах, обычно называют фликкер-шумами. Также, вследствие специфической частотной характеристики эти шумы часто называют низкочастотными или 1/f-шумами.

### 3.2 Коэффициент шума

Понятие «коэффициент шума» полностью описывает способ количественного определения уровня шумов в электронных устройствах. Коэффициент шума  $K_{Ш}$  является величиной, только благодаря которой становится возможным сравнение шумовых свойств реальных и идеальных устройств (без шума). По определению [14]:

$$K_{Ш} = \frac{P_{\text{реал.}}}{P_{\text{идеал.}}}, \quad (10)$$

где  $P_{\text{реал.}}$  – мощность шумов на выходе реального устройства, Вт;

$P_{\text{идеал.}}$  – мощность шумов на выходе идеального устройства, Вт.

Мощность шумов на выходе идеального устройства можно рассматривать, как мощность тепловых шумов сопротивления источника.

Стандартной температурой для измерения мощности шумов источника является  $T=290$  К. Следовательно формулу (10) можно записать в виде:

$$K_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{реал.}}}{P_{\text{ист.}}}, \quad (11)$$

где  $P_{\text{ист.}}$  – мощность шумов на выходе, обусловленная шумами источника, Вт.

Эквивалентным определением коэффициента шума является отношение сигнал/шум на входе ( $P_{\text{с.вх}}, P_{\text{ш.вх}}$ ), деленное на отношение сигнал/шум на выходе ( $P_{\text{с.вых}}, P_{\text{ш.вых}}$ ):

$$K_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{с.вх}}/P_{\text{ш.вх}}}{P_{\text{с.вых}}/P_{\text{ш.вых}}}. \quad (12)$$

Отношения сигнал/шум следует выражается в виде отношения мощностей, за исключением, когда входного сопротивления и сопротивления нагрузки равны или, когда в качестве этих отношений можно брать также отношения квадратов напряжений или токов.

### 3.3 Отношение сигнал/шум

Отношение среднеквадратического значения амплитуды сигнала к среднему значению корня из суммы квадратов всех остальных составляющих спектра, включая гармоники, но исключая постоянную составляющую называется отношением сигнал/шум (*SINAD*) [19].

Отношение сигнал-шум является мерой, используемой в науке и технике, которая позволяет сравнить уровень желательного сигнала к уровню фонового шума. *SINAD* определяется как отношение мощности сигнала к мощности шума, на практике часто выражается в децибелах. На рисунке 10 приведен наглядный вид отношения сигнал/шум.

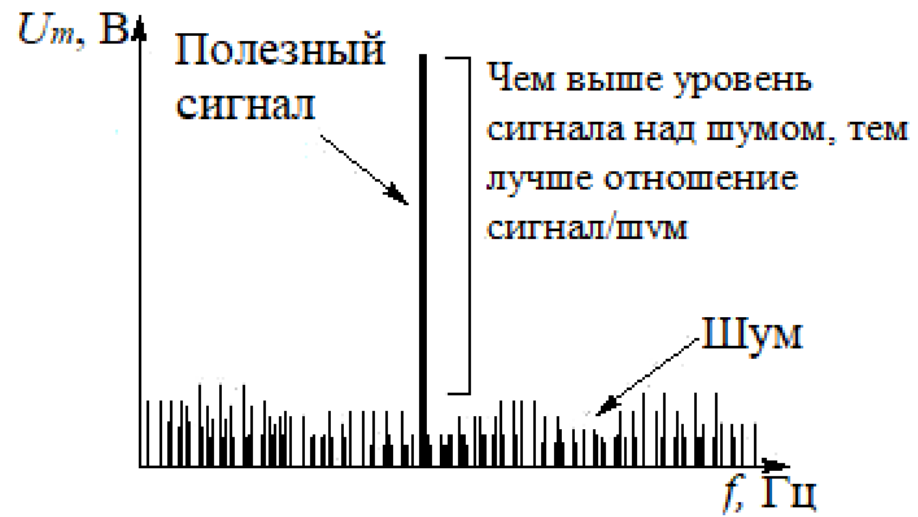


Рисунок 10 – Наглядный вид отношения сигнал/шум

Так, чем выше уровень отношения сигнала над шумом, тем лучше соотношение сигнал/шум.

## 4 Результаты моделирования генератора ГС-50

### 4.1 Процесс нарастания амплитуды в колебательном звене генератора ГС-50

На рисунке 11 показан график возбуждения колебаний на входе и выходе инвертора, в итоге моделирования колебательного звена.

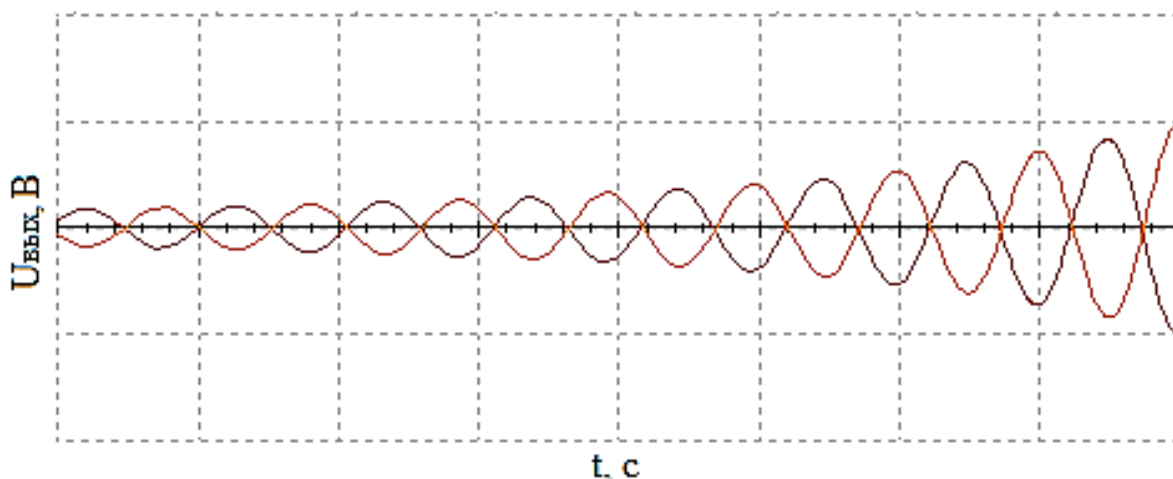


Рисунок 11 – Графики возбуждения колебаний на входе и выходе инвертора

На графике показано нарастание колебаний синусоидальной формы на входе и выходе. Как уже говорилось ранее, сигналы на входе и выходе инвертора отличаются друг от друга на  $180^\circ$ , то есть, сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ . Данное утверждение подтверждается полученными графиками.

На рисунке 12 и 13 показаны графики, возбуждения колебаний на выходе первого интегратора и выходе второго интегратора.



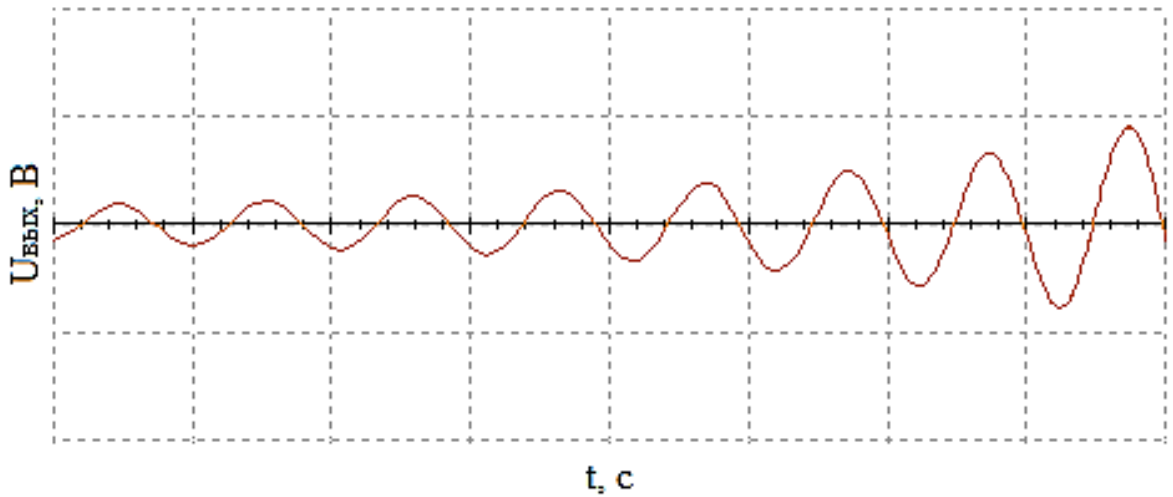


Рисунок 12 – График возбуждения колебаний на выходе первого интегратора

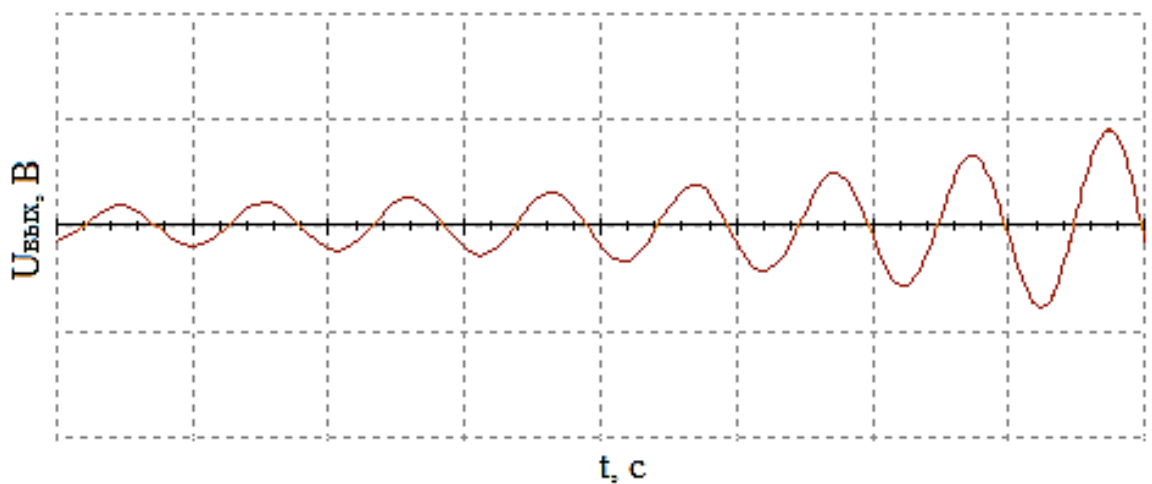


Рисунок 13 – График возбуждения колебаний на выходе второго интегратора

#### 4.2 Процесс установления стационарного режима в колебательном звене генератора ГС-50

На рисунке 14 показаны графики выходного и входного напряжений инвертора в стационарном режиме, после того как прошел переходный

процесс, за счет введения стабилитронов, которые ограничивают амплитуду колебаний на конденсаторах интеграторов.

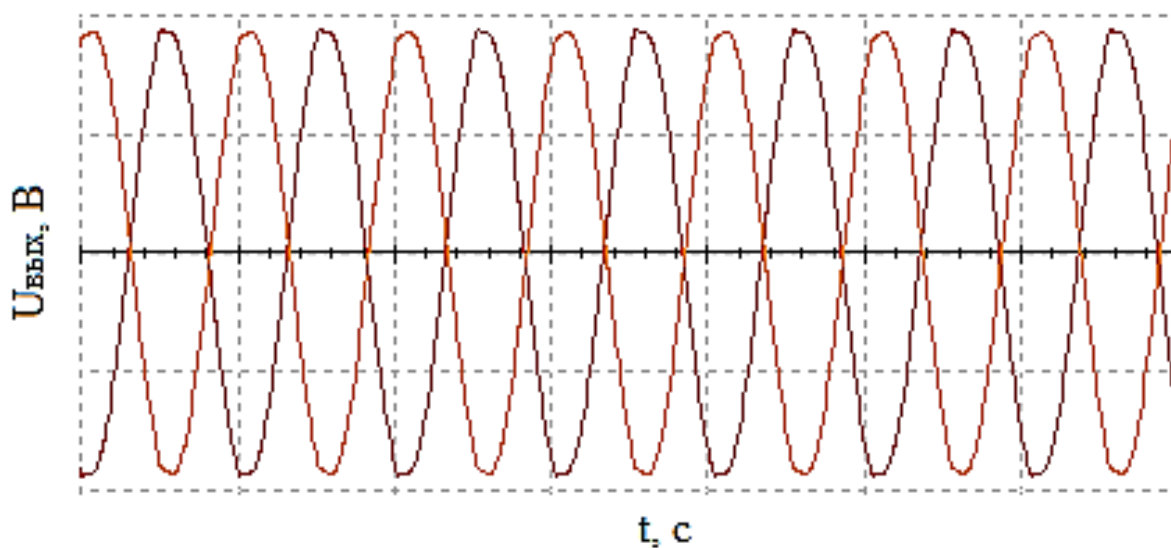


Рисунок 14 – Графики выходного и входного напряжений инвертора в стационарном режиме генератора

На рисунке 15 и 16 показаны графики выходного напряжения первого и второго интегратора, в стационарном режиме.

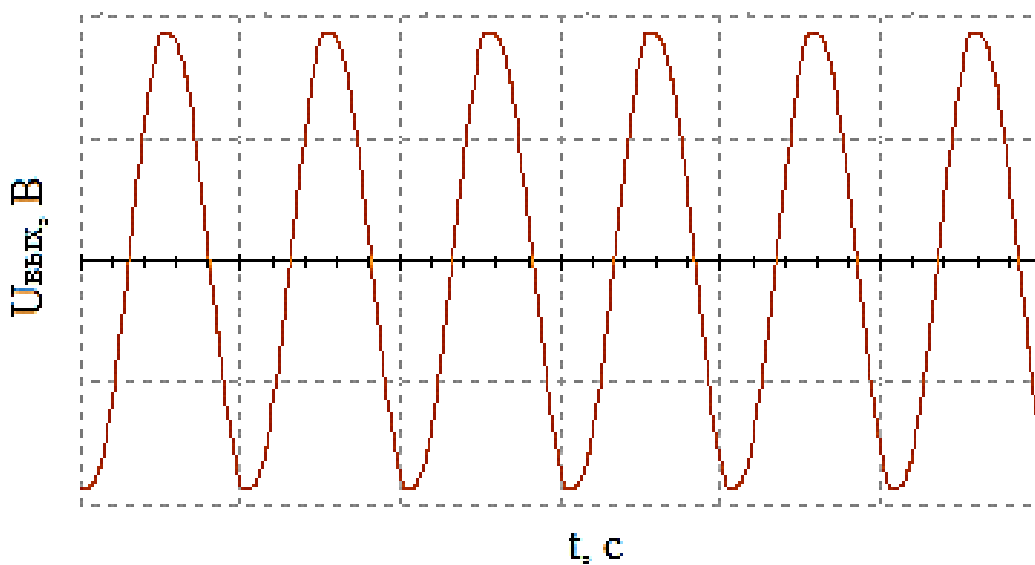


Рисунок 15 – График выходного напряжения первого интегратора в стационарном режиме

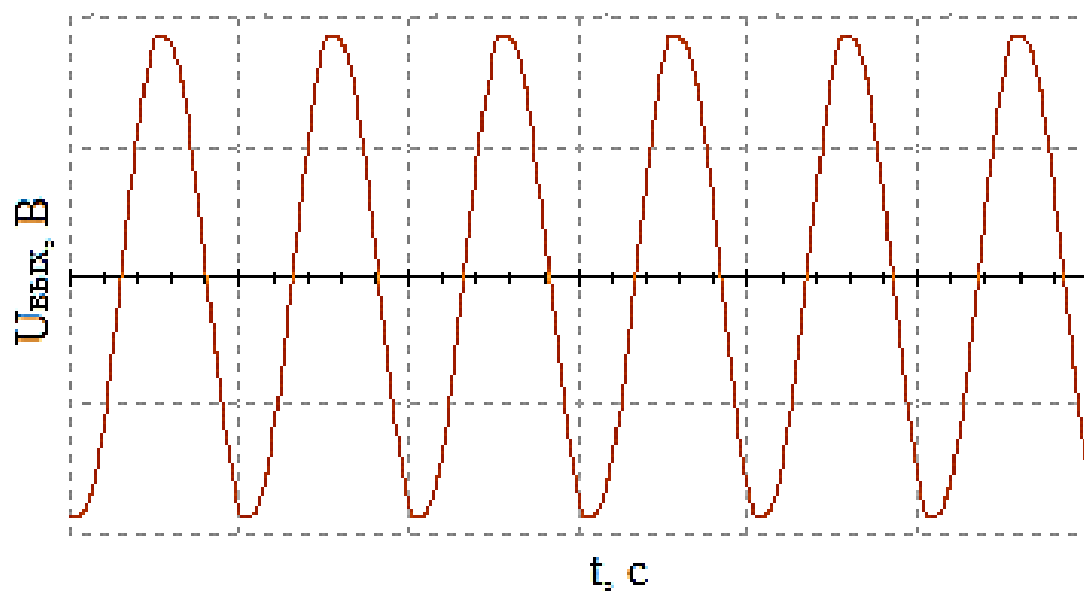


Рисунок 16 – График выходного напряжения второго интегратора в стационарном режиме

## 5 Моделирование функциональных частей генератора ГС-50

### 5.1 Моделирование инвертора в составе генератора ГС-50

Сперва, в работе был исследован инвертор, построенный на двухканальном операционном усилителе. Функциональная схема инвертора приведена на рисунке 17. Схема исследования инвертора в *Multisim* представлена на рисунке 18.

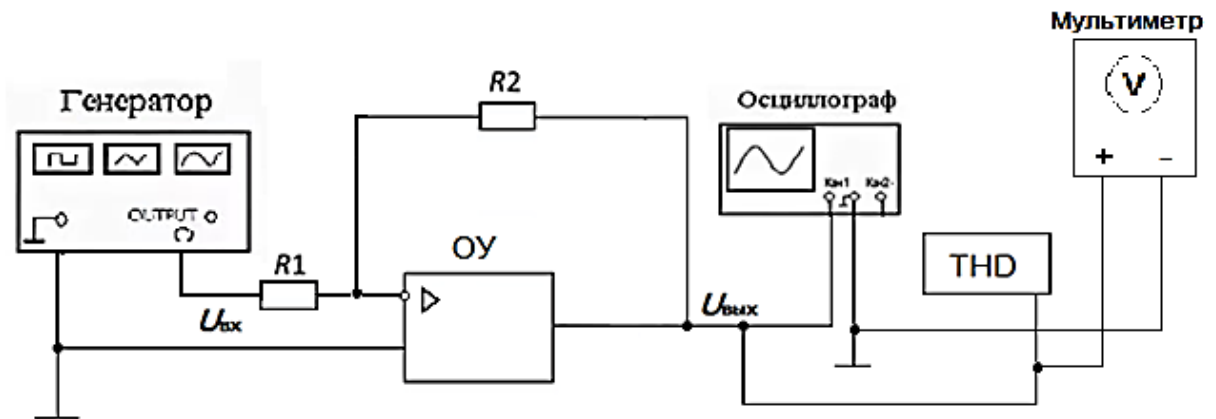


Рисунок 17 – Функциональная схема инвертора

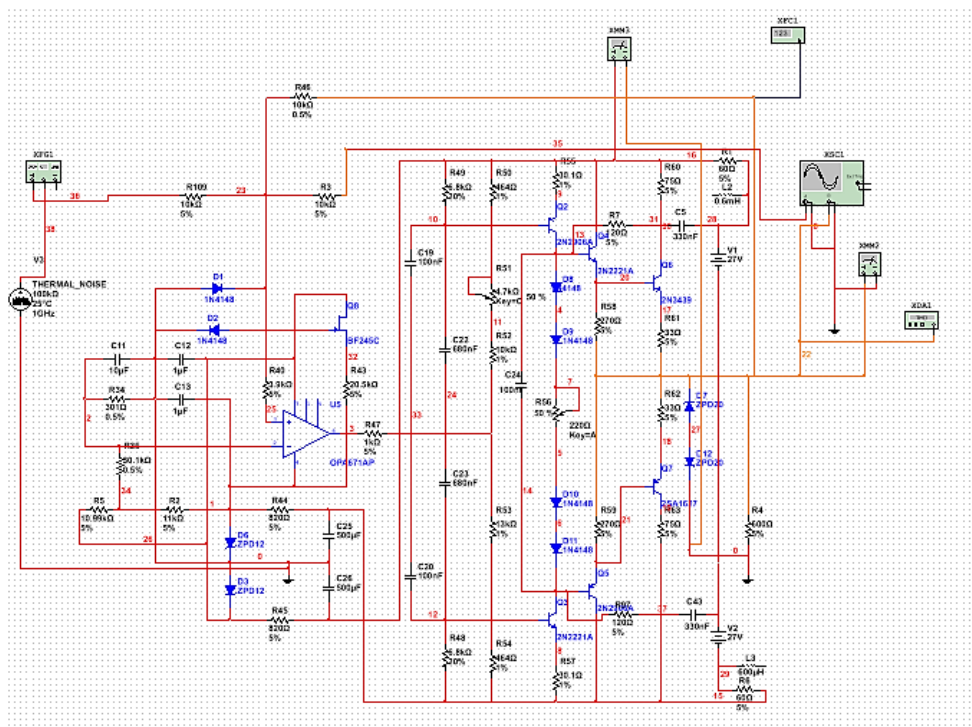


Рисунок 18 – Схема исследования инвертора в *Multisim*

Проведено моделирование искажения сигнала на выходе инвертора генератора. При неизменном входном напряжении  $U_{\text{вх}} = 10 \text{ В}$  и изменяя частоту сигнала  $f$  от 1 Гц до 100 кГц получены такие метрологические характеристики, как: коэффициент гармоник выходного напряжения, уровень выходного напряжения, а также отношение сигнал/шум. Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Полученные результаты моделирования инвертора

$f$ , Гц	$U_{\text{вх}}$ , В	$U_{\text{вых}}$ , В	$K_{\text{г}}$ , %	SINAD, дБ
1	10,000	9,997	0,000	83,850
10	10,000	9,998	0,000	83,678
50	10,000	9,998	0,000	83,596
100	10,000	9,996	0,000	83,590
200	10,000	9,998	0,000	82,538
300	10,000	9,998	0,000	82,503
400	10,000	9,998	0,000	82,455
500	10,000	9,999	0,000	82,359
1000	10,000	9,998	0,001	82,214
5000	10,000	9,999	0,006	70,376
10000	10,000	9,998	0,015	69,845
50000	10,000	9,999	0,095	68,945
100000	10,000	9,998	0,194	67,149

Примечание – В таблице приняты следующие сокращения:  $f$  – частота сигнала, Гц;  $U_{\text{вх}}$  – напряжение на входе инвертора, В;  $U_{\text{вых}}$  – напряжение на выходе инвертора, В;  $K_{\text{г}}$  – коэффициент гармоник, %; SINAD – отношение сигнал/шум, дБ

На рисунке 19 представлен график зависимости коэффициента гармоник от частоты сигнала при напряжении на входе 10 В.

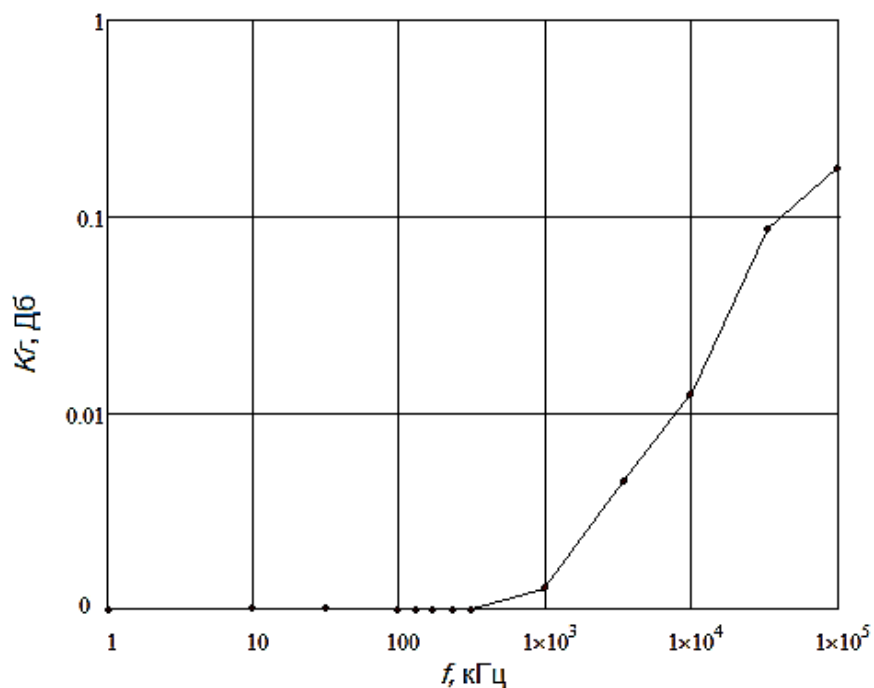


Рисунок 19 – График зависимости коэффициента гармоник от частоты сигнала

На рисунке 20 представлен график зависимости отношения сигнал/шум от частоты сигнала при напряжении на входе 10 В.

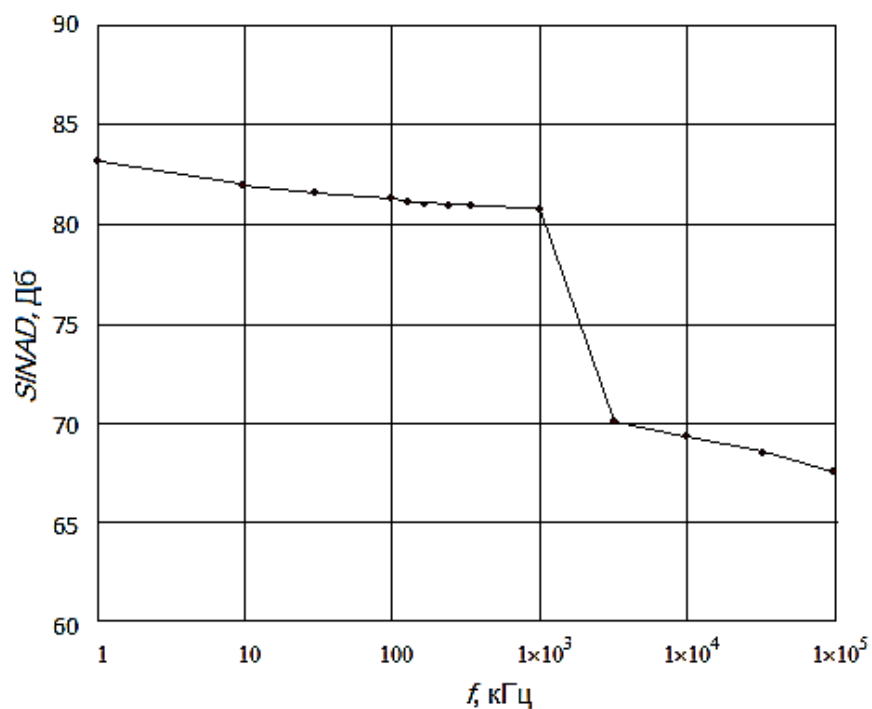


Рисунок 20 – График зависимости отношения сигнал/шум от частоты сигнала при напряжении на входе 10 В

Как видно из графиков, значение коэффициента гармоник плавно возрастает с увеличением частоты сигнала, а отношение сигнал/шум напротив уменьшается. Это связано с тем, что на более высоких частотах нежелательные – высокие частоты недостаточно фильтруются.

## 5.2 Моделирование интегратора в составе генератора ГС-50

Затем в работе был исследован интегратор, построенный на двухканальном операционном усилителе. Функциональная схема генератора приведена на рисунке 21. Схема исследования интегратора в *Multisim* представлена на рисунке 22

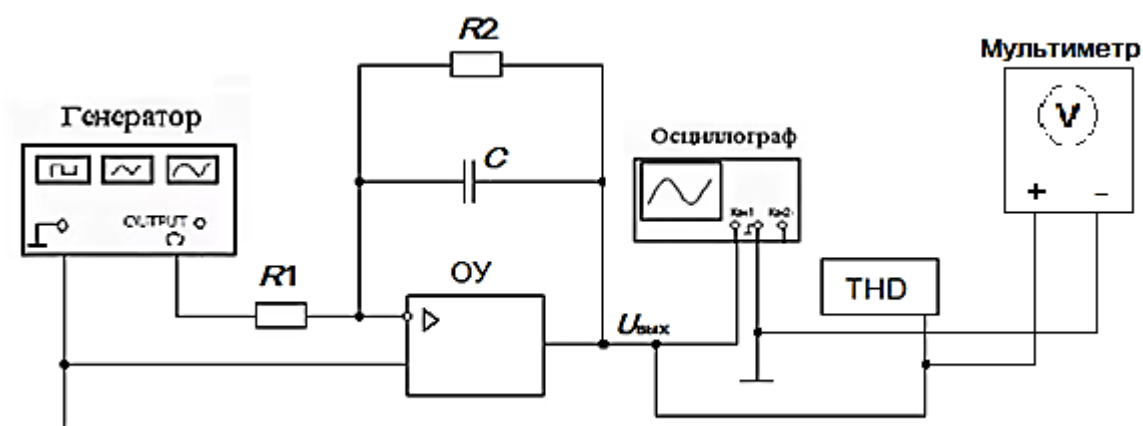


Рисунок 21 – Функциональная схема генератора

Аналогично было проведено моделирование искажения сигнала на выходе инвертора генератора. При неизменном входном напряжении  $U_{\text{вх}} = 10 \text{ В}$  и изменяя частоту сигнала  $f$  от 1 Гц до 100 кГц получены значения коэффициента гармоник выходного напряжения, отношения сигнал/шум, уровень выходного напряжения. Полученные результаты приведены в таблице 2.

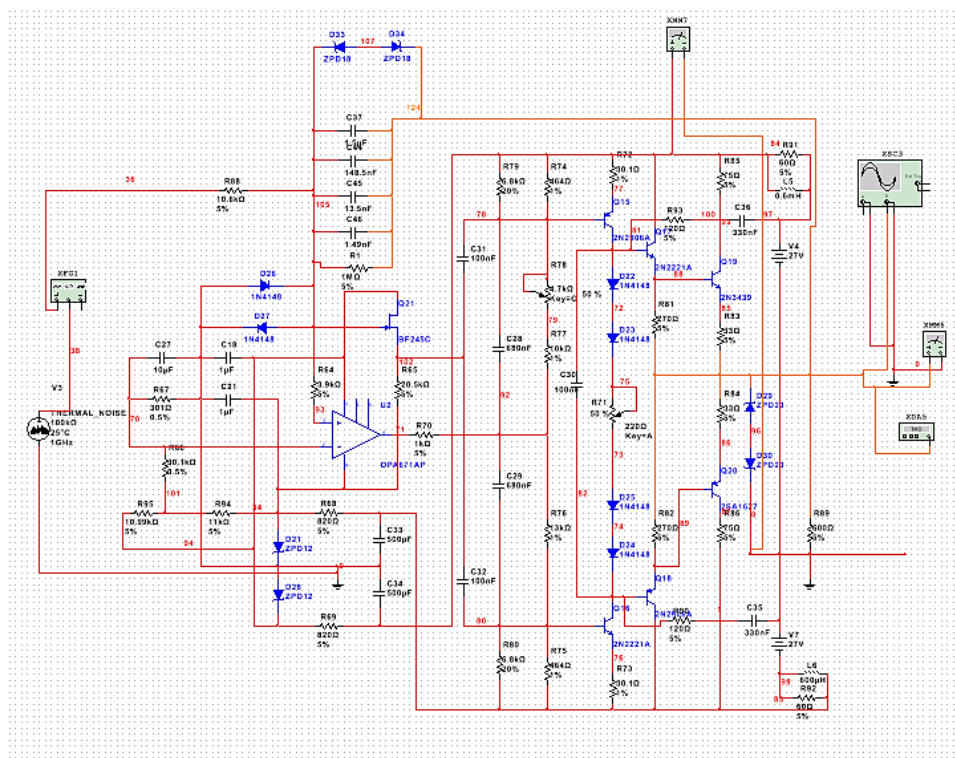


Рисунок 22 – Схема исследования интегратора в *Multisim*

Таблица 2 – Полученные результаты моделирования интегратора

$f$ , Гц	$U_{ВХ}$ , В	$U_{ВЫХ}$ , В	$K_r$ , %	SINAD, дБ
1	10,000	10,001	0,000	89,985
10	10,000	9,021	0,000	89,127
50	10,000	1,804	0,000	86,958
100	10,000	0,902	0,000	86,213
200	10,000	0,451	0,000	85,628
300	10,000	0,300	0,000	81,044
400	10,000	0,225	0,000	78,916
500	10,000	0,180	0,001	68,940
1000	10,000	0,090	0,002	67,135
5000	10,000	0,018	0,002	65,910
10000	10,000	0,009	0,002	64,852
50000	10,000	0,002	0,003	63,528
100000	10,000	0,001	0,008	62,856

Из таблицы 2 видно, что напряжение на выходе генератора уменьшается в геометрической прогрессии. По полученным значениям выходного напряжения был построен график зависимости выходного напряжения от частоты сигнала (рисунок 23).



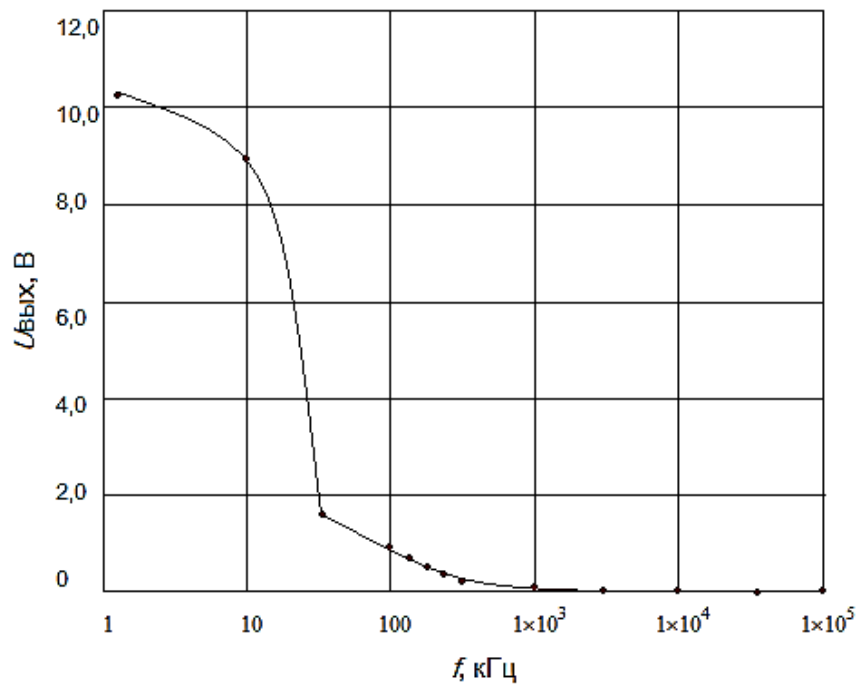


Рисунок 23 – График зависимости выходного напряжения от частоты сигнала

Уменьшение значения напряжения на выходе связано с особыми свойствами интегратора.

Так как работа интегратора, в основном, основана на том, что инвертирующий вход заземлён, согласно принципу виртуального замыкания. Так через резистор протекает входной ток  $I_{\text{вх}}$  и, в тоже время, для уравнивания точки нулевого потенциала, конденсатор заряжается током равным  $I_{\text{вх}}$ , но с противоположным знаком. В результате, на выходе схемы формируется напряжение, до уровня которого конденсатор будет заряжаться этим током. При этом входное сопротивление интегратора будет равно сопротивлению резистора, а выходное сопротивление будет определяться параметрами конкретного операционного усилителя. Так при прохождении сигнала через интегратор происходит ослабление входного сигнала.

На рисунках 24 и 25 изображены график зависимости коэффициента гармоник от частоты сигнала и график зависимости отношения сигнал/шум от частоты сигнала.

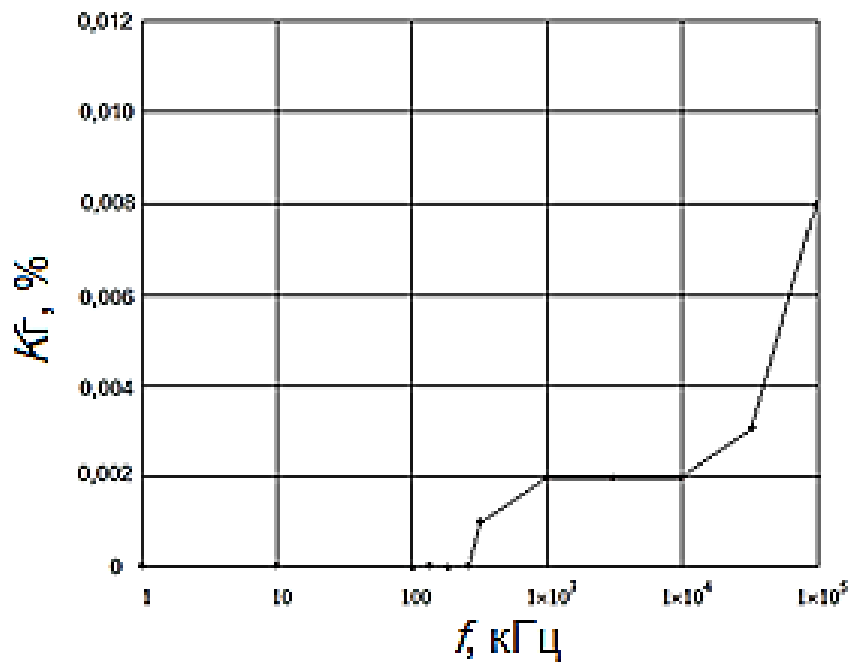


Рисунок 24 – График зависимости коэффициента гармоник от частоты сигнала

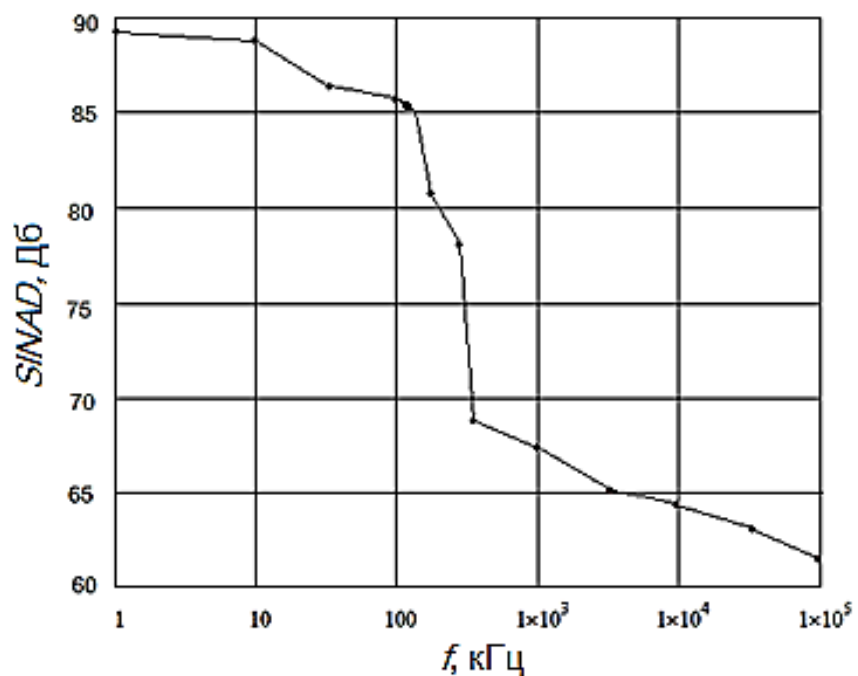


Рисунок 25 – График зависимости отношения сигнал/шум от частоты сигнала

Сравним результаты, полученные в ходе исследования двух функциональных блоков генератора ГС-50: инвертора и интегратора.

Как видно из полученных в предыдущем разделе графиков, коэффициенты гармоник, отношение сигнал/шум, а также напряжение на выходе элементов различны. Это связано с разной природой действия этих элементов.

Так как интегратор по своей сути является фильтрующим устройством, он дополнительно фильтрует нелинейные искажения, в связи с чем, отношение сигнал/шум на выходе интегратора больше, чем на выходе инвертора. На практике принято, считать хорошими устройствами являются те, у которых отношение сигнал/шум превышает 60 Дб.

## 6 Моделирование метрологических характеристик генератора ГС-50

Исследование инвертора и интегратора, основных элементов задающего генератора, позволило исследовать генератор ГС-50 в целом. Была исследована схема, представленная на рисунке 4. Схема исследования генератора ГС-50 в Multisim приведена в Приложении В.

Аналогично предыдущим разделам, изменяя частоту сигнала от 1 Гц до 100 кГц, получаем значения коэффициента гармоник выходного напряжения, отношения сигнал/шум, уровень выходного напряжения. Полученные результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Полученные результаты моделирования генератора

$f$ , Гц	$U_{вх}$ , В	$U_{вых}$ , В	$K_g$ , %	SINAD, дБ
1	10,000	9,998	0,000	84,851
10	10,000	9,996	0,000	84,578
50	10,000	9,998	0,000	84,394
100	10,000	9,996	0,000	84,170
200	10,000	9,999	0,000	83,578
300	10,000	9,998	0,000	83,504
400	10,000	9,997	0,000	83,457
500	10,000	9,999	0,000	83,378
1000	10,000	9,998	0,002	82,214
5000	10,000	9,999	0,005	81,376
10000	10,000	9,999	0,013	79,963
50000	10,000	9,999	0,089	78,875
100000	10,000	9,998	0,198	77,185

На рисунке 26 представлен график зависимости коэффициента гармоник от частоты сигнала.

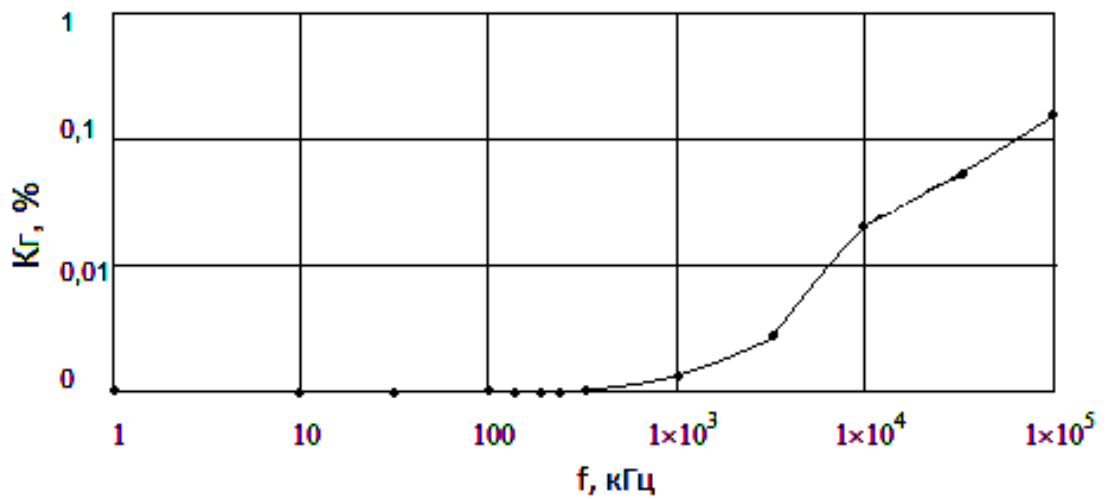


Рисунок 26 – График зависимости коэффициента гармоник от частоты сигнала

На рисунке 27 представлен график зависимости отношения сигнал/шум от частоты сигнала.

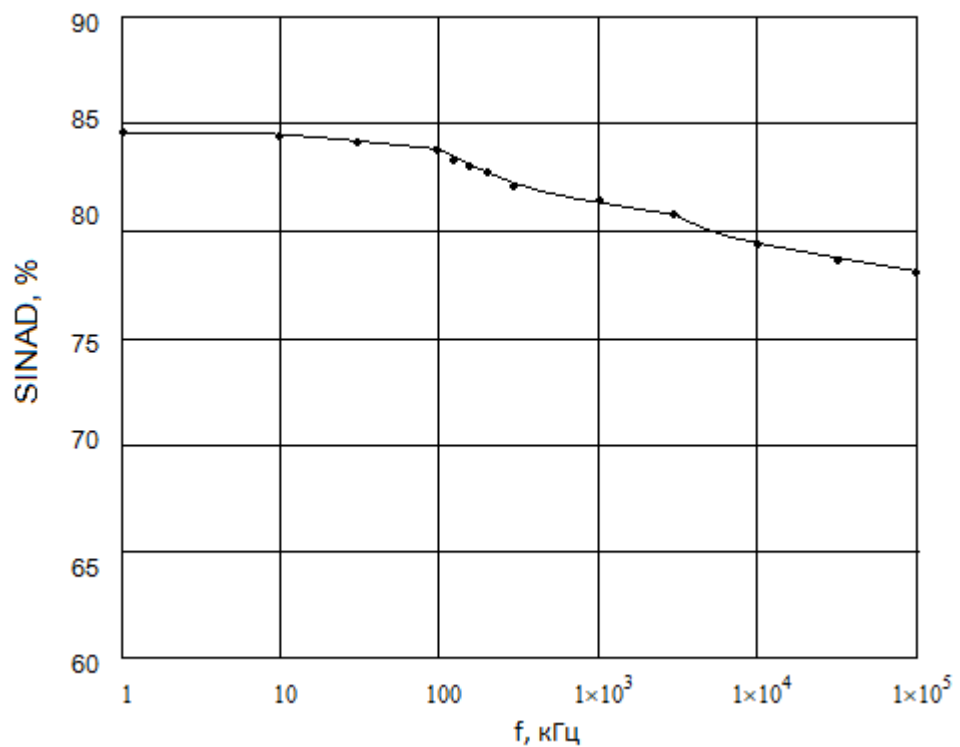


Рисунок 27 – График зависимости отношения сигнал/шум от частоты сигнала

Определим абсолютную и относительную погрешности установки выходного напряжения. Для этого воспользуемся формулами:

$$\Delta U = U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ВЫХ}}. \quad (13)$$

$$\delta U = \frac{\Delta U}{U_{\text{ВХ}}} \cdot 100 \%. \quad (14)$$

Полученные результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Определение погрешности уровня выходного напряжения

$f$ , Гц	$U_{\text{ВХ}}$ , В	$U_{\text{ВЫХ}}$ , В	$\Delta U$ , В	$\delta U$ , %
1	10,000	9,997	0,002	0,02
10	10,000	9,998	0,004	0,04
50	10,000	9,998	0,002	0,02
100	10,000	9,996	0,004	0,04
200	10,000	9,998	0,001	0,01
300	10,000	9,998	0,002	0,02
400	10,000	9,998	0,003	0,03
500	10,000	9,999	0,001	0,01
1000	10,000	9,998	0,002	0,02
5000	10,000	9,999	0,001	0,01
10000	10,000	9,998	0,001	0,01
50000	10,000	9,999	0,001	0,01
100000	10,000	9,998	0,002	0,02

Сравним, полученные результаты погрешности, с установленными ранее метрологическими характеристиками генератора ГС-50. Так из таблицы 4 видно, что относительная погрешность установки выходного напряжения не превышает, установленной. Это означает, что присутствующие в схеме шумы, оказывают незначительное влияние на напряжение на выходе генератора.

Также, сравним полученные в ходе моделирования коэффициенты гармоник выходного напряжения с установленными метрологическими характеристиками генератора ГС-50.

Так из таблицы 3 видно, что на высоких частотах коэффициент гармоник в полученной модели генератора ГС-50 превышает допустимые значения. Это связано с наличием шума в исследуемой модели генератора.

## **7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В данном разделе магистерской диссертации предпринята попытка дать оценку экономическому эффекту от модернизации генератора синусоидальных колебаний. Цель представленной магистерской диссертации – улучшение метрологических характеристик генераторов электрических сигналов с учетом шумов элементов с помощью моделирования и совершенствования схемы генератора ГС-50.

Поэтому, в данной главе рассмотрена конкурентоспособность и соответствие магистерской диссертации современным требованиям в областях ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование научно-исследовательских работ;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.



## **7.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

### **7.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Для определения потребителей результатов исследования следует рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование. Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем данная разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определёнными общими признаками. Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определённый товар (услуга). Целевым рынком проекта модифицированного генератора являются люди, заинтересованные в работе данного генератора и в компьютерном моделировании его метрологических характеристик, а также организации, осуществляющие изготовления данных генераторов, с целью создания более качественных генераторов с улучшенными метрологическими характеристиками.

### **7.1.2 Анализ конкурентных технических решений**

Необходимо проводить детальный анализ конкурирующих разработок, так как рынки пребывают в непрекращающемся движении. Подобный анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим конкурентам.

В ходе работы над магистерской диссертацией исследования проводились с помощью программного обеспечения для инженерных вычислений – *NI Multisim*. Аналогичные исследования можно проводить, используя и другое программное обеспечение. Например: *MatLab*.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты. Оценочная карта приведена в таблице 5.

Таблица 5 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>					
Повышение производительности труда пользователя	0,13	4	5	0,52	0,65
Удобство в эксплуатации	0,13	5	4	0,65	0,52
Потребность в ресурсах памяти	0,05	5	4	0,25	0,2
Функциональная мощность	0,09	4	5	0,36	0,45
Качество интеллектуального интерфейса	0,24	4	2	0,96	0,48
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>					
Цена	0,05	4	3	0,2	0,15
Предполагаемый срок службы	0,2	3	3	0,6	0,6
Финансирование научной разработки	0,01	3	3	0,03	0,03
Срок выхода на рынок	0,1	3	4	0,3	0,4
Итого	1	-	-	3,87	3,48

Примечание – Б<sub>ф</sub> – использование *NI Multisim*; Б<sub>к1</sub> – использование *MatLab*.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где:

- 1 – наиболее слабая позиция;
- 5 – наиболее сильная позиция.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i B_i, \quad (15)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V<sub>i</sub> – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Показатель научно-технического уровня для данного проекта составил

$$K=0,13 \cdot 4 + 0,13 \cdot 5 + 0,05 \cdot 5 + 0,09 \cdot 4 + 0,24 \cdot 4 + 0,05 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 + 0,01 \cdot 3 + 0,1 \cdot 3 = 3,87.$$

Из таблицы 5 видно, что использование *Multisim* является более конкурентоспособным решением, чем использование *MatLab*.

## 7.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 7.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

В ходе выполнения научных исследований была создана рабочая группа, состоящая из научного руководителя и студента.

В данном подразделе приведен, созданный перечень работ и отдельных этапов в рамках проведения исследования, а также приведены исполнители по каждому виду работ (таблица 6).

Таблица 6 – Перечень работ, этапов и распределений исполнителей

№ этапа	Содержание работ	Должность исполнителя
1	Постановка целей и задач	Руководитель – 100 %
2	Составление и утверждение технического задания	Руководитель – 100 %, инженер – 10 %
3	Подбор и изучение материалов	Руководитель – 20 %, инженер – 100 %
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель – 100 %, инженер – 10 %
5	Обсуждение литературы	Руководитель – 30 %, инженер – 100 %
6	Проведение теоретических расчетов	Инженер – 100 %
7	Проведение эксперимента	Инженер – 100 %
8	Сопоставление результатов	Инженер – 100 %
9	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель – 30 %, инженер – 100 %
10	Оформление расчетно-пояснительной записки	Инженер – 100 %
11	Оформление графического материала	Инженер – 100 %
12	Подведение итогов	Руководитель – 60 % Инженер – 100 %

## 7.2.2 Определение трудоемкости выполненных работ

Так как трудовые затраты чаще всего являются основной частью стоимости проведенного исследования, определение трудоемкости выполнения работ для каждого исполнителя является важным моментом.

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости  $t_{ожі}$  рассчитывается по следующей формуле:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (16)$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, чел.-дн.;

$t_{mini}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.;

$t_{maxi}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.

Исходя из полученных значений  $t_{ожі}$ , рассчитывается продолжительность каждого вида работы в рабочих днях  $T_{РД}$  по формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д}, \quad (17)$$

где  $K_{Д}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек, вызванных внутренними причинами ( $K_{Д} = 1,2$ );

$K_{ВН}$  – коэффициент выполнения работ, учитывающий возможное влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно  $K_{ВН} = 1$ .

Данные расчетов приведены в таблице 7.

## 7.2.3 Разработка графика научного исследования

В качестве графика проведения научного исследования использовалась диаграмма Ганта, т.к. оно является наиболее наглядным и удобным способом построения ленточного графика.

Для построения графика, длительность каждого из этапов работ переводится из рабочих в календарные дни по формуле:

$$T_{\text{КД}} = T_{\text{РД}} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (18)$$

где  $k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности в свою очередь рассчитывается по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (19)$$

где  $T_{\text{кал}} = 366$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}} = 108$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}} = 10$  – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{366}{366 - 108 - 10} = 1,48.$$

Таким образом, получили значение  $k_{\text{кал}} = 1,48$ . Все рассчитанные значения сведены в таблице 7.

Таблица 7 – Временные показатели приведения научного исследования

№ этапа	Исполнители	Продолжительность работы, дни			Трудоемкость работ по исполнителям, чел.-дн.			
		$t_{\text{min}}$ , чел.-дн.	$t_{\text{max}}$ , чел.-дн.	$t_{\text{ожб}}$ , чел.-дн.	$T_{\text{РД}}$		$T_{\text{КД}}$	
					НР	И	НР	И
1	И, НР	5	7	5,8	6,96	—	10,30	—
2	И, НР	2	5	3,2	3,84	0,38	5,68	0,56
3	И, НР	14	20	16,4	3,94	19,68	5,83	29,13
4	И, НР	5	9	6,6	7,92	0,79	11,72	1,17
5	И, НР	3	6	4,2	1,26	5,04	1,86	7,46
6	И	13	17	14,6	—	17,52	—	25,93
7	И	11	15	12,6	—	15,12	—	22,38
8	И	7	14	9,8	4,70	11,76	6,96	17,40
9	И, НР	7	10	8,2	2,95	9,84	4,37	14,56
10	И	15	20	17	—	20,4	—	30,19
11	И	7	10	8,2	—	9,84	—	14,56
12	И, НР	6	9	7,2	5,18	8,64	7,67	12,79
ИТОГ				113,8	<b>36,75</b>	<b>129,6</b>	54,39	176,13

Примечание – НР – научный руководитель, И – инженер.

На основании таблицы 7 был построен календарный план-график (таблица 8). Данный график строится для наибольшего по длительности



- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
  - отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
  - накладные расходы;
- затраты на электроэнергию

### **7.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования**

В рамках расчета материальных затрат НТИ должны быть учтены:

- приобретаемые сырье и материалы, необходимые для создания продукции;
- покупаемые материалы, необходимые для поддержания нормального технологического процесса;
- затраты на дополнительные комплектующие;
- сырье, материалы, различные комплектующие изделия, применяемые в качестве объектов исследования;
- затраты на канцелярские принадлежности.

Стоимость материалов определяется методом калькулирования основанном на прямом определении затрат по формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) * \sum_{i=1}^m C_i * N_{расxi}, \quad (20)$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расxi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Величина коэффициента (kT), отражающего соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение, зависит от условий договоров поставки, видов материальных ресурсов, территориальной удаленности поставщиков и т.д. Транспортные расходы принимаются в пределах от 15 до 25) % от стоимости материалов.

Результаты расчетов материальных затрат представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Материальные затраты

Наименование материалов	Количество, шт		Цена за ед., руб.		Затраты на материалы $Z_M$ , руб.	
			1 исп.	2 исп.	1 исп.	2 исп.
Компьютер	1	1	35000	45750	35000	45750
Принтер	1	1	5000	10000	5000	10000
Заправка катриджа	1	1	300	500	300	500
Пачка бумаги А4	1	1	260	600	260	600
Итого					40560	56850

Допустим, что ТЗР составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны  $C_{\text{мат}} = 40560 \cdot 1,05 = 42588,00$  руб. В ходе научно-технического исследования у приобретенных видов продукции не было остатков, следовательно, не нужно исключать стоимость возвратных отходов. Также необходимо учитывать, что данное оборудование в дальнейшем будет использоваться в других проектах. В данном проекте использовалось исполнение 1.

### 7.3.2 Расчет заработной платы

В рамках данной главы рассчитывается основная заработная плата для всех исполнителей, участвовавших в проведении НТИ. Величина расходов по заработной плате рассчитывается на основании трудоемкости выполняемых работ, а также действующей системы тарифных ставок и окладов.



Поскольку в рабочую группу входят инженер и научный руководитель, то, соответственно, рассчитывались расходы по их заработной плате.

Расчет оплаты труда производится на основе отраслевой системы оплаты труда в ТПУ. Так как руководитель входит в профессорско-преподавательский состав (профессор, доктор наук), его месячный оклад (МО) составляет 47104,00 руб. Зарплата инженера составляет 9489,00 руб.

Среднедневная тарифная заработная плата (ЗП<sub>дн-т</sub>) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{дн. т-б} = МО/25,083. \quad (21)$$

Соответственно дневной оклад руководителя равен 1877,93 руб., а инженера – 378,30 руб.

Расчеты затрат на основную заработную плату приведены в таблице 10. При расчете учитывалось, что в году 248 рабочих дней и, следовательно, в месяце 25,083 рабочий день, а затраты времени на выполнение работы по каждому исполнителю брались из таблицы 7. Коэффициент, учитывающий коэффициент по премиям  $K_{пр} = 1,1$ , районный коэффициент  $K_{рк} = 1,3$ ,  $K_{доп.ЗП} = 1,188$ .

Таблица 10 – Затраты на основную заработную плату

Исполнители	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб. день	Затраты времени, раб. дни	Коэффициент	Фонд з/пл, руб.
НР	47104	1877,93	36,7	1,69	116474,85
И	9489	378,30	129,6	1,69	82856,78
Итого					199331,63

Основная заработная плата  $C_{осн}$  будет равна 199331,63 руб.

### 7.3.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты по этой статье составляют отчисления по единому социальному налогу (ЕСН).

Отчисления от заработной платы определяются по формуле:

$$C_{\text{соцф}} = K_{\text{соцф}} \cdot C_{\text{осн}}, \quad (22)$$

где  $K_{\text{соцф}}$  - коэффициент, учитывающий размер отчислений из заработной платы, он включает в себя:

- 1) отчисления в пенсионный фонд;
- 2) на социальное страхование;
- 3) на медицинское страхование,

и составляет 30 % от затрат на заработную плату.

$$C_{\text{соцф}} = 0,30 \cdot 199331,63 = 59799,49 \text{ руб.}$$

### 7.3.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot Ц_{\text{э}}, \quad (23)$$

где  $P_{\text{об}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$Ц_{\text{э}}$  – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{об}}$  – время работы оборудования, час.

Для ТПУ  $Ц_{\text{э}} = 6,59 \text{ руб./кВт·час}$  (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 3 для инженера ( $T_{\text{рд}}$ ) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 ч.:

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t, \quad (24)$$

где  $K_t \leq 1$  – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к  $T_{\text{рд}}$ , определяется исполнителем самостоятельно. В ряде случаев возможно определение  $t_{\text{об}}$  путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{ОБ}} = P_{\text{НОМ.}} \cdot K_C \quad (25)$$

где  $P_{\text{НОМ.}}$  – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_C \leq 1$  – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности  $K_C = 1$ .

Расчет затраты на электроэнергию приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Расчет затрат

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$ , час		Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$ , кВт	Затраты Эл.ОБ, руб.	
	НР	И		НР	И
Персональный компьютер	$(36,7 \cdot 8) \cdot 0,6 = 176,16$	$(129,6 \cdot 8) \cdot 0,6 = 622,08$	0,3	52,85	186,62
<b>Итого:</b>				<b>239,47</b>	

### 7.3.5 Расчет амортизационных расходов

В пункте амортизационные отчисления от используемого оборудования рассчитывается амортизация за время выполнения работы для оборудования, которое имеется в наличии.

Амортизационные отчисления рассчитываются на время использования ПК по формуле:

$$C_{\text{АМ}} = \frac{N_a \cdot C_{\text{ОБ}} \cdot t_{\text{рф}} \cdot n}{F_d}, \quad (26)$$

где  $N_a$  - годовая норма амортизации,  $N_a = 0,4$ ;

$C_{\text{ОБ}}$  - цена оборудования,  $C_{\text{ОБ}} = 35000$  руб.;

$F_d$  - действительный годовой фонд рабочего времени,  $F_d = 1992$  часа;

$t_{\text{рм}}$  - время работы ВТ при создании программного продукта,  $t_{\text{рм}} = 256,24$  ч.

$n$  – число задействованных ПК,  $n = 1$ .

$$C_{\text{ам}} = (0,4 \cdot 35\,000 \cdot 239,47) / 1992 = 1683,02 \text{ руб.}$$

### **7.3.6 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов (кроме суточных)**

Сюда относятся:

- командировочные расходы, в т.ч. расходы по оплате суточных, транспортные расходы, компенсация стоимости жилья;
- арендная плата за пользование имуществом;
- оплата услуг связи;
- услуги сторонних организаций.

При выполнении магистерской диссертации не было дополнительных расходов по данному пункту.

### **7.3.7 Расчет прочих расходов**

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, т.е.:

$$C_{\text{проч}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{з/п}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{нп}}) \cdot 0,1 \quad (27)$$

Для нашего примера это

$$C_{\text{проч}} = (42588,00 + 199331,63 + 59799,49 + 239,47 + 1683,02 + 0) \cdot 0,1 = 30364,16 \text{ руб.}$$

### **7.3.8 Расчет общей себестоимости разработки**

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость магистерской диссертации (таблица 12).

Таблица 12 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	42588
Основная заработная плата	$C_{\text{зп}}$	199331,63
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	59799,49
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.об.}}$	29,94
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	2104,22
Непосредственно учитываемые расходы	$C_{\text{нп}}$	0
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	30364,16
Итого:		334005,77

Таким образом, затраты на разработку составили  $C = 334005,77$  руб.

### 7.3.9 Расчет прибыли

Прибыль от реализации проекта в зависимости от конкретной ситуации может определяться различными способами. Если исполнитель работы не располагает данными для применения «сложных» методов, то прибыль следует принять в размере от 5 до 20 % от полной себестоимости проекта. Она составляет 33400,58 руб. (10 %) от расходов на разработку проекта.

### 7.3.10 Расчет НДС

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли. В нашем случае это  $(334005,77 + 33400,58) \cdot 0,2 = 73481,27$  руб.

### 7.3.11 Цена разработки ОКР (НИР)

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, в нашем случае:

$$\text{ЦОКР}_{(\text{НИР})(\text{КР})} = 334005,77 + 33400,58 + 73481,27 = 440887,62 \text{ руб.}$$

#### **7.4 Оценка экономической эффективности проекта**

Оценка экономической эффективности НИР отражает финансовые последствия проекта для его участников – изменение финансовых результатов их деятельности, уровня капитализации участников проекта.

Так как данная работа носит исследовательский характер, и перспективы использования её результатов не определены, то оценка экономической эффективности невозможна.

## **8 Социальная ответственность**

Международный стандарт ISO 26000:2010 «Руководство по социальной ответственности» [20] является руководством по принципам, которые лежат в основе социальной ответственности, основных тем и проблем социальной ответственности, а также способам интеграции социально ответственного поведения в стратегии и процессы организации [21].

Теоретические исследования и компьютерное моделирование метрологических характеристик генератора «ГС-50» проводились с помощью программного обеспечения *NI Multisim*. Следовательно, объектом исследования является рабочее место, оборудованное персонально электронно-вычислительной машиной (ПЭВМ).

Работа с компьютером, производится сидя и сопровождается незначительным физическим напряжением. В соответствии с СанПиН 2.2.4.548 [22] данная работа относится к категории работ Ia, т.к. является легкой. У работ данной категории интенсивность энергозатрат составляет до 120 ккал/ч (до 139 Вт).

В данном разделе будут рассмотрены вредные факторы, которые негативно влияют на организм человека, такие как повышенная или пониженная температура воздуха рабочей среды, недостаточность освещения рабочей зоны, повышенный уровень электромагнитных излучений и шума, а также опасные факторы, такие как электрический ток, возникновение пожара и короткое замыкание.

### **8.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Из трудового кодекса РФ и СанПиН 2.2.2/2.4.1340 [23] следует, что продолжительность рабочей недели не должна превышать 40 ч при

пятидневной недели, и 48 ч при шестидневной. Продолжительность работы за компьютером не должна превышать 6 ч за смену и должны делаться перерывы на (10 – 15) мин через каждые (45 – 60) мин работы. Перерывы сопровождаются проветриванием и гимнастикой для глаз и тела [24, 25].

В процессе работы, все используемые предметы должны быть расположены в зоне досягаемости. В соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340 [23] изложенные нормы и требования следует соблюдать для повышения комфорта в процесс работы с ПЭВМ.

## **8.2 Производственная безопасность**

В настоящее время эффективность профессиональной деятельности напрямую зависит от обеспечения безопасности человека в среде обитания. Проявление вредных факторов в рассматриваемой рабочей зоне обусловлены электромагнитными и электростатическими излучениями от ПК, несоблюдение техники безопасности при работе с паяльным инструментом. Следовательно, с точки зрения безопасности важно научиться пользоваться компьютером и паяльником, а также правильно организовывать свою работу.

Отрицательное влияние компьютера на человека является комплексным, за время работы за компьютером на организм влияет целый ряд неблагоприятных факторов, а именно [26]:

Физические факторы:

- длительное пребывание в сидячем положении, однотипная деятельность, монотонность труда;
- широкий спектр излучения от дисплея, включающего в себя рентгеновскую, ультрафиолетовую и инфракрасную области;
- повышенный уровень электромагнитного излучения различных частот от монитора и системного блока;
- повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне;
- утомление глаз, повышенная нагрузка на зрение;



- повышенный уровень шума и вибрации на рабочем месте;
- опасность поражения электрическим током;
- опасность возникновения пожара.

Психофизические факторы:

- умственное перенапряжение от решения поставленных задач;
- обширный объем перерабатываемой информации;
- нервно-эмоциональные и нервно-психические перегрузки.

Далее более подробно рассмотрены опасные и вредные факторы, воздействующие на человека во время решения поставленных задач.

### **8.2.1 Анализ вредных факторов рабочего помещения**

Вредные производственные факторы в соответствии с ГОСТ 12.0.003 [27] при работе с компьютером представлены в пункте 6.2 настоящего раздела.

В результате воздействия вредных и опасных производственных факторов на работающего, ухудшается его самочувствие, снижается работоспособность.

### **8.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в учебной аудитории при проведении исследований**

Улучшению условий труда для пользователей ПК в последнее десятилетие уделяется большое внимание. Основным фактор, влияющий на производительность труда пользователя ПК, - комфортное и безопасное условие труда. При несоблюдении эргономики могут возникнуть довольно серьезные последствия.

При проведении исследований в учебных аудиториях важную роль играет организация рабочего места. Она должна соответствовать правилам

охраны труда и удовлетворять требованиям удобства выполнения работы, экономии энергии и времени оператора.

Основной документ, который определяет условия труда на персональных электронно-вычислительных машинах (ПЭВМ), - санитарные нормы и правила [28]. В данном документе регламентируются основные требования к помещениям, микроклимату, шуму, освещению помещений и рабочих мест, организации и оборудованию рабочих мест.

Опасность поражения электрическим током является основным опасным фактором. Согласно правилам ПЭУ [22] и исходя из анализа состояния аудитории, по степени опасности поражения электрическим током ее можно отнести к классу помещений без повышенной опасности

### **8.2.3 Анализ вредных факторов**

#### **8.2.3.1 Микроклимат**

В рабочем помещении должны быть обеспечены оптимальные параметры микроклимата, т.е. эти параметры обеспечивают хорошее самочувствие человека, состояние теплового комфорта, необходимую работоспособность. Как результат, повышается производительность труда. Чтобы обеспечить на рабочем месте благоприятные условия работы, которые соответствуют физиологическим потребностям человеческого организма, в санитарных нормах [22] установлены оптимальные и метеорологические условия для рабочей зоны помещения. В тех случаях, когда по технологическим требованиям, техническим и экономически обоснованным причинам не могут быть обеспечены оптимальные параметры, устанавливаются допустимые. Допустимые условия микроклимата не вызывают нарушений здоровья у человека, но могут явиться причиной возникновения теплового дискомфорта, ухудшения самочувствия и снижения работоспособности.

Показателями, которые характеризуют микроклимат рабочей зоны, являются:

- температура воздуха, °С;
- относительная влажность воздуха, %;
- скорость движения воздуха, м/с.

Оптимальные и допустимые показатели температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений должны соответствовать значениям, указанным в таблице 13.

Таблица 13 – Оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений

Период года	Температура воздуха, °С		Относительная влажность воздуха, %		Скорость движения воздуха, м/с	
	О	Д	О	Д	О	Д
Теплый	от 23 до 25	от 22 до 28	от 40 до 60	55 (при 28 °С)	0,1	0,1-0,2
Холодный	от 22 до 24	от 21 до 25	от 40 до 60	75	0,1	Не более 0,1

Примечание – В таблице приняты следующие сокращения: О – оптимальные; Д – допустимые.

В учебной аудитории 10 корпуса, где находится рабочая зона оборудованная компьютером, показатели микроклимата следующие:

- температура воздуха, 24 °С;
- относительная влажность воздуха, 56 %;
- скорость движения воздуха, 0,1 м/с.

Следовательно, в соответствии с [22], для рабочей зоны параметры микроклимата соответствуют оптимальным значениям. В учебной аудитории водяная система отопления. Для обеспечения естественной вентиляции воздуха во время перерыва аудитория проветривается.

### **8.2.3.2 Шум**

Длительное воздействие шума на рабочем месте крайне негативно сказывается на работающем: происходит снижения внимания, увеличивается расход энергии при одинаковой физической нагрузке, происходит замедление скорости реакций и т.д. Как результат, производительность труда падает и снижается качество выполняемой работы.

Согласно санитарным правилам и нормам [23] в учебной аудитории, предназначенной для работы с ПЭВМ, предельно допустимый уровень звука не должен превышать 50 дБ. Основные источники шума в аудитории – компьютер и люминесцентные лампы. Учебный корпус расположен на центральной улице, вблизи автомобильных дорог, поэтому могут возникать дополнительные источники шума при открытом окне или форточки в аудитории.

По субъективным ощущениям на рабочем месте уровень шума не превышает допустимого значения.

### **8.2.3.3 Освещение**

Освещённость – физическая величина, характеризующая освещение поверхности, создаваемое световым потоком, падающим на эту поверхность. Освещённость измеряется в Люксах (СИ) и обозначают её буквой E.

Хорошее освещение помещения и рабочего места является одним из важнейших условий для обеспечения безопасных и благоприятных условия труда, т.к. оно определяет трудовую эффективность и влияет на самочувствие и восприятие человека. При освещении плохого качества или низких уровней, люди могут ощущать усталость глаз и переутомление, что приводит к снижению работоспособности. В ряде случаев это может привести к головным болям.

Согласно СП 52.13330.2016 [29] работа за ПК относится к зрительным работам высокой точности III разряда зрительной работы для помещений жилых и общественных зданий. При данном виде работ общее освещение должно быть 300 Лк.

Рассмотрим помещение учебного корпуса, в котором производились работы, с размерами: длина  $A = 24$  м, ширина  $B = 12$  м, высота  $H = 4,5$  м. Высота поверхности  $h_{pn} = 0,8$  м. Коэффициент отражения стен  $R_c = 30$  %, потолка  $R_n = 50$  %. Коэффициент запаса  $k = 1,5$ , коэффициент неравномерности  $Z = 1,1$ .

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен.

Световой поток лампы определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{N \cdot \eta}, \quad (28)$$

где  $E_n$  – нормируемая минимальная освещенность, лк;

$S$  – площадь помещения, м<sup>2</sup>;

$K_z$  – коэффициент запаса (помещения с малым выделением пыли - 1,5);

$Z$  – коэффициент неравномерности освещения (для люминесцентных ламп - 1,1);

$N$  – число светильников, шт;

$\eta$  – коэффициент использования светового потока.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения  $i$ , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью  $h$  и коэффициентов отражения стен  $\rho_c$  и потолка  $\rho_n$ . Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{S}{h(A+B)}. \quad (29)$$

Получаем:

$$i = 288 / ((4,5 - 0,5 - 0,8) \cdot (24 + 12)) = 2,5.$$

Из таблицы 14 примем значение  $i$  равное 2,25, которое наиболее близко к 2,5.

Таблица 14 – Коэффициент использования светового потока

Светильник	«Глубоко-излучательные»			«Универсаль» без затенителя			«Люцетта»			ВЗГ 200 с отражателем			ОД			ПВЛ			
	$\rho_n$ , %	30	50	70	30	50	70	30	50	70	30	50	70	30	50	70	30	50	70
$\rho_c$ , %	10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50	10
$i$	Коэффициент использования $\eta \cdot 100$																		
0,5	19	21	25	21	24	28	14	16	22	12	14	17	23	26	31	14	16	19	
0,6	24	27	31	27	30	34	19	21	27	16	18	21	30	33	37	18	20	22	
0,7	29	31	34	32	35	38	23	24	30	19	21	24	35	38	42	21	23	25	
0,8	32	34	39	35	38	41	24	26	33	21	24	26	39	41	45	23	25	27	
0,9	34	36	39	38	40	44	27	29	35	23	25	28	41	44	48	25	27	29	
1,0	36	38	40	40	42	45	29	31	37	25	27	29	44	46	49	26	28	30	
1,1	37	39	41	42	44	46	30	32	38	26	27	30	46	48	51	27	29	31	
1,25	39	41	43	44	46	48	31	34	41	27	29	31	48	50	53	29	30	32	
1,5	40	43	46	46	48	51	34	37	44	29	30	39	50	52	56	30	31	34	
1,75	43	44	48	48	50	53	36	39	46	30	32	34	52	55	58	31	33	35	
2,0	44	46	49	50	52	55	38	41	48	32	33	35	55	57	60	33	34	36	
2,25	46	48	51	52	54	56	40	43	50	33	35	37	57	59	62	34	35	37	
3,0	49	51	53	55	57	60	44	47	54	35	37	39	60	62	66	36	37	40	
3,5	50	52	54	56	58	61	45	49	57	36	38	40	61	64	67	37	38	40	
4,0	51	52	55	57	59	62	46	50	59	37	39	41	63	65	68	38	39	41	
5,0	52	54	57	58	60	63	48	52	61	38	40	42	64	66	70	38	40	42	

Так, коэффициент использования светового потока:  $\eta = 0,62$ .

Размещаем светильники в три ряда. В каждом ряду можно установить 12 светильников типа ОД мощностью 40 Вт (с длиной 1,23 м), при этом разрывы между светильниками в ряду составят 50 см. Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении  $N = 72$ .

Определяем потребный световой поток ламп:

$$\Phi = \frac{300 \cdot 288 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{72 \cdot 0,62} = 3143 \text{ лм.}$$

Выбираем стандартную лампу – 40 Вт с потоком 2850 лм. Делаем проверку выполнения условия:

$$-10 \% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100 \% \leq +20 \%$$

Получаем:

$$-10 \% \leq 8,78 \% \leq +20\%$$

На основании проделанных расчетов можно сделать вывод, что полученное значение попадает в нормированный интервал. Нормы освещенности в данном помещении соблюдаются.

#### **8.2.3.4 Повышенный уровень электромагнитных излучений**

Пользователь, при работе с ПК находится в непосредственной близости к монитору, что вызывает воздействие электромагнитных полей (ЭМП). Вредное влияние переменных магнитных полей должно быть учтено при организации рабочего места с ПЭВМ.

Когда на человека воздействуют поля, напряженность которых выше допустимой нормы, то наблюдается ухудшение самочувствия работника, нарушения нервной, сердечно-сосудистой системы, повышение температуры тела и появление головной боли, а также нарушения некоторых биологических показателей крови.

Предельно допустимые уровни энергетических экспозиций электромагнитного поля диапазона частот от 30 кГц до 300 ГГц, не должны превышать значений, приведенных в СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200 [30].

С целью уменьшения негативного воздействия электромагнитного излучения, возникающего от экрана компьютера, используются специальные жидкокристаллические мониторы. Так же существуют специальные экранирующие очки и пленки, покрывающие экран, которые обеспечивают дополнительную защиту от электромагнитного излучения. Компьютер, на

котором проводилось исследование, оснащен LCD монитором, напряженность ЭМП которого менее 2,5 В/м, что соответствует норме.

Для обеспечения нормальной деятельности пользователя с учетом норм предельно допустимой напряженности ЭМП экран монитора должен находиться на оптимальном расстоянии от глаз (не менее 50 см, но не более 1 м). В нашем случае расстояние между глазами пользователя и монитором равно 72 см, что соответствует норме.

Для снижения усталости глаз делались перерывы при работе за компьютером (по 15 мин после каждого часа работы), а также выполнялась зарядка для глаз.

### **8.2.3.5 Психофизические факторы**

Психофизическими факторами при работе с ПЭВМ являются: статическое положение тела в течение длительного времени, монотонность работы и умственные перегрузки. К статическим факторам, прежде всего, относится вынужденное положение тела во время работы, длительное напряжение отдельных групп мышц. При вынужденном сидячем положении чаще наблюдаются сколиозы и кифозы.

Профилактика сводится к механизации и автоматизации труда, рационализации рабочей позы путем совершенствования конструкций рабочих мест, гимнастике, смене положения во время перерывов (работал стоя – отдыхаешь сидя и наоборот) и др.

Долгая работа за компьютером является монотонной, что быстро приводит к общей усталости, снижению концентрации и т.п. Для избегания данного фактора выполнялись различные виды работ, делались перерывы на отдых.

Умственные перегрузки связаны с большим объемом информации, обрабатываемой во время проведения исследований. Они приводят к головным болям, усталости, нервозности и т.п. Для избегания данного



фактора было сделано распределение времени на работу с информацией и выполнением других работ, не связанных с умственными нагрузками.

### **8.2.3.6 Вывод**

В данном разделе рассматривалось влияние вредных факторов при выполнении магистерской диссертации. Было выявлено, что параметры микроклимата соответствуют оптимальным значениям. В зимнее время в учебной аудитории используется водяная система отопления. Для обеспечения вентиляции воздуха аудитория во время перерыва проветривается. Рассчитанное значение искусственного освещения в аудитории соответствует установленным нормам. Так же соответствует нормам и уровень шума в помещении. Для уменьшения влияния электромагнитного излучения от монитора использовались специальные защитные очки. Расстояние между лицом пользователя и монитором является оптимальным и соответствует нормам.

## **8.2.4 Анализ опасных факторов**

### **8.2.4.1 Поражение электрическим током**

В соответствии с [24] учебная аудитория является помещением без повышенной опасности, т.е. отсутствуют какие-либо условия, создающие опасность: оно сухое, хорошо отапливаемое, полы токонепроводящие, температура и влажность соответствуют нормам. В аудитории отсутствуют электроустановки, за исключением кондиционера и приносимого с собой пользователем компьютера.

Деятельность непосредственно связана с ПЭВМ, токоведущие части изолированы, т.е. случайное прикосновение к токоведущим частям

исключено. Также в аудитории присутствует кондиционер, у которого также имеется изоляция токоведущих частей.

Для обеспечения защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции, рекомендуется применять защитное заземление.

Заземление корпуса ПЭВМ, а также кондиционера обеспечено подведением заземляющей жилы к питающим розеткам. Сопротивление заземления 4 Ом, согласно ПЭУ [31] для электроустановок с напряжением до 1000 В.

Основное организационное мероприятие по электробезопасности – инструктаж и обучение безопасным методам труда, а также проверка знаний правил безопасности и инструкций в соответствии с занимаемой должностью применительно в выполняемой работе.

#### **8.2.4.2 Опасность возникновения пожара. Короткое замыкание**

В помещениях с ПЭВМ повышен риск возникновения пожара. Неисправность электрооборудования, освещения, неправильная их эксплуатация, наличие статистического электричества неудовлетворительный надзор за пожарными устройствами и производственным оборудованием может послужить причиной пожара. Также важной причиной для возникновения пожара является короткое замыкание.

Короткое замыкание – электрическое соединение разных фаз или потенциалов электроустановки между собой или с землей, не предусмотренное в нормальном режиме работы, при котором в проводниках, в месте контакта, резко возрастает сила тока, превышая максимально допустимые величины, что представляет большую опасность для

электрического оборудования и может вызвать перебои в электроснабжении потребителей.

Основной и важной причиной возникновения коротких замыканий является нарушения изоляции электрооборудования. Нарушения изоляции могут вызываться: перенапряжениями, прямыми ударами молнии, старением изоляции, механическими повреждениями изоляции и неудовлетворительным уходом за оборудованием.

### **8.3 Экологическая безопасность**

Как правило, любая деятельность человека, в особенности связанная с производственной деятельностью, оказывает негативное влияние на окружающую среду.

Деятельность по проведению исследований для дипломной работы основывалась исключительно на использовании ПЭВМ, что не является промышленной деятельностью, однако, неправильно утилизированная компьютерная техника может негативно повлиять на окружающую среду – при распаде на тяжелые металлы и ядовитые соединения.

Все отходы, которые образуются в ходе работы, выбрасываются в урну, а затем утилизируются. Люминесцентные лампы утилизируются специальным персоналом кафедры. При появлении неисправностей компьютерная техника списывается также специальным персоналом кафедры, а затем подвергается утилизации специализированными организациями.

## **8.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

### **8.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследования**

Как было сказано ранее, при выполнении исследований в рамках магистерской диссертации деятельность основывалась исключительно на использовании ПЭВМ.

Объект исследования, т.е. компьютерное моделирование шумовых характеристик генератора ГС-50 в программе *Multisim*, не могут инициировать ЧС. Следовательно, можно говорить только о тех ЧС, которые могут возникнуть в аудитории при проведении исследований вне зависимости объекта.

### **8.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в аудитории при проведении исследований**

В данном пункте будет рассмотрен наиболее вероятный вид ЧС в учебной аудитории – пожар.

Согласно СНиП 21-01 [32], по пожарной безопасности данное рабочее место относится к категории Г (умеренная пожароопасность), здание по огнестойкости относится к III степени, где стены, колонны – несгораемые, несущие конструкции междуэтажных и чердачных перекрытий – трудносгораемые, несущие конструкции покрытий – сгораемые.

Причинами возникновения пожара могут быть:

- неисправности электропроводки, розеток и выключателей которые могут привести к короткому замыканию или пробое изоляции;
- использование поврежденных (неисправных) электроприборов;
- использование в помещении электронагревательных приборов с открытыми нагревательными элементами;

- возникновение пожара вследствие попадания молнии в здание;
- возгорание здания вследствие внешних воздействий;
- неаккуратное обращение с огнем и несоблюдение мер пожарной безопасности.

Помещение должно быть обеспечено исправными и пригодными к применению средствами пожаротушения (в соответствии с установленными нормами и проектом здания корпуса):

- огнетушителями (из расчета 2 огнетушителя на 800 м<sup>2</sup> коридора, но не менее 2-х на этаж). Проверка огнетушителей проводится не реже одного раза в год. Не реже одного раза в 5 лет каждый огнетушитель должен быть переразряжен, проведен внешний и внутренний осмотр, а также проведены гидроиспытания на прочность баллона и пневмоиспытания на герметичность корпуса, пусковой головки, шланга и запорного устройства;

- пожарными кранами ПК. Каждый пожарный кран должен быть укомплектован рукавом, стволом, вентилем, гайками и проверяться на работоспособность (специальной комиссией в присутствии коменданта корпуса) не реже одного раза в шесть месяцев, с оформлением результатов проверки актом.

Системы противопожарного водоснабжения должны включаться в работу от автоматических пожарных извещателей, устанавливаемых в коридорах этажей, а также дистанционно от кнопок, установленных в шкафах кранов (для корпусов, оборудованных пожарной автоматикой).

Ручное и дистанционное включение и выключение отдельных агрегатов систем (пожарных насосов) должно быть предусмотрено с каждого этажа здания.

У пусковых устройств систем, сигнализационных приборов, включаемых при пожаре, должны быть вывешены таблички, определяющие назначение и порядок приведения их в действие.

В производственных помещениях должно быть не менее двух эвакуационных выходов.

## **8.5 Выводы по разделу «Социальная ответственность»**

В аудитории, в которой выполнялись работы по написанию магистерской диссертации, было выявлено, что микроклимат соответствует оптимальным значениям. В зимнее время в учебной аудитории используется водяная система отопления. Для обеспечения вентиляции воздуха аудитория во время перерыва проветривается. Так же соответствует нормам и уровень шума в помещении.

Были выявлены психофизические факторы при данном виде работ:

- статическое положение тела в течение длительного времени, монотонность
- работы и умственные перегрузки.

Аудитория учебного корпуса относится к категории помещений без повышенной опасности, т.к. в помещении не имеется токопроводящих полов, токопроводящей пыли, повышенной влажности и т.д. Помещение снабжено пожарной сигнализацией, огнетушителем и планом эвакуации. Все электронные приборы подключены к сети питания имеющей защитное заземление.

## Заключение

В рамках работы над магистерской диссертацией были исследованы инвертор и интегратор в составе исследуемого объекта – генератора сигналов прецизионного ГС-50. Затем был исследован и сам генератор. Полученные результаты показали, что, присутствующий в схеме шум в большей степени влияет на метрологические характеристики инвертора, чем интегратора. Это связано, в первую очередь с различием в природе действия этих элементов.

Так как интегратор по своей сути является фильтрующим устройством, он дополнительно фильтрует нелинейные искажения, в связи с чем, отношение сигнал/шум на выходе интегратора больше, чем на выходе инвертора.

После последующего моделирования генератора, можно сделать вывод, что в значительной мере на его выходные характеристики: выходное напряжение, коэффициент гармоник выходного напряжения и отношение сигнал/шум влияет именно инвертор. После сравнения полученных результатов с приспанными генератору сигналов метрологическими характеристиками, в частности: погрешности установки выходного напряжения и коэффициента гармоник выходного сигнала, можно сделать вывод о том, что, присутствующий в схеме шум в меньшей мере влияет на уровень выходного напряжения генератора ГС-50. Погрешность установки выходного напряжения не превышает установленную. В отличие от коэффициента гармоник выходного сигнала, так как присутствующий в схеме шум в значительной степени влияет на его значение, особенно это заметно на высоких частотах генерируемого сигнала.

Полученные результаты будут использованы при разработке модернизированной версии генератора ГС-50М с меньшим уровнем искажения выходного сигнала.

## Список публикаций

Орехова А. С. Исследование шумовых характеристик выходного напряжения генератора сигналов прецизионного ГС-50 / А. С. Орехова ; науч. рук. Ю. К. Рыбин // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 3-7 декабря 2018 г., г. Томск. — Томск : Изд-во ТПУ, 2018. — [С. 190-191].



### Список используемых источников:

- 1 ГОСТ 8.009-84 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – М.: Изд-во стандартов, 2018. - 27 с.
- 2 Рыбин Ю.К. Электронные устройства: Учебное пособие. / Ю.К. Рыбин. – Томск: Из-во: «Печатная мануфактура», 2003. – 264 с.
- 3 Робинсон Ф.Н.Х. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях. Пер. с англ. / Ф.Н.Х. Робинсон. – М.: Автомиздат, 1980. – 256 с.
- 4 Дьяконов В.П. Генерация и генераторы сигналов. / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 384 с.
- 5 РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2014 год.
- 6 ГОСТ 8.314-78 ГСИ. Генераторы низкочастотные измерительные. Методы и средства поверки. – М: Издательство стандартов, 1978 г.
- 7 ГОСТ 30804.3.12-2013 (IEC 6 1000-3-12:2004) Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключенными к низковольтным распределительным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний. – М.: Стандартиформ, 2014 г. – 37 с.
- 8 Интегратор и дифференциатор на ОУ. URL: <https://www.electronicsblog.ru/usilitelnaya-sxemotexnika/integrator-i-differenciator-na-ou.html> – Загл. С экрана.
- 9 Тупицына А.И. Методы компьютерного моделирования физических процессов и сложных систем. Учебное пособие– СПб: Университет ИТМО, 2014. – 48 с.
- 10 Колесов Ю. Б., Сениченков Ю. Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы. Учебное пособие. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012. — 224 с.: ил.

- 11 Кельтон В. Имитационное моделирование /В. Кельтон, А. Лоу. — Спб.: Питер: Издательская группа BHV, 2004. — 847 с.
- 12 Multisim [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/National\\_Instruments](https://ru.wikipedia.org/wiki/National_Instruments), свободный. – Загл. с экрана.
- 13 Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 399 с., ил.
- 14 Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах./Г. Отт. – М. : Мир, 1974. – 320 с.
- 15 Johnson J.B., Thermal Agitation of Electricity in Conductors, Phys. Rev., 32, 97-109 (July 1928)
- 16 Nyquist H., Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors, Phys. Rev., 32, 110-113 (July 1928)
- 17 Гусев В.Г. Электроника. / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – М.: Высшая школа, 1991 г. – 622 с.
- 18 Van der tiel A., Noise, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1954.
- 19 Кестер У. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов./ У. Кестер – М: Техносфера, 2010. – 328 с.
- 20 ГОСТ Р ИСО 26000-2012. Руководство по социальной ответственности. – М.: Стандартинформ, 2012. – 61 с.
- 21 ISO 26000 //ru.wikipedia.org Википедия. Свободная энциклопедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ISO\\_26000](https://ru.wikipedia.org/wiki/ISO_26000) - Загл. с экрана.
- 22 Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Минздрав России, 1997. – 20 с.
- 23 Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
- 24 Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. – М.: Госкомсанэпиднадзор, 2003.

25 ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – М.: Стандартинформ, 2010. – 27 с.

26 Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123 – ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (с изменениями от 29 июля 2017) [Электронный ресурс] – URL: - <http://docs.cntd.ru/document/902111644/> - Загл. с экрана.

27 ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов по безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2016. – 16 с.

28 Правила устройства электроустановок: ПУЭ 7. Издание 7. – М.: Госэнергонадзором Минэнерго России, 2003 год.

29 ГОСТ Р ИСО 26000-2012. Руководство по социальной ответственности. – М.: Стандартинформ, 2012. – 61 с.

30 Свод правил: СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. – М.: Минстрой России, 2016. – 108 с.

31 Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий. – М.: Минздрав России, 2003. – 24 с.

32 СНиП 21-01-97. «Пожарная безопасность зданий и сооружений». - Госстрой России. - М.: ГУП ЦПП, 2002 год.

## Приложение А

(справочное)

### Signal generators: types, metrological characteristics and operating principle

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ81	Орехова Анастасия Сергеевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Рыбин Юрий Константинович	д.т.н., с.н.с		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Пичугова Инна Леонидовна			

# 1 Signal generators

## 1.1 Types of signal generators

Signal generators are devices by which the energy of a DC power source is converted into output electrical vibrations with a given frequency and shape [2].

Generators of electrical signals, depending on the principle of their operation, are divided into:

- dependent (generators with external influence (control));
- independent (generators that operate in self-oscillating mode).

Independent generators include generators with self-excitation or, in other words, autogenerators.

Also in measuring technology, there are several main types of generators: G2 – noise signal generators; G3 – low-frequency *RC*-generators; G4 – high-frequency *LC*-generators; G5 – pulse generators; G6 – signal generators of complex shape [2].

Ideally, a monochromatic sinusoidal signal with constant amplitude and frequency is generated at the output of the generator. But in practice, it is impossible to achieve it due to the fact that the output signal is accompanied by nonlinear distortions and noise signals from radio elements included in the circuit [3].

Most sinusoidal waveform generators are based on a frequency-selective circuit (*FSC*) and an amplifier (*U*), which are covered by feedback (*CF*) through a feedback circuit (*FC*).

Here various *RC*-circuits, oscillating *RL*-circuits, etc. can be used as a *FSC* [4]. It should be also noted that the amplifier is powered by an electrical power source, most often a DC power source.

It should be also noted that fluctuations in this system happen only if the following conditions are met simultaneously:

– phase balance – the total phase shift at the oscillation frequency must be equal to 0 or a multiple of  $2\pi$ , which means that the CF in this system at the signal generation frequency must remain positive;

– balance of amplitudes – the loop transmission coefficient at a steady oscillation frequency should be either equal to one, or slightly exceed it [4]. So, when the loop coefficient is equal to one, the generation of stationary vibrations with a constant, unchanging amplitude occurs.

Note that the execution of these conditions is necessary, but not sufficient for generating stable sinusoidal self-oscillations in stationary mode [2].

## 1.2 RC-low frequency generators

RC-generators are used when there is a need to generate signals with low frequencies, including signals in the radio frequency range up to 10 MHz. Typical RC-generator with Wien bridge is shown in Figure 1.

In this scheme, an RC-generator with a Wien bridge consists of an operational amplifier covered by negative feedback through resistors  $R1$  and  $R2$ , and covered by positive feedback through a frequency-selective circuit formed by  $R3C1R4C2$  [2].

To obtain sinusoidal oscillations, a negative feedback loop must be introduced, so that the amplifier gain is provided at a level slightly higher than the gain value (the amplitude balance condition).

An RC-generator with a Wien bridge provides an output signal with a distortion about 0.05 %. However, this type of signal generators has a significant disadvantage. Thus, to obtain a high-quality sinusoidal signal with small nonlinear distortions, it is always necessary to ensure the exact ratio of resistors in the negative feedback circuit in the circuit, that is, to ensure that the transmission coefficient in the circuit is equal to three ( $\beta=1/3$ ). So, if  $\beta<1/3$ , then the circuit will have strong distortions, significantly affecting the shape of the output signal. In the event where  $\beta>1/3$ , after the occurrence of fluctuations, their amplitude will

gradually begin to decrease, until, over time, it becomes equal to zero. Therefore, when designing such  $RC$ -generators, various automatic amplitude stabilization systems are widely used.

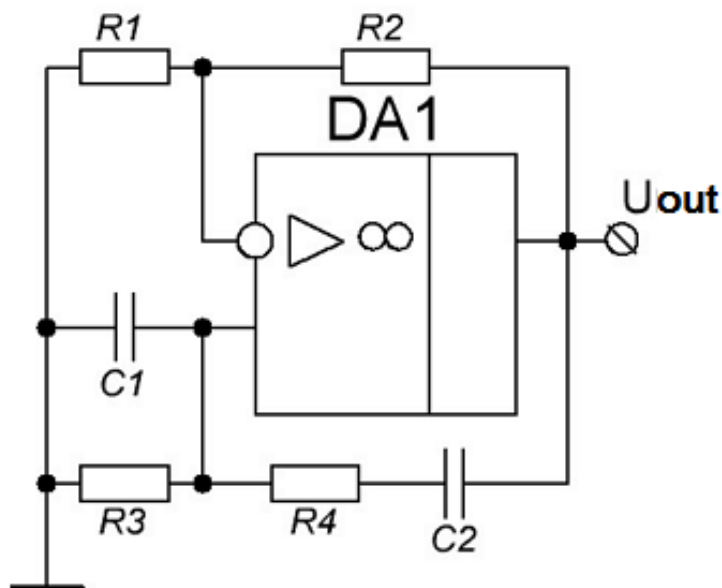


Figure 1. Typical  $RC$ -generator with Wien bridge

In this case, stabilization of the signal amplitude at the input can be achieved by means of the nonlinearity that the amplifier possesses. So, the onset of sinusoidal signal generation mode occurs when the signal amplitude increases and its gain drops at the output of the operational amplifier, which means that the amplitude balance is achieved at a certain amplitude.

Most amplitude stabilization systems are based on the property of nonlinear elements to change their internal resistance under the influence of incoming voltage. Figure 2 shows a scheme of an  $RC$ -generator with a Wien bridge on the operation amplifier with a simple amplitude stabilization system.

In this scheme, two diodes  $VD1$  and  $VD2$  are connected in series with the resistor  $R2$  according to a counter-parallel scheme, due to which the scheme provides stabilization of the amplitude of both negative and positive half-waves of the sinusoidal signal.

So, when the amplitude of the output voltage increases, the current flowing through the diode increases and, as a result, the dynamic resistance of the diode decreases, the transmission coefficient of the negative feedback circuit increases, thereby reducing the amplitude of the output signal.

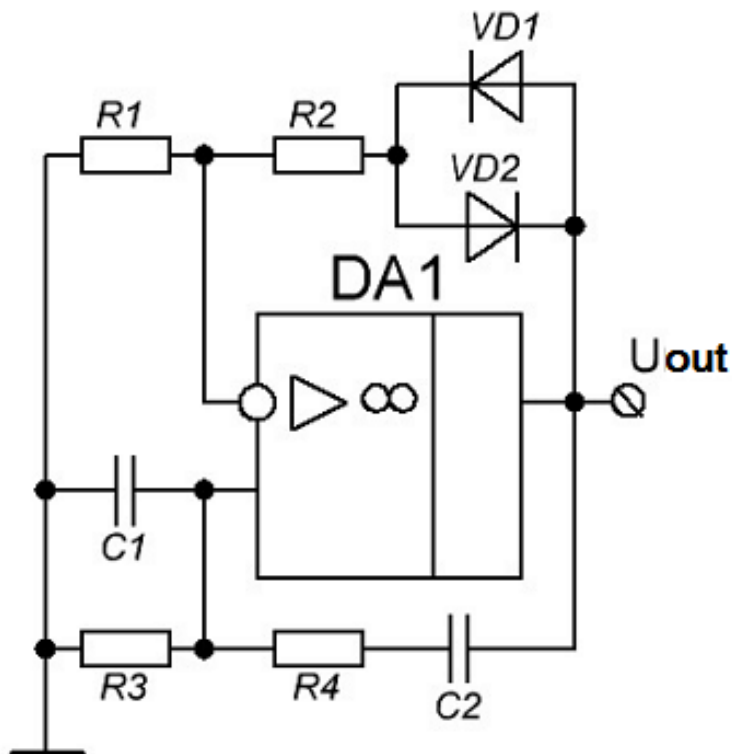


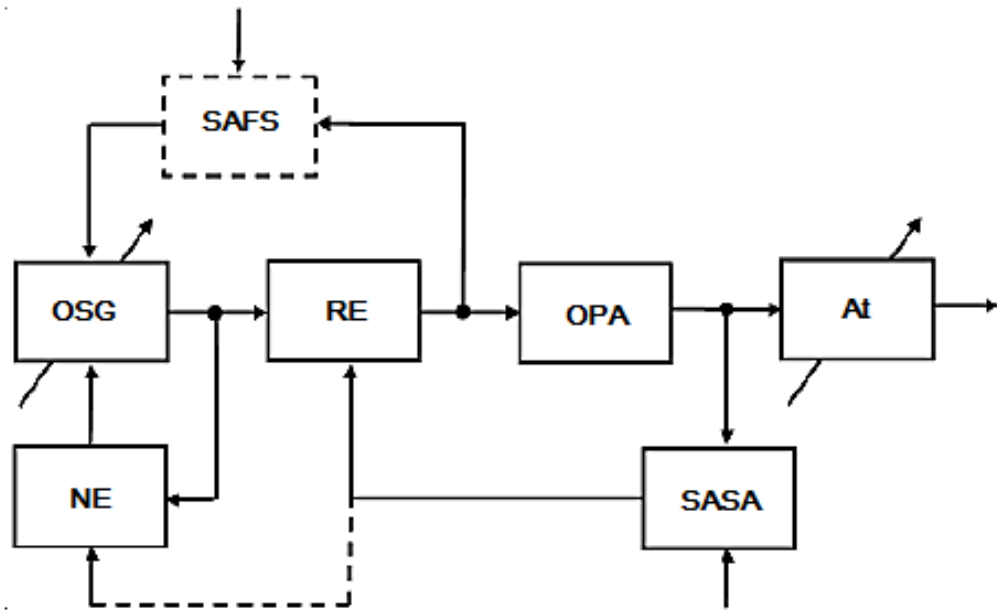
Figure 2. The scheme of an RC generator with a Wien bridge on an operational amplifier with a simple amplitude stabilization system

When constructing this circuit, it should also be taken into account that the value of the resistor  $R2$  should be slightly smaller than in circuits without amplitude stabilization systems. So, providing the condition  $\beta < 1/3$  there are conditions created for guaranteed occurrence of sinusoidal vibrations.

### 1.3 Principle of operation signal generator

Figure 3 shows a simplified block diagram of the measurement signal generator.





OSG – oscillatory system of the generator; NE – nonlinear element; RE – regulating element; OPA – output power amplifier; At – attenuator; SASA – system of automatic stabilization of the amplitude of self-oscillations; SAFS – system of automatic adjustment of the frequency of self-oscillations

Figure 3. A simplified block diagram of the measuring signal generator

The main block of the presented scheme is the oscillatory system. Here, together with the nonlinear element of the generator, vibrations of a given shape, amplitude and frequency arise and form. These two elements form the master generator. It creates conditions for excitation, establishing a stationary mode and stability in time of the amplitude and frequency of vibrations, turning them into self-oscillations.

Usually the output voltage of the master generator does not exceed (1 – 2) V, so it is further amplified by an output power amplifier. With the help of an automatic oscillation amplitude stabilization system and a control element at the output, stable self-oscillations with a "reference level" of alternating voltage are provided. Its value is set by the reference voltage source. This system is also able to control the amplitude change by changing its value. But more often, for these purposes, a multi-limit attenuator is used, which is turned on at the output of the

amplifier. The automatic self-oscillation frequency adjustment system allows you to adjust and stabilize the self-oscillation frequency (in practice, it is not often included in the measuring generators, so figure 3 shows a dotted line). In precision oscillators with high amplitude accuracy, such as the generator GS-50, the nonlinear element is often replaced by an additional loop for automatic amplitude stabilization, turning the stabilization system into a two-circuit one.

All these systems are extremely important for providing the required parameters of the generated vibrations, but the most important of them is the oscillating system of the generator. It is in it that vibrations of the required shape and frequency are generated. Only this system ultimately determines the shape of the generator's output voltage, because other systems have virtually no regulating or stabilizing effects that affect its shape. Therefore, the design of oscillating systems of generators is given the closest attention.

#### **1.4 Precision signal generator GS-50**

The generator GS-50 is a sinusoidal signal source with a precision waveform. This *RC*-generator is intended for research, testing and configuration of systems and devices that can be used in radio electronics, communications, computing and measuring technology, and instrument engineering. The generator GS-50 implements an *RC*-generator with a discrete frequency setting and a system for stabilizing the output voltage level. In this case, the amplitude is stabilized in it by means of an automatic control system.

#### **1.5 Metrological characteristics of the GS-50 generator**

According to RMG-29 [5], a metrological characteristic is a characteristic of one of the properties of measuring instruments that affects the measurement result and its error.

Based on the provisions established in [1], the metrological characteristics of measuring instruments are nothing more than a component of the initial information about this SI. Knowledge of sufficient information about metrological characteristics of measuring instruments in practice is necessary for:

- determining the measurement results and calculating the characteristics of the instrumental component of the measurement error;
- calculation of metrological characteristics of channels of measuring systems that include SI, which have normalized metrological characteristics;
- implementation of the optimal choice of SI.

Besides, metrological characteristics serve as the controlled characteristics when monitoring SI for compliance with the established requirements.

For signal generators, the list of normalized metrological characteristics of measuring instruments, according to the State Standard GOST 8.314 [6], consists of:

- frequency setting errors on the frequency scale;
- frequency instability; output voltage setting error;
- errors of the output voltage regulator (divider, attenuator);
- the harmonic coefficient of the output voltage.

The generator GS-50 is capable of setting the output signal frequency in the frequency range from 10 Hz to 100 kHz inclusive.

Frequency setting is performed discretely in the following sub-bands:

- I: from 10 to 100 Hz (setting after 1 Hz);
- II: 100 to 1000 Hz (setting after 10 Hz);
- III: from 1000 to 10000 Hz (setting after 100 Hz);
- IV: from 10000 to 100000 Hz (setting after 1000 Hz).

The limits of the permissible basic error of the discrete frequency setting must not exceed:

- I, II, III sub-bands:  $\pm 1 \%$ ;
- IV sub-band  $\pm 1.5 \%$ .

Unevenness of the output voltage level at the output "00" in the frequency range relative to the output voltage level at the frequency 1 kHz must not exceed:

- $\pm 1\%$  in the range of 10 to 20 Hz;
- $\pm 1.5\%$  in the range from 0.02 to 100.00 kHz.

The harmonic coefficient of the output signal is not more than:

- I sub-band: 0.0003 % ( 10 to 20 Hz);
- I, II, III sub-bands: 0.0002 % (20 to 10 kHz);
- IV sub-band: 0.0003 % (10 to 20 kHz);
- IV IV sub-band: 0.003 % (20 to 100 kHz) [5].

It is known that the signal distortion depends on the following sum: THD + Noise, where THD is the total harmonic coefficient (small value).

## 1.6 Description of the electrical block diagram of the generator GS-50

Figure 4 shows the functional block diagram of the GS-50 generator.

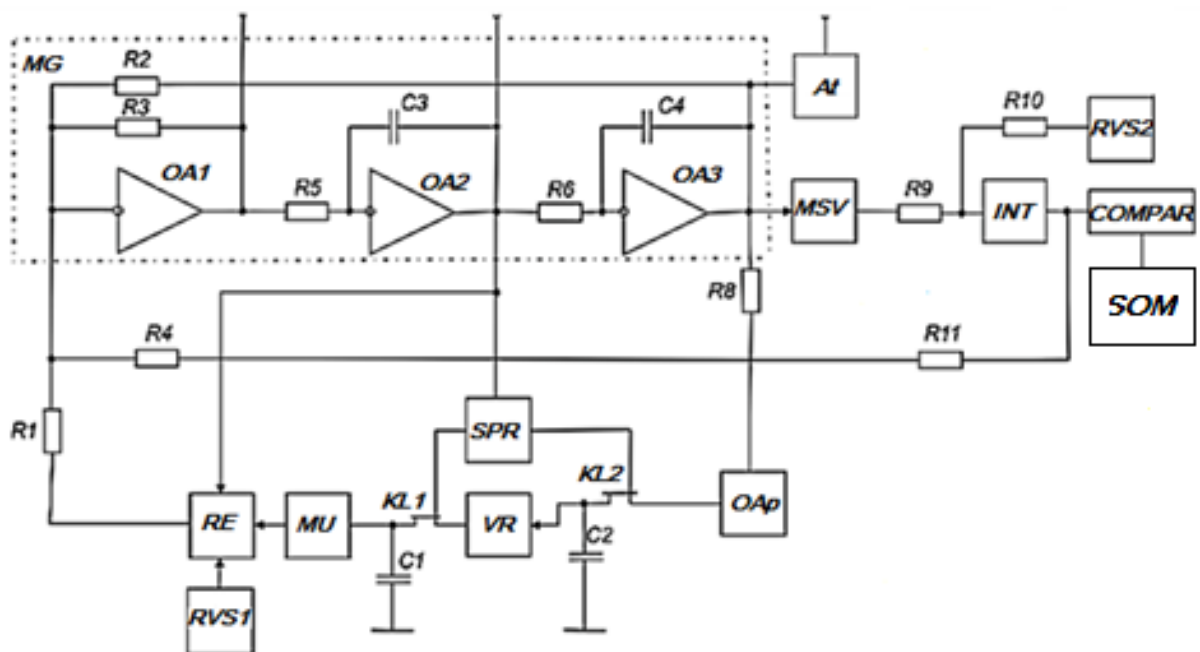


Figure 4. A functional block diagram of the generator GS-50

The basis of this device is a master generator (*MG*), made with the scheme of the oscillating link with an active phasing circuit based on integrators and the dual-circuit the system of stabilization of the amplitude of the output voltage *ZG*.

The AC voltage output is supplied to the internal circuit to stabilize the amplitude, which includes the operational amplifier (*OAp*), electronic keys for field-effect transistors (*KL1*) and (*KL2*), voltage repeated (*VR*), storage capacitors *C1* and *C2*, the impedance matching amplifier (*MU*) and the shaper rectangular pulses (*SRP*).

The pulses, formed at the output of the amplifier limiter, are converted by a circuit, consisting of *KL1*, *KL2*, *VR*, *SRP*, capacitors *C1* and *C2*, into a DC voltage with a level, proportional to the amplitude of the pulses *OAp*. The DC voltage, received and amplified by the matching amplifier, controls the resistance of the channel of one of the differential field transistors of the regulating element (*RE*). The resistance of the second transistor, connected to the reference voltage source *RVS1*, remains constant. The main input receives AC voltage from the output of the first integrator of the active phasing circuit, shifted by  $90^\circ$  relative to the output voltage *ZG*.

The voltage from of the master generator output is also supplied to the external amplitude stabilization circuit, which includes a converter of medium-straightened values (*MSV*), an integrator (*INT*) and an *RVS2* reference voltage source.

The straightened negative polarity signal from the *MSV* output through the resistor *R9* is fed to the input of the *INT* and compared with the positive voltage of the *ION2* source. In case of misalignment, the signal from the integrator output changes the limitation level of the limiter amplifier in the direction of misalignment reduction.

The attenuator *At* serves as step attenuation of the output voltage of the device. In order to prevent the oscillation stops during frequency manipulation, there is a high-speed start-up device which includes a comparator *COMPAR* and a free-running multivibrator *SOM*.

Thus, the main functional nodes of the GS-50 signal generator are:

- master oscillator;
- internal amplitude stabilization loop;
- outer contour of stabilization of the amplitude;
- attenuator;
- high-speed startup device.

### **1.7 Master generator as part of the generator GS-50**

When power is turned on, the oscillating system of the master generator automatically generates electrical signals of the specified form. At the same time, the excitation of vibrations can be understood as a continuous increase in their amplitude from small values to sufficiently large ones. This is an extremely important process, without which there will be no fluctuations at the output and the main function of the generator will become impossible.

The mechanism of oscillation is based on the fact that in real generators, active and passive elements (such as transistors, resistors, amplifiers and diodes) are able to create voltages on their external terminals that change according to a random law. They are also called internal noises and usually have quite small values.

To increase vibrations, both in a real self-oscillating system and in its mathematical model, a positive feedback or an active element with negative resistance is introduced into the system at a predetermined frequency. These actions in the design lead to the appearance of a mechanism of instability of the initial equilibrium position and, as a result, an increase in the amplitude. Therefore, it is concluded that any, even the minimum voltage on the elements of the self-oscillating system increases due to the presence of positive feedback or negative resistance of the active element. Note that this refers to the structural instability of the oscillatory system, for the increase of vibrations in which a small "initial push" is sufficient. It can also be a voltage jump on the elements at the time of power

supply. Subsequently, the voltage jumps may disappear, and the fluctuations will continue to increase.

In this case, for the occurrence of periodic vibrations, an active element is introduced into the circuit, which can be an amplifier or an element with a negative resistance for periodic replenishment of the consumed part of the electrical energy. It is the presence of an active element in the chain that is the second prerequisite for the occurrence of vibrations in the system.

In addition, in an oscillating system, the condition of instability of transients must be observed. This means that the design of an electric circuit with an active element must be performed so that any, even small enough, initial voltages on the reactive elements or fluctuations in the electric voltage in the active circuit increase in amplitude. It should be noted here that such an increase in voltage and current is inherent only in time-unstable processes. Based on this, the condition of instability of processes in the electrical circuit is an important condition for the occurrence of vibrations.

Also, special attention should be paid to the fact that the unstable process under certain parameters of the electric circuit allows a periodic form, that is, it would be oscillatory and at the same time repeated periodically in time. This implies another condition for the occurrence of vibrations – the condition of periodic oscillation of transients.

Also, the oscillation process in the circuit must be controlled, i.e. it must always be possible to control the transient process, the increase or decrease in the amplitude of vibrations. This controllability can be provided by the active element itself, as well as by an additional non-linear element such as a voltage limiter, an incandescent bulb, a thermistor, or an automatic oscillation amplitude stabilization system. The controllability of the vibrational transition characteristic is the fifth condition. Finally, the periodic process in an oscillating system must be stable to any disturbances, both external and arising in the system itself.

Physically, the conditions can be explained by the fact that, once it has arisen under the influence of any disturbances, fluctuations in an electrical circuit

increase and become undamped periodic oscillations of a certain shape, amplitude and frequency regardless of the underlying disturbances, i.e. turn into self-oscillation. It is this possibility of turning vibrations into self-oscillation that converts the oscillating system into an auto-oscillating system, i.e., into an auto-generator.

Let us consider the oscillating system of the generator GS-50.

Figure 5 shows the electrical diagram of the oscillating system of the master generator, consisting of one inverter ( $OA1, R1, R2$ ) and two integrators ( $OA2, R3, C1$  and  $OA3, R4, C2$ ). The diagram also shows the input and output voltages.

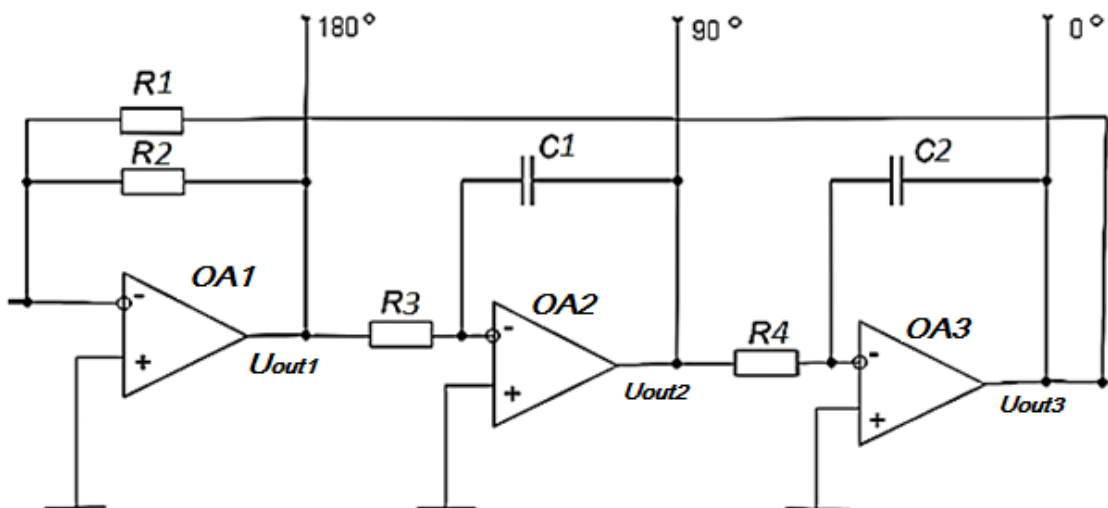


Figure 5. Electrical diagram of the oscillating system of the master generator

Appendix B describes the conditions for the occurrence of vibrations in the oscillating system of the master generator.

## Conclusion

This section is focused on the types of signal generators, as well as it describes the object of research – the generator GS-50, and provides its



metrological characteristics. The principle of operation of signal generators has been described. The scheme of the oscillating link of the generator and the functional block diagram of the generator GS-50 have been considered.

## Приложение Б

(обязательное)

### Описание условий возникновения колебаний в колебательной системе задающего генератора

Для получения условий приведем некоторые функциональные зависимости, учитывая, что коэффициент передачи данной схемы равен:

$$k = -R2/R1.$$

Учитывая что резисторы  $R2$  и  $R3$  обладают одинаковым сопротивлением коэффициент передачи равен:

$$k = -1$$

Тогда:

$$U_{\text{ВЫХ1}} = U_{\text{ВЫХ3}} \cdot k = -U_{\text{ВЫХ3}} = U_{\text{ВХ2}};$$

$$U_{\text{ВЫХ2}} = -\frac{1}{R3C1} \cdot \int U_{\text{ВХ2}} dt = \frac{1}{R3C1} \cdot \int U_{\text{ВЫХ3}} dt = \frac{1}{R3C1} \cdot \int U_{\text{ВЫХ3}} dt = U_{\text{ВХ3}};$$

$$U_{\text{ВЫХ3}} = \frac{1}{R4C2} \cdot \int U_{\text{ВХ3}} dt = \frac{1}{R4C2} \cdot \int \left( \frac{1}{R3C1} \cdot \int U_{\text{ВЫХ3}} dt \right) dt = \frac{1}{R3R4C1C2} \cdot$$

$\iint U dt^2.$

Заменим:

$$\tau1 = R3C1 \text{ и } \tau2 = R4C2.$$

Получим следующее выражение:

$$U(t) = \frac{1}{\tau1 \cdot \tau2} \cdot \iint U dt^2.$$

С помощью прямого преобразования Лапласа перейдем от интегрального вида к операторному:

$$U(p) = \frac{1}{\tau1 \tau2} \cdot U(p) \cdot \frac{1}{p^2}.$$

Далее производим следующие преобразования:

$$1 = \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \cdot \frac{1}{p^2},$$

тогда:

$$p^2 = \frac{1}{\tau_1 \tau_2} = (-j\omega)^2 = \omega^2.$$

И в итоге, с учетом того, что в схеме резисторы и конденсаторы попарно равны, получаем следующее выражение, характеризующее частоту колебаний колебательной системы задающего генератора:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{\tau_1 \tau_2}} = \sqrt{\frac{1}{\tau^2}} = \frac{1}{\tau}.$$

## Приложение В

(обязательное)

### Электрическая принципиальная схема генератора со схемой стабилизации

