

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование нелинейных искажений генератора “ГС-50”

УДК 621.373.1.018.78-047.37

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ61	Фидченко Михаил Витальевич		

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ВКР	Рыбин Юрий Константинович	профессор д. т. н.		
Руководитель ООП	Заревич Антон Иванович	доцент к. т. н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ШИП	Шаповалова Наталья Владимировна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ИШНКБ	Авдеева Ирина Ивановна			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОАР	Леонов Сергей Владимирович	доцент к. т. н.		

Томск – 2018 г.

Планируемые результаты обучения по направлению 27.04.01

«Стандартизация и метрология»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВПО 3+, критериев и/или заинтересованных сторон
Профессиональные компетенции		
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.	Требования ФГОС 3+ (ОК-1, 8, 9, 10; ПК- 17, 23, 24, 28). Критерий 5 АИОР (п.1.1, 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P2	Выполнять работы по метрологическому обеспечению и техническому контролю, проводить анализ состояния и динамики метрологического и нормативного обеспечения производства, производить оценку качества измерений, контроля и испытаний, проводить работы по автоматизации измерений и контроля в производстве и научных исследованиях.	Требования ФГОС 3+ (ОК - 13, ПК - 3, 7, 8, 9, 13, 14). Критерий 5 АИОР (п.1.3, 1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P3	выполнять работы в области стандартизации и сертификации: выполнять разработку и экспертизу новых технических регламентов и другой нормативной документации, разрабатывать процедуры оценки соответствия, поддерживать единое информационное пространство планирования и управления предприятием на всех этапах жизненного цикла изделий.	Требования ФГОС 3+ (ПК-1, 2, 5, 6, 19, 21, 29). Критерий 5 АИОР (п. 1.3, 1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P4	Выполнять работы в области контроля и управления качеством: исследовать причины появления некачественной продукции, разрабатывать предложения по предупреждению и устранению причин брака, осуществлять приемочный и выходной контроль продукции, а также контроль производства на основе современных технических средств.	Требования ФГОС 3+ (ПК-4, 12, 14, 15, 21). Критерий 5 АИОР (п. 1.3, 1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P5	Использовать базовые знаний в области экономики, проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения инновационной инженерной деятельности; организовывать работы по защите объектов интеллектуальной собственности и коммерциализации прав на них, проводить технико-экономический анализ по проектам связанным с метрологическим обеспечением производства.	Требования ФГОС3+ (ОК-5, ПК-11, 14, 16, 17, 18, 20, 27, 30). Критерий 5 АИОР (п.2.1, 1.3, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
Универсальные компетенции		
P6	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности, заниматься научно- педагогической деятельностью в области метрологии, технического регулирования и управления качеством.	Требования ФГОС 3+ (ОК-1, 3, 4, 5, ПК-32, 33, 34). Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P7	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, принимать исполнительские решения в условиях спектра мнений, определять порядок работ, демонстрировать ответственность за результаты работы.	Требования ФГОС 3+ (ОК-11, 12, ПК-20, 22, 32). Критерий 5 АИОР (п.2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности.	Требования ФГОСЗ+ (ОК-14, ПК-26) Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P9	Ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а так же различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду.	Требования ФГОС ВПО 3+ (ОК-7, ПК-10, 14, 20,). Критерий 5 АИОР (п.2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI
P10	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности, проявлять гражданскую позицию, направленную на его совершенствование.	Требования ФГОС ВПО 3+(ОК-6). Критерий 5 АИОР (п.1.6, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа ИШИТР

Направление подготовки (специальность) 27.04.01 Стандартизация и метрология
 Отделение школы (НОЦ) ОАР

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП доцент ОАР
 Заревич А. И. к.т.н.

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ61	Фидченко Михаилу Витальевичу

Тема работы:

Исследование нелинейных искажений генератора «ГС-50»	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 2585/с от 13.04.2018 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	5.06.2018
--	-----------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <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>Исследование нелинейных искажений, нестабильности напряжения и погрешности установки частоты генератора “ГС-50”, определение наиболее подходящих средств измерений, возможные улучшения характеристик генератора.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <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>	<p>Погрешность установки частоты, неравномерность выходного напряжения, коэффициент гармоник генератора “ГС-50”</p>
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Презентация в программе Power Point</p>

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Шаповалова Наталья Владимировна
Социальная ответственность	Авдеева Ирина Ивановна
Часть на иностранном языке	Кузнецова Ирина Николаевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
РС-генераторы с низкими искажениями	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	1.03.2018
---	------------------

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ61	Фидченко Михаил Витальевич		

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

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ61	Фидченко Михаил Витальевич

Школа	Информационных технологий и робототехники	Отделение	Автоматизации и робототехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Стандартизация и метрология

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	стоимость расходных материалов.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	коэффициенты для расчета заработной платы.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	отчисления во внебюджетные фонды (30%).

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	– потенциальные потребители результатов исследования; – анализ конкурентоспособности.
2. Разработка устава научно-технического проекта	
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	– структура работ в рамках научного исследования; – определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения научного исследования; – бюджет научно-технического исследования.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	– оценка экономической эффективности проекта; – оценка научно-технического уровня НИР.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	28.03.2018 г.
---	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ШИП	Шаповалова Наталья Владимировна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ61	Фидченко Михаил Витальевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ61	Фидченко Михаилу Витальевичу

Школа	ИШИТР	Отдел	ОАР
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	27.04.01 Стандартизация и метрология

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Исследование характеристик генератора “ГС-50” в учебной лаборатории. Рабочим местом является стол с установленными на нем средствами измерений: генератор, осциллограф, вольтметр, частотомер. Обработка результатов происходит за столом на компьютере в домашних условиях.
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:	Вредные: Уровень электромагнитных излучений в рабочей зоне; Микроклимат; Освещенность рабочей зоны. Психофизические: Умственное перенапряжение; Монотонность труда. Опасные: Возможность поражения электрическим током; Короткое замыкание; Статическое электричество.
2. Экологическая безопасность:	Утилизация лабораторного оборудования, люминесцентных ламп, использованной бумаги.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возникновение пожара в случае короткого замыкания. Тушение оборудования только углекислотным или порошковым огнетушителем.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	ГОСТ 12.2.061-81. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. СанПиН 2.2.4.548-96. ГОСТ 12.2.032-78. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009. ФЗ-197.
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
	01.03.2018

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ИШНКБ	Авдеева Ирина Ивановна			01.03.2018

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ61	Фидченко Михаил Витальевич		01.03.2018

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки (специальность) 27.04.01 Стандартизация и метрология
 Уровень образования Магистратура
 Отделение школы (НОЦ) автоматизации и робототехники
 Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2017/2018 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.2018
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
19.03.2018	<i>Введение</i>	
30.04.2018	<i>1. Генераторы синусоидальных сигналов</i>	
17.04.2018	<i>2. Методы исследования характеристик генератора "ГС-50"</i>	
2.05.2018	<i>3. Результаты исследования характеристик генератора "ГС-50"</i>	
7.05.2018	<i>4. Улучшение характеристик генератора "ГС-50"</i>	
14. 05.2018	<i>Заключение</i>	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОАР	Рыбин Юрий Константинович	профессор Д. Т. Н.		1.03.2018

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР	Заревич Антон Иванович	доцент К. Т. Н.		1.03.2018

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 120 страниц, 36 рисунков, 32 таблицы, 26 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: генератор, метрологические характеристики, исследование характеристик, нелинейные искажения, погрешность установки частоты, неравномерность выходного напряжения.

Объектом исследования являются погрешность установки частоты, неравномерность выходного напряжения и нелинейные искажения генератора “ГС-50”.

Цель работы – исследование метрологических характеристик генератора “ГС-50”, выбор методов и приборов, которыми можно проводить исследование, возможные способы улучшения характеристик генератора “ГС-50”.

В процессе исследования проводились измерения напряжения, частоты и коэффициента гармоник генератора “ГС-50” и обработка полученных результатов.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: погрешность установки частоты не более 1 %, неравномерность выходного напряжения не более 3 %, значение коэффициента гармоник 0,00018 %.

Степень внедрения: данная работа находится на стадии научного исследования.

Область применения: исследования нелинейных искажений вносимых электронными элементами.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в возможности реализации электронных элементов с маленькими значениями вносимых искажений.

В будущем планируется реализовать запланированные улучшения характеристик генератора “ГС-50”.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ).
Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя.
Общие эргономические требования.

ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие
эргономические требования.

ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и
номенклатура видов защиты.

ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009 Эргономические требования к проведению
офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 5.
Требования к расположению рабочей станции и осанке оператора.

СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному,
искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.

СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным
электронно-вычислительным машинам и организации работы.

СанПиН 2.2.4/2.1.9.055-96 Электромагнитные излучения
радиочастотного диапазона.

СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату
производственных помещений.

В данной работе применены следующие термины с соответствующими
определениями:

Джиттер – нежелательные фазовые и/или частотные случайные
отклонения передаваемого сигнала.

Поверка – совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения
соответствия средств измерений метрологическим характеристикам.

Пьезокристалл – вещество, обладающие свойством при сжатии продуцировать электрический заряд и обратным свойством под действием электрического напряжения изменять форму.

Direct Digital Synthesis – цифровой синтезатор сигналов.

В данной работе применены следующие сокращения:

АРУ – автоматическая регулировка усиления.

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь.

Кг – коэффициент гармоник.

Неравномерность выходного напряжения – изменение установленного номинального значения уровня выходного сигнала при перестройке частоты.

НИР – научно-исследовательская работа.

ОУ – операционный усилитель.

ПК – персональный компьютер.

РФ – Российская Федерация.

СКЗ – среднеквадратическое значение.

ТЗ – техническое задание.

ТПУ – Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет.

Ш – шум.

ЧС – чрезвычайная ситуация.

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь.

ppm – part per million.

Оглавление

Введение	13
1 Генераторы синусоидальных сигналов и нелинейные искажения	15
1.1 Генераторы синусоидальных сигналов	15
1.2 RC-генераторы с низкими искажениями	18
1.3 Применение генераторов синусоидальных сигналов	28
1.4 Нелинейные искажения	29
1.5 Исследование нелинейных искажений в усилителях	42
2 Методы исследования характеристик генератора “ГС-50”	47
2.1 Метод исследования погрешности установки частоты	47
2.2 Метод исследования неравномерности выходного напряжения	49
2.3 Метод исследования коэффициента гармоник	50
3 Результаты исследования характеристик генератора “ГС-50”	52
3.1 Обработка результатов исследования погрешности установки частоты	52
3.2 Обработка результатов исследования неравномерности выходного напряжения	58
3.3 Обработка результатов исследования нелинейных искажений	62
4 Улучшение характеристик генератора “ГС-50”	68
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	75
6 Социальная ответственность	95
Заключение	104
Список публикаций студента	106
Список использованных источников	107
Приложение А	110

Введение

Генераторы – средства измерения, выдающие электрические колебания, воздействующие на исследуемые объекты. Таким образом, получается информация о характеристиках и свойствах этих объектов.

Наибольшее применение находят генераторы синусоидальных сигналов. Генераторы являются источниками измерительных, управляющих и стимулирующих сигналов, которые используются для создания различной электроники и радиоаппаратуры (музыкальные системы). Также используются в сферах медицины (для контроля слуховых аппаратов и проверки слуха человека) и спутниковой связи. Характеристики сигналов на выходе генераторов должны соответствовать технической документации, поскольку от этого зависит корректное функционирование приборов и достоверность полученных данных.

Генераторы измерительных сигналов бывают различных типов: низкочастотные и высокочастотные, цифровые и аналоговые. Их основными метрологическими характеристиками являются неравномерность выходного напряжения, погрешность установки частоты и коэффициент гармоник. Для данного исследования подходят низкочастотные аналоговые генераторы, они обладают меньшим значением коэффициента гармоник, чем высокочастотные и цифровые генераторы. Типовое значение коэффициента гармоник для низкочастотных генераторов находится в диапазоне от 0,05 % до 0,1 %.

В данной работе изучен метод определения коэффициента гармоник, определения погрешности установки частоты и определения неравномерности выходного напряжения. Коэффициент гармоник можно исследовать с помощью измерителей нелинейных искажений, анализаторов спектра и осциллографов. Неравномерность выходного напряжения исследуется вольтметрами или осциллографами. Погрешность установки частоты исследуется с помощью частотомеров и осциллографов.

Объектом исследования является генератор “ГС-50”. Этот генератор конкурирует с зарубежными по значению коэффициента гармоник. Американские генераторы Krohn-Hite 4402B и Tektronix SG505 обладают значениями коэффициента гармоник равными 0,0005 % и 0,0008 % соответственно. В то время как значение коэффициента гармоник у генератора “ГС-50” равно 0,0002 %.

Цифровая техника активно развивается, и появляются новые устройства и элементы. Каждую новинку требуется проверить, ведь она может вносить искажения в проходящий через нее сигнал. Если эти искажения велики, по сравнению с искажениями на выходе генератора выдающего сигнал, то определить это будет не трудно. Но если искажения генераторов будут превышать, искажения, вносимые, к примеру, АЦП, то с выявлением этого возникнут трудности.

Исследование направлено на уменьшение коэффициента гармоник генератора “ГС-50”. Улучшение характеристик позволит выявлять даже незначительные искажения в элементах цепи. Помимо улучшения характеристик также может потребоваться усовершенствовать методики поверки, поскольку лучшие характеристики предусматривают большие требования к средствам поверки.

1 Генераторы синусоидальных сигналов и нелинейные искажения

1.1 Генераторы синусоидальных сигналов

Генераторы синусоидальных сигналов очень часто используются с целью проверки и подстройки электронных устройств. Объясняется это тем, что сгенерированные периодические сигналы обладают рядом постоянных параметров – частотой, амплитудой, а также фазой. С помощью генераторов моделируются сигналы, аналогичные тем, что будут поступать на устройства во время их работы.

Выделяют следующие виды генераторов:

- Низкочастотные RC – генераторы;
- Высокочастотные LC – генераторы;
- Генераторы с пьезокристаллическими, кварцевыми и электромеханическими резонаторами;
- Генераторы, формирующие синусоидальные сигналы из треугольных сигналов путем их плавного ограничения;
- Генераторы, реализующие цифровые методы синтеза синусоидальных сигналов.

RC – генераторы

RC–генераторы создают низкочастотные сигналы с частотой до $(2 \div 5)$ МГц.

RC–генераторы получили свое название из-за наличия RC–цепи (рисунок 1).

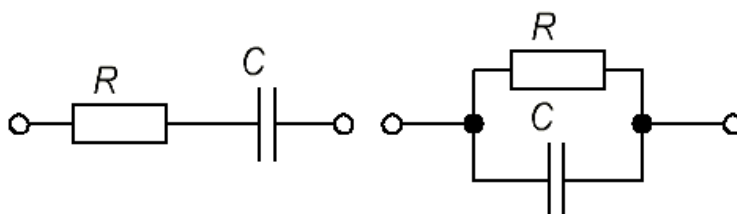


Рисунок 1 – Последовательная и параллельная RC–цепи применяемая в генераторах синусоидальных сигналов

Обычно генератор состоит из параллельной и последовательной RC-цепей. Частота сгенерированного сигнала для такого генератора равна:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1C_1R_3C_2}}. \quad (1)$$

Часто сопротивление и емкость в последовательной RC-цепи соответственно равно сопротивлению и емкости в параллельной цепи, в связи с этим выражение (1) преобразуется в:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (2)$$

Амплитуда сигнала стабилизируется благодаря нелинейности усилителя. Когда амплитуда сигнала на выходе усилителя достигает максимального значения, коэффициент усиления уменьшается. Баланс амплитуд достигается при некотором значении амплитуды, в этом случае начинается стационарный режим генерации малоискаженного синусоидального сигнала.

Также стабилизация производится с помощью инерционной отрицательной обратной связи. При использовании в обратной связи маломощной лампы накаливания происходит увеличение ее сопротивления из-за нагрева. Таким образом, происходит уменьшение амплитуды сигнала и его стабилизация. Используя такой способ можно добиться малых искажений синусоидального сигнала, из-за линейности обратной связи, для быстроизменяющегося сигнала.

Плавное изменение частоты в аналогичных генераторах осуществляется за счет реостатов, а грубое – переключателем, который изменяет емкость конденсаторов. Обычно, грубое переключение изменяется с кратностью 10.

LC-генераторы

LC-генераторы создают сигналы с очень высокой частотой (от сотен мегагерц и выше). Схема LC-генератора представлена на рисунке 2.

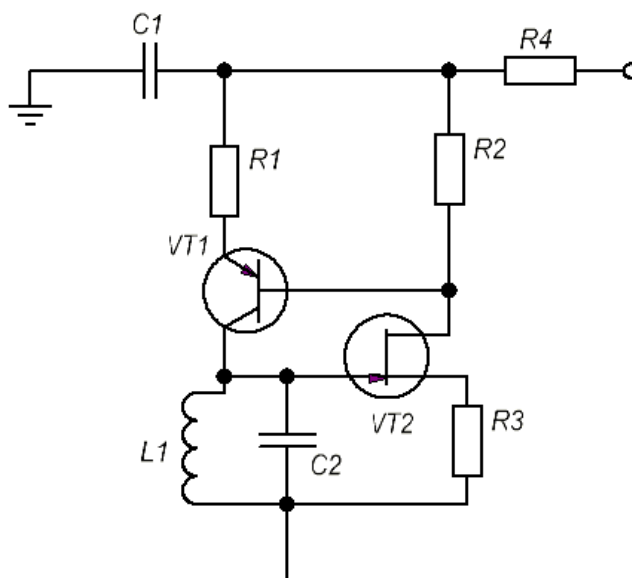


Рисунок 2 – LC-генератор на полевом и биполярном транзисторе

Частота генерации определяется следующим выражением:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (3)$$

Поскольку реактивное сопротивление конденсатора C и катушки индуктивности L модульно равны, происходит их компенсация в последовательном контуре. Общее сопротивление становится равно сопротивлению потерь последовательного контура.

Из этого следует, что изменять частоту сигнала генератора LC-типа можно изменяя индуктивность или емкость. Для изменения частоты можно использовать либо катушки с переменной индуктивностью, либо конденсаторы с переменной емкостью. Также можно использовать конденсаторы с переменной емкостью на основе р-п-перехода. Применение таких конденсаторов дает возможность конструировать генераторы, управляемые напряжением.

Добротность – отношение реактивного сопротивления катушки индуктивности или конденсатора к активному сопротивлению потерь. Добротность определяется фильтрующей способностью генераторов LC-типа. Большее значение добротности дает более стабильную частоту выходного

сигнала генератора. Отношение стабильности частоты генератора LC-типа к стабильности частоты генератора RC-типа находится в диапазоне от 10 до 100.

Генерация синусоидального сигнала LC-генератора выполняется проще, чем у генераторов RC-типа из-за высокой фильтрующей способности. Но все равно, нелинейные искажения генераторов LC-типа выше. [1]

1.2 RC-генераторы с низкими искажениями

Низкие искажения желательны для тестирования высокопроизводительного аудиооборудования и создания эталонных приборов, для генераторов с высоким разрешением в мостах переменного тока, и для других измерений высокого разрешения на аудио или субчастотном диапазонах. Существует явный компромисс между широким диапазоном частот, низкими искажениями и стабильностью. Генераторы с неизменяемой частотой или низкочастотные генераторы обычно простые и хорошие, а также обладают низкими значениями коэффициента гармоник.

RC-генераторы работают как с отрицательной, так и с положительной обратной связью, причем польза от положительной обратной связи немного выше, чем потери от отрицательной обратной связи. Один канал обратной связи поступает от выхода усилителя через полосовой или режекторный фильтр, что позволяет усилителю работать только на одной частоте. Затем для стабилизации рабочей точки системы требуется некоторая форма автоматического контроля уровня (называемая АРУ). Эта стабильная рабочая точка обеспечивает стабильность выходной амплитуды и низкое искажение, если усилитель является хорошим.

В целом усилитель звукового диапазона должен иметь хороший или превосходный коэффициент подавления синфазного сигнала (КПСС, CMRR – англ.) и быть относительно широкополосным. Основными параметрами являются низкий уровень шума, высокий коэффициент усиления и низкие нелинейные искажения. Операционные усилители с полевым транзистором, такие как ОРА134 и 604, могут создавать более низкий уровень шума, когда

импеданс фильтра относительно высок, как это часто бывает в моделях с мостом Вина и T-мостом, особенно в тех случаях, когда изменение частоты выполняется с помощью переменных конденсаторов. Усилитель на полевом транзисторе требуется для очень большого количества приборов с мостом Вина, из-за необходимости небольших конденсаторов и очень больших резисторов, которые нужны для настройки диапазона на низких частотах.

Любая из этих конструкций может работать очень хорошо, учитывая хорошие усилители, тщательную компоновку, прецизионные компоненты и компактную АРУ. Ни одна из конструкций не показала себя окончательно лучшей, хотя конструкция с фазовым сдвигом часто используется в RC-генераторах. Хорошие RC-генераторы по-прежнему используются профессиональными дизайнерами аудиосистем, а также любителями, благодаря простоте и низкой стоимости.

Хотя они довольно часто в коммерческом и промышленном использовании заменяются с помощью технологий Direct Digital Synthesis (DDS), низкочастотные RC-генераторы с низким уровнем искажений по-прежнему популярны и обычно обеспечивают относительную простоту и экономичность, с хорошей общей производительностью.

Мост Вина

Схема моста Вина является основой серии HP 200 и используется во многих других, включая Heathkit IG-1272 и некоторые другие генераторы компании Sound Technology. Она использует последовательную RC-цепь, соединенную с параллельной RC-цепью, обе цепи имеют одинаковые значения сопротивления резистора R и емкости конденсатора C. Эта последовательная цепь является цепью положительной обратной связи усилителя и подключена к неинвертирующему входу усилителя.

Схема моста Вина представлена на рисунке 3.

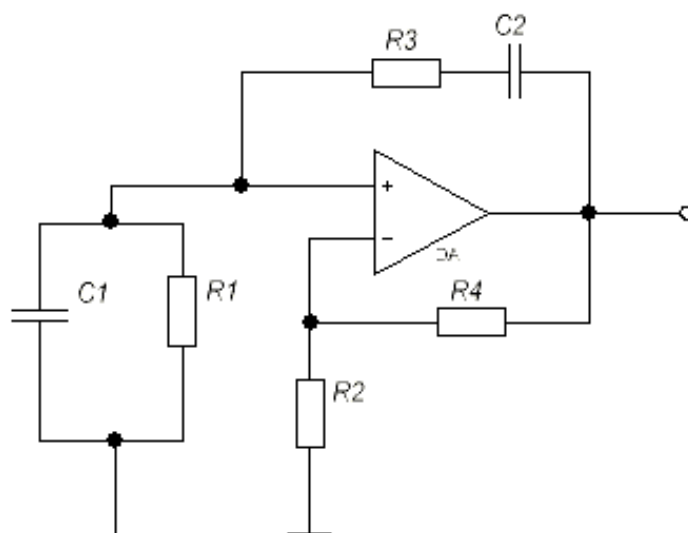


Рисунок 3 – Схема усилителя с мостом Вина

Резисторы R и конденсаторы C в параллельной и последовательной цепях обычно имеют одинаковые значения сопротивления и емкости. В связи с этим амплитуда настроенного сигнала обратной связи через мост к неинвертирующему входу составляет $1/3$ амплитуды (минус 9,5 дБ) выходного сигнала. Разность фаз равна 0° при выполнении условия в формуле (1).

Фазовый сдвиг в 0° на пиковой амплитуде моста, связанный с фазой 0° усилителя, приводит к 0° сдвига фазы только на частоте колебаний. Любая другая частота имеет большее или меньшее значение фазового сдвига и более высокое значение коэффициента ослабления, предотвращая колебание.

Отрицательная обратная связь на инвертирующем входе усилителя должна иметь коэффициент ослабления немного больший, чем 3, так чтобы положительная обратная связь немного превышала отрицательную обратную связь для поддержания колебаний. Отрицательная обратная связь также имеет эффект заточки фильтра моста Вина, увеличивая его добротность Q и смещая фазовый сдвиг к нулю.

Большинство генераторов на мосте Вина используют равные значения сопротивлений R и равные значения емкостей C , но некоторые, например, серии HP 651/652/653/654, используют последовательную цепь R $2C$ и параллельную цепь $2R$ C , что приводит к коэффициенту ослабления равному 2 вместо 3 для максимального сигнала положительной обратной связи. Это

снижение усиления может иметь результат более низкого уровня шума или лучшей высокочастотной стабильности.

Мосты Вина могут быть эффективно настроены в диапазоне частот либо с помощью переменных конденсаторов, либо с помощью переменных резисторов, либо они могут быть настроены дискретными шагами с переключаемыми резисторами или конденсаторами в качестве переменных элементов. Большинство недорогих RC-генераторов звука настраиваются емкостью потому, что проще и дешевле делать прецизионные конденсаторы с изменяемым значением емкости, чем делать прецизионные потенциометры.

Джон Линсли Худ (John L. Linsley Hood) утверждал, что основным недостатком генераторов на мосте Вина было то, что они ограничены нелинейными искажениями в 0,01 % Кг из-за относительно высоких уровней входных сигналов усилителя и, как следствие, нарушения синфазного режима во входном каскаде. Джим Уильямс (Jim Williams) из Linear Technology разработал генератор на мосте Вина с использованием операционного усилителя, управляющим общей точкой моста и АРУ, для подавления синфазного сигнала. Он сообщил о значительном сокращении Кг, до уровня около 0,0003 %.

T-мост

Схема T-моста используется в приемнике Heathkit IG-18 / SG-18 и генераторе HP 239A. Фильтр помещают в цепь отрицательной обратной связи усилителя, а АРУ в цепь положительной обратной связи. На рисунке 4 представлена схема T-моста.

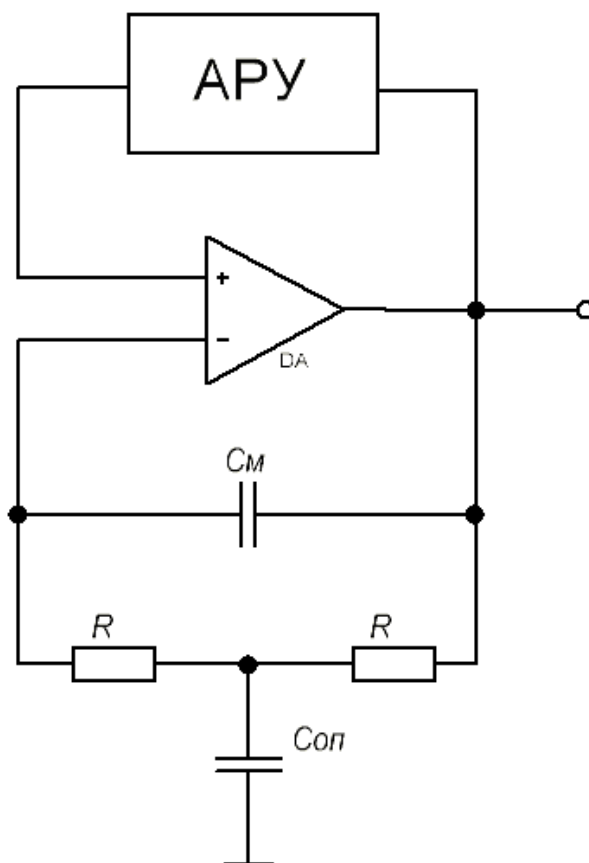


Рисунок 4 – Схема усилителя с Т-RC-мостом

Опять же, частота колебаний определяется по формуле (1). Фильтр использует мостовой конденсатор C_m для соединения двух резисторов, а второй опорный конденсатор $C_{оп}$ соединяет два (равных) резистора в общей точке. В результате получается режекторный фильтр, ширина которого зависит от отношения двух значений конденсаторов. Квадратный корень отношений конденсатора является множителем и делителем C в формуле частоты для того, чтобы частота настройки была рассчитана. Из-за размещения в контуре с отрицательной обратной связью, точка режекции становится пиком на выходе усилителя. На частотах по обе стороны от режекции / пика общая отрицательная обратная связь поддерживает колебания. АРУ находится в цепи положительной обратной связи, и коэффициент ослабления в этом цикле должен быть немного меньше, чем затухание на частоте среза в цепи отрицательной обратной связи для поддержания колебаний. Коэффициент ослабления Т-моста определяется выражением:

$$K_{\text{ослабл}} = \frac{2}{2 + \frac{C_{\text{оп}}}{C_{\text{м}}}}, \quad (4)$$

то есть

$$K_{\text{ослабл}} = \frac{2}{2 + C_{\text{отн}}}, \quad (5)$$

где $C_{\text{отн}} = C_{\text{оп}}/C_{\text{м}}$ – отношение емкости опорного конденсатора к емкости мостового конденсатора.

Значения ёмкости мостового конденсатора $C_{\text{м}}$ и опорного конденсатора $C_{\text{оп}}$ зависит от емкости конденсатора C в формуле (2) и определяется выражениями:

$$C_{\text{м}} = C/\sqrt{C_{\text{отн}}}, \quad (6)$$

$$C_{\text{оп}} = C \cdot \sqrt{C_{\text{отн}}}. \quad (7)$$

К примеру, в генераторе Heathkit IG-18 отношение конденсаторов $C_{\text{отн}}$ составляет 10:1. Подставив это значение в формулы (6) и (7) получим, что $C_{\text{м}}=C/3.162$ и $C_{\text{оп}}=C \cdot 3.162$. Подставив значение отношения конденсаторов в формулу (3) получим, что это отношение дает коэффициент ослабления равный $2/(2 + 10)=1/6$ или около минус 15,6 дБ, если значения конденсатора точны. Это, в свою очередь, означает, что коэффициент усиления от цепи положительной обратной связи должен быть немного больше для поддержания колебаний.

В НР 239А отношение конденсаторов равно 100:1, с коэффициентом ослабления $2/(2+100)=1/51$ или чуть менее минус 34 дБ, а $C_{\text{м}}=C/10$, $C_{\text{оп}}=C \cdot 10$. Усиление цепи положительной обратной связи должно быть немного выше 34 дБ. Более высокий коэффициент усиления и большее отношение конденсаторов означают более резкую и глубокую фильтрацию режекторного фильтра с более высоким значением добротности, что дает лучшую погрешность установки частоты, что приводит к снижению КГ, если усилитель является тихим и имеет малое значение нелинейных искажений. Благодаря очень высокому коэффициенту усиления фильтра и очень хорошему операционному усилителю,

НР 239А достигает чрезвычайно низкого Кг на частоте 1 кГц, ниже минус 110 дБ и приближается к 0,0001 %.

Также есть еще одна компоновка для Т-моста, в которой плечевые элементы моста являются одинаковыми конденсаторами, а неравные элементы моста и опоры являются резисторами. В этой компоновке мостовой резистор больше размером, а резистор опоры меньше размером, чем размер корпусов конденсаторов моста и опоры, описанных выше.

Схема с Т-мостом полезна для генераторов с настраиваемой емкостью, но приводит к большим значениям сопротивления резисторов на низких частотах для типичных относительно небольших емкостей регулируемых конденсаторов.

На основе фазового сдвига

Эти схемы используют две инвертирующие ступени интегратора усилителя, каждая из которых имеет секцию настройки RC входного элемента R и элемент обратной связи C (интегратор), причем один элемент, обычно резистор, настраивает частоту в пределах диапазона, а другой элемент настраивает диапазон. Секции имеют одинаковые коэффициент усиления и постоянные времени, что означает равные сопротивления и равные емкости. Генераторы на основе фазового сдвига цепи могут иметь более двух настроенных ступени, но, в связи с этим, настройка более сложная.

В конструкции с двумя интеграторами каждый интегратор имеет 90° фазового сдвига на настроенной частоте, в сумме 180° . Обратная связь проходит через третий инвертирующий усилитель с дополнительным сдвигом на 180° , чтобы получить требуемый сдвиг фазы в 360° между выходом и входом.

Как и у моста Вина, обратная связь управления усилением, как правило, с третьим усилителем, должна быть такой, чтобы поддерживать колебания. Усилители этих генераторов, обычно, настроены на единичный коэффициент усиления. Преимущество конструкции с переменным состоянием состоит в

том, что ее можно настроить так, чтобы обеспечить независимую точную настройку частоты для каждого диапазона, изменив значение резистора обратной связи для каждого диапазона. Эти генераторы способны к очень низким уровням искажения от 0,0002 % до 0,002 % на аудиочастотах в зависимости от качества и уровня шума усилителя, а также от производительности контура АРУ. Преимуществом является то, что выход может быть взят со второй стадии интегратора, который дает встроенный фильтр нижних частот второго порядка, имеющий минус 12 дБ ниже частоты колебаний, что значительно уменьшает как искажение, так и шум на выходе.

Двойной T-мост

Эти схемы почти никогда не используются в генераторах, поскольку они требуют три конденсатора и три резистора для настройки, что означает шесть частей на диапазон, а не четыре как у других. Это приводит к увеличению сложности настройки. Неэкономичный, непрактичный и не имеющий особых преимуществ. Модели двойного T-моста обычно лучше подходят для ручной настройки, но поскольку производительность не оправдывает сложность, они редко используются.

Автоматическая регулировка усиления (АРУ)

На основе лампы накаливания

АРУ необходима в генераторе с низкими искажениями и часто управляется лампой накаливания как резистором заземления или резистором в цепи обратной связи. Лампа представляет собой резистор с положительным температурным коэффициентом. По мере увеличения выходного сигнала уровень тока цепи обратной связи увеличивается, лампа нагревается, ее сопротивление увеличивается, а коэффициент усиления усилителя увеличивается или уменьшается по мере необходимости в конкретной конфигурации. Очень элегантный и довольно эффективный, а также экономичный.

Термистор

Другой простой системой АРУ является использование термистора, резистора с отрицательным температурным коэффициентом, в качестве одной из ветвей цепи обратной связи. Когда ток сигнала увеличивается, сопротивление термистора уменьшается, повышая или понижая коэффициент усиления по мере необходимости. И лампы и термисторы эффективны, но, будучи системами первого порядка, напрямую контролируемые уровнем выходного сигнала, они ограничены в герметичности уровня контроля, который они могут достичь. Термисторы имеют дополнительный недостаток в том, что они чувствительны к условиям окружающей температуры, что усложняет стабильность, если нагрев из-за сигнального тока достаточно высок, чтобы заглушить окружающие эффекты.

Термисторы в дополнение ко всему чрезвычайно маленькие и хрупкие, поэтому проходящий ток не может нагреть их достаточно, чтобы привести к значительному изменению сопротивления. И из-за размеров, они еще более чувствительны к окружающей температуре. Компания GR столкнулась с этой проблемой, заключая маленькие термисторы в вакуумные колбы, подобно лампам. Это имеет два преимущества: во-первых, они эффективно изолированы от температуры окружающей среды и во-вторых, они имеют более длительную термическую постоянную времени, благодаря отсутствию значительной теплопроводности в воздухе.

Полевой транзистор с управляющим p-n-переходом

Сегодня многие системы АРУ используют сопротивление транзисторов с управляющим p-n-переходом, как усиление элемента управления, иногда как часть системы множителей в цепи обратной связи операционного усилителя. Баланс положительной и отрицательной обратной связи поддерживается таким образом, что очень небольшие изменения амплитуды выходного сигнала приводят к сдвигу в балансе двух типов обратной связи на этапе управления усилением. Управление осуществляется по сигналу постоянного тока, преобразованного из переменного тока путем выпрямления и фильтрации, и

одной или более ступеней интеграции и / или усиления для достижения высокого усиления цепи и очень жесткого контроля. Поскольку напряжение на затворном источнике N-канального транзистора с управляющим p-n-переходом от отрицательного значения приближается к нулю, сопротивление источника стока уменьшается. Когда полевой транзистор помещается в общую ветвь обратной связи, это означает, что увеличение выходного напряжения будет приводить в движение напряжение источника затвора к нулю, уменьшая общий коэффициент усиления, уменьшая выход.

Транзисторы с управляющим p-n-переходом работают очень хорошо, когда уровень сигнала, контролируемый сопротивлением канала, невелик, как правило, менее нескольких сотен милливольт, чем ниже – тем лучше, тогда общая обратная связь от стока к затвору или от выходного сигнала к затвору используется для уменьшения эффектов модуляции сопротивления канала. Путь к уменьшению K_g заключается в том, чтобы поддерживать уровень сигнала на стоке транзистора низким, до 100 милливольт. В целом, характеристики K_g хорошо спроектированных генераторов, управляемых транзисторами, могут быть в диапазоне от 0,0002 % до 0,02 % в зависимости от рабочего диапазона и других деталей, как уже отмечалось ранее.

Оптрон

На других системах АРУ на основе оптронов используется фоторезистор кадмий-сульфид (CdS) в качестве чисто резистивного элемента управления обратной связью, его сопротивление контролируется лампой или светодиодом, питаемым от сигнала постоянного тока, преобразованного из выходного сигнала переменного тока. Сигнал постоянного тока обусловлен одним или несколькими усилителями и / или интеграторами. В отличие от транзистора, оптрон является чисто резистивным и не содержит эффектов внутренней модуляции (хотя постоянный ток должен быть достаточно хорошо фильтрован и иметь низкую пульсацию сигнала во избежание модуляции фоторезистора, особенно при управлении светодиодом). Фоторезисторы не реагируют быстро на изменения интенсивности света, эффект, аналогичный тепловой массе

лампы накаливания. Использование светодиодного источника света вместо лампы накаливания, естественно, улучшает реакцию. Но системы CdS все еще недостаточно быстры, чтобы обеспечить дополнительную фильтрацию цепи для стабилизации сигнала.

КГ может быть равно или, возможно, немного лучше, чем при использовании конструкции на основе транзисторов, но системы АРУ на основе оптронов редко используются в генераторах, где доминируют системы с транзисторами. Конструкции с транзисторами предпочтительны как по стоимости, так и по причине использования пространства. Некоторые генераторы производимые компаниями, в частности, от компании Sound Technology, использовали как транзисторы, так и оптроны в одном генераторе, чтобы получить как быстрый отклик, так и низкое искажение. [2]

1.3 Применение генераторов синусоидальных сигналов

Один из видов использования генераторов заключается в измерении и тестировании электронных элементов и систем.

Новые приемники и передатчики должны быть проверены на работоспособность, на вносимые ими искажения, а также на подтверждение характеристик этих приборов. Генераторы сигналов могут создавать сигналы различной формы, с минимальными искажениями и с необходимым напряжением сигнала.

Также тестируются и проверяются АЦП и ЦАП. Определяются их линейные характеристики, монотонность и вносимые ими искажениями. Генераторы должны обладать соответствующими характеристиками, чтобы провести максимально точные измерения.

Помимо исследований характеристик на рабочих диапазонах также необходимо исследовать приборы на предельных режимах. Сигналы с искажениями, сигналы с джиттерами, сигналы с колеблющейся частотой и напряжением. Поэтому необходимо, чтобы помимо хороших характеристик,

генераторы обладали возможностью намеренного внесения искажений в выходной сигнал. К примеру, модуляции сигнала.

Чтобы выполнять все возложенные задачи, для генераторов важно иметь хорошие характеристики, такие как низкую неравномерность выходного сигнала, высокую погрешность установки частоты сигнала и низкий коэффициент гармоник сигнала. Также генераторы должны иметь широкие частотные диапазоны, возможность генерации не только синусоидального сигнала, но и любой другой формы. [3]

1.4 Нелинейные искажения

Основным источником нелинейных искажений в генераторах являются усилители. Хорошие знания о нелинейных искажениях в усилителях являются основой при выборе правильного усилителя для конкретного прибора. Это понимание начинается с объяснения измерительной установки и того, что коэффициент гармоник плюс шум ($K_{г+ш}$) означает. Обычно используются две зависимости: $K_{г+ш}$ от частоты и $K_{г+ш}$ от амплитуды. Диапазоны этой зависимости объясняются характеристиками шумов усилителя, импеданса источника, коэффициента усиления разомкнутой цепи, пропускной способности и скоростью спада.

Измеритель нелинейных искажений - это очень специализированное электронное средство измерения, предназначенное для измерения гармонических искажений. Далее будет описано, как происходит измерение с помощью измерителя нелинейных искажений.

С генератора подается синусоидальная волна на вход усилителя. Важно использовать именно синусоидальный сигнал, поскольку в нем имеется только одна базовая частота. Усилитель имеет нелинейности и вносит искажения в сигнал, из-за чего сигнал на выходе усилителя отличается от сигнала на его входе.

Выходной сигнал с усилителя подается на измеритель нелинейных искажений для обработки. Внутри прибора сигнал поступает на режекторный

фильтр, который убирает или максимально уменьшает основу сигнала. Во время измерения частоты развертки КГ+Ш от частоты, режекторный фильтр отслеживает частоту движущейся синусоидальной волны. Фильтр ослабляет первую гармонику, широкополосный шум и любые другие мешающие сигналы.

Далее полосовой фильтр пропускает гармоники, а также широкополосный шум в заданной полосе пропускания. Затем следует среднеквадратический детектор. Функция среднеквадратического детектора заключается в преобразовании напряжения пик-ту-пик (peak to peak) исследуемого сигнала в соответствующее среднеквадратическое значение. Это среднеквадратическое значение измеряется вольтметром в режиме измерения переменного тока и обрабатывается посредством цифрового сигнального процессора (ЦСП) для получения анализа Фурье гармоник, которые включают широкополосный шум. Элемент обрабатывает это, чтобы получить значение КГ+Ш, которое обычно выражается в %, но может также выражаться в децибелах.

В зависимости от топологии усилителя и технологии конструкции, добавляются разное количество нежелательных нелинейных искажений. В общем случае искажения вызваны входной парой или промежуточным и выходным каскадом, чаще последними двумя. Эти искажения вводимые усилителем добавляют частотные гармоники, отсутствующие во входном сигнале. Коэффициент гармоник определяет, сколько содержится гармонических искажений в сигнале, по отношению к основному сигналу.

Шум (Ш) также входит в расчет КГ+Ш. Это связано с тем, что усилитель всегда вносит шум, и это добавляется к гармоническим искажениям на выходе усилителя. Измеритель нелинейных искажений использует преобразование Фурье для получения значения КГ+Ш, который описывается следующим уравнением:

$$КГ + Ш = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} (V_n^2) + V_{шум}^2}{V_1^2}} \cdot 100 \%, \quad (8)$$

где V_1 – напряжение первой гармоники, В;

V_m – напряжение высших гармоник, В;

V_{noise} – напряжение шумов, В.

Среднеквадратические значения в уравнении позволяют легко увидеть, если в КГ+Ш преобладает шум или КГ.

На рисунке 5 изображено графическое представление уравнения (8) и показано КГ+Ш измеренное на различных базовых частотах. Например, график показывает, что КГ+Ш составляет приблизительно 0,00001 % при базовой частоте в 100 Гц, и 0,0001 % при частоте 10 кГц.

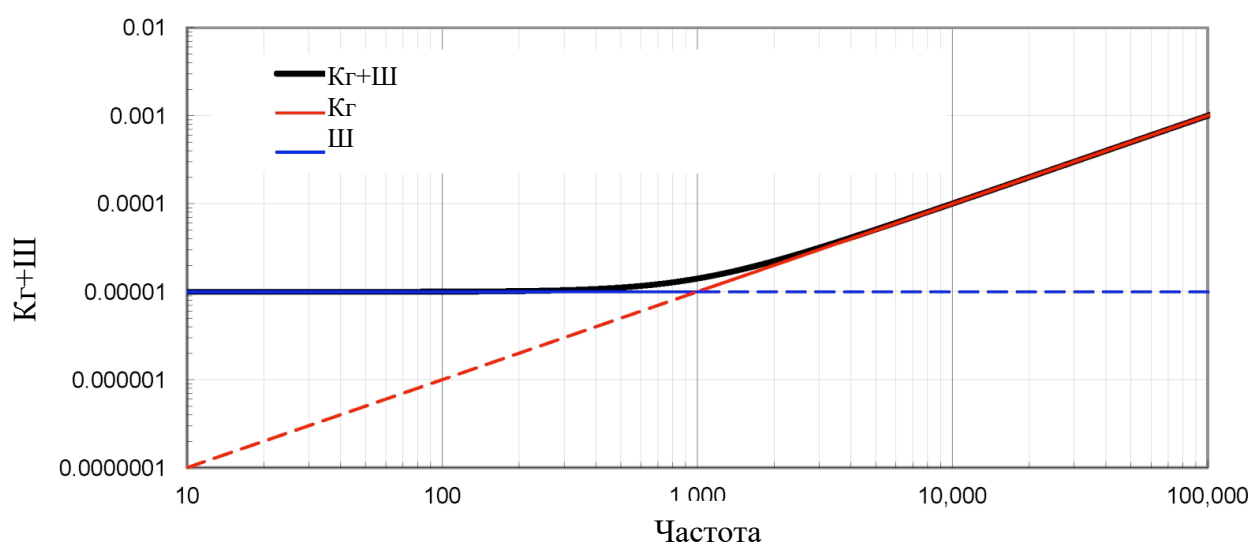


Рисунок 5 – КГ+Ш среднеквадратичная сумма Ш и КГ

На рисунке 5 также показано, что КГ+Ш состоит из КГ (красная линия) и шума (синяя линия). Среднеквадратическая сумма обеих линий КГ+Ш, показана черной линией.

График зависимости искажений от частоты для усилителя получается путем использования синусоидального сигнала с фиксированной амплитудой при изменении его частоты. Выходной сигнал с усилителя поступает на измеритель нелинейных искажений, который измеряет КГ+Ш для каждой частоты.

На рисунке 6 результаты этого измерения. В этом примере был использован усилитель ОРА1652 с коэффициентом усиления 1, с нагрузкой 2 кОм. Пунктирная полоса указывает, с какого момента появляются

значительные гармонические искажения. В данном случае полоса пропускания полосового фильтра установлена в пределе до 80 кГц, базовая частота сигнала равна 10 кГц. Это позволяет измерять напряжение восьми гармоник. Кроме того, шум также измеряется в пределе частот до 80 кГц.

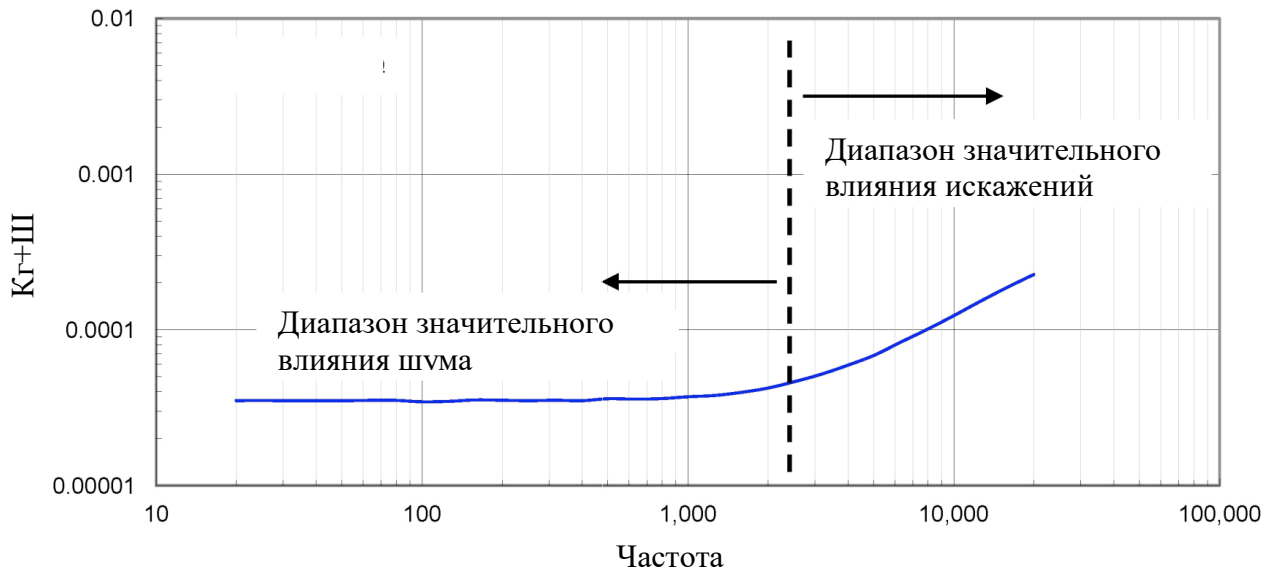


Рисунок 6 – Значения $K_{г+Ш}$ в диапазоне от 20 до 20 кГц

Область значительного влияния шума.

Обычно эта область имеет самые низкие значения $K_{г+Ш}$. Это связано с тем, что в спектральном содержании, полученным измерителем нелинейных искажений, преобладает шумовое напряжение усилителя $V_{шум}$, в отличие от его гармоник, V_m . Без шума кривая на рисунке будет продолжать увеличиваться с наклоном плюс 20 дБ за декаду на низких частотах (см. рисунок 5).

Если усилитель имеет более низкое значение $K_{г}$ по сравнению с шумом, его плотность шума позволяет оценить $K_{г+Ш}$. В примере плотность напряжения шумов ОРА1652 на частоте 1 кГц составляет 4,5 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Если ширина полосы пропускания составляет 80 кГц, то напряжение шума можно выразить как:

$$V_{шум} = E_0 \cdot \sqrt{B}, \quad (9)$$

где $E_0=4,5 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$;

B – полоса пропускания цепи, $B = 80 \text{ кГц}$.

Получаем, что значение напряжение шума равно 1,27 мкВ.

Эта операция даст тот же результат, что и расчет площади области под кривой плотности шума. Это аппроксимация, поскольку она не учитывает область мерцания шума. Предполагая фиксированную синусоидальную амплитуду волны 3 В скз, общий интегральный шум Ш(%) будет равен:

$$\text{Ш}(\%) = \frac{V_{\text{шум}}}{V_1} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

где $V_1=3 \text{ В}$, тогда

$$\text{Ш}(\%) = \frac{1,27 \text{ мкВ}}{3 \text{ В}} \cdot 100 \% = 0,000042 \%$$

Значение КГ+Ш при низких частотах составляет 0,000045 %. Этот расчет демонстрирует тот факт, что при значении частоты 1 кГц в характеристике КГ+Ш преобладают шумы усилителя, а не гармонические искажения, добавляемые усилителем.

Также важно учитывать, что напряжение шума изменяется в зависимости от сопротивления источника $R_{\text{и}}$ подключенного к положительному входу усилителя. На рисунке 7 представлены результаты измерения КГ+Ш для различных сопротивлений источника, используемых на биполярном усилителе (ОРА1602). Сопротивление создает звуковой шум. Это добавляет напряжение шума усилителя и приводит к более высоким значениям КГ+Ш.

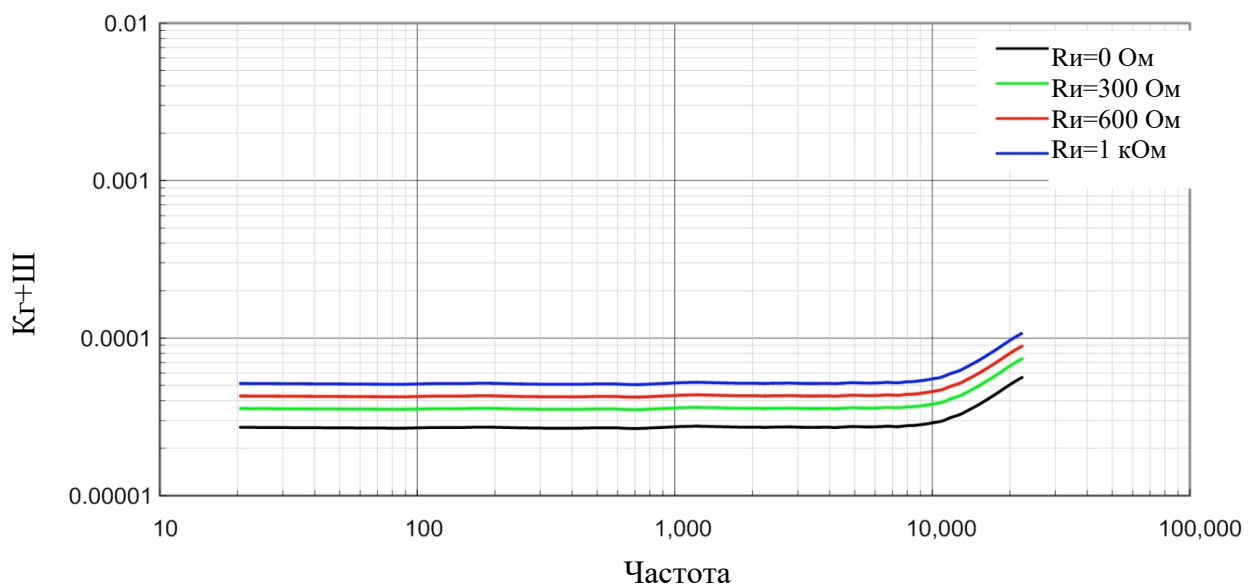


Рисунок 7 – Влияние на КГ+Ш сопротивления источника

Кроме того, усилители, использующие биполярную дифференциальную входную пару, имеют значительное значение тока, который преобразуется в напряжение шума из-за сопротивления источника. Текущий шум является существенным вкладом в общее напряжение шума усилителя. Усилители входного сигнала на полевых транзисторах имеют значительное преимущество в этом отношении по сравнению с усилителями на биполярных транзисторах из-за чрезвычайно малотоковых составляющих шума. Дополнительный шум можно рассчитать как:

$$E_0^2 = e_N^2 + (i_N \cdot R_{и})^2 + 4KTR_{и} , \quad (11)$$

где E_0 – полная плотность напряжения шумов;

e_N и i_N – плотность напряжения и тока шумов соответственно;

K – постоянная Больцмана;

T – температура в Кельвинах.

$4KTR_{и}$ представляет собой плотность напряжения теплового шума, создаваемую сопротивлением источника.

Различия в КГ+Ш на рисунке 7 обусловлены выражениями $4KTR_{и}$ и $i_N R_{и}$. В примере, на частоте 1 кГц, плотность напряжения шумов ОРА1602 составляет 2,5 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$, тогда как плотность тока составляет 1,8 пА/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Температура $T=300$ К, а сопротивление источника $R_{и}=1$ кОм. Расчет общего интегрированного шума по формуле (11):

$$E_0 = \sqrt{(2,5 \frac{\text{нВ}}{\sqrt{\text{Гц}}})^2 + (1,8 \frac{\text{пА}}{\sqrt{\text{Гц}}})^2 + (4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 300\text{К} \cdot 1\text{кОм})} = 5,1 \frac{\text{нВ}}{\sqrt{\text{Гц}}}$$

Подставив полученное значение E_0 в формулы (9) и (10) получаем, что:

$$V_{noise} = 5,1 \frac{\text{нВ}}{\sqrt{\text{Гц}}} \cdot \sqrt{80 \text{ кГц}} = 1,44 \text{ мкВ},$$

$$N(\%) = \frac{1,44 \text{ мкВ}}{3 \text{ В}} \cdot 100 \% = 0,000048 \%$$

Получаем, что разница шума между черной линией и синей линией составляет 0,000006 %. Небольшая разница между измерением и вычислением состоит в том, что вычисление является оценкой.

Диапазон значительного влияния K_2

На более высоких частотах усилитель становится более нелинейным, а значение $K_{\Gamma+Ш}$ увеличивается на плюс 20 дБ за декаду. В этой области кривой преобладает K_{Γ} и иллюстрируется искажение коэффициента усиления.

Когда коэффициент усиления разомкнутого контура является большим, коррекция от отрицательной обратной связи лучше, чем когда коэффициент усиления разомкнутого контура мал. Поскольку коэффициент усиления разомкнутого контура уменьшается с увеличением частоты на минус 20 дБ/декаду, способность отрицательной обратной связи корректировать присущие нелинейности усилителя ухудшается с увеличением частоты. Таким образом, K_{Γ} увеличивается с увеличением частоты, потому что усилитель имеет меньший коэффициент усиления для исправления ошибок на входе. На рисунке 8 изображено изменение коэффициента усиления разомкнутого контура и K_{Γ} .

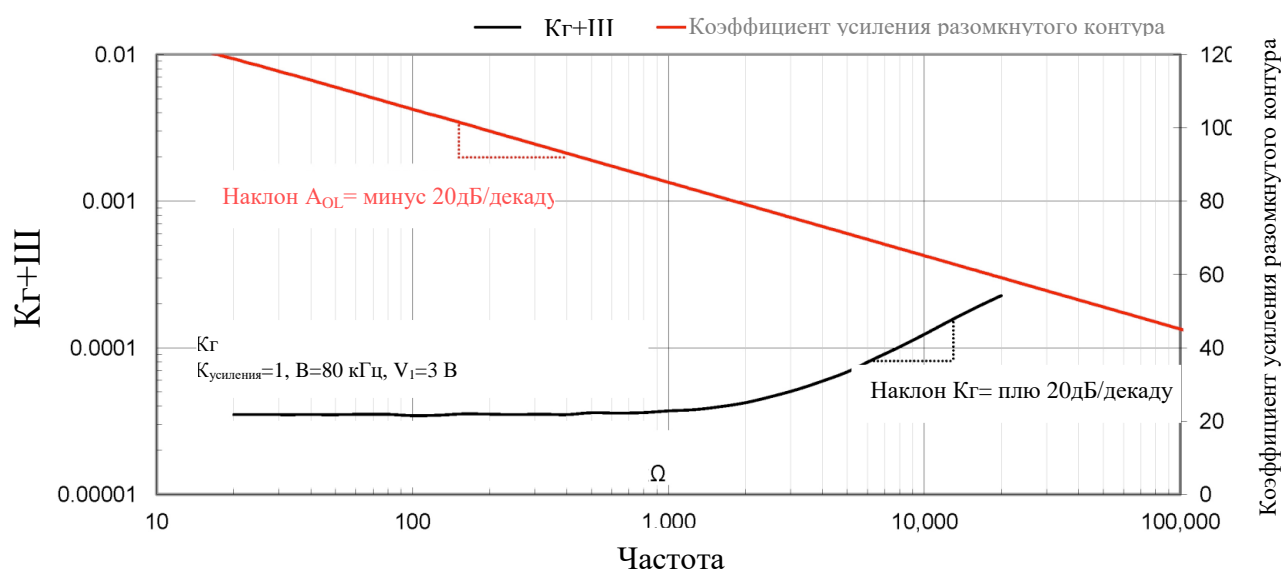


Рисунок 8 – Зависимость $K_{\Gamma+Ш}$ и коэффициента усиления разомкнутого контура от частоты

Интуитивно понятно, что, поскольку коэффициент усиления разомкнутого контура уменьшается на минус 20 дБ за декаду, искажение увеличивается на тот же коэффициент. Согласно классической теории обратной

связи, коэффициент усиления замкнутого контура для операционного усилителя:

$$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1+A_{OL}\beta}, \quad (12)$$

где A_{CL} – коэффициент усиления замкнутого контура;

A_{OL} – коэффициент усиления разомкнутого контура;

β – коэффициент обратной связи.

Коэффициент усиления - это произведение $A_{OL}\beta$. Когда коэффициент усиления равен одному, то коэффициент обратной связи тоже равен единице. То есть, все данные с выхода возвращаются к отрицательному входу усилителя, так что усиление контура является его коэффициентом усиления разомкнутого контура. Если усиление разомкнутого контура составляет 120 дБ, это дает меньшую погрешность на выходе, чем, если усиление разомкнутого контура составляет 100 дБ. Усилители с более высоким коэффициентом усиления разомкнутого контура и более широкой полосой пропускания имеют меньшее значение $K_{г}$.

На рисунке 9 показано, что когда к усилителю подается сигнал с напряжением 3 В, частотой 10 кГц, на графике $K_{г+Ш}$ расположена в зоне значительного влияния $K_{г}$. Частотный спектр, показанный на рисунке 9, является хорошим инструментом для проверки результатов $K_{г+Ш}$ и для наблюдения за тем, какие гармоники вносят наибольшие искажения. Значение $K_{г+Ш}$ при 10 кГц составляет 0,000126 %.

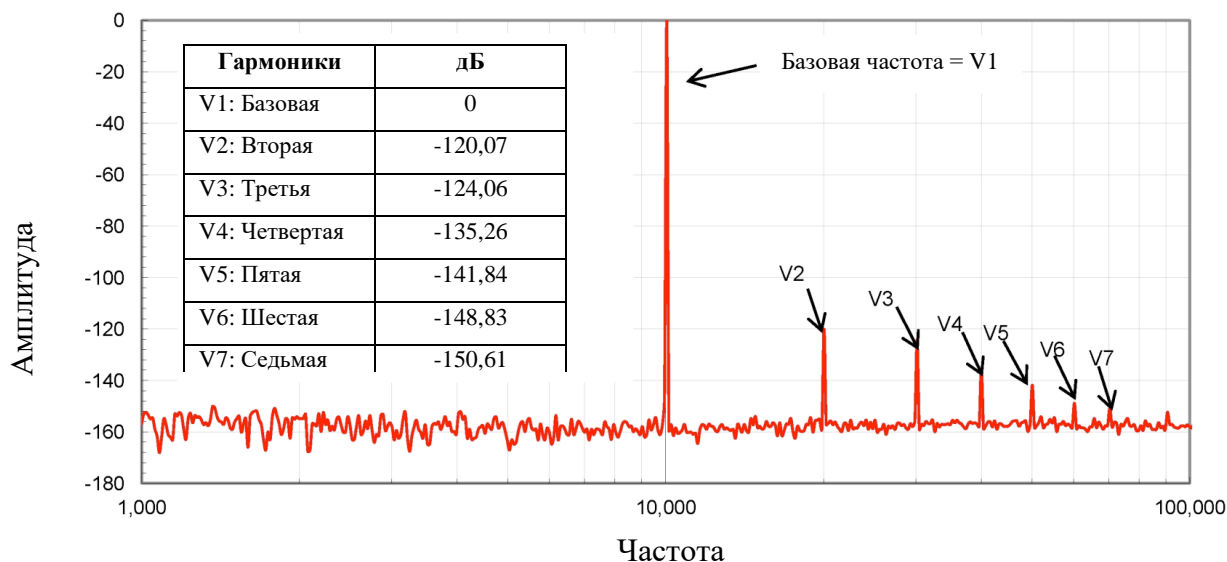


Рисунок 9 – Спектр сигнала частотой 10 кГц

Кг на рисунке 9 вычисляется путем суммирования высших гармоник и деления их суммы на первую гармонику. К примеру, расчет с использованием второй, третьей и четвертой гармоник.

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^4 V_n^2}{V_1^2}} \cdot 100\% = \sqrt{\frac{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2}{V_1^2}} \cdot 100\%$$

Амплитуда гармоник должна быть преобразована в среднеквадратическое значение напряжения:

$$V_1 = 10^{\frac{0 \text{ дБ}}{20 \text{ дБ}}} = 1 \text{ В},$$

$$V_2 = 10^{\frac{-120,07 \text{ дБ}}{20 \text{ дБ}}} = 9,921 \cdot 10^{-7} \text{ В},$$

$$V_3 = 10^{\frac{-124,06 \text{ дБ}}{20 \text{ дБ}}} = 6,267 \cdot 10^{-7} \text{ В},$$

$$V_4 = 10^{\frac{-135,26 \text{ дБ}}{20 \text{ дБ}}} = 1,725 \cdot 10^{-7} \text{ В}.$$

Таким образом, получаем, что:

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\frac{(9,921 \cdot 10^{-7})^2 + (6,267 \cdot 10^{-7})^2 + (1,725 \cdot 10^{-7})^2}{(1)^2}} \cdot 100\% = 0,000118\%$$

Но у нас еще имеется шум, величина которого $V_{\text{шум}} = 0,42 \text{ мкВ}$, тогда $K_{\Gamma} + \text{Ш}$:

$$K_{\Gamma} + \text{Ш} = \sqrt{\frac{(9,921 \cdot 10^{-7})^2 + (6,267 \cdot 10^{-7})^2 + (1,725 \cdot 10^{-7})^2 + (0,42 \cdot 10^{-6})^2}{(1)^2}} \cdot 100 \%,$$

$$K_{\Gamma} + \text{Ш} = 0,000126 \%$$

Как видно из расчета $K_{\Gamma} + \text{Ш}$, при частоте сигнала 10 кГц, шум вносит дополнительные искажения даже в зоне значительного влияния K_{Γ} .

Последний тип искажений, который будет обсуждаться, является искажением, вызванным нарастанием напряжения, которое происходит на более высоких частотах.

Увеличение частоты до значений выше 100 кГц приводит к значительному увеличению искажений. Это легко наблюдать с помощью осциллографа. На рисунке 10 представлено максимальное выходное напряжение в зависимости от частоты (также известное как полоса пропускания полной мощности) для ОРА1652. Видно, что значение напряжения сигнала с установленным напряжением 3 В начинает уменьшаться на частоте 375 кГц, это большая деградация линейности. За пределами 375 кГц выходная синусоидальная волна начинает выглядеть как треугольник и становится ослабленной, потому что отрицательная обратная связь усилителя не достаточно быстра, чтобы поддерживать работу с входом. Таким образом, выход не полностью колеблется.

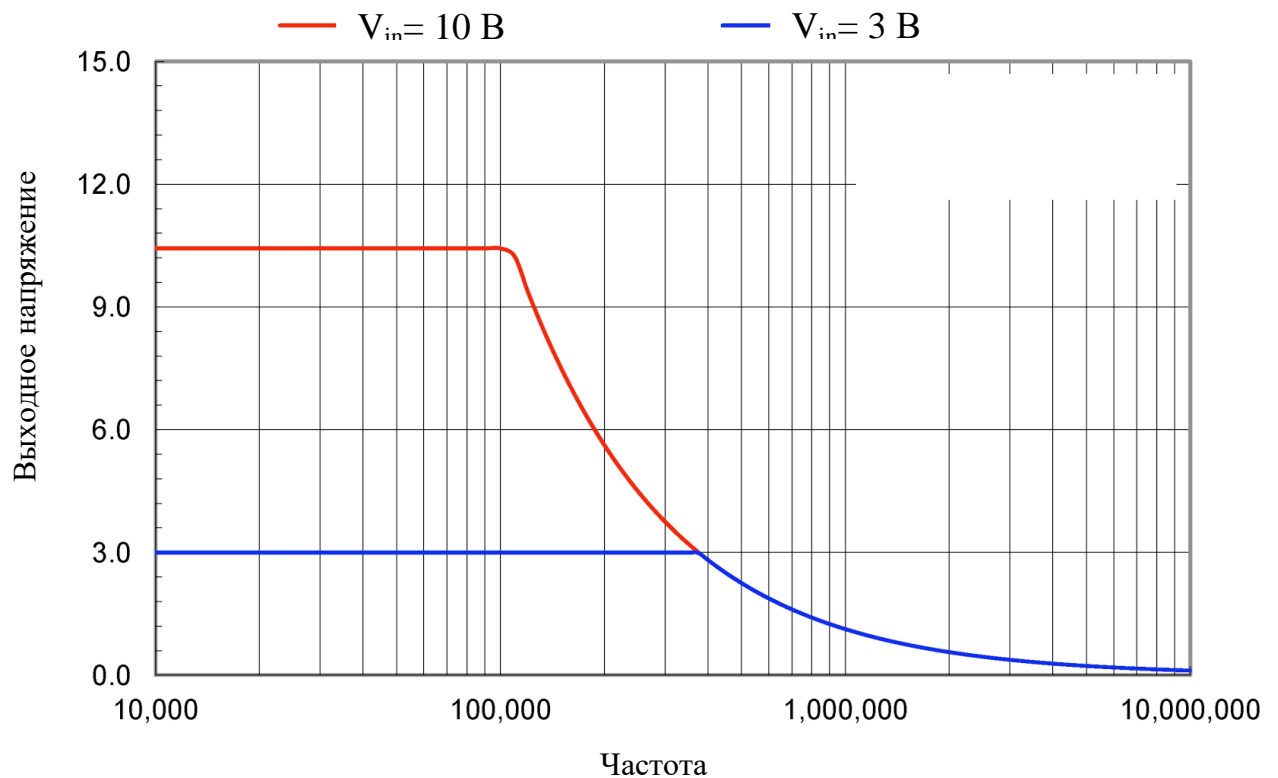


Рисунок 10 – Зависимость выходного напряжения усилителя от частоты

Легко увидеть, что зависимость между частотой и амплитудой на выходе усилителя обусловлена скоростью спада. Скорость спада усилителя определяется как максимальная скорость изменения напряжения на его выходе. То есть dV_{OUT}/dt , и это фиксированная величина. Следующие выражения показывают зависимость между частотой и амплитудой сигнала.

Если выходной сигнал задается:

$$V_{out} = V_p \sin(\omega t),$$

где V_p – пиковое напряжение, В,

то скорость спада определяется как:

$$SR = \frac{dV_{out}}{dt} = V_p \omega \cos(\omega t),$$

после дифференцирования получаем:

$$SR = \omega \cdot V_p \cos(\omega t),$$

где $\omega = 2\pi f$.

Максимальное значение будет получено при значении косинуса равного 1. Тогда:

$$SR = 2\pi \cdot f \cdot V_p. \quad (13)$$

Выражение (13) показывает, что, поскольку скорость спада усилителя постоянна, с увеличением частоты уменьшается пиковое напряжение, чтобы уравнение оставалось постоянным.

Усилитель ОРА1652 имеет скорость спада 10 В/мкс. Таким образом, если применить среднеквадратическое значение напряжения равное 3 В, максимальная частота равна 375 кГц. На рисунках 11-12 показан экран осциллографа на которой синусоидальная волна напряжением 3 В среднеквадратичного значения с частотой 100 кГц (11) и волна с частотой 1 МГц (12). Показан сигнал на входе и на выходе усилителя. Искажение четко видно, когда частота составляет 1 МГц. Синусоидальный сигнал больше похож на треугольный, и он ослаблен. При фиксированной скорости спада 10 В/мкс и частоте 1 МГц нарушает уравнение 13. Таким образом, среднеквадратичное значение напряжения сигнала уменьшается с 3 В до 2 В. [4]

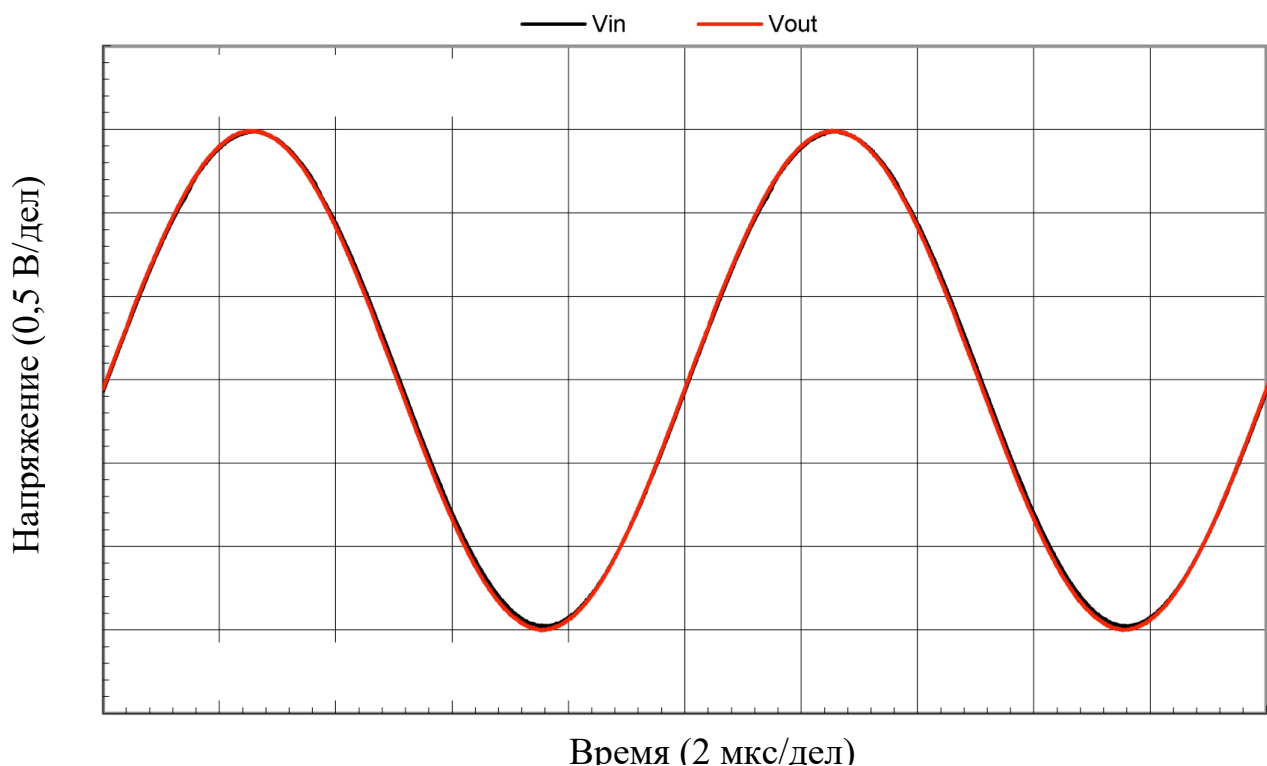


Рисунок 11 – Сигнал частотой 100 кГц на входе и выходе усилителя

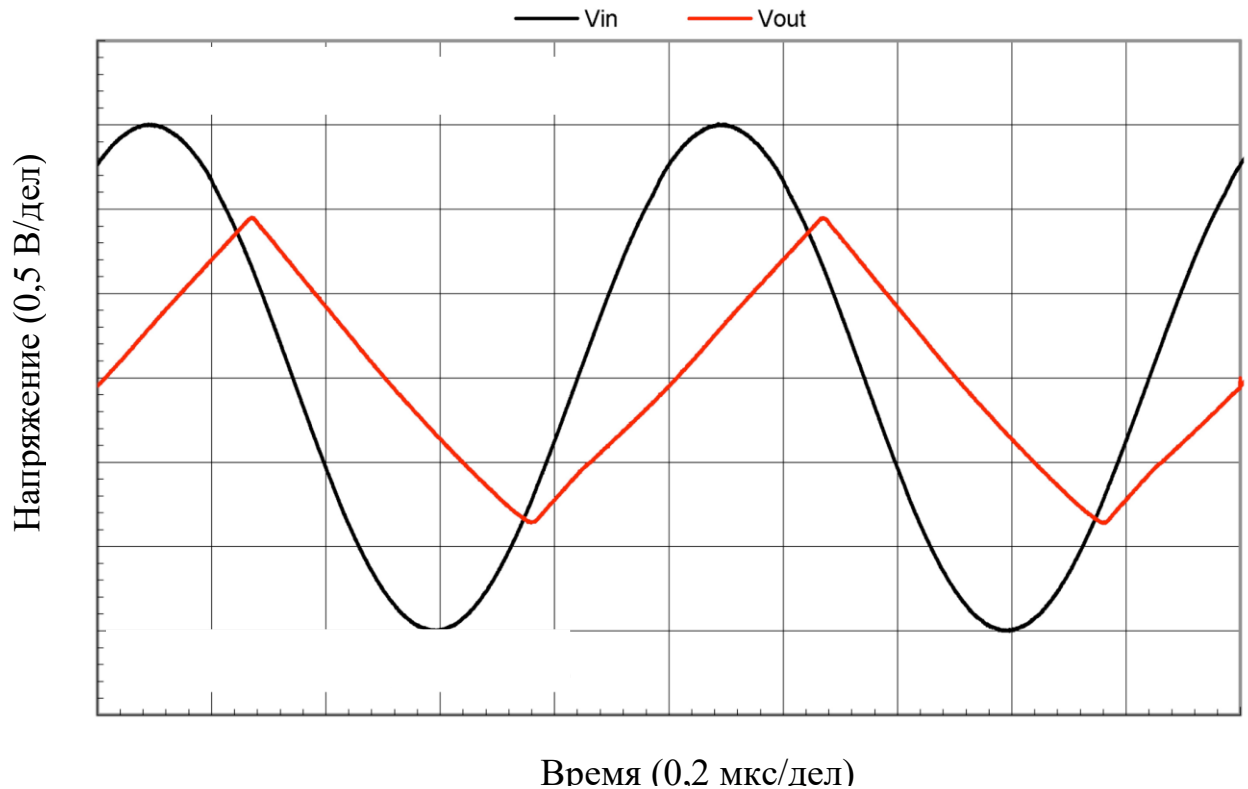


Рисунок 12 – Сигнал частотой 1 МГц на входе и выходе усилителя

Вот некоторые типовые значения коэффициента гармоник:

- 0 % — форма сигнала представляет собой идеальную синусоиду;
- 3 % — форма сигнала отлична от синусоидальной, но искажения незаметны на глаз;
- 5 % — отклонение формы сигнала от синусоидальной заметно на глаз по осциллограмме;
- 10 % — стандартный уровень искажений, при котором считают реальную мощность (СКЗ), заметен на слух;
- 12 % — идеально симметричный треугольный сигнал;
- 22 % — «типичный» сигнал трапецеидальной или ступенчатой формы;
- 48 % — идеально симметричный прямоугольный сигнал (меандр);
- 80 % — идеальный пилообразный сигнал. [5]

1.5 Исследование нелинейных искажений в усилителях

Ученый Роберт Пиз (Robert A. Pease) проводил исследование нелинейных искажений усилителя LM4562. Вот что он пишет в своей работе:

«Многие операционные усилители очень линейны - как инвертор с коэффициентом усиления, они часто имеют линейность в диапазоне от 0,0005 % до 0,00005 %. Однако метод исследования нелинейных искажений усилителя не широко известен.

Можно использовать операционные усилители для точных приборов, даже если они обладают нелинейными искажениями меньше, чем 0,0005 %. Большинство людей не могут слышать искажения ниже 0,0001 %. Однако для точной измерительной аппаратуры, или для аудиоаппаратуры высокой точности, обычно рекомендуется выбирать операционные усилители с малым значением нелинейных искажений. Вопреки многим мнениям, КМОП-усилители с сток нагруженным выходом необязательно имеют хуже нелинейные искажения по сравнению со старыми биполярными транзисторными усилителями.

Нелинейные искажения часто определяются в дБ ниже уровня сигнала (например, минус 110 дБ), или в % (например, 0,0003%). Также нелинейные искажения могут выражаться в частях на миллион (3 ppm или 0,3 ppm), по сравнению с выходным сигналом. 1 ppm = 0,0001 % Кг.

Нелинейные искажения часто измеряются на низких частотах, поскольку там легче проводить исследование. Нелинейные искажения могут быть измерены для инвертора или для усилителя. В теории можно было бы вычесть значение напряжения входа из значения напряжения выхода и представить отклонения как функцию выходного напряжения V_{OUT} . Однако сделать это практически невозможно при максимальном разрешении. Таким образом, метод исследования в режиме реального времени невозможен. Результаты исследования можно увидеть только через несколько секунд. Конечно, измеритель нелинейных искажений, такой как звуковая система двух

каскадов SYS-2522 может использоваться для прямого считывания искажений, но даже эта процедура имеет ограничения и не позволяет исследовать искажения ниже 0,0003 %.

На рисунке 13, представлена классическая испытательная схема, которая используется более 40 лет. R_{IN} и R_F используются для установки входного напряжения (обычно 20 В амплитудного значения), чтобы на выходе напряжение было 20 В. Источник сигнала должен иметь регулировку смещения, которую пользователь настраивается таким образом, чтобы выходное напряжение изменялось в диапазоне от минус 10 В до плюс 10 В без смещения. Таким образом, искажения напряжения на выходе операционного усилителя эффективно обрезается. Между тем R_2 и R_3 используются для увеличения напряжения ошибки (V_ϵ) в 1000 раз, что обусловлено отношением R_2 к R_3 . Поэтому, если коэффициент усиления составляет 1 миллион, а его напряжение ошибки составляет 20 мкВ амплитудного значения, напряжение на вертикальном входе осциллографа будет 20 мВ амплитудного значения. Хороший операционный усилитель с коэффициентом усиления в 1 миллион может легко выполнить оба требования к усилению. Такая схема позволяет избегать использования предусилителей с малыми шумами, которые обязательно добавят дополнительные искажения.

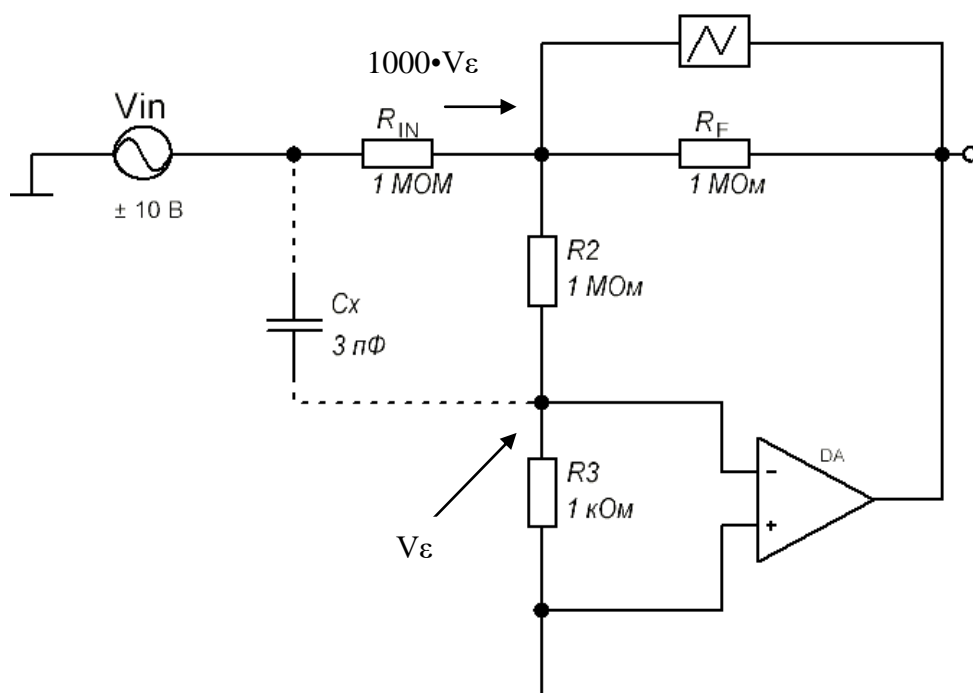


Рисунок 13 – Схема для исследования нелинейных искажений усилителя LM4562

В теории можно измерить погрешность измерения V_{ϵ} со значением 1000 В с помощью любого вида измерителя или осциллографа. Но чтобы увидеть линейные и нелинейные компоненты, лучше всего использовать осциллограф в режиме X-Y (режим вычитания). Тогда любые бугры или кривые будут коррелировать с соответствующим уровнем колебаний на выходе. Наклоны, бугры и кривые могут быть измерены, несмотря на шум, который больше, чем эти сигналы.

LM4562 – хороший быстрый усилитель с частотой до 54 МГц. Но на частоте 1 кГц с напряжением 20 В амплитудного выходного сигнала погрешность напряжения (V_{ϵ}) будет достигать ± 118 мкВ. Значение сигнала имеет получается 236 мВ амплитудного значения. Но есть проблема в возможности различения сигнала значением 1 мкВ на осциллографе.

Решение состоит в подключении небольшой витой пары, которую можно использовать в качестве регулируемого конденсатора C_x , как показано на рисунке 13. Используется провод с тефлоновой изоляцией. Когда подключается (или отключается) витая пара - для уменьшения погрешности

усилителя - сигнал становится всего лишь несколько мВ п-п, и возможно различить значение погрешности эквивалентное 1 мкВ даже при наличии некоторого шума. Значение нелинейных искажений на этом усилителе находится ниже 0,000008 %, в отношении ко входу. Это примерно минус 159 дБ, по отношению к 7-вольтовому среднеквадратичному сигналу.

Эта схема, использующая сопротивления с номиналами 1 МОм, 1 МОм, 1 кОм и 1 МОм создает малый уровень шумов, несмотря на то, что шумы на резисторе 1 кОм значительно больше шумов усилителя LM4562. Чтобы получить лучшее разрешение искажений, можно использовать другие резисторы, с меньшим значением сопротивления вместо резисторов со значением сопротивления 1 МОм. Резисторы с номиналом 1 МОм были заменены на резисторы с номиналом в 20 кОм, а резистор с номиналом 1 кОм заменен на резистор с номиналом 20 Ом. Также конденсатор с номиналом 3 пФ был заменен на конденсатор с номиналом 150 пФ. В результате были обнаружены искажения ниже 0,000008 %. На частоте 2 кГц были обнаружены нелинейные искажения, вносимые второй гармоникой со значением в минус 159 дБ.

Некоторые из ранних тестов на LM4562 показали, что усилитель может получить значение нелинейных искажений до 0,00003 %. Это значение получилось потому, что при входном напряжении более 3 В скз, нелинейные искажения начали уменьшаться из-за несовершенного (нелинейного) коэффициента подавления синфазного сигнала. Значение было получено тогда, когда усилитель применялся как повторитель (рисунок 14). Если вы используете усилитель в качестве повторителя, то нелинейные искажения можно уменьшить. Используя схему, приведенную на рисунке 14, можно с помощью осциллографа разглядеть и выходной сигнал, и вносимые усилителем шумы и искажения.

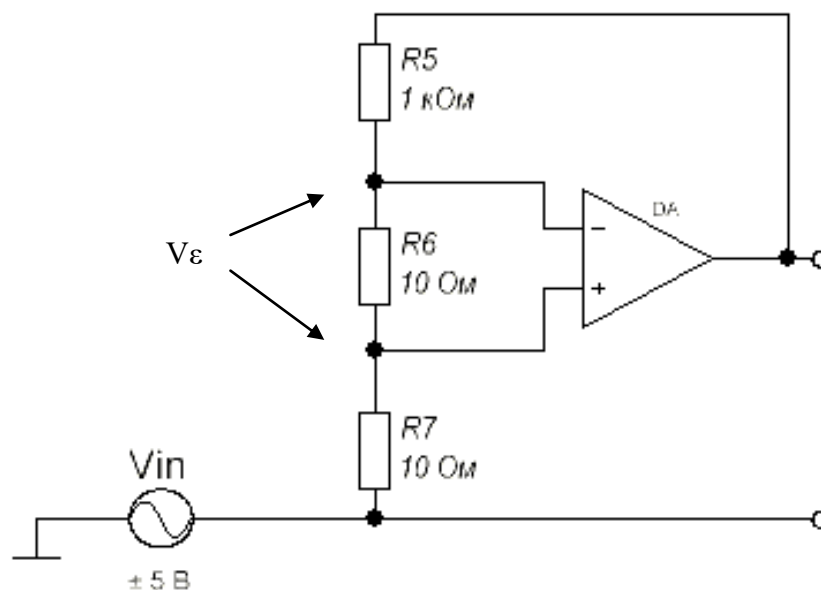


Рисунок 14 – Схема с использованием усилителя в качестве повторителя»

Из работы Роберта Пиза можно сделать выводы, что для исследования усилителей с низкими значениями нелинейных искажений, требуется использовать схемы, которые будут усиливать выходной сигнал. Это требуется для уменьшения затрат на исследование, поскольку без должного усиления требуется пользоваться дорогими анализаторами спектра или измерителями нелинейных искажений. При достаточном усилении сигнала можно использовать осциллографы в режиме вычитания и сравнивать сигнал, поступающий на вход схемы с сигналом на ее выходе. Таким образом, можно исследовать искажения и шумы, вносимые усилителем. [6]

2 Методы исследования характеристик генератора “ГС-50”

2.1 Метод исследования погрешности установки частоты

Генератор “ГС-50” создает синусоидальные сигналы в диапазоне частот от 10 Гц до 100 кГц. Частота сигнала переключается с помощью четырех ручек: три с фиксированными позициями и одна с плавной регулировкой частоты. Ручка управления десятками устанавливает значение в диапазоне от 0 до 10. Ручка управления единицами – в диапазоне от 0 до 9. Третья ручка является множителем, изменяющимся в диапазоне от 1 до 10^3 . Четвертая выполняет плавное увеличение или уменьшение частоты относительно установленной с помощью остальных ручек. [7]

Для контроля установки частоты применяются осциллографы и частотомеры. Данный вид измерения является прямым измерением методом непосредственной оценки. Измерения абсолютные, однократные, метрологические, равноточные, статические. Блок схема измерения представлена на рисунке 15.

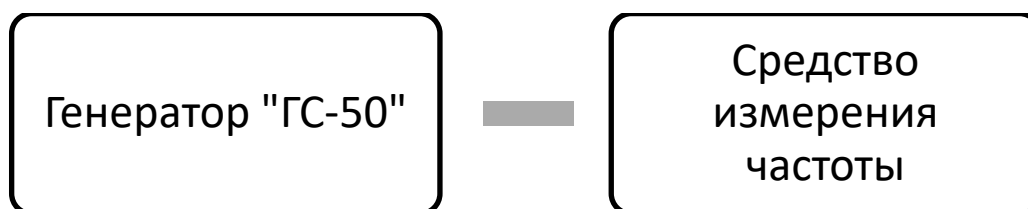


Рисунок 15 – Структурная схема измерения погрешности установки частоты

Осциллографы могут проводить измерения в автоматическом режиме и с помощью курсоров. В автоматическом режиме осциллограф отображает измеренную частоту f или период T в специальном месте на экране осциллографа. Измерение с помощью курсоров выполняется следующим образом: оператор устанавливает один курсор на одной из точек синусоиды на экране осциллографа, второй курсор устанавливается ровно через период, на той же самой точке синусоиды. Этот метод позволяет также производить измерения, как частоты сигнала, так и его периода. Соотношение частоты и периода связано следующей формулой: [1]

$$f = \frac{1}{T}. \quad (14)$$

Контроль погрешности установки частоты частотомером отличается от контроля осциллографом тем, что не наблюдается форма сигнала. Но также как и у осциллографа можно контролировать либо частоту сигнала, либо его период.

В данной методике результат измерения частоты осциллографом или частотомером принимается, как действительное значение $f_{\text{действ}}$, и его сравнивают с установленной на генераторе $f_{\text{уст}}$. Разность этих показателей и является погрешностью установки частоты

$$\Delta = f_{\text{действ}} - f_{\text{уст}}. \quad (15)$$

В качестве контролируемых точек используются следующие сочетания (таблица 1) [7]:

Таблица 1 – Положения ручек генератора “ГС-50”, при которых измеряется погрешность установки частоты.

Десятки	Единицы	Множитель
1	0	1
6	0	1
10	0	1
1	0	10
6	0	10
10	0	10
1	0	10 ²
1	1	10 ²
1	2	10 ²
1	3	10 ²
1	4	10 ²
1	5	10 ²
1	6	10 ²
1	7	10 ²
2	0	10 ²
3	0	10 ²
4	0	10 ²
5	0	10 ²
6	0	10 ²
7	0	10 ²
8	0	10 ²
9	0	10 ²
10	0	10 ²
1	0	10 ³

Продолжение таблицы 1

Десятки	Единицы	Множитель
6	0	10^3
10	0	10^3

2.2 Метод исследования неравномерности выходного напряжения

Генератор “ГС-50” может создавать сигнал с выходным напряжением до 10 В среднеквадратичного значения. Уровень напряжения выходного сигнала регулируется с помощью ручки регулировки выходного сигнала.

На генераторе устанавливается частота 1 кГц и выходное напряжение 0,01; 0,1; 1; 10 В. Далее, изменяя частоту, контролируется уровень выходного напряжения.

Данный вид измерения является прямым измерением методом непосредственной оценки. Измерения абсолютные, однократные, метрологические, равноточные, статические. Блок схема исследования неравномерности установки частоты представлена на рисунке 16.

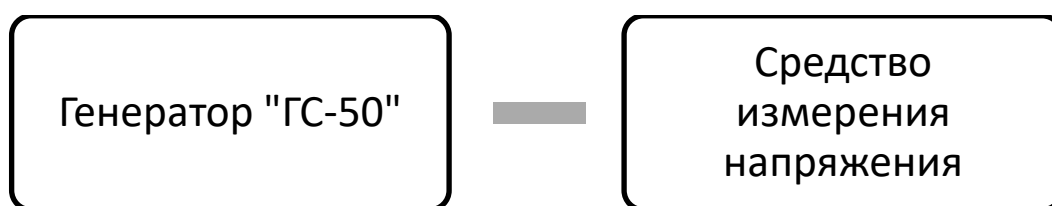


Рисунок 16 – Структурная схема измерения нестабильности выходного напряжения

Для контроля уровня выходного сигнала используются осциллографы и вольтметры. Вольтметры производят измерение напряжения выходного сигнала, отображая среднеквадратичное значение напряжения. Осциллографы позволяют помимо измерения выходного напряжения контролировать форму сигнала. Осциллографы могут измерять и среднеквадратичное значение напряжения, и его амплитуду. Генератор “ГС-50” не имеет индикатора, отображающего значение выходного напряжения, поэтому требуется использовать прибор для измерения выходного напряжения, результат измерения которого принимается за действительное значение. [7]

2.3 Метод исследования коэффициента гармоник

Коэффициент гармоник измеряется с помощью измерителей нелинейных искажений, осциллографов и анализаторов спектра. Данный вид измерения является косвенным измерением. Измерения являются относительными, однократными, метрологическими, равноточными, статическими. Блок схема проведения измерений приведена на рисунке 17.

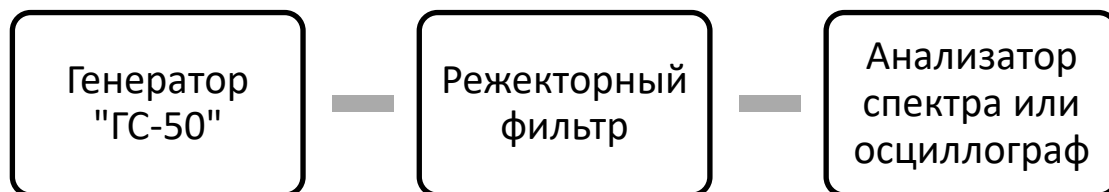


Рисунок 17 – Структурная схема измерения коэффициента гармоник генератора “ГС-50”

Измеритель нелинейных искажений производит измерение и в качестве результата отображает значение коэффициента гармоник. Анализатор спектра производит измерение амплитуды сигнала на установленной частоте. Для измерения с помощью анализатора требуется использовать режекторный фильтр для ослабления сигнала на определенной частоте. Измерение амплитуд гармоник производится на частотах соответствующих гармоникам неослабленного выходного сигнала. Затем подключается фильтр, частота подавления соответствует частоте выходного сигнала, амплитуда сигнала максимально подавляется. Проводится измерение амплитуды сигнала на выходе фильтра на частотах соответствующих гармоникам выходного сигнала. Отношение амплитуды сигнала на выходе фильтра к амплитуде сигнала на входе фильтра является коэффициентом ослабления K_{oc} . Далее производится измерение амплитуды гармоник сигнала на выходе фильтра $A_{г}$. Для определения действительного значения амплитуды A требуется полученное значение амплитуды разделить на коэффициент ослабления сигнала [7]

$$A = \frac{A_{г}}{K_{oc}} . \quad (16)$$

Далее высчитывается значение коэффициента гармоник по формуле:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + \dots + A_n^2}}{A_1} \cdot 100 \%, \quad (17)$$

где A_n – амплитуда n-ой гармоники.

Измерение коэффициента гармоник с помощью осциллографа возможно лишь в том случае, когда в осциллографе имеется быстрое преобразование Фурье (БПФ). Быстрое преобразование Фурье отображает спектр полученного сигнала. С помощью горизонтальных курсоров осциллографа производится измерение амплитуды гармоник, а с помощью вертикальных курсоров контролируется частота гармоник. В целом данный метод аналогичен методу измерения анализатором спектра, с дополнительной возможностью контролировать форму исследуемого сигнала. [1]

3 Результаты исследования характеристик генератора “ГС-50”

3.1 Обработка результатов исследования погрешности установки частоты

Исследование проводилось с применением частотомера ЧЗ-57 (федеральный информационный фонд по обеспечения единства измерений СИ номер 6081-77) и осциллографа АСК – 2041(федеральный информационный фонд по обеспечения единства измерений СИ номер 41498-09).

Диапазон измерения частоты сигнала частотомера ЧЗ-57 от 0,1 Гц до 100 МГц. Время счёта изменяется от 1 до 10^4 мс. Пределы относительной погрешности измерений частоты определяется по формуле:

$$\pm \left(\delta_0 + \frac{1}{f_{изм} \cdot t_{сч}} \right) \%, \quad (18)$$

где $\delta_0 = \pm 5 \cdot 10^{-7} \%$ – аддитивная погрешность по частоте;

$f_{изм}$ – измеряемая частота, Гц;

$t_{сч}$ – время счета, с.

Диапазон измеряемых периодов сигнала от 1 мкс до 10^4 с. Число измеряемых периодов от 10 до 10^4 . Период тактовой частоты от 10^{-7} до 10^{-3} с. Пределы относительной погрешности измерения периода определяется по формуле:

$$\pm \left(\delta_0 + \frac{T_{такт}}{n \cdot T_{изм}} \right) \%, \quad (19)$$

где n – число усредняемых периодов;

$T_{такт}$ – период тактовой частоты, с;

$T_{изм}$ – измеряемый период, с. [8]

Осциллограф АСК-2041 имеет коэффициент развертки $K_{разв}$ от 5 нс до 50 с и шаг коэффициента ($1 \div 2,5 \div 5$). При этом погрешность измерения периода определяется по формуле:

$$\Delta t = \pm (0,02 \cdot t_x + 0,03 \cdot K_{разв})с, \quad (20)$$

где t_x – измеренное значение периода, с. [9]

Результаты измерения частоты частотомером ЧЗ-57 представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерения частоты генератора “ГС-50” частотомером ЧЗ-57

Установленная частота, Гц	Измеренное значение частоты, кГц	Пределы погрешности измерения частоты, кГц	Измеренное значение периода, мс	Пределы погрешности измерения периода, мс
10x1	-	-	100,2919	±0,01
60x1	0,0598	±0,0013	-	-
100x1	0,0998	±0,0015	-	-
10x10	0,1005	±0,0015	-	-
60x10	0,6022	±0,004	-	-
100x10	1,0047	±0,006	-	-
10x10 ²	1,0037	±0,006	-	-
11x10 ²	1,104	±0,0065	-	-
12x10 ²	1,2051	±0,007	-	-
13x10 ²	1,3051	±0,0075	-	-
14x10 ²	1,4066	±0,008	-	-
15x10 ²	1,504	±0,0085	-	-
16x10 ²	1,6053	±0,009	-	-
17x10 ²	1,7041	±0,0095	-	-
20x10 ²	2,006	±0,011	-	-
30x10 ²	3,023	±0,016	-	-
40x10 ²	4,025	±0,021	-	-
50x10 ²	5,005	±0,026	-	-
60x10 ²	6,016	±0,031	-	-
70x10 ²	6,999	±0,036	-	-
80x10 ²	8,003	±0,041	-	-
90x10 ²	9,017	±0,046	-	-
100x10 ²	10,036	±0,051	-	-
10x10 ³	10,018	±0,051	-	-
60x10 ³	60,04	±0,301	-	-
100x10 ³	100,16	±0,501	-	-

В отличие от частотомера осциллограф АСК-2041 позволяет одновременно измерять и частоту, и период сигнала. Результаты измерения осциллографом указаны в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты измерения частоты генератора осциллографом АСК-2041

Установленная частота, Гц	Измеренное значение частоты, Гц	Пределы погрешности измерения частоты, Гц	Измеренное значение периода, мс	Пределы погрешности измерения периода, мс
10x1	9,975	±0,105263	100,3	±9,5
60x1	59,88	±0,3	16,7	±3,333333
100x1	100	±0,3125	10	±3,2
10x10	100,3	±0,3125	9,975	±3,2
60x10	600,6	±1,276596	1,665	±0,783333
100x10	1000	±3,125	1	±0,32
10x10 ²	1005	±3,142857	0,995	±0,318182
11x10 ²	1099	±3,157895	0,91	±0,316667
12x10 ²	1205	±3,170732	0,83	±0,315385
13x10 ²	1307	±3,181818	0,765	±0,314286
14x10 ²	1399	±3,191489	0,715	±0,313333
15x10 ²	1504	±6,153846	0,665	±0,1625
16x10 ²	1600	±6,181818	0,625	±0,161765
17x10 ²	1709	±6,25	0,585	±0,16
20x10 ²	2000	±6,382979	0,5	±0,156667
30x10 ²	3030	±28,57143	0,33	±0,035
40x10 ²	4000	±29,41176	0,25	±0,034
50x10 ²	5000	±30	0,2	±0,033333
60x10 ²	6015	±30,43478	0,1663	±0,032857
70x10 ²	6957	±30,76923	0,1438	±0,0325
80x10 ²	8000	±58,06452	0,125	±0,017222
90x10 ²	8989	±58,82353	0,1113	±0,017
100x10 ²	10000	±31,42857	0,1	±0,0316667
10x10 ³	10000	±31,42857	0,1	±0,0316667
60x10 ³	60060	±127,6596	0,01665	±0,007833
100x10 ³	100000	±312,5	0,01	±0,0032

Пределы погрешность установки частоты генератора “ГС-50” составляют ± (1÷1,5) %. В таблице 4 представлены границы допустимых значений частоты выходного сигнала. [7]

Таблица 4 – Допустимые границы установленной на генераторе частоты

Нижняя граница допустимого значения, Гц	Установленное значение, Гц	Верхняя граница допустимого значения, Гц
9,9	10	10,1
59,4	60	60,6
99	100	101
594	600	606
990	1000	1010
1089	1100	1111
1188	1200	1212
1287	1300	1313

Продолжение таблицы 4

Нижняя граница допустимого значения, Гц	Установленное значение, Гц	Верхняя граница допустимого значения, Гц
1386	1400	1414
1485	1500	1515
1584	1600	1616
1683	1700	1717
1980	2000	2020
2970	3000	3030
3960	4000	4040
4950	5000	5050
5940	6000	6060
6930	7000	7070
7920	8000	8080
8910	9000	9090
9850	10000	10150
59100	60000	60900
98500	100000	101500

Результаты измерения частоты частотомером ЧЗ-57 и осциллографом АСК-2041, с учетом погрешностей средств измерений, представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результат измерения частоты генератора частотомером ЧЗ-57 и осциллографом АСК-2041

Установленное значение частоты, Гц	Результат измерения частотомером ЧЗ-57, Гц	Результат измерения осциллографом АСК-2041, Гц
10	9,971 ± 0,001	10,0 ± 0,1
60	59,8000 ± 0,0013	59,9 ± 0,3
100	100,5000 ± 0,0015	100,3 ± 0,3
600	602,200 ± 0,004	600,6 ± 1,3
1000	1004,700 ± 0,006	1005 ± 3
1100	1104,000 ± 0,007	1099 ± 3
1200	1205,100 ± 0,007	1205 ± 3
1300	1305,100 ± 0,008	1307 ± 3
1400	1406,600 ± 0,008	1399 ± 3
1500	1504,000 ± 0,009	1504 ± 3
1600	1605,300 ± 0,009	1600 ± 6
1700	1704,10 ± 0,01	1709 ± 6
2000	2006,000 ± 0,011	2000 ± 6
3000	3023,000 ± 0,016	3030 ± 6
4000	4025,00 ± 0,02	4000 ± 28
5000	5005,00 ± 0,03	5000 ± 29
6000	6016,00 ± 0,03	6020 ± 30
7000	6999,00 ± 0,04	6960 ± 30
8000	8003,00 ± 0,04	8000 ± 30
9000	9017,00 ± 0,05	8990 ± 60

Продолжение таблицы 5

Установленное значение частоты, Гц	Результат измерения частотомером ЧЗ-57, Гц	Результат измерения осциллографом АСК-2041, Гц
10000	10036,00 ± 0,05	10000 ± 60
60000	60040,0 ± 0,3	60060 ± 130
100000	100160,0 ± 0,5	100000 ± 300

Результаты, полученные частотомером, входят в диапазон допустимых значений частоты генератора. В свою очередь, результаты, полученные осциллографом, не на всех частотах входят в допустимый диапазон. На частотах 10 Гц, 3000 Гц, 7000 Гц (рисунки 18, 19 и 20 соответственно) границы измеренного значения выходят за границы допустимых значений выходной частоты генератора. На рисунках черным цветом обозначено установленное на генераторе значение частоты выходного сигнала, синим цветом - границы допустимых значений выходной частоты генератора, фиолетовым – измеренное значение осциллографом, красным – границы погрешности измеренного значения.

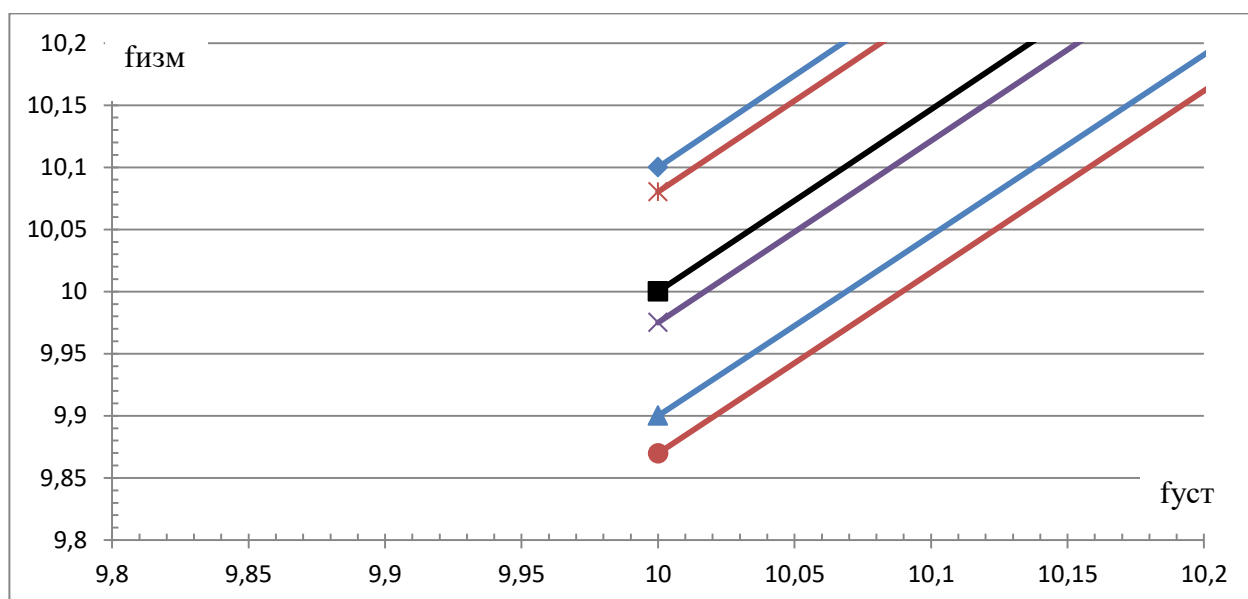


Рисунок 18 – Результаты измерения частоты 10 Гц осциллографом АСК-2041

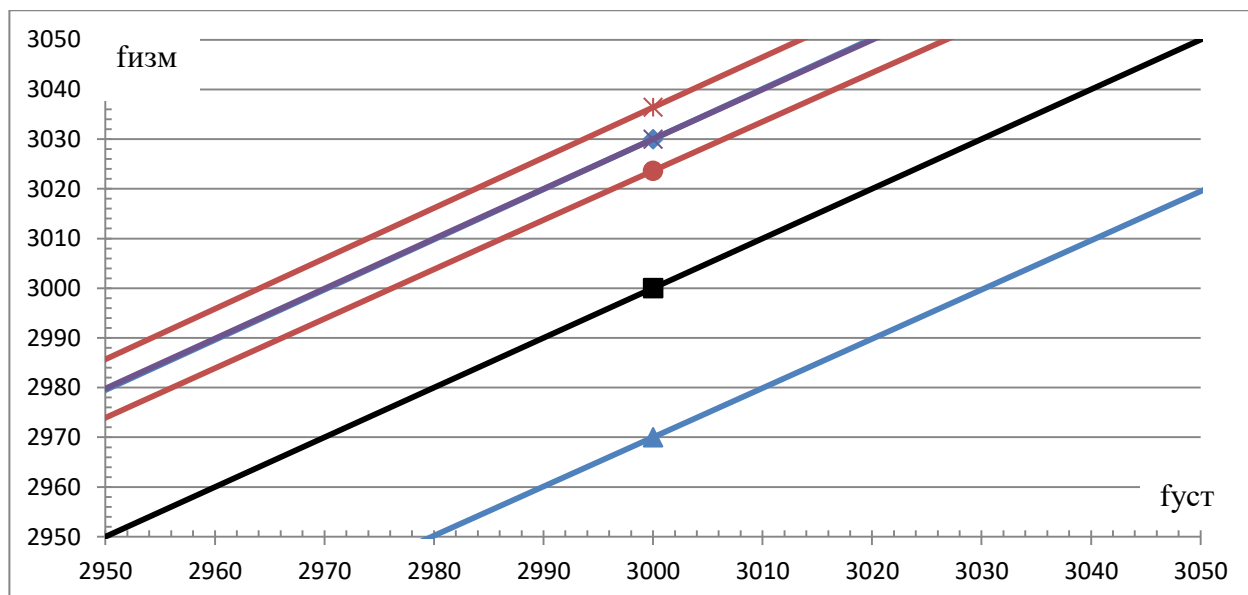


Рисунок 19 – Результат измерения частоты 3000 Гц осциллографом АСК-2041

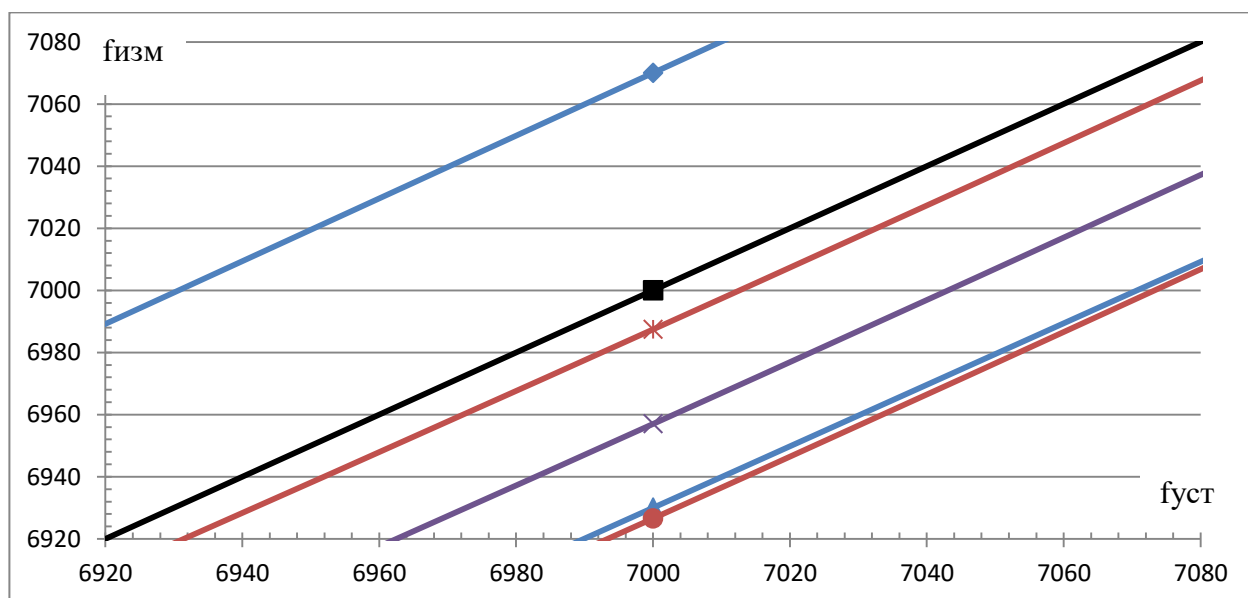


Рисунок 20 – Результат измерения частоты 7000 Гц осциллографом АСК-2041

Как видно на рисунках границы погрешностей измеренного значения осциллографом выходят за допустимые границы установленного значения частоты на генераторе. В связи с этим получается, что измерение частоты с помощью осциллографа не допустимо. Для исследования погрешности установки частоты подходит частотомер ЧЗ-57. Границы погрешностей измеренного значения частотомером входят в допустимые границы частоты выходного сигнала генератора.

3.2 Обработка результатов исследования неравномерности выходного напряжения

Измерения проводились с помощью вольтметра В7-40 (федеральный информационный фонд по обеспечения единства измерений СИ номер 39075-13) и мультиметра Agilent 3458А (федеральный информационный фонд по обеспечения единства измерений СИ номер 25900-03). Вольтметр В7-40 позволяет измерять напряжение в диапазоне от 0,01 мВ до 2000 В. Пределы погрешности измерения для пределов измерения 200 мВ и 2 В составляет:

$$\pm \left[0,05 + 0,02 \cdot \left(\frac{U_k}{U} - 1 \right) \right] \%, \quad (21)$$

где U_k – конечное значение установленного предела измерений;

U – измеренное значение напряжения.

Для пределов 20, 200, 2000 В пределы погрешности измерения составляет:

$$\pm \left[0,1 + 0,02 \cdot \left(\frac{U_k}{U} - 1 \right) \right] \%. \quad (22) [10]$$

Мультиметр Agilent 3458А измеряет значение переменного напряжения, в диапазоне от 10 нВ до 1000 В. Пределы погрешности измерения напряжения мультиметром представлены в таблице 6 в виде: [11]

$$a \cdot U_{\text{изм}} + b \cdot U_{\text{пр}}, \quad (x)$$

где $U_{\text{изм}}$ – измеренное значение напряжения, В;

$U_{\text{пр}}$ – предел измерения напряжения мультиметра, В;

a и b – коэффициенты в %.

Таблица 6 – Погрешность измерения мультиметром Agilent 3458А

Предел, $U_{\text{пр}}$	Диапазон частот				
	от 1 до 40 Гц	от 40 Гц до 1 кГц	от 1 кГц до 20 кГц	от 20 кГц до 50 кГц	от 50 кГц до 100 кГц
10 мВ	0,03 + 0,03	0,02 + 0,011	0,03 + 0,011	0,1 + 0,011	0,5 + 0,011
100 мВ	0,007 + 0,004	0,007 + 0,002	0,014 + 0,002	0,03 + 0,002	0,08 + 0,002
10 В					
100 В	0,02 + 0,004	0,02 + 0,002	0,02 + 0,002	0,035 + 0,002	0,12 + 0,002
1000 В	0,04 + 0,004	0,04 + 0,002	0,06 + 0,002	0,12 + 0,002	0,3 + 0,002

Результат измерений вольтметром В7-40 и мультиметром Agilent 3458А

представлены в таблицах 7 и 8.

Таблица 7 – Результат измерения выходного напряжения генератора вольтметром В7-40

Установленная частота, кГц	Измеренное значение при выходном напряжении 0,01 В, В	Измеренное значение при выходном напряжении 0,1 В, В	Измеренное значение при выходном напряжении 1 В, В	Измеренное значение при выходном напряжении 10 В, В
10	0,00984	0,09853	0,9851	9,86
20	0,00995	0,09956	0,9959	9,966
40	0,00998	0,09987	0,999	9,997
80	0,00999	0,09996	0,9999	10,006
100	0,00999	0,09992	1,0007	10,007
200	0,00999	0,09999	1,0003	10,009
400	0,01	0,10002	1,0004	10,011
800	0,01	0,10002	1,0004	10,012
1000	0,01	0,10002	1,0002	10,01
2000	0,01	0,10002	1,0004	10,01
4000	0,01	0,10001	1,0005	10,01
8000	0,01	0,09996	1,0006	10,009
10000	0,00999	0,09996	1,0006	10,007
20000	0,00998	0,09992	1,0002	9,991
40000	0,00993	0,09976	0,9988	9,941
80000	0,00984	0,09867	0,9985	9,921
100000	0,00982	0,09812	0,998	9,91

Таблица 8 – Результат измерения выходного напряжения генератора мультиметром Agilent 3458А.

Установленная частота, кГц	Измеренное значение при выходном напряжении 0,01 В, В	Измеренное значение при выходном напряжении 0,1 В, В	Измеренное значение при выходном напряжении 1 В, В	Измеренное значение при выходном напряжении 10 В, В
10	0,009905	0,099886	0,99788	9,9846
20	0,009918	0,099981	0,99965	9,9973
40	0,00994	0,099991	1,00018	10,0018
80	0,00997	0,100001	1,00033	10,0029
100	0,00999	0,100008	1,00031	10,002
200	0,009991	0,10001	1,00029	10,0015
400	0,009993	0,10001	1,00027	10,0017
800	0,009995	0,100011	1,00026	10,0017
1000	0,009996	0,100011	1,00031	10,0017
2000	0,009986	0,100013	1,00029	10,0018
4000	0,009983	0,100018	1,00026	10,0019
8000	0,009981	0,100015	1,00023	10,0021
10000	0,009982	0,10001	1,0002	10,0024

Продолжение таблицы 8

Установленная частота, кГц	Измеренное значение при выходном напряжении 0,01 В, В	Измеренное значение при выходном напряжении 0,1 В, В	Измеренное значение при выходном напряжении 1 В, В	Измеренное значение при выходном напряжении 10 В, В
20000	0,009978	0,100005	1,00004	10,0029
40000	0,009974	0,099967	0,99914	10,0025
80000	0,009951	0,099925	0,99576	9,9955
100000	0,009941	0,099759	0,99327	9,9895

На рисунках 21-22 представлены измеренные вольтметром В7-40 значения выходного напряжения генератора.

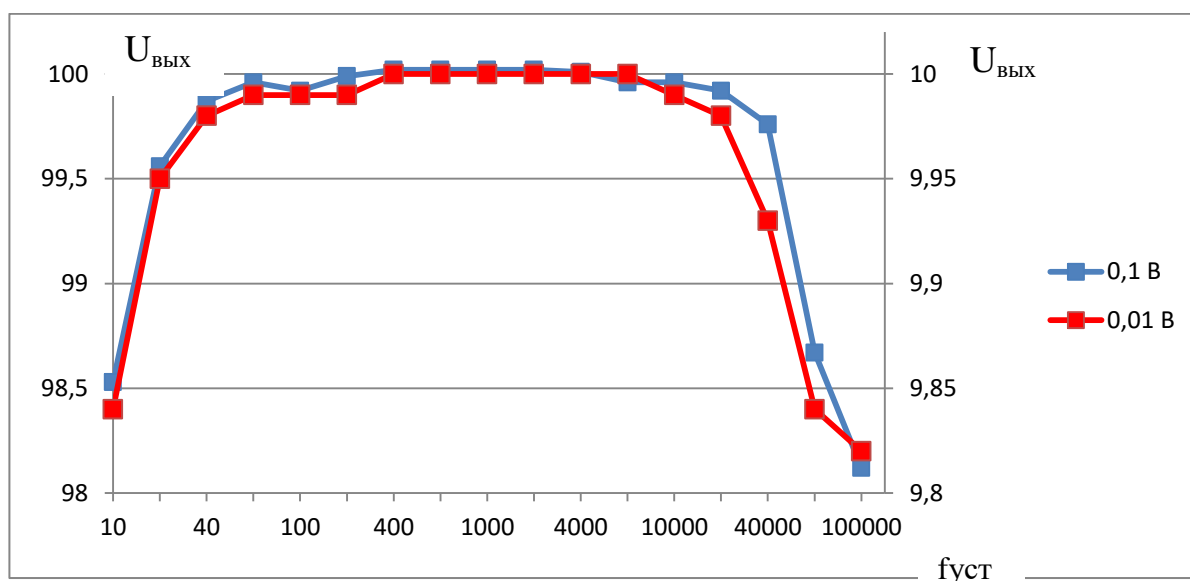


Рисунок 21 – Результат измерения вольтметром В7-40 выходного напряжения генератора равного 10 и 100 мВ

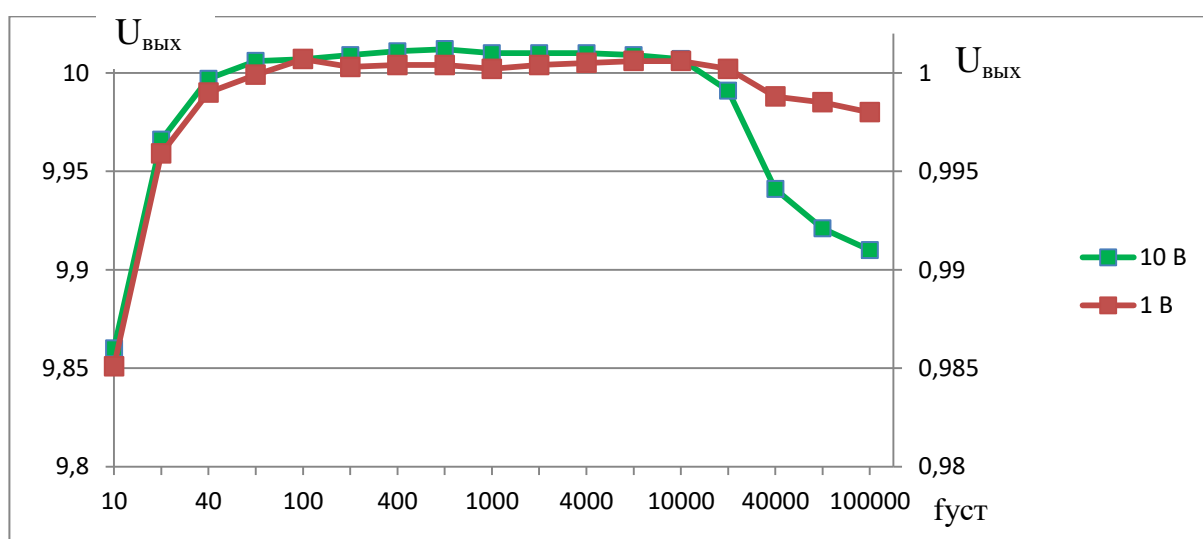


Рисунок 22 – Результат измерения вольтметром В7-40 выходного напряжения генератора равного 1 и 10 В

На рисунках 23-24 представлены результаты измерения мультиметром Agilent 3458A.

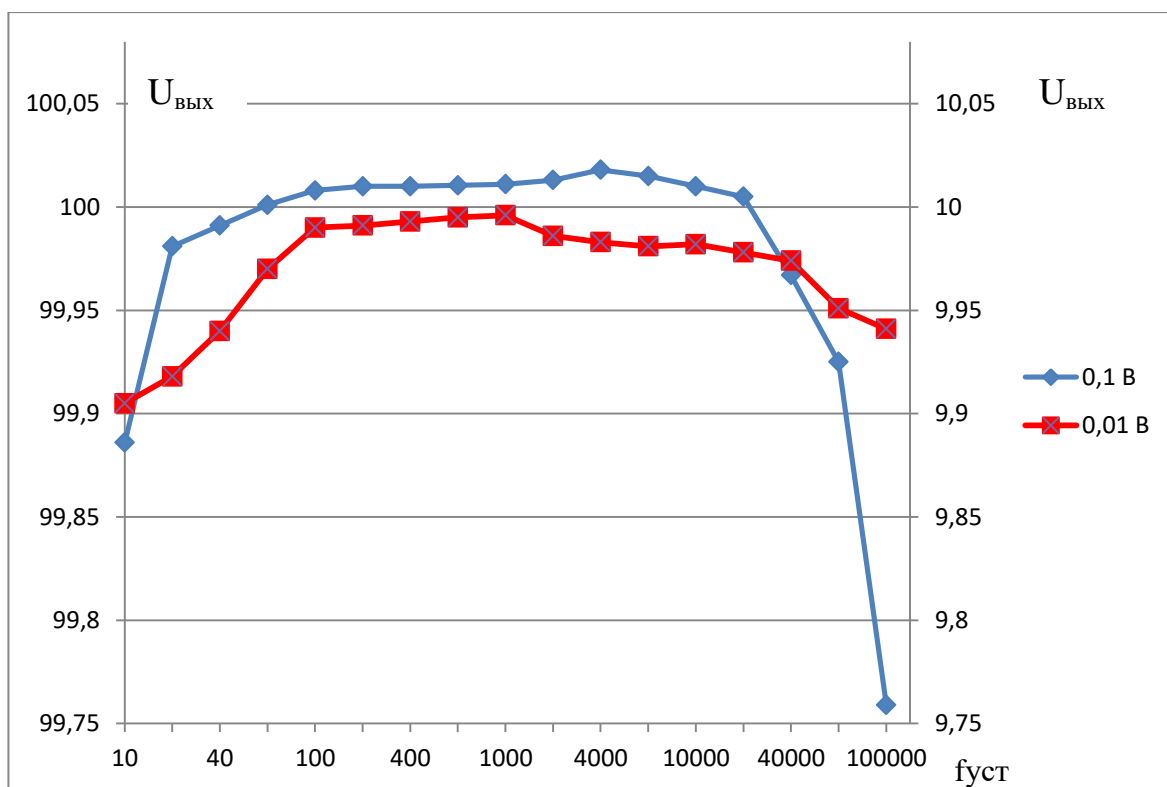


Рисунок 23 – Результат измерения мультиметром Agilent 3458A выходного напряжения генератора равного 10 и 100 мВ

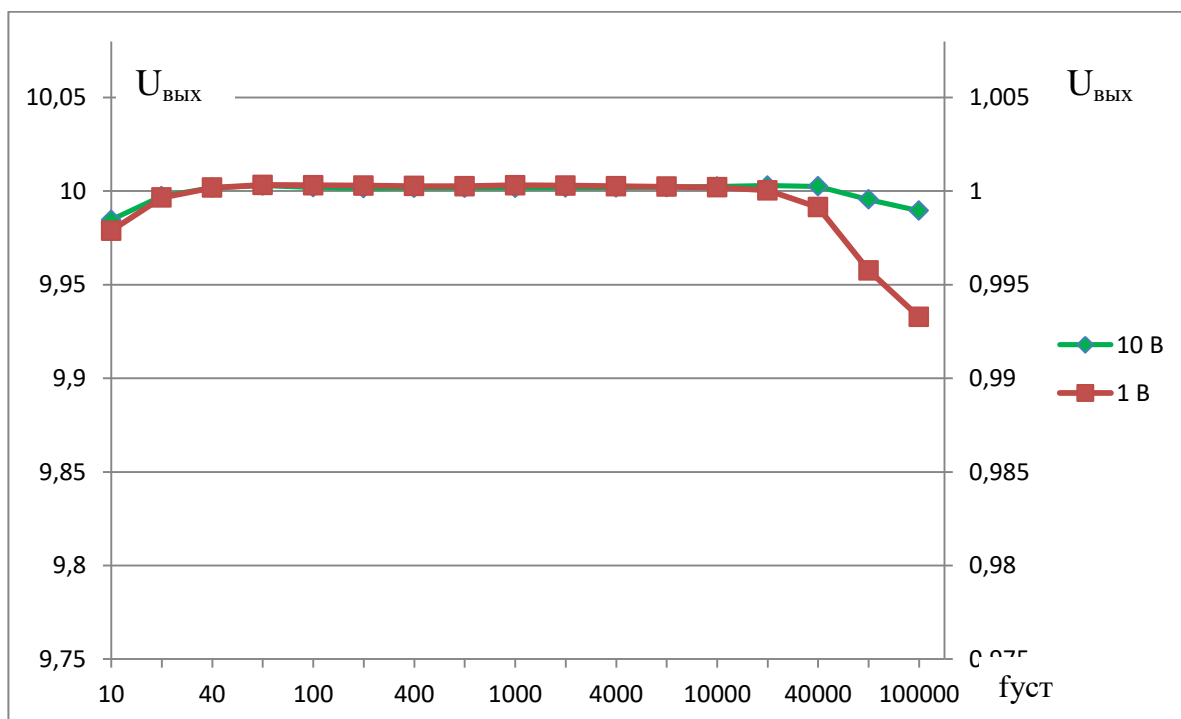


Рисунок 24 – Результат измерения мультиметром Agilent 3458A выходного напряжения генератора равного 1 и 10 В

Как видно из графиков оба прибора подходят для исследования неравномерности выходного напряжения. Однако мультиметр обладает большей точностью измерения, чем вольтметр.

На графиках видно, что наибольшее отклонение от установленного напряжения, наблюдается на граничных значениях частот. При частотах меньше 80 Гц и больше 40 кГц наблюдается наибольшая неравномерность выходного напряжения. Базовым значением, является напряжение установленное на частоте 1 кГц.

3.3 Обработка результатов исследования нелинейных искажений

Измерение нелинейных искажений производилось с помощью осциллографов АСК – 2041 и LeCroy 64 Xs Wavesurfer, номер Госреестра 40910-09, а также с помощью анализатора спектра СК4-56, номер Госреестра 6489-78.

Коэффициент отклонения $K_{откл}$ для осциллографа АСК–2041 изменяется в пределах от 2 мВ до 5 В со степенями (1÷2÷5). Пределы погрешности измерения напряжения вычисляются по формуле:

$$\pm(0,02 \cdot U_x + 0,04 \cdot K_{откл}) \text{ В}, \quad (23)$$

где U_x – измеренное значение напряжения. [9]

Для осциллографа LeCroy 64 Xs коэффициент отклонения $K_{откл}$ изменяется в пределах от 10 мВ до 10 В. Пределы погрешности измерения напряжения составляет:

$$\pm 0,015 \cdot U_x + 0,005 \cdot K_{откл} + 0,001 \text{ В}. \quad (24) [12]$$

Анализатор спектра позволяет измерять напряжения спектра в диапазоне от 80 нВ до 80 мВ, в диапазоне частот от 10 Гц до 60 кГц. Погрешность измерения напряжения не превышает 1,5 % от установленного значения. [13]

Результаты измерений представлены в таблицах 9, 10 и 11 для осциллографа АСК-2041, осциллографа LeCroy 64 XS и для анализатора спектра СК4-56 соответственно.

Таблица 9 – Результат измерения коэффициента гармоник генератора “ГС-50” осциллографом АСК-2041

Частота, кГц	Номер гармоники	Кос	Амплитуда ослабленного сигнала, мВ	Амплитуда сигнала, В	Коэффициент гармоники, %
0,2	1	0,00246	0,00848	3,44671	0,0059
	2	0,34127	0,000052	0,000152	
	3	0,52381	0,000064	0,000122	
	4	0,650794	0,000026	0,00004	
	5	0,730159	0,000032	0,0000438	
1	1	0,001905	0,00576	3,024	0,0044
	2	0,34127	0,0000376	0,00011	
	3	0,52381	0,0000344	0,000065	
	4	0,650794	0,0000189	0,000029	
	5	0,730159	0,0000192	0,000026	
2	1	0,00368	0,0184	5	0,0048
	2	0,336	0,00008	0,000238	
	3	0,528	0,0000128	0,000024	
	4	0,64	0,0000008	0,00000125	
	5	0,72	0,000012	0,0000167	
10	1	0,003095	0,01	3,230769	0,0056
	2	0,309524	0,0000168	0,0000543	
	3	0,47619	0,000076	0,00016	
	4	0,571429	0,0000112	0,0000196	
	5	0,634921	0,00004	0,000063	

Таблица 10 – Результат измерения коэффициента гармоник генератора осциллографом LeCroy 64 XS

Частота, кГц	Номер гармоники	Кос	Амплитуда ослабленного сигнала, мВ	Амплитуда сигнала, В	Коэффициент гармоники, %
0,2	1	0,002226	0,01556	6,990117	0,0043
	2	0,34	0,0000959	0,000282	
	3	0,53	0,0000532	0,0001	
	4	0,652	0,0000378	0,000058	
	5	0,73	0,0000154	0,0000211	
1	1	0,002164	0,01258	5,813309	0,0023
	2	0,342	0,0000156	0,0000456	
	3	0,536	0,0000256	0,0000478	
	4	0,656	0,0000508	0,0000774	
	5	0,732	0,0000644	0,000088	
2	1	0,004022	0,00656	1,631029	0,003
	2	0,344	0,000014	0,0000407	
	3	0,533	0,0000116	0,0000218	
	4	0,6512	0,0000042	0,0000645	
	5	0,7266	0,0000134	0,0000184	

Продолжение таблицы 10

Частота, кГц	Номер гармоники	Кос	Амплитуда ослабленного сигнала, мВ	Амплитуда сигнала, В	Коэффициент гармоники, %
10	1	0,002932	0,02037	6,947476	0,003
	2	0,316	0,0000692	0,000219	
	3	0,484	0,0000398	0,0000822	
	4	0,584	0,0000212	0,0000363	
	5	0,646	0,0000168	0,000026	

Таблица 11 – Результат измерения коэффициента гармоник генератора анализатором спектра СК4-56

Частота, кГц	Номер гармоники	Кос	Амплитуда ослабленного сигнала, В	Амплитуда сигнала, В	Коэффициент гармоники, %
0,2	1	0,00081	6,17	0,005	0,0004
	2	0,345	0,000026	0,000009	
	3	0,537	0,000004	0,000002	
	4	0,651	0,0000023	0,0000015	
	5	0,728	0,0000003	0,0000002	
1	1	0,001	7,8	0,0078	0,00019
	2	0,34	0,000014	0,000005	
	3	0,53	0,000005	0,000003	
	4	0,654	0,00000183	0,0000012	
	5	0,73	0,00000018	0,00000013	
2	1	0,00096	7,8	0,0075	0,00018
	2	0,344	0,000014	0,000005	
	3	0,535	0,000004	0,000002	
	4	0,652	0,0000027	0,0000018	
	5	0,7269	0,00000014	0,0000001	
10	1	0,0009	8,88	0,008	0,00026
	2	0,345	0,000023	0,000008	
	3	0,533	0,000005	0,0000027	
	4	0,65	0,00000037	0,00000024	
	5	0,728	0,0000001	0,00000008	

На рисунке 25 представлен график, со значениями коэффициента гармоник для генератора “ГС-50”, в соответствии с эксплуатационной документацией. [7]

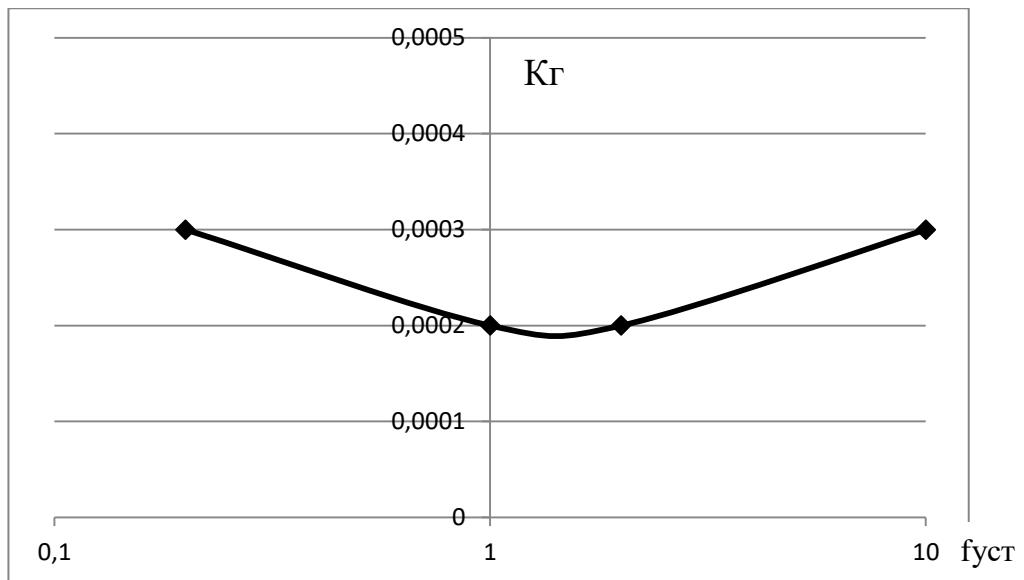


Рисунок 25 – Значение коэффициента гармоник генератора “ТС-50”, в соответствии с эксплуатационной документацией

Измерив значения коэффициента гармоник, построили графики зависимости коэффициента гармоник от частоты. Результаты представлены на рисунках 26-27.

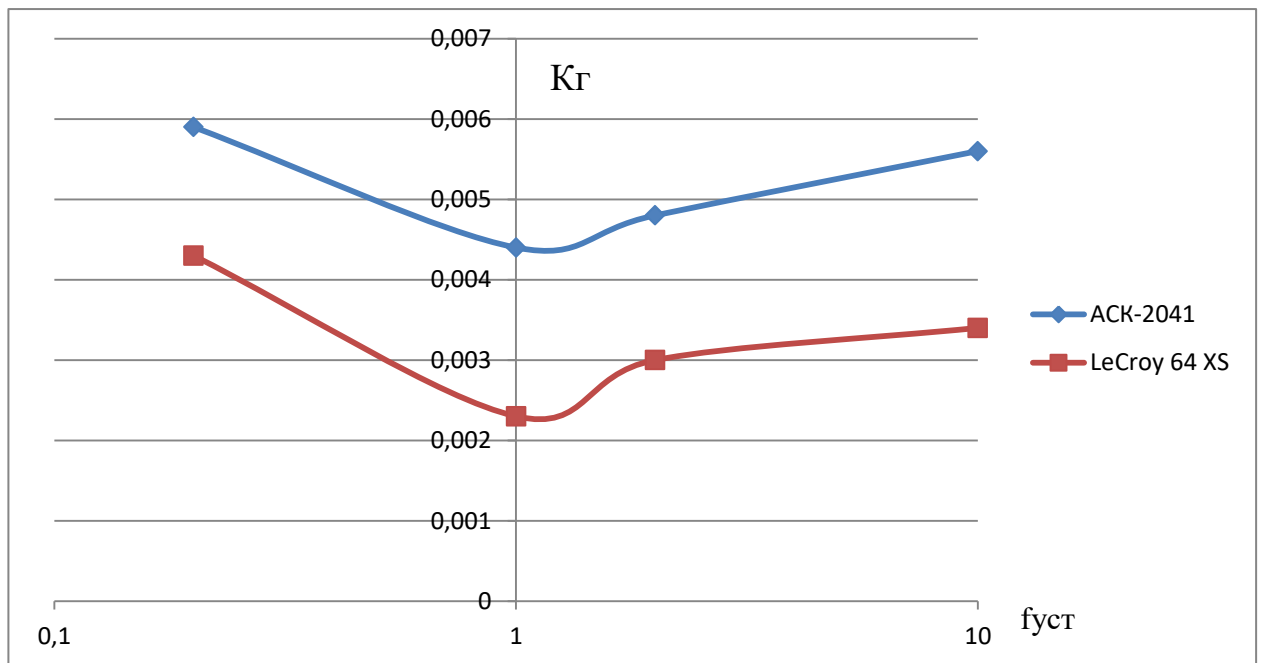


Рисунок 26 – Значения коэффициентов гармоник, полученные осциллографом LeCroy 64 Xs и осциллографом АСК-2041

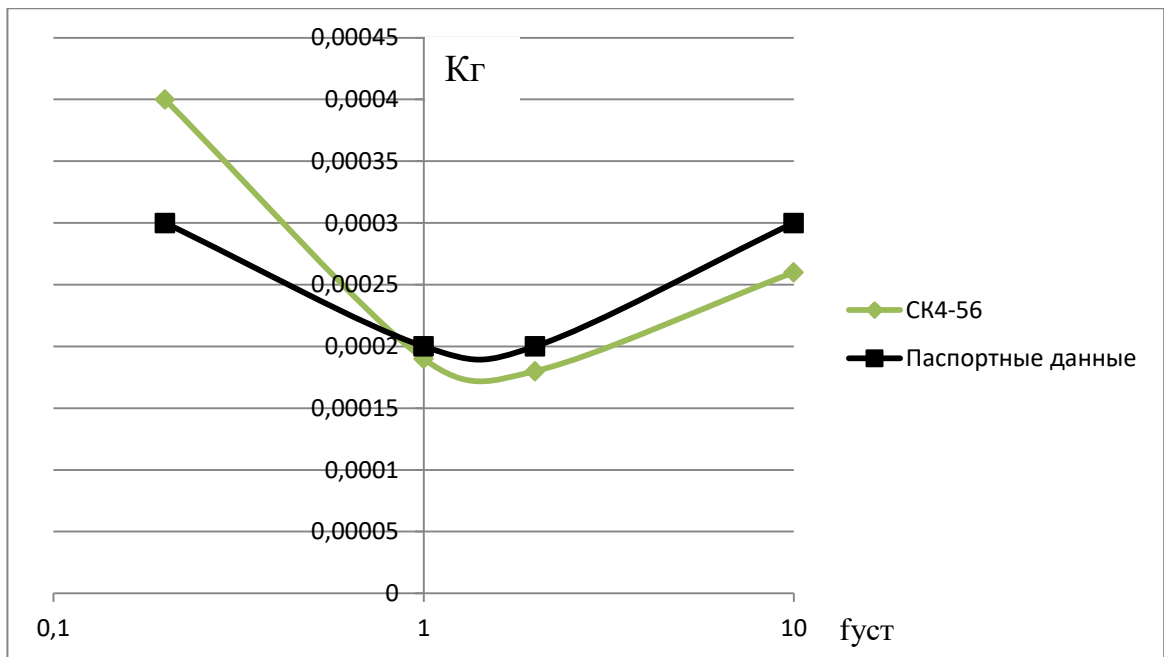


Рисунок 27 – Значения коэффициентов гармоник, полученные анализатором спектра СК4-56 и эксплуатационные данные коэффициента гармоник генератора “ГС-50”

Из рисунка 26 видно, что значения коэффициента гармоник, полученные осциллографами, не соответствуют паспортным данным. Это говорит о том, что искажения, вносимые этими приборами, не дают оценить коэффициент гармоник генератора. Из рисунка 27 видно, что анализатор спектра СК4-56 способен исследовать коэффициент гармоник генератора “ГС-50”.

Поскольку погрешность анализатора спектра СК4-56 составляет 1,5 % от установленного значения на рисунке 28 представлены допустимые границы погрешности измерения K_g .

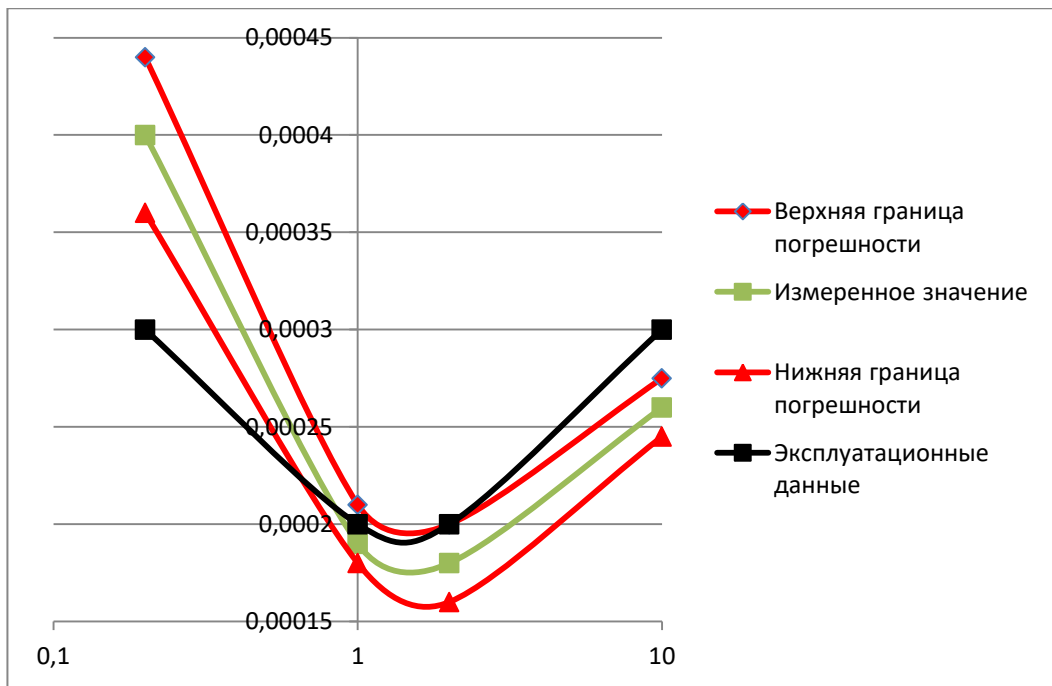


Рисунок 28 – Значение коэффициента гармоник, измеренное анализатором спектра СК4-56 с границами погрешности измерения.

Границы погрешности измерения анализатором спектра СК4-56 выходят за границы допустимых значений на частотах 200 Гц и 1 кГц. Это говорит о том, что возможные значения коэффициента гармоник генератора “ГС-50” не соответствуют эксплуатационным данным.

4 Улучшение характеристик генератора “ГС-50”

Выходной сигнал генератора искажается из-за наличия активных элементов, таких, как усилителей и систем стабилизации.

Для снижения искажений усилителя можно линеаризовать его амплитудную характеристику посредством ввода глубокой отрицательной обратной связи. Лучшим способом уменьшения нелинейных искажений является использование активных частотно-зависимых цепей, а конкретнее линейного консервативного колебательного звена (рисунок 29).

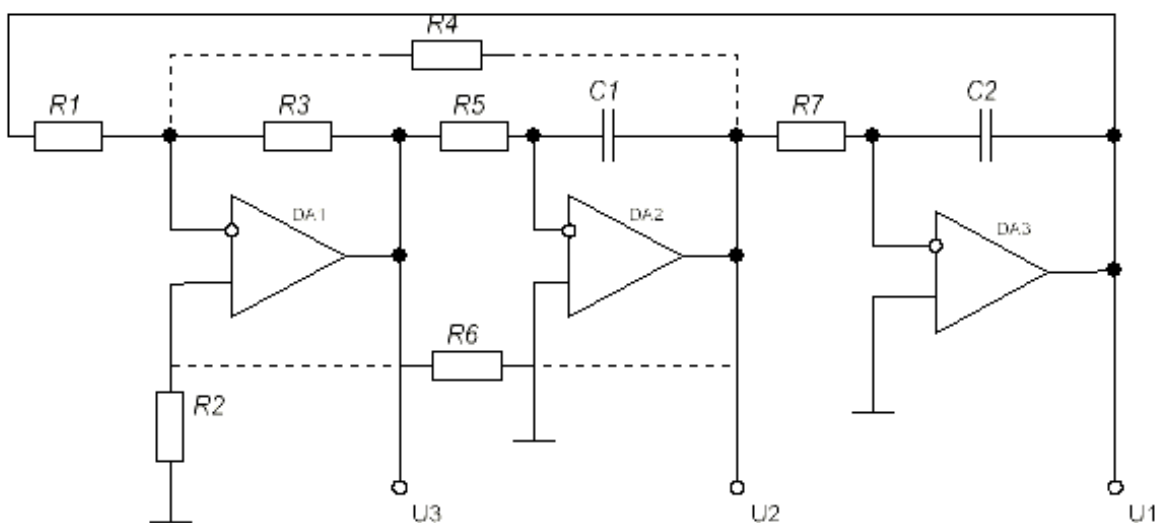


Рисунок 29 – Консервативное колебательное звено на ОУ

Данная цепь имеет три выхода, напряжения выходов сдвинуты по фазе друг от друга на 90° , в результате чего разность фаз напряжений U_1 и U_3 равно 180° .

Для пояснения схемы запишем систему уравнений

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_3 \dot{K}_3, \dot{U}_2 = \dot{U}_3 \dot{K}_2, \dot{U}_3 = \dot{U}_1 \dot{K}_1,$$

где \dot{K} – комплексные коэффициенты передачи инвертора на DA1 и интеграторов на DA2 и DA3.

Выражение без учета напряжения выглядит как:

$$1 - \dot{K}_1 \dot{K}_2 \dot{K}_3 = 1 - K_1 \left(-\frac{1}{j\omega\tau_1} \right) \left(-\frac{1}{j\omega\tau_2} \right) = K_1 - \omega^2 \tau_1 \tau_2 = 0,$$

где $K_1 = -R_3/R_1$, $\tau_1 = R_5 C_1$, $\tau_2 = R_7 C_2$.

Решением этого уравнения являются синусоидальные функции, соответствующие колебаниям с амплитудой, определяемой начальными условиями.

В данной системе колебания могут продолжаться максимально долго, однако из-за не совершенности элементов это невозможно. Виной этому паразитные параметры резисторов и потери на конденсаторах. Но, если пренебречь ими, то частота колебаний определяется по формуле:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_1}{\tau_1 \tau_2}}.$$

Резисторы и конденсаторы должны обладать одинаковыми параметрами, чтобы $|K_1| = 1, \tau_1 = \tau_2 = \tau$ и $\omega_0 = 1/\tau$.

Амплитуда колебаний управляется с помощью резисторов R4 (возбуждающий) и R2, R6 (демпфирующие). Баланс между возбуждающей цепью и демпфирующей соблюдается при равенстве $R_4/(R_1 || R_3) = R_6/R_2$. Если равенство будет нарушено, то колебания начнут спадать, или нарастать. Поэтому для управления можно изменять сопротивление какого-либо резистора.

Снижение искажений системы стабилизации возможно при использовании схемы генератора на консервативном колебательном звене (рисунок 30). В данной схеме используется система автоматической стабилизации со стробируемым амплитудным детектором. Амплитудный детектор выполнен на транзисторном ключе (Кл) и конденсаторе С2. Когда на формирователе импульсов (ФИ) достигается момент максимального выходного напряжения, на непродолжительное время ключ открыт. Сравнение и ограничитель выполнены на ОУ DA5, диоде VD и резисторах R7-R9, а усилитель ошибки – на DA2 в виде пропорционально-интегрирующего усилителя (ПИУ).

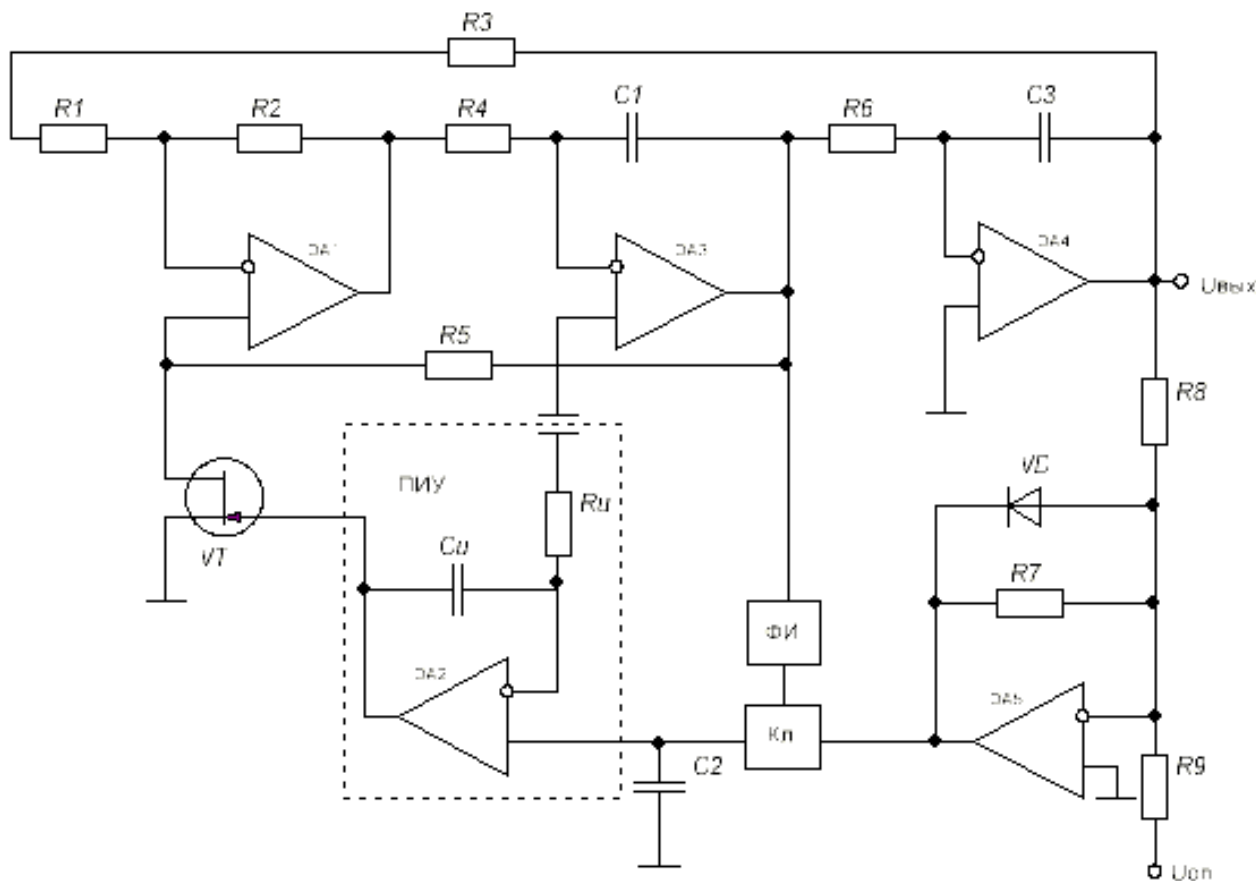


Рисунок 30 – Генератор со схемой амплитудной стабилизации и стробируемым детектором

Благодаря этой схеме напряжение на выходе амплитудного детектора не спадает между импульсами, в стационарном режиме напряжение не содержит пульсаций и тем самым не вносит искажения в выходной сигнал. Выходная частота такого генератора изменяется от 1 Гц до 200 кГц, а коэффициент гармоник становится менее 0,0001 %.

Генераторам синусоидальных сигналов присуще противоречие между стабильностью выходного напряжения, уровнем нелинейных искажений и длительностью установления амплитуды. При использовании данной схемы переходные процессы сокращаются по времени до одного-двух периодов выходного напряжения. Повышенная стабильность выходного напряжения и снижение нелинейных искажений описано выше. Получается, что противоречия, присущие генераторам синусоидальных сигналов, благодаря

данной схеме отсутствуют. Дополнительное улучшение характеристик возможно благодаря более качественным элементам генератора. [14]

Несмотря на описанные выше преимущества, данная схема обладает и недостатками по сравнению со схемой, примененной в генераторе “ГС-50”. Уменьшив коэффициент гармоник на частотах, близких к 1 кГц, будет получено увеличение коэффициента гармоник на высших частотах. Простая замена схемы генератора не позволит получить желаемый результат.

Еще одним из вариантов уменьшения коэффициента гармоник является замена усилителей в основном блоке генератора. В генераторе “ГС-50” применяются усилители КР544УД2Б. К сожалению, в информации об российских усилителях не указывают характеристики шумов и вносимых искажений. В связи с этим были рассмотрены возможные варианты замены усилителей, с низкими значениями шумов и искажений. Были рассмотрены следующие усилители: AD825A, MC33077, AD8597, MAX-4269, AD797. Исследование искажений было промоделировано в программе Multisim (рисунок 31). Коэффициент усиления 2.

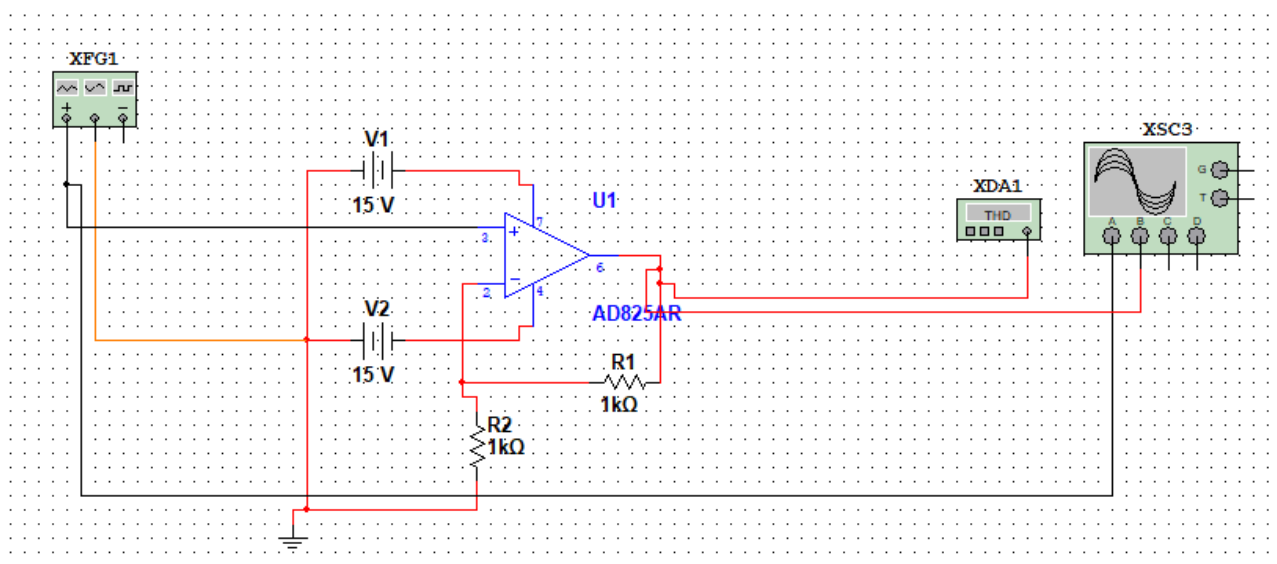


Рисунок 31 – Схема исследования нелинейных искажений усилителей.

В таблице 12 представлены некоторые характеристики рассмотренных усилителей.

Таблица 12 – Характеристики исследуемых усилителей

Параметр	AD825A	MC33077	AD8597	MAX-4269	AD797
Скорость нарастания выходного напряжения, В/мкс	140	11	16	900	20
Потребляемый ток, мА	6,5	3,5	5	1,6	8,2
Напряжения смещения, мВ	1	0,2	0,01	1	0,08
Шум, нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$	12	4,4	1,07	8	0,9
Вносимые искажения, %	0,0001	0,007	0,0001	0,0001	0,0001
Выходное напряжение, В	13,3	14,1	13,7	8	13

Шум также оказывает влияние на вносимые усилителем искажения, меньшее значение шума, уменьшает коэффициент гармоник.

В программе Multisim отсутствует модель усилителя MAX-4269. Помимо этого, не все модели усилителей в программе обладают нелинейными характеристиками. Исследовав модель усилителя MC33077 на нелинейность было выяснено, что модель является линейной (рисунок 32).

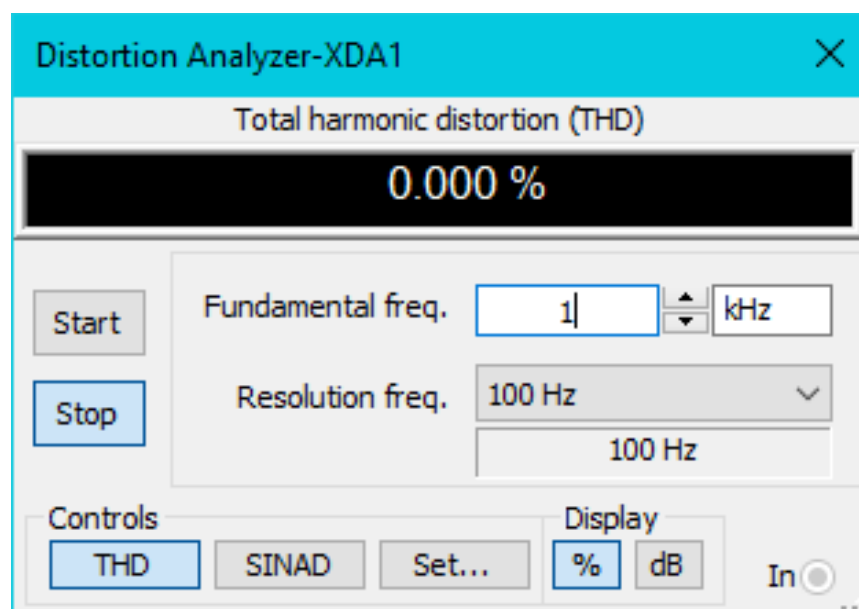


Рисунок 32 – Значение коэффициента гармоник для усилителя MC33077 при входном напряжении 15 В.

Как видно из рисунка 32 значение K_g на выходе усилителя при входном напряжении 15 В равно 0,000 %. Что не соответствует реальным

характеристикам усилителя. Далее были проверены на нелинейность другие усилители, их модели соответствуют заявленным характеристикам.

На вход усилителей было подано переменное напряжение с амплитудным значением равным половине максимального выходного значения напряжения усилителей. Результаты измерения K_d представлены на рисунках 33-35.

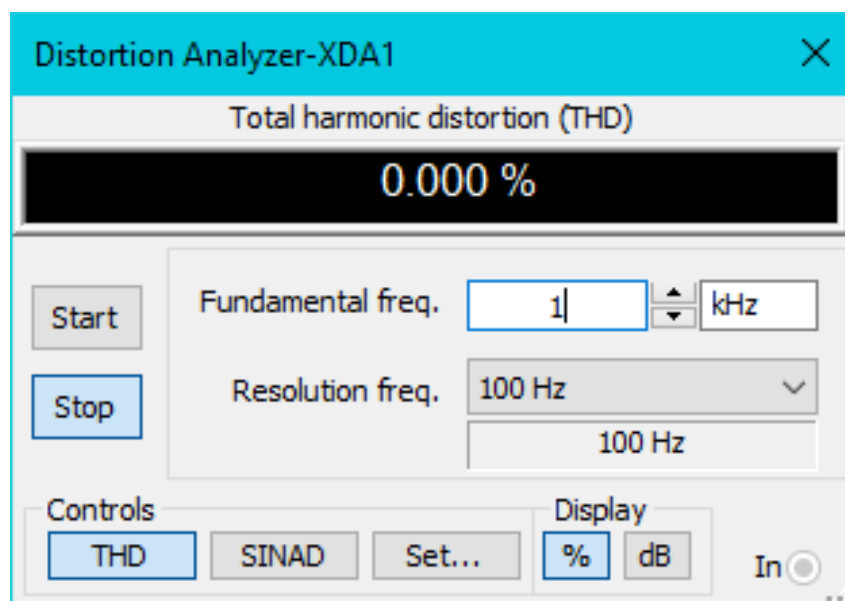


Рисунок 33 – Измеренное значение K_d для усилителя AD825A при входном значении напряжения 7 В.

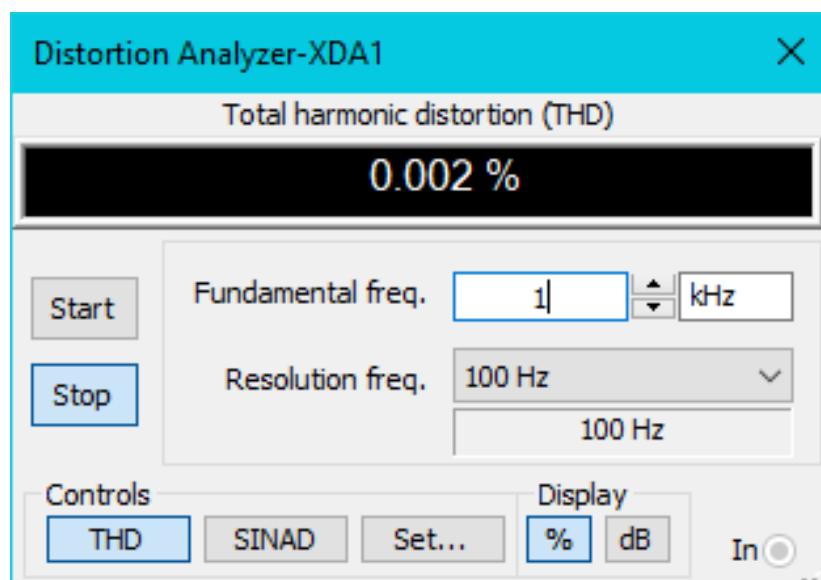


Рисунок 34 – Измеренное значение K_d для усилителя AD8597 при входном значении напряжения 6 В.

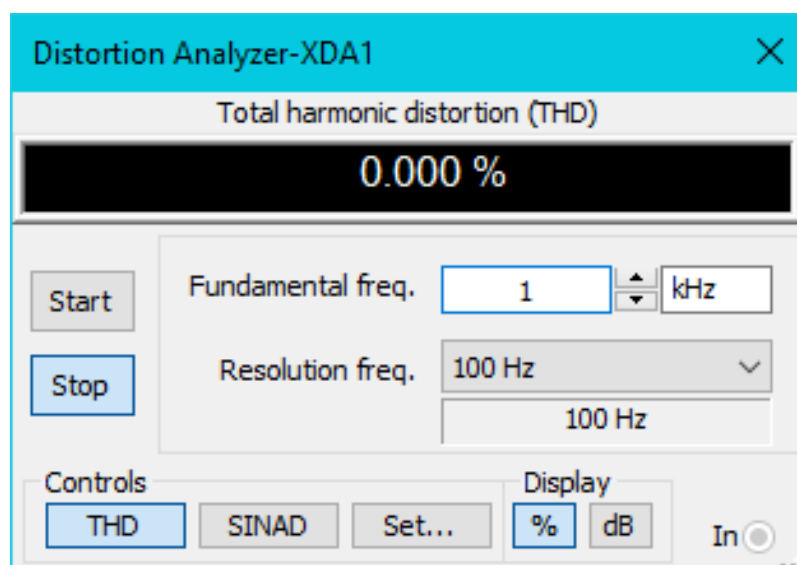


Рисунок 35 – Измеренное значение Кг для усилителя AD797A при входном значении напряжения 6 В.

Как видно из полученных результатов, программа не позволяет измерять значения Кг ниже 0,001 %. Можно предположить, что значение Кг этих усилителей отличается в четвертом или пятом знаке после запятой. Для этого потребуется создать реальный макет для исследования Кг.

Генератор “ГС-50” обладает значением Кг на уровне 0,0002% и это очень низкое значение нелинейных искажений. Американские генераторы Krohn-Hite 4402В и Tektronix SG505 обладают значениями Кг равными 0,0005 % и 0,0008 % соответственно. Замена усилителей на более качественные приведет к еще меньшему значению и позволит выделить модифицированный генератор среди генераторов с низким значением нелинейных искажений. С еще меньшим значением Кг, чем 0,0002 % можно исследовать элементы на вносимые искажения, которые ранее считались не искажающими сигнал.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

5.1.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки;
- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);
- бюджет разработки;
- уровень проникновения на рынок;
- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

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. Поскольку итогом научного исследования должен стать усовершенствованный генератор, с лучшими характеристиками, чем у генератора “ГС-50”, для сравнения конкурентоспособности усовершенствованного прибора выбран генератор “ГС-50”. Выбранные показатели для оценки конкурентоспособности генератора показаны в таблице 13.

Таблица 13 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _{кл}	К _ф	К _{кл}
1	2	3	4	6	7
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Повышение производительности труда	0,13	3	2	0,39	0,26
2. Соответствует требованиям потребителей	0,13	4	3	0,52	0,39
3. Надежность	0,1	4	4	0,4	0,4
4. Безопасность	0,1	4	4	0,4	0,4
5. Предоставляемые возможности	0,15	5	4	0,75	0,6
6. Простота эксплуатации	0,05	5	5	0,25	0,25
Экономические критерии оценки эффективности					
7. Конкурентоспособность	0,19	5	4	0,95	0,76
8. Цена	0,05	5	5	0,25	0,25
9. Уровень проникновения на рынок	0,1	3	3	0,3	0,3
Итого	1			4,21	3,61

Оценка качества конкурентоспособности определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (24)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i-го показателя.

$$K = 0,13 \cdot 3 + 0,13 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,05 \cdot 5 + 0,19 \cdot 5 + 0,05 \cdot 5 + 0,1 \cdot 3 = 0,39 + 0,52 + 0,4 + 0,4 + 0,75 + 0,25 + 0,95 + 0,25 + 0,3 = 4,21$$

Значение $K=4,21$ говорит о конкурентоспособности и перспективности научной разработки.

5.1.2 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и

компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в таблице 14.

Таблица 14 - Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	3	2
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	3
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	5
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	3	4
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	3
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	3
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	4
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	1	2
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	2
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	2
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	2
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	2	3
15	Проработан механизм реализации научного проекта	3	3
	ИТОГО БАЛЛОВ	38	46

Уровень знаний разработчика для коммерциализации разработки выше среднего, а перспективность разработки на среднем уровне.

5.2 Инициация проекта

5.2.1 Цели и результат проекта

Для инициации проекта необходимо поставить цели и задач. Для этого сначала нужно определить заинтересованные стороны в проекте, которые представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Научный руководитель	Выполненная работа магистранта
Магистрант	Заказы на исполнение
ТПУ	Заказы на исполнение

В таблице 16 представлены цели проекта и результаты, при которых цели считаются достигнутыми.

Таблица 16 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Усовершенствование имеющегося генератора
Ожидаемые результаты:	Известны и намечены пути усовершенствования генератора
Критерии приемки результата проекта:	Усовершенствованный генератор обладает лучшими характеристиками
Требования к результату проекта:	Требование:
	Уменьшить уровень нелинейных искажений
	Уменьшить погрешность установки частоты
	Уменьшить неравномерность выходного напряжения

5.2.2 Организационная структура проекта

В научном проекте требуется, чтобы каждый его член выполнял поставленную ему роль. В таблице 17 представлены лица, участвующие в проведении и реализации научного исследования.

Таблица 17 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функция	Трудозатраты, час.
1	Фидченко Михаил Витальевич, НИ ТПУ, студент-магистрант	Исполнитель проекта	Выполнение научной работы	468
2	Рыбин Юрий Константинович, НИ ТПУ, профессор, д.т.н.	Руководитель проекта, эксперт проекта	Координация деятельности, осуществляет научную оснастку	156
ИТОГО				624

5.2.3 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

Исследование метрологических характеристик генератора заключается в исследовании нелинейных искажений, исследовании погрешности установки частоты и исследовании неравномерности выходного напряжения. Для проведения этих исследований можно использовать разные приборы, в связи с этим в таблице 18 представлены различные варианты исполнения научного исследования.

Таблица 18 – Возможные варианты исполнения исследования

	1	2	3
А. Нелинейные искажения	Осциллограф АСК-2041	Осциллограф LeCroy 64 XS	Анализатор спектра СК4-56
Б. Погрешность установки частоты	Осциллограф АСК-2041	Частотомер ЧЗ-56	АСК-2041 и ЧЗ-56
В. Неравномерность напряжения	Вольтметр В7-40	Мультиметр Agilent 3458А	В7-40 и Agilent 3458А

Были выбраны следующие виды исполнений: 1 – А1Б1В1; 2 – А2Б2В2; 3 – А3Б3В3. Выполнение научного исследования будет производиться по исполнению 3.

5.3 Планирование управления научно-техническим проектом

5.3.1 Структура работ проекта

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующий исполнитель.

В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, провести распределение исполнителей по видам работ. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 19.

Таблица 19 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Магистрант
	3	Выбор направления исследований	Руководитель
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, магистрант
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение требуемых измерений	Магистрант
Обобщение и оценка результатов	6	Расшифровка данных и сравнение с имеющимися показателями	Магистрант
Оформления отчета по НИР	7	Составление пояснительной записки	Руководитель, магистрант

5.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (25)$$

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

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

t_{maxi} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (26)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

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

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

5.3.3 Разработка графика проведения научного исследования

При выполнении дипломных работ студенты в основном становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем. Поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (27)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (28)$$

где $T_{кал} = 365$ – количество календарных дней в году;

$T_{вых} = 91$ – количество выходных дней в году;

$T_{пр} = 28$ – количество праздничных дней в году.

$$k_{кал} = \frac{365}{365 - 91 - 28} = 1,48$$

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} округляем до целого числа. Все рассчитанные значения сводим в таблицу 20.

Таблица 20 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ									Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, T_{pi}			Длительность работ в календарных днях, T_{ki}		
	t_{min} , чел-дни			t_{max} , чел-дни			$t_{ож}$, чел-дни									
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Составление и утверждение технического задания	1	1	1	3	3	3	1,8	1,8	1,8	Руковод.	1,8	1,8	1,8	3	3	3
Подбор и изучение материалов по теме	5	10	7	10	20	13	7	14	9,4	Магист.	7	14	9,4	11	21	14
Выбор направления исследований	4	4	4	6	6	6	4,8	4,8	4,8	Руковод.	4,8	4,8	4,8	8	8	8
Календарное планирование работ по теме	2	2	2	4	4	4	2,8	2,8	2,8	Руковод. магист.	1,4	1,4	1,4	3	3	3
Проведение измерений	10	10	10	15	17	15	12	12,8	12	Магист.	12	12,8	12	18	19	18
Расшифровка данных и сравнение с имеющимися показателями	8	10	8	12	12	10	9,6	10,8	8,8	Магист.	9,6	10,8	8,8	15	16	14
Составление пояснительной записки	10	10	15	15	13	25	12	11,2	19	Руковод. магист.	6	5,6	8,5	9	9	13

Продолжение таблицы 20

Название работы	Трудоёмкость работ									Исполнитель и	Длительность работ в рабочих днях, T_{pi}			Длительность работ в календарных днях, T_{ki}		
	t_{min} , чел-дни			t_{max} , чел-дни			$t_{ож}$, чел-дни				Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3							
ИТОГО							6,6	6,6	6,6	Руководитель			11	11	11	
							28,6	37,6	30,2	Магистрант			44	56	46	
							14,8	14	21,8	Руководитель и магистрант			12	12	16	
							50	58,2	58,6	Всего			67	79	73	

На основе таблицы 20 строим план график (таблица 20).

Таблица 21 – Календарный план график проведения НИР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал. дни	Продолжительность выполнения работ												
				Фев.		Март			Апрель			Май				
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Составление ТЗ	Руковод.	3	■												
2	Изучение материалов	Дипл.	11		□											
3	Выбор направления	Руковод.	8			■										
4	Планирование работ	Руковод. магистр.	3				□									
5	Проведение измерений	Магистр.	18					□								
6	Расшифровка данных	Магистр.	15						□							
7	Пояснительная записка	Руковод. магистр.	9									□				

■ - руководитель, □ магистрант

5.4 Бюджет научно-технического исследования

5.4.1 Расчет материальных затрат НИИ

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

— приобретаемые со стороны сырье и материалы, необходимые для создания научно-технической продукции;

— покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции для обеспечения нормального технологического процесса и для упаковки продукции или расходуемых на другие производственные и хозяйственные нужды (проведение испытаний, контроль, содержание, ремонт и эксплуатация оборудования, зданий, сооружений, других основных средств и прочее), а также запасные части для ремонта оборудования, износа инструментов, приспособлений, инвентаря, приборов, лабораторного оборудования и других средств труда, не относимых к основным средствам, износ спецодежды и других малоценных и быстроизнашивающихся предметов;

— покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;

— сырье и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований (испытаний) и для эксплуатации, технического обслуживания и ремонта изделий – объектов испытаний (исследований);

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i + N_{расхi}, \quad (29)$$

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

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, m^2 и т.д.);

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

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Величина коэффициента (k_T), 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 (15÷25) % от стоимости материалов. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносим в таблицу 22.

Таблица 22 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество			Цена за ед., руб.			Затраты на материалы(З _м), руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Бумага	Лист	100	100	150	1,2	1,4	1,2	138	161	207
Картридж для принтера	Шт.	1	1	2	1000	1000	1000	1150	1150	2300
Итого								1288	1311	2507

5.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме.

Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене. Расчет затрат по данной статье заносится в таблицу 23. При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15 % от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного НТИ и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений.

Таблица 23 – Расчет бюджета затрат на приобретение оборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования	Количество единиц оборудования			Цена единицы оборудования, тыс. руб.			Общая стоимость оборудования, тыс. руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Частотомер ЧЗ-57	0	1	1	100	100	100	0	115	115
2	Осциллограф АСК-2041	1	0	1	250	250	250	280	0	280
3	Осциллограф LeCroy	0	1	0	1000	1000	1000	0	1200	0
4	Анализатор спектра СК4-56	0	0	1	300	300	300	0	0	340
5	Вольтметр В7-40	1	0	1	50	50	50	55	0	55
6	Мультиметр Agilent 3458A	0	1	1	800	800	800	0	890	890
Итого								335	2205	1680

5.4.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада.

Расчет оплаты труда производится на основе отраслевой системы оплаты труда в ТПУ.

Поскольку руководитель входит в профессорско-преподавательский состав (профессор, доктор наук), его месячная зарплата составляет 42448,47 руб. Зарплата магистранта взята из группы рабочих первого уровня, квалификационный уровень 2, и составляет 8036,60 руб. Заработная плата на

один человеко-день рассчитывается как месячная зарплата, разделенная на 30. Расчет основной заработной платы сводится в таблицу 24.

Таблица 24 – Расчет основной заработной платы

Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.			Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.			Всего заработная плата по тарифу(окладам), тыс. руб.		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Руковод.	6,6	6,6	6,6	1,415	1,415	1,415	9,34	9,34	9,34
Магистрант	28,6	37,6	30,2	0,268	0,268	0,268	7,66	10,07	8,09
Руковод., магистрант	50	58,2	58,6	1,683	1,683	1,683	84,15	97,95	98,62
Всего							101,15	117,36	116,05

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИТ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (30)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата ((12÷20) % от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = T_p \cdot Z_{\text{дн}}, \quad (31)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_M \cdot M}{F_d}, \quad (32)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

В таблице 25 представлен баланс рабочего времени.

Таблица 25 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистрант
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные - праздничные	119	119
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	48	72
Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистрант
Действительный годовой фонд рабочего времени	198	176

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (33)$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30 % от $Z_{тс}$);

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15÷20 % от $Z_{тс}$).

Принимаем $k_d = 0,3$;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Для упрощения расчетов введем интегральный коэффициент $k_{инт}$

$$k_{инт} = (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p.$$

В таблице 26 произведен расчет заработной платы работников.

Таблица 26 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	З _{тс} , тыс. руб.	k _{инт}	З _м , тыс. руб.	З _{дн} , тыс. руб.	Т _р , раб. дн.	З _{осн} , тыс. руб.
Руководитель	42,4	2,08	88,19	4,63	23	106,49
Дипломник	8	1,3	10,4	0,61	56	34,16
Итого З _{осн}						140,65

5.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (34)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 27.

Таблица 27 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, тыс. руб		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Руководитель	106,49	106,49	125,01
Дипломник	34,16	41,48	37,80
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	30		
Итого	42,195	44,391	48,843

5.4.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при

формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно - технической продукции. Общие затраты на научный проект представлены в таблице 28.

Таблица 28 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	
1. Материальные затраты НТИ	1288	1311	2507	
2. Затраты на спецоборудование для научных работ	335000	2205000	1680000	
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	140650	147970	162810	
4. Отчисления во внебюджетные фонды	42195	41480	37800	
5. Накладные расходы	83061,28	383321,76	301298,72	16% от суммы 1-4
6. Бюджет затрат НТИ	602194,28	2779082,76	2184415,72	Сумма ст. 1-5

Вывод: самым дешевым получилось исполнение 1, самым дорогим исполнение 2. Используемое исполнение 3 оказалось не самым дорогим, но все равно требует больших вложений.

5.4.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп } i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (35)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп } i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;
 Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;
 Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно- исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (36)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

В таблице 29 представлены характеристики, их вес и качество в зависимости от исполнения.

Таблица 29 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1. Неравномерность напряжения	0,13	3	3	3
2. Погрешность установки частоты	0,13	3	4	5
3. Удобство управления	0,1	4	4	5
4. Доступность интерфейса	0,1	4	4	4
5. Коэффициент гармоник	0,15	3	4	5
6. Размеры	0,05	5	5	5
7. Конкурентоспособность	0,19	3	4	5

Продолжение таблицы 29

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
8. Цена	0,05	5	3	4
9. Уровень проникновения на рынок	0,1	3	3	3
Итого	1			

$$I_{p1} = 3 \cdot 0,13 + 3 \cdot 0,13 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,05 + 3 \cdot 0,19 + 5 \cdot 0,05 + 3 \cdot 0,1 = 3,1$$

$$I_{p2} = 3 \cdot 0,13 + 4 \cdot 0,13 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,05 + 4 \cdot 0,19 + 3 \cdot 0,05 + 3 \cdot 0,1 = 3,77$$

$$I_{p3} = 3 \cdot 0,13 + 5 \cdot 0,13 + 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,19 + 4 \cdot 0,05 + 3 \cdot 0,1 = 4.39$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп1} = \frac{I_{p1}}{I_{финр1}}, I_{исп2} = \frac{I_{p2}}{I_{финр2}} \text{ и т.д.} \quad (37)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. *Сравнительная эффективность проекта* ($\mathcal{E}_{ср}$):

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп1}}{I_{исп2}}. \quad (38)$$

В таблице 30 представлена сравнительная эффективность различных исполнений разработки.

Таблица 30 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,22	1	0,79
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,1	3,77	4.39
3	Интегральный показатель эффективности	14.09	3,77	5,56
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0,39	1,47	1

Проведя расчет ресурсоэффективности и сравнив различные исполнения приходим к выводу, что исполнение № 3 является лучше исполнения 2 по всем параметрам. Исходя из сравнительной характеристики, можно сделать вывод, что исполнение 1 является наилучшим. Однако в этом исполнении выбраны дешевые измерительные приборы, которые могут не удовлетворять требованиям для улучшения характеристик. Исполнение 3 является подходящим поскольку в таком случае, улучшенный генератор будет соответствовать требуемым характеристикам и будет востребован на рынке. [15]

В результате научного исследования должен получиться метод улучшения генератора “ГС-50”, чтобы сделать характеристики более подходящими для современной электроники. В таблице 31 представлено сравнение характеристик генератора “ГС-50” и целевых характеристик нового генератора.

Таблица 31 – Сравнение характеристик

Характеристика	“ГС-50”	Улучшенный генератор	Разница
Коэффициент гармоник	0,0003%	0,00001%	В 30 раз меньше
Неравномерность напряжения	±3%	±0,1%	В 30 раз меньше
Погрешность установки частоты	±1%	±0,1%	В 10 раз меньше

Генератор с улучшенными характеристиками будет более востребован на рынке, сможет исследовать электронные компоненты лучше, поскольку будет вносить меньше искажений и не будет влиять на результаты измерений.

6 Социальная ответственность

6.1 Введение

В разделе «Социальная ответственность» рассмотрено рабочее место, на котором выполняется научное исследование. Оно должно соответствовать нормам производственной санитарии, техники безопасности, охраны труда и окружающей среды.

Данное научное исследование производится с целью исследования характеристик генератора “ГС-50”, выбора наилучших методов исследования и определения путей улучшения характеристик генератора. Улучшение требуется для того, чтобы новый генератор можно было использовать при исследовании современных электроэлементов.

Исследование проводится в учебной аудитории, оснащенный измерительными приборами. Обработка результатов и план улучшения производятся за компьютерном столом.

В разделе указаны опасные, вредные и психофизические факторы, которые могут влиять на человека, занимающегося данной научной работой. Также рассмотрено влияние на экологию, возможные чрезвычайные ситуации.

6.2 Производственная безопасность

Во время исследования на человека могут влиять следующие вредные и опасные факторы, приведенные в таблице 32. [16]

Таблица 32 – Вредные и опасные факторы при исследовании характеристик генератора

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)[X]		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1) Исследование характеристик 2) Обработка результатов	1)Повышенная температура воздуха 2)Недостаточная освещенность рабочей зоны 3)Повышенный уровень электромагнитных излучений 4)Умственное перенапряжение 5)Монотонность труда	1) Поражение электрическим током 2) Статическим электричеством 3) Короткое замыкание	ГОСТ 12.2.061-81 СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. СанПиН 2.2.4.548–96. ГОСТ 12.2.032-78. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009. ФЗ-197 СП 52.13330.2016

6.3 Анализ выявленных вредных факторов

Микроклимат производственных помещений – состояние внутренней среды помещения, оказывающее воздействия на человека.

Микроклимат характеризуют: температура воздуха, температура поверхностей, относительная влажность воздуха, скорость движения воздуха и интенсивность теплового облучения. [17]

Изменения в микроклимате могут плохо повлиять на человека. Повышенная температура воздуха приводит к перегреву тела, а в следствии к тепловому удару. Пониженная температура приводит к переохлаждению организму, а в следствии к болезням.

Поскольку работы проводимые при исследовании классифицируются как легкие, оптимальными условиями микроклимата являются: в теплый период – температура воздуха (23÷25) °С, температура поверхностей (22÷26) °С, относительная влажность воздуха (60÷40) %, скорость движения воздуха 0,1 м/с; в холодный – температура воздуха (22÷24) °С, температура поверхностей (21÷25) °С, относительная влажность воздуха (60÷40) %, скорость движения воздуха 0,1 м/с. [17]

Для нормализации микроклимата в теплый период температура помещения зависит от погодных условий вне помещения, и может не соответствовать требованиям. Для нормализации температуры в помещении требуется устанавливать кондиционеры. Если влажность выше или ниже нормальной, требуется воспользоваться осушителями или увлажнителями воздуха.

В холодный период температура помещения регулируется центральной системой отопления.

Чтобы в помещении было достаточно свежего воздуха, требуется проводить проветривание.

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

Недостаточное освещение вынуждает человека напрягать зрение, что может привести к переутомлению глаз, снижающее работоспособность.

Исследование характеристик и работа за ПК относится к зрительным работам разряда Б для помещений жилых и общественных зданий. Норма освещенности при таких условиях 300 лк.

Длина учебной аудитории составляет 7 м, ширина – 5 м, высота – 4 м. Площадь S равна 35 м^2 . В аудитории 6 светильников N , по 4 люминесцентные лампы n . Световой поток $\Phi_{\text{ст}}$ одной люминесцентной лампы составляет 750 Лм. Коэффициент использования светового потока u для используемого помещения составляет 0,8. Коэффициент запаса K равен 1,5. Коэффициент неравномерного освещения – 1,1. Освещенность помещения рассчитывается по формуле:

$$E = \frac{N \cdot n \cdot \Phi_{\text{ст}} \cdot u}{S \cdot K \cdot z} = \frac{6 \cdot 4 \cdot 750 \cdot 0,8}{35 \cdot 1,5 \cdot 1,1} = 249 \text{ Лк.}$$

Отличие от нормированного уровня вычисляется как:

$$\Delta E = \frac{E - E_{\text{норм}}}{E_{\text{норм}}} \cdot 100\% = \frac{249 - 300}{300} \cdot 100\% = -17\%.$$

Получаем, что значение минус 17 % не входит в нормированный интервал минус 10 % $\leq \Delta E \leq$ плюс 20 %. Для приведения освещенности к требуемым значениям требуется дополнительно установить лампу местного освещения. [18]

Электромагнитное излучение оказывает вредное влияние на человека в зависимости от: интенсивности излучения, частоты излучения, площади тела человека, на которое влияет излучение, продолжительность воздействия и его режим, особенностей организма, подвергнутого влиянию излучения.

Воздействие излучения может вызвать сонливость, головную боль, повышенную утомляемость,

При частоте излучения от 2 кГц до 400 кГц, напряженность электрического поля не должно превышать 2,5 В/м за рабочую смену. Напряженность магнитного поля не должна превышать 25 нТл.

Источниками излучения в аудитории являются: генератор, осциллограф, частотомер, анализатор спектра, вольтметр и персональный компьютер.

Для уменьшения воздействия электромагнитного излучения требуется использовать жидкокристаллические экраны, находиться на расстоянии от источника и делать перерывы в работе. [19]

Работа по исследованию характеристик генератора и обработки полученных измерений на персональном компьютере является монотонной и умственно напряженной.

Монотонность вызывает усталость и снижение концентрации оператора, также ему кажется, что время тянется медленнее. Умственные перегрузки вызывают усталость, раздражительность и может привести к головной боли.

Для борьбы с этими факторами требуется делать периодические перерывы, менять род деятельности, чтобы человек мог отдохнуть. [20]

Проведя анализ вредных факторов на рабочем месте было выявлено, что микроклимат соответствует требуемым нормам, также в помещении имеется возможность проветривания и установлен кондиционер, для регулирования температуры. Освещенность на рабочем месте является недостаточной для

работы, поэтому требуется установить дополнительные источники освещения. Для уменьшения влияния электромагнитного излучения приборы и компьютер были расположены на расстоянии не менее 50 см от головы оператора, также было уменьшено время воздействия излучения. Для избегания психофизических перегрузок делались перерывы на прогулку по коридору и на чай.

6.4 Анализ опасных факторов

Электрический ток является опасным для человека, проходя через организм, он оказывает тепловое, механическое, химическое и биологическое воздействие. Удар током может привести к гибели человека.

Аудитория, в которой проводилось исследование, относится к категории помещений без повышенной опасности. В аудитории все розетки имеют защитное заземление. Все провода приборов и их корпуса имеют защитное изоляционное покрытие.

Короткое замыкание возникает при контакте двух точек электрической цепи с различными потенциалами, не предусмотренное конструкцией.

Короткое замыкание может сопровождаться повреждением оборудования или возгоранием. Для предотвращения короткого замыкания требуется проверять сохранность изоляции приборов и проводов. Также используются устройства автоматического отключения.

Статическое электричество накапливается при трении материалов. В случае большой разницы потенциалов удар статическим током может вызвать ожоги.

Для предотвращения накапливания статического заряда требуется использовать индивидуальные средства защиты, такие как аэрозоль «Антистатик», непроводящие коврики, изоляционные перчатки, одежда не накапливающая статическое электричество, изоляционные боты. [21]

Аудитория снабжена заземленными розетками, изоляция приборов не нарушена. В аудитории требуется установить автоматическое отключение и защитные непроводящие коврики.

6.5 Экологическая безопасность

Само исследование не оказывает вредного влияния на окружающую среду. Поскольку целью исследования является новый прибор, рассмотрена экологическая безопасность при его утилизации.

Утилизация электроприборов производится в специализированных утилизирующих предприятиях. Прибор помещается в специальный контейнер и отправляется на предприятие. На предприятии прибор разбирается на компоненты и далее часть компонентов может быть использована повторно, часть компонентов требуется переработать, чтобы использовать снова. В случае, когда компоненты невозможно использовать повторно требуется их сжигать или производить захоронение. Данные способы утилизации накладывает особые требования по предварительной подготовке утилизируемых объектов, поскольку при сжигании в атмосферу могут выделять ядовитые вещества, а при захоронении ядовитые вещества отравляют почву.

Во время исследования может потребоваться утилизация люминесцентных ламп, которые используются для освещения аудитории, и бумаги, на которой записываются результаты исследования.

Утилизировать люминесцентные лампы необходимо в специальных пунктах, имеющих лицензию на данный вид деятельности, поскольку такие лампы содержат ядовитую ртуть. Современные методы позволяют получать ртуть в чистом виде и использовать ее повторно.

Израсходованную бумагу необходимо утилизировать не только потому, что бумажный мусор загрязняет природу, но и потому что бумага изначально делается из деревьев. Для переработки бумаги ее относят в специальные пункты.

В ТПУ утилизация лабораторного оборудования происходит довольно редко, по причине того, что при его поломке достаточно заменить один элемент. В случае утилизации приборов или их компонентов, они помещаются в специальные контейнеры и отправляются в компанию Полигон. Утилизация люминесцентных ламп осуществляется в компании Экотом. Бумага утилизируется в компании Ресурс-Томск.

6.6 Безопасность в ЧС.

Основной чрезвычайной ситуацией в аудитории, которая может возникнуть, является пожар. Возникновение пожара может произойти по причине: короткого замыкания, искрения приборов, незатушенных сигарет.

Для предотвращения пожара требуется проверять изоляционное покрытие и исправность приборов. В помещениях запрещается курить и разводить открытые огни.

В случае возникновения пожара требуется оповестить сотрудников и студентов об этом, позвонить в пожарную службу по телефону 01 или 101, организовать встречу пожарных и направить их месту возгорания. В случае, если пожар не сильный можно попробовать устранить его самостоятельно с помощью воды из пожарных кранов, либо с помощью огнетушителей. [22]

В аудитории, в которой проводится исследование оборудование проверяется на наличие неисправностей. При возникновении пожара требуется отключить питание установок и тушить пожар только порошковым или углекислотным огнетушителем, поскольку оборудование находится под напряжением до 1000 В.

6.7 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

Из трудового кодекса РФ и СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 следует, что продолжительность рабочей недели не должна превышать 40 часов при пятидневной неделе, и 48 часов при шестидневной. Продолжительность работы

за компьютером не должна превышать 6 часов за смену и должны делаться перерывы на 10-15 минут через каждые 45-60 минут работы. Перерывы сопровождаются проветриванием и гимнастикой для глаз и тела. [23][24]

Компоновка рабочего места должна быть удобной для работы. На рисунке 36 изображены зоны с оптимальным размещением рабочего места. [25][26]

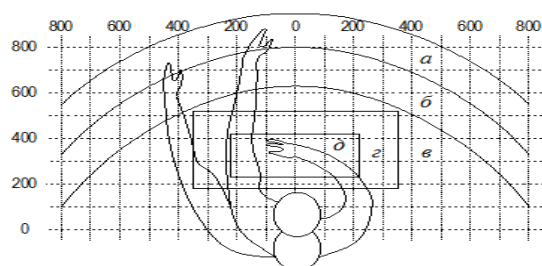


Рисунок 36 – Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости

а – зона максимальной досягаемости; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Выполнение исследования и обработка результатов выполнялась в соответствии с нормативными документами и не превышала 48 часов в неделю. При работе с приборами и компьютером каждые 60 минут делались 10-тиминутные перерывы. При проведении исследования проводилась перестановка измерительного прибора в зависимости от исследуемой характеристики. Генератор располагался в зоне б справа потому, что имелась необходимость изменения частоты и выходного напряжения. Тетрадь располагалась в зоне д для записи полученных результатов. Вольтметр располагался в зоне а посередине. Осциллограф, частотомер и анализатор спектра располагались в зоне б посередине потому, что для проведения измерений необходимо было переключать кнопки и подстраивать приборы для измерений.

6.8 Вывод

Проведя анализ аудитории, в которой проводилось исследование было выявлено следующее:

а) Требования по микроклимату соблюдаются и в теплый, и в холодный период. Зимой терморегуляция производится с помощью центральной системы отопления, летом – с помощью кондиционера.

б) В аудитории не достаточный уровень освещения, поэтому требуется снабдить рабочее место дополнительным источником местного освещения.

в) Для уменьшения влияния электромагнитного излучения были использованы жидкокристаллические экраны компьютера и приборов. Также они были расположены на достаточном расстоянии.

г) Для устранения вредного влияния психофизических факторов применялись перерывы с изменением рода деятельности.

д) Для предотвращения влияния опасных факторов проводятся периодические проверки состояние оборудования в аудитории.

е) Для обеспечения экологической безопасности производится правильная утилизация приборов, ламп и макулатуры.

ж) На случае возникновения чрезвычайной ситуации в аудитории имеется порошковый огнетушитель, также огнетушитель и пожарный кран имеется в коридоре рядом с аудиторией.

з) Рабочее место скомпоновано оптимально для удобного выполнения работы.

Заключение

В данной работе было проведено исследование метрологических характеристик генератора “ГС-50”. Были изучены методы исследования характеристик и рассмотрены варианты исполнения данных методик.

Исследовав погрешность установки частоты, были получены данные о том, что измерение должно производиться частотомером ЧЗ-57. Полученные результаты соответствуют паспортным данным генератора. Точность частотомера является достаточной и подходящей для контроля и поверки генератора “ГС-50”. Также, данным частотомером можно контролировать и более точные значения установки частоты.

Исследовав неравномерность выходного напряжения, получены данные о том, что неравномерность напряжения соответствует паспортному значению генератора “ГС-50”. Для исследования характеристики использовались вольтметр В7-40 и мультиметр Agilent 3458А. По результатам оба прибора подходят для контроля неравномерности, но для поверки этой характеристики требуется использовать мультиметр из-за его высокого показателя точности. Также мультиметр сможет измерять напряжения с меньшим значением неравномерности.

При исследовании коэффициента гармоник возникла проблема с измерением осциллографами АСК-2041 и LeCroy 64 Xs. Шумы возникающие в данных приборах не позволяют корректно оценить значение коэффициента гармоник. Для исследования подходит анализатор спектра СК4-56. Также этот прибор может измерять значения коэффициента гармоник от 0,00001 %, что является достаточным для измерения характеристики модифицированного генератора.

Для модификации генератора было принято решение о замене усилителей на те, что обладают меньшими шумами и нелинейными искажениями. Рассмотрены усилители компании Analog Device, модели AD825A, AD8597 и AD797A. Заменяв усилители в основном блоке генератора

на один из приведенных, позволит уменьшить значения коэффициента гармоник на выходе генератора. Значение коэффициента гармоник меньше 0,0002 % для генератора станет наименьшим и выделит этот генератор среди всех в мире.

Список публикаций студента

Михеенко М. О. Исследование погрешности установки выходного напряжения генератора “ГС-50” для утверждения типа средства измерения / М. О. Михеенко, М. В. Фидченко, Ю. К. Рыбин // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 04-07 декабря 2017 г., г. Томск. — Томск: Изд-во ТПУ, 2017. — [С. 63-64].

Список использованных источников

1. Дьяконов В.П. Генерация и генераторы сигналов / В. П. Дьяконов. — М.: ДМК Пресс, 2009. — 384 с.
2. About RC audio range low-distortion oscillators [Электронный ресурс] Moorepage.net – Dick Moore, 2010. – сохраненная веб-страница. – Яз. англ. – Загл. с экрана.
3. Крыльчук Ю.А. Компьютерное управление работой многоканального генератора акустических сигналов сложной формы / Ю.А. Крыльчук // СПбГЭТУ «ЛЭТИ» : ВКР бакалавра / Ю. Крыльчук, А. Перегудов. – СПб. 2016. С. 9-10.
4. Jorge Vega. Harmonic Distortion part I. Understanding Harmonic Distortion Vs Frequency Measurements in Op Amps / Jorge Vega // Texas Instruments: Article / Jorge Vega, Raj Ramanathan. – Texas – 12 P.
5. Википедия [Электронный ресурс] / Коэффициент нелинейных искажений; ред. Gromolyak; Web-мастер Сергин В. – Электрон. Дан. – М – 2007. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент_нелинейных_искажений, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 09.02.2018 г.
6. LM4562, LME49710, LME49740 [Электронный ресурс] : Application Note 1671 Gain and Linearity Testing for Precision Operational Amplifiers / Texas Instruments – Электрон. дан. – Texas: Robert A. Pease – Article – 2008. – 6 P.
7. Генератор сигналов прецизионный “ГС-50”. Техническое описание и руководство по эксплуатации. – Томск. – 1991. – 167 С.
8. ЧЗ-57. Частотомер электронно-счетный: Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЕЯ.721.943 ТО. – М. – 100 С.
9. Осциллограф. АСК-2041. Руководство по эксплуатации – М. Актаком. – 52 С.
10. Вольтметр универсальный цифровой. В7-40. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Часть 1. Тг2.710.016 ТО. – М. – 129 С.

11. Agilent Technologies. Мультиметр 3458А. Руководство по эксплуатации. 03458-90014. – США – 370 С.
12. Цифровые осциллографы LeCroy серии WaveSurfer Xs. Руководство по эксплуатации.
13. СК4-56. Анализатор спектра. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – М. – 67 С.
14. Рыбин Ю.К. Электронные устройства: Учебное пособие. – Томск: Изд-во «Печатная мануфактура». 2003. – 264 С.
15. Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: Учебно-методическое пособие. – Томск. Изд-во ТПУ. 2014. – 73 С.
16. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
17. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
18. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
19. СанПиН 2.2.4/2.1.9.055-96 Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона.
20. ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.
21. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
22. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
23. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ.
24. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.

25. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

26. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009 Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 5. Требования к расположению рабочей станции и осанке оператора.

Приложение А

(обязательное)

Раздел ВКР выполненный на иностранном языке

Research of harmonic distortion of the GS-50 oscillator.

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ61	Фидченко Михаил Витальевич		

Консультант проф. кафедры:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Рыбин Ю.К.	Д. Т. Н.		

Консультант – лингвист кафедры ИЯИК:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузнецова И.Н.			

About RC audio range low-distortion oscillators

General performance issues

Low distortion is desirable for testing high performance audio equipment and constructing AC voltage reference standards, for excitation oscillators in high-resolution AC bridges and for other high-resolution measurements at audio or sub-RF frequencies. There is an obvious trade-off between a wide frequency range, low distortion and stability. Single frequency or narrow-range spot frequency oscillators can usually be simpler and better, as in the Linear Technology design for a 10 kHz oscillator, which while not exactly simple, offers THD in the low parts per million area.

RC oscillators work by having both negative and positive feedback, with the gain from positive feedback slightly higher than the loss from negative feedback. One feedback path goes from the output of the system amplifier through a frequency-selective band-pass or band-reject filter, which enables the amplifier to oscillate only at a single frequency. Then some form of automatic level control (called ALC or AGC) is needed to stabilize the operating point of the system. This stable operating point provides output amplitude stability and low distortion, if the amplifier is a good one.

In general, the audio range oscillator's amplifier must be low noise, have good to excellent CMRR, and be relatively wide-band, with a GBW product of 5 MHz or more, preferably more, if operation at high frequencies, such as (100÷200) kHz, is desired. IC op-amps are naturals for this use, with several having wide commercial application, including the Signetics/TI NE5534 and the Harris/Intersil 2600 series. Other candidates include the Analog Devices AD797, the Burr-Brown/TI OPA134 and OPA604, and several Linear Technology parts, such as the LT1115 and LT1122. Low noise, high gain and low distortion are the key parameters. Low-noise FET-input op-amps, like the OPA134 and 604 can offer lower noise when the filter impedance is relatively high, as it is often in the case of Wien Bridge and Bridged-T designs. A FET input amplifier is essential for the very widely-used capacitively-

tuned Wien Bridge units due to the necessarily small capacitors and very large resistors needed for the range setting at low frequencies.

Any of these designs can work very well, considering good amplifiers, careful layout, precision components, and tight AGC. Not any design has proven conclusively better, although the state-variable/phase-shift design is in ascendancy in RC oscillators. Good RC oscillators still find favor with audio system designers, audiophiles, and hobbyists thanks to simplicity and low cost.

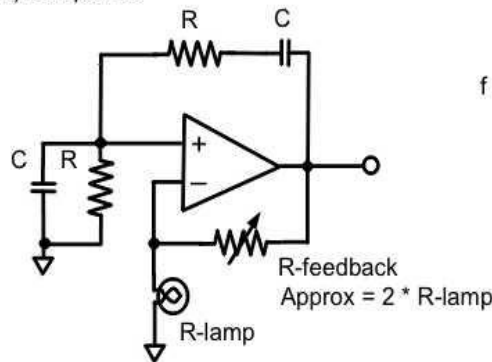
Although they are being rapidly replaced in commercial and industrial applications by Direct Digital Synthesis (DDS) designs, RC oscillators for low-frequency, low-distortion use are still popular and generally take one of a few forms that offer relative simplicity and economy of design with good overall performance:

1) Wien Bridge

This circuit is famously the heart of the HP 200 Series and is used in many others, including the Heath IG-1272 and some Sound Technology units. It uses a series arm of an R and a C connected to a parallel arm having the same R and C component values. This filter is then placed in the positive feedback loop of an amplifier, with the junction of the series and parallel arms connected to the non-inverting input. Meanwhile, an automatic gain control circuit is placed in the negative feedback loop and connected to the inverting input. Figure 1 shows using thermistor and lamp in negative feedback loop.

Wien Bridge Oscillators

a) Lamp AGC



$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

AGC can also be based on a photocell or FET.

b) Thermistor AGC

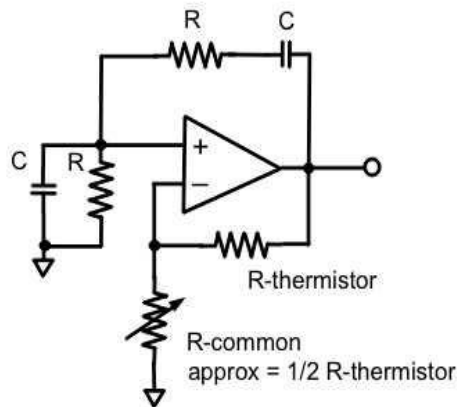


Figure A. 1. Two schemes of Wien bridge.

If the Rs and Cs are equal in the two arms, the amplitude of the tuned feedback signal through the bridge to the non-inverting input is 1/3 the amplitude (minus 9.5dB) of the output and, compared to the output, has a phase shift of 0° at:

$$f = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot R \cdot C)}, \tag{A. 1}$$

which is the frequency of oscillation. The 0 degree phase shift at the bridge's peak amplitude, coupled with the 0° phase of the amplifier, results in 0° of phase shift only at the oscillation frequency. Any other frequency has more or less phase shift, and higher attenuation, preventing oscillation.

The negative feedback network to the inverting input of the amplifier needs to have an attenuation of slightly more (a gain of slightly less) than 3, so that positive feedback slightly exceeds negative feedback to sustain oscillation. The negative

feedback also has the effect of sharpening the Wien Bridge filter, increasing its Q and increasing the slope of the phase shift through zero.

Most Wien Bridge oscillators use equal Rs and equal Cs, but a few, like the HP 651/652/653/654 Series use a series arm of R 2C and a parallel arm of 2R C, which results in an attenuation of 2 instead of 3 for the peak positive feedback signal. This lowering of needed amplifier gain may have the result of lower noise or better high-frequency stability; HP doesn't say why they used this configuration in these very wide-band units instead of the classic form.

Wien Bridges can be effectively tuned within a range either by variable capacitors or by variable resistors, or they can be tuned in discrete steps with either switched Rs or Cs as the variable elements. Ranging is then done with the other components, either Rs or Cs. Most low-cost RC audio oscillators are capacitance tuned. It seems to be easier and cheaper to make precision dual-gang tuning capacitors than to make precision dual-gang log taper potentiometers.

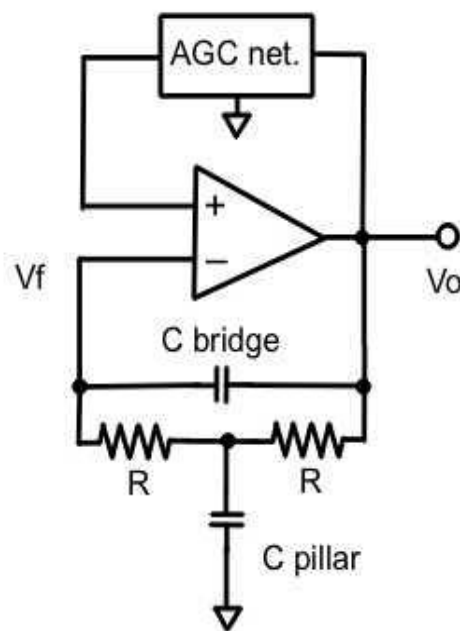
John L. Linsley Hood argued that the primary weakness of Wien Bridge oscillators was that they are limited to around 0.01% THD due to relatively high input signal levels to the amplifier and a resulting common-mode failure in the input stage(s). Jim Williams of Linear Technology designed a Wien Bridge oscillator using IC op-amps, with an op-amp driving both the common point of the bridge and AGC common to suppress the common-mode signal, and he reported a significant reduction in THD, to a level of about 3 ppm.

2) *Bridged-T*

These circuits, famously used in the Heathkit IG-18/SG-18 and successors, and the HP 239A Oscillator (and the oscillator section of the HP 339A Distortion Analyzer), place the filter circuit in the negative feedback loop of the amplifier and the AGC circuit in the positive loop. Again, the frequency of oscillation is given by equation (1), but with a twist. The filter uses a bridge capacitor, C_b, to bridge the two resistor arms, with a second pillar capacitor, C_p, from the junction of the two (equal) resistors to common. The result is a notch filter whose depth depends on the ratio of the two capacitor values.

The square root of the capacitor ratio is a multiplier and divisor of the C in the frequency formula in order for the tuning frequency to be as calculated. Placed in the negative feedback loop, the notch becomes a peak at the amplifier's output. At frequencies on either side of the notch/peak, the overall negative feedback keeps oscillation from occurring. The AGC is in the positive feedback loop, and the attenuation in that loop has to be slightly less (the gain from the loop slightly more) than the attenuation at the notch frequency in the negative loop to sustain oscillation.

Bridged-T Oscillator



$$f = \frac{1}{2 \pi R C}$$

$$C \text{ ratio} = C_p / C_b$$

$$C_p = C * \sqrt{C \text{ ratio}}$$

$$C_b = C / \sqrt{C \text{ ratio}}$$

$$V_f = V_o * [2 / (2 + C \text{ ratio})]$$

let $f = 1\text{kHz}$, $R = 1\text{kohm}$,
then $C = 159\text{nF}$.

If $C \text{ ratio} = 10$, square root
of $C \text{ ratio} = 3.162$, so
 $C_p = 503\text{nF}$, $C_b = 50.3\text{nF}$,
and $V_f = V_o / 6 = -15.6\text{dB}$

AGC network can be based
on a lamp, thermistor,
photocell, or FET.

Figure A. 2. Scheme with T-bridge.

The notch attenuation of the Bridged-T is given by

$$2 / (2 + \frac{C_p}{C_b}), \tag{A. 2}$$

that is,

$$2 / (2 + C_{ratio}). \tag{A. 3}$$

The value of the two capacitors is given by the C in the equation 1 formula, with

$$C_b = \frac{C}{\sqrt{C_{ratio}}}, \quad (\text{A. 4})$$

$$C_p = C \cdot \sqrt{C_{ratio}}. \quad (\text{A. 5})$$

In the Heath IG-18, the ratio of the capacitors is 10:1, meaning that $C_b=C/3.162$, and $C_p=C \cdot 3.162$. This ratio gives an attenuation of $2/(2+10)=1/6$, or about 15.6 dB if the capacitor values are precise. This in turn means that the gain from the positive loop has to be slightly more for oscillation.

In the HP 239A/339A, the capacitor ratio is 100:1, with an attenuation of $2/(2+100)=1/51$, or slightly more than 34dB, and $C_b=C/10$, $C_p=C \cdot 10$. Positive loop gain has to be a bit over 34dB. The higher gain and bigger ratio of the HP design means a sharper and deeper notch with higher Q, which gives better frequency selectivity, leading to lower THD if the amplifier is quiet and has intrinsically low distortion. Thanks to the very high filter gain and a very good op-amp, the HP 239 achieves extremely low THD at 1 kHz, under minus 110 dB and approaching 1 ppm.

For the Bridged-T, one in which the arm elements of the T are equal capacitors, and the unequal bridge and pillar elements are resistors. In this arrangement, the bridge resistor is the larger and the pillar resistor is the smaller, opposite to the case for the bridge and pillar capacitors described above, same calculations, just the location is reversed.

This arrangement is useful for capacitance-tuned oscillators, but does result in large resistor values at low frequencies for the typical relatively small capacitances of ganged air-variable tuning caps.

3) Phase-shift or State-variable

These circuits, including the high-performance Tektronix SG-505, employ two inverting amplifier integrator stages, each with an R C tuning section of an R input element and a C feedback (integrator) element, with one element, usually the resistor, tuning the frequency within a range, and the other element tuning the range. The sections have identical gains and time-constants, meaning equal Rs and equal Cs. Phase-shift oscillators can have more than two tuned stages, but then tuning obviously is more complicated.

In a two-integrator design, each integrator has 90° of phase shift at the tuned frequency, for 180° . Feedback is applied overall via a third inverting amplifier, with an additional 180 degrees of shift to get the required 360° of phase shift of the output back to the input at the oscillation frequency (all oscillators, like the Wien Bridge, can properly be described as phase-shift designs, but most are separated out from this class thanks to using peak or notch filters, rather than the sequential low-pass filters of this design). The frequency of oscillation is measured with equation (1).

Like the Wien bridge, the gain control feedback, usually to the third amplifier, must be such as to maintain oscillation. The amplifiers of these oscillators are generally set up for unity-gain. An advantage of the state-variable design is that it can be set up, as in Cordell's design, to allow independent fine-tuning of frequency for each range by changing one feedback resistor value per range. These oscillators are capable of very low distortion levels of anywhere from 2 ppm to 20 ppm at audio frequencies, depending on amplifier quality and noise levels, and on the performance of the AGC loop.

As noted by Bob Cordell, an intrinsic advantage is that the output can be taken from the second integrator stage, yielding a built-in 2nd-order low-pass tracking filter having minus 12 dB/octave response above the frequency of oscillation, which greatly reduces both distortion and noise in the output.

4) *Twin-T*

These circuits are almost never used in commercial designs because they require three capacitors and three resistors for tuning, meaning six parts per range rather than four for the other designs, with a consequent increase in tuning complexity. Not economical, not practical, and no particular performance benefit. Twin-T designs are generally better suited to manual tuning, but since the performance doesn't justify the complexity, they are rarely used.

Oddly, though, HP used a Twin-T notch filter in a THD analyzer, the 4333A, a unit I've never seen, and which may not have had much market life -- quite a

complicated tuning system was used in its design. This unit was an all-discrete transistor unit that followed the 334 and preceded the 339.

Automatic Gain Control (AGC)

Incandescent lamp based

AGC is essential in a low-distortion oscillator and is often controlled by using an incandescent lamp as either a ground leg resistor or a feedback resistor in a feedback loop. A lamp is a positive temperature coefficient (PTC) resistor. As the output increases, the level of the feedback current increases, the lamp gets hotter, its resistance increases, and the amplifier gain goes up or down, as needed by the particular configuration. Very elegant and quite effective, and also economical. THD performance can be as good as 0.01% or a bit better at fairly high output levels.

Thermistor based

Another common simple AGC system is to use a thermistor, a negative temperature coefficient (NTC) resistor, as one leg of the feedback loop. Thermistor-stabilized oscillators include the well-known GR 1310-A. With the thermistor, as the signal current increases, its resistance decreases, raising or lowering the gain as needed by the configuration. Both lamps and thermistors are effective, but being first-order systems, directly controlled by the output signal level, they are limited in the tightness of the level control they can achieve. Thermistors have the added disadvantage of being sensitive to ambient temperature conditions, complicating stability unless the heating due to signal current is high enough to swamp ambient effects.

Thermistors have the added liability of having to be physically extremely small and fragile in order for the signal current to heat them enough to result in a significant resistance change. And when small, they are even more sensitive to ambient effects. GR got around this problem by encapsulating tiny thermistors in vacuum bulbs, much like lamps. This has two advantages -- one, they are effectively isolated from ambient temperature, and two, they have a longer thermal time constant thanks to the absence of significant heat conduction into air.

In general, performance is about the same as a lamp type AGC unless special techniques are used. John L. Linsley Hood designed one oscillator using a thermistor and a Wien Bridge, tuned with a two-gang potentiometer, that achieved THD less than 0.005 % in the 100 Hz to 10 kHz range. He also designed a unit that employed a multiplier type of feedback with a thermistor that balanced positive and negative feedback from a split-load phase inverter. This design achieved very low THDs of less than 0.0003 % in the 100 Hz to 10 kHz range. This elegant design did use a Twin-T filter circuit with elements switched for spot frequency use, continuous tuning being impractical.

JFET based

Today, many AGC systems use the channel resistance of JFETs as gain control elements, sometimes as part of a multiplier system in the feedback loop of an op-amp, as in Bob Cordell's design, where a balance of positive and negative feedback is maintained such that very small changes in output signal amplitude result in a shift in the balance of the two types of feedback in the gain control stage. The control is by a DC signal derived from the AC output by rectification and filtering, and one or more stages of integration and/or amplification to achieve high loop gain and very tight control. As an N-channel JFET's gate-source voltage becomes less negative and approaches zero, the drain-source resistance decreases. When the FET is placed in the common leg of a feedback network, this means an increase in output will drive the gate-source voltage toward zero, reducing the overall gain, lowering the output.

JFETs work very well when the signal level controlled by the channel resistance is low, generally less than a few hundred millivolts, with lower being better; and when local feedback from drain to gate or from output signal to gate is used to reduce channel resistance modulation effects -- see Jim Williams' notes on this effect. Bob Cordell says the key to low THD is to keep the signal level on the FET's drain low, well under 100 millivolts, which is not usually the case in units like the HP 204C/D, which only manage optimized THDs of around 0.05 %, otherwise they are very capable FET-stabilized wide-range oscillators.

In general, THD performance of well-designed JFET-controlled oscillators can be in 2 ppm to 200 ppm range (0.0002 % to 0.02 %), depending on operating range and other details, as noted previously.

Photocell based

Other AGC systems use a Cadmium-Sulphide (CdS) photocell as a purely resistive feedback control element, with its resistance controlled by a lamp or LED powered by a DC signal derived from the AC output signal. The DC signal is conditioned by one or more amplifiers and/or integrators. Unlike a JFET, the photocell is purely resistive, and is free from internal modulation effects (although the DC has to be fairly well filtered and have low signal ripple to avoid modulating the photocell, especially when driven by an LED).