

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

---

Институт неразрушающего контроля \_\_\_\_\_

Направление подготовки приборостроение \_\_\_\_\_

Кафедра физических методов и приборов контроля качества \_\_\_\_\_

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

| Тема работы                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Разработка средства измерения ёмкости электрического кабеля на основе фазометрического метода |

УДК 621.389.694.3.011.4

Студент

| Группа | ФИО                            | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------------|---------|------|
| 1БМ4Б  | Киселёв Евгений Константинович |         |      |

Руководитель

| Должность | ФИО                        | Ученая степень, звание            | Подпись | Дата |
|-----------|----------------------------|-----------------------------------|---------|------|
| Доцент    | Фёдоров Евгений Михайлович | Кандидат технических наук, доцент |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность                       | ФИО                        | Ученая степень, звание      | Подпись | Дата |
|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------|------|
| Заведующий кафедрой менеджмента | Чистякова Наталья Олеговна | Кандидат экономических наук |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО                        | Ученая степень, звание    | Подпись | Дата |
|-----------|----------------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент    | Анищенко Юлия Владимировна | Кандидат технических наук |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Зав. кафедрой                                   | ФИО                        | Ученая степень, звание                       | Подпись | Дата |
|-------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------|---------|------|
| Физических методов и приборов контроля качества | Суржиков Анатолий Петрович | Доктор физико-математических наук, профессор |         |      |

Томск – 2016 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

| Код<br>результат                           | Результат обучения<br>(выпускник должен быть готов)                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b><i>Профессиональные компетенции</i></b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| P1                                         | Применять глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания для создания и обработки новых материалов.                                                                                                                                                                                 |
| P2                                         | Применять глубокие знания в области современных технологий и машиностроительного производства для решения междисциплинарных инженерных задач.                                                                                                                                                        |
| P3                                         | Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа, связанные с созданием и обработкой материалов и изделий, с использованием системного анализа и моделирования объектов и процессов машиностроения.                                                                                         |
| P4                                         | Разрабатывать технологические процессы, проектировать и использовать новое оборудование и инструменты для обработки материалов и изделий, конкурентоспособных на мировом рынке приборостроительного производства.                                                                                    |
| P5                                         | Проводить теоретические и экспериментальные исследования в области современных технологий обработки материалов, нанотехнологий, создания новых материалов в сложных и неопределённых условиях.                                                                                                       |
| P6                                         | Внедрять, эксплуатироваться и обслуживать современные высокотехнологичные линии автоматизированного производства, обеспечивать их высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на приборостроительном производстве выполнять требования по защите окружающей среды. |
| <b><i>Универсальные компетенции</i></b>    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| P7                                         | Использовать глубокие знания по проектному менеджменту для ведения инновационной инженерной деятельности с учётом юридических аспектов защиты и интеллектуальной собственности.                                                                                                                      |
| P8                                         | Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности.                                                                                                         |
| P9                                         | Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы, состоящей из специалистов различных направлений и квалификация, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.                                           |
| P10                                        | Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах устойчивого развития.                                                                                                                                   |
| P11                                        | Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.                                                                                                                                                                                     |

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

---

Институт неразрушающего контроля \_\_\_\_\_

Направление подготовки приборостроение \_\_\_\_\_

Кафедра физических методов и приборов контроля качества \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      \_\_\_\_\_ (Дата)      Суржиков А.П.  
(Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

| Группа | ФИО                            |
|--------|--------------------------------|
| 1БМ4Б  | Киселёв Евгений Константинович |

Тема работы:

|                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Разработка средства измерения ёмкости электрического кабеля на основе фазометрического метода |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Исходные данные к работе</b><br>(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.).        | Коаксиальный радиочастотный кабель РК 75 2-11А. Измерения будут производиться в непрерывном процессе.                                                             |
| <b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b><br>(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). | Определение метрологических характеристик теоретически и экспериментально и конструирование первичного преобразователя. Разработка измерительной схемы и прибора. |
| <b>Перечень графического материала</b><br>(с точным указанием обязательных чертежей)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Первичный преобразователь; цифровой блок; фазометр.                                                                                                               |
| <b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b><br>(с указанием разделов)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                   |
| <b>Раздел</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>Консультант</b>                                                                                                                                                |
| Финансовый Менеджмент                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Чистякова Н.О.                                                                                                                                                    |
| Социальная ответственность                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Анищенко Ю.В.                                                                                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                   |
| <b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                   |
| 3. Методы измерения ёмкости                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                   |

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

**Задание выдал руководитель:**

| Должность | ФИО                        | Ученая степень, звание            | Подпись | Дата |
|-----------|----------------------------|-----------------------------------|---------|------|
| Доцент    | Фёдоров Евгений Михайлович | Кандидат технических наук, доцент |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                            | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------------|---------|------|
| 1БМ4Б  | Киселёв Евгений Константинович |         |      |

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

| Группа | ФИО                              |
|--------|----------------------------------|
| 1БМ4Б  | Киселёву Евгению Константиновичу |

|                     |                                  |                           |                                                         |
|---------------------|----------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------|
| Институт            | институт неразрушающего контроля | Кафедра                   | кафедра физических методов и приборов контроля качества |
| Уровень образования | магистратура                     | Направление/специальность | приборостроение                                         |

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

|                                                                                                                                      |                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих | Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску<br>Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

2. Нормы и нормативы расходования ресурсов

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

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ
2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

| Должность                       | ФИО                        | Ученая степень, звание      | Подпись | Дата |
|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------|------|
| Заведующий кафедрой менеджмента | Чистякова Наталья Олеговна | Кандидат экономических наук |         |      |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО                            | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------------|---------|------|
| 1БМ4Б  | Киселёв Евгений Константинович |         |      |

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

| Группа | ФИО                              |
|--------|----------------------------------|
| 1БМ4Б  | Киселёву Евгению Константиновичу |

|                            |                                  |                                  |                                                         |
|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>Институт:</b>           | институт неразрушающего контроля | <b>Кафедра</b>                   | кафедра физических методов и приборов контроля качества |
| <b>Уровень образования</b> | магистратура                     | <b>Направление/специальность</b> | приборостроение                                         |

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

|                                                                  |                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Характеристика объекта исследования и области его применения. | Объект исследования: измеритель ёмкости кабеля.<br>Оборудование для проведения исследований: измерительные приборы, паяльная станция, различные генераторы сигналов. |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

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

|                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1. Производственная безопасность</b><br>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.<br><br>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения. | Вредные факторы:<br>- повышенный уровень электромагнитного и электростатического полей.<br>- повышенный уровень шума.<br>- повышенная температура внешней среды.<br>- недостаточная освещённость.<br>- повышенная концентрация вредных веществ.<br><br>Опасные факторы:<br>- опасность поражения электрическим током.<br>- ожоги при контакте с оголёнными токоведущими линиями и при не аккуратном обращении с паяльником. |
| <b>2. Экологическая безопасность</b>                                                                                                                                                                                                          | Вредных факторов оказывающих негативное влияние на окружающую среду при разработке устройства не наблюдается.                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b><br>– перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;<br>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС.                                                      | Вероятно следующее ЧС: пожар.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.</b>                                                                                                                                                                        | К исследовательской работе не допускаются беременные женщины и люди имеющие болезни связанные с дыхательной системой.                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

**Задание выдал консультант:**

| Должность | ФИО                        | Учёная степень,<br>звание    | Подпись | Дата |
|-----------|----------------------------|------------------------------|---------|------|
| Доцент    | Анищенко Юлия Владимировна | Кандидат<br>технических наук |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                            | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------------|---------|------|
| 1БМ4Б  | Киселёв Евгений Константинович |         |      |

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа \_\_\_\_\_ 114 \_\_\_\_\_ с., \_\_\_\_\_ 47 \_\_\_\_\_ рис., \_\_\_\_\_ 28 \_\_\_\_\_ табл.,  
\_\_\_\_\_ 23 \_\_\_\_\_ источника, \_\_\_\_\_ 3 \_\_\_\_\_ прил.

Ключевые слова: измерение ёмкости, методы измерения ёмкости, смещение фазы, датчик, коаксиальный кабель, погонная ёмкость, волновое сопротивление, цифровая обработка, микроконтроллер.

Объектом исследования является коаксиальный радиочастотный кабель РК 75 2-11А с волновым сопротивлением  $75 \pm 7.5 \text{ Ом}$ .

Цель работы — рассчитать, спроектировать, построить и получить метрологические характеристики цифрового прибора для измерения ёмкости кабеля.

В процессе исследования проводились разработки блоков измерительной схемы прибора, для измерения ёмкости.

В результате исследования была разработана схема устройства способного измерять от 1 до 500 пф.

Область применения: кабельная промышленность.

В будущем планируется заключение договоров с предприятиями на производство устройств.

## Оглавление

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Введение.....                                                                  | 13 |
| 2. Объект измерения.....                                                          | 14 |
| 2.1 Конструкция кабелей связи.....                                                | 14 |
| 2.1.1 Виды кабелей.....                                                           | 14 |
| 2.1.2 Наименования элементов кабельной цепи.....                                  | 15 |
| 2.2 Параметры кабельной цепи.....                                                 | 18 |
| 2.3 Рабочая ёмкость кабеля.....                                                   | 19 |
| 3. Методы измерения ёмкости.....                                                  | 23 |
| 3.1 Методы непосредственной оценки.....                                           | 24 |
| 3.1.1 Автогенератор как источник гармонических колебаний.....                     | 24 |
| 3.1.1.1 Измерение ёмкости по изменению частоты измерительного автогенератора..... | 29 |
| 3.1.2 Метод преобразования ёмкости в сдвиг фаз.....                               | 33 |
| 3.2 Методы сравнения.....                                                         | 35 |
| 3.2.1 Мостовой метод измерения ёмкости.....                                       | 35 |
| 4. Методы измерения сдвига фазы.....                                              | 37 |
| 4.1 Компенсационный метод.....                                                    | 37 |
| 4.2 Суммарно-резонансный метод.....                                               | 38 |
| 4.3 Методы измерения с помощью осциллографа.....                                  | 39 |
| 4.3.1 Метод линейной развёртки.....                                               | 39 |
| 4.3.2 Метод эллипса.....                                                          | 39 |
| 4.4 Метод преобразования временного интервала в напряжение.....                   | 41 |
| 5. Выбор метода и структурной схемы.....                                          | 44 |
| 6. Конструктивно-технологическая часть.....                                       | 45 |
| 6.1 Выбор первичного преобразователя.....                                         | 45 |
| 6.2 Составление уравнение преобразования и определение чувствительности....       | 50 |
| 6.3 Расчёт элементов устройства.....                                              | 51 |
| 6.3.1 Расчёт фазовращателя.....                                                   | 51 |
| 6.3.2 Расчёт компаратора.....                                                     | 53 |
| 6.3.3 Преобразование сдвига фаз в промежуток времени.....                         | 55 |
| 6.3.4 Цифровой блок.....                                                          | 56 |
| 6.3.5 Программное обеспечение.....                                                | 57 |

|                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.3.6 Генератор.....                                                                                                              | 58  |
| 6.3.7 Блок питания.....                                                                                                           | 60  |
| 6.3.5 Изготовление фазометра.....                                                                                                 | 62  |
| 6.3.6 Изготовление цифрового блока.....                                                                                           | 63  |
| 6.3 Сборка устройства.....                                                                                                        | 65  |
| 7. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности.....          | 68  |
| 7.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....                                                                       | 68  |
| 7.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....                               | 68  |
| 7.3 FAST-анализ.....                                                                                                              | 69  |
| 7.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....                                                                             | 74  |
| 7.5 Инициация проекта.....                                                                                                        | 76  |
| 7.6 Планирование управления научно-техническим проектом.....                                                                      | 78  |
| 7.6.1 Иерархическая структура работ проекта.....                                                                                  | 78  |
| 7.6.2 Контрольные события проекта.....                                                                                            | 78  |
| 7.6.3 План проекта.....                                                                                                           | 79  |
| 7.6.4 Бюджет научного исследованиями.....                                                                                         | 81  |
| 7.7 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования..... | 87  |
| 8. Социальная ответственность.....                                                                                                | 90  |
| 8.1 Производственная безопасность.....                                                                                            | 91  |
| 8.1.1 Анализ вредных и опасных факторов при разработке устройства.....                                                            | 91  |
| 8.2 Экологическая безопасность.....                                                                                               | 94  |
| 8.3 Безопасность в ЧС.....                                                                                                        | 94  |
| 8.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....                                                              | 95  |
| 8.5 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.....                                                                  | 96  |
| Заключение.....                                                                                                                   | 97  |
| Список литературы.....                                                                                                            | 98  |
| Список публикаций.....                                                                                                            | 100 |
| Приложение Б.....                                                                                                                 | 101 |
| Приложение В.....                                                                                                                 | 102 |
| Приложение Г.....                                                                                                                 | 103 |

## 1. Введение

Измерение ёмкости кабеля является неотъемлемой частью во всей кабельной промышленности. Ёмкость зависит от толщины проводников, длины кабеля, материала изоляции и прочих факторов. Как известно, ёмкость, способна пропускать переменный электрический ток. При этом от частоты тока зависит сопротивление, которое емкость оказывает переменному току. Чем она выше — тем сопротивление меньше. В следствии чего, вместе с сопротивлением самих проводников, стоит также учитывать и емкость, что является важнейшей характеристикой кабеля.

Целью данной выпускной квалификационной работы является системный анализ методов измерения ёмкости (в частности ёмкости кабеля), подробный анализ измерения сдвига фаз, проектирование устройства для измерения ёмкости и сдвига фаз сигналов и его непосредственная разработка. Данный прибор в будущем будет являться важной частью в процессе производства кабельной продукции. Личный вклад в развитие данного проекта является физическая реализация устройства, расчёт схемы, построение опытного образца и проведение экспериментов с установкой метрологических характеристик.

Данный метод позволяет контролировать ёмкость кабеля ещё на стадии нанесения изоляции. Что делает процесс экономически выгодным с финансовой точки зрения. Также это дает возможность изначально задавать необходимую емкость и контролировать постоянство её значения по всей длине кабеля.

Объектом исследования является коаксиальный кабель РК-75-2-11А, а метод измерения ёмкости кабеля является фазометрическим.

На данный момент существует рабочий образец способный измерять ёмкость в пределах от 1 до 500 пф. Устройство имеет блок питания, генератор, основной аналоговый и цифровой блоки. Цифровой блок основан микроконтроллере STM32F103 и используется для математической обработки сигнала и вывода результата измерения на ЖК экран. За период существования прибора, были получены следующие характеристики: зависимости выходного напряжения от смещения фазы сигналов, зависимости от разных частот сигналов, максимальное выходное напряжение, входное сопротивление. Из достоинств данного устройства можно отметить лёгкую настройку, простоту установки для проведения измерения, возможность установки нуля прямо во время работы, высокую точность и низкую стоимость.

## **2. Объект измерения**

Объектом измерения в данной работе является электрическая ёмкость, которая представляет собой характеристику проводника, меру его способности накапливать электрический заряд. Электрическая ёмкость может существовать в нескольких системах, таких как плоский конденсатор, два параллельных проводника, проволока параллельная стене, две параллельные компланарные полосы, шар вблизи стены, круглый диск, коаксиальная линия. Подробный анализ в этой работе будет посвящён системе «коаксиальная линия», так как она является физической моделью исследуемого кабеля.

### **2.1 Конструкция кабелей связи**

#### **2.1.1 Виды кабелей**

Из-за возникновения большого количества различной информационной аппаратуры и техники, появилась проблема передачи информации с наименьшими потерями. В ходе решения этой задачи, кабельная промышленность внесла наибольший вклад в её развитие. Это объясняется тем, что большая часть потерь информации происходит именно при передачи её по линиям связи. Сегодня, предприятия производящие кабели связи, предлагают огромный выбор видов кабелей связи, каждый из которых применяется для различных целей.

Для осуществления различных видов электрической связи требуются цепи образованные двумя проводниками. Исключением служат лишь кабели для сигнализации и блокировки, используемые по однопроводной системе. Передача информации телефонных разговоров и телевизионных программ по однопроводным цепям не представляется возможным, так как качество связи при этом было бы совершенно неудовлетворительным.

В зависимости от взаимного расположения проводников физические цепи связи разделяются на симметричные и коаксиальные. Если оба проводника одной цепи выполнены из проволоки одинакового диаметра, имеют изоляцию одинаковой толщины и расположены так, что между ними можно провести плоскость симметрии (рисунок 2), то цепь является симметричной. Если же оба проводника цепи выполнены в виде соосных цилиндров, т.е. в поперечном сечении имеют форму концентрических окружностей (рисунок 1), то цепь считается несимметричной и в этом случае называется коаксиальной.



Рисунок 1 - Коаксиальный кабель



Рисунок 2 - Симметричный кабель

### 2.1.2 Наименования элементов кабельной цепи

В отличие от цепей воздушной линии, проводники в кабелях расположены в непосредственной близости друг от друга, поэтому во избежание контакта между ними, они должны быть изолированы на всём протяжении цепи. В случае симметричных цепей каждый проводник покрывается слоем изоляции отдельно.

Проводники, образующие коаксиальную цепь, не изолируются каждый в отдельности. При коаксиальном расположении проводников достаточно поместить изоляционную прослойку между ними. Поэтому за проводниками коаксиальной цепи сохраняется их первоначальное название «проводник». При этом различаются внутренний и внешний проводники коаксиальной цепи, а понятие «жила», принятое при рассмотрении симметричных кабелей, в данном случае не применимо.

Элементарные группы - это изолированные жилы, образующие

симметричную цепь, располагаются не параллельно, а скручиваются между собой с целью уменьшения взаимных влияний между отдельными цепями. Скручивание ставит обе жилы одной цепи в одинаковые условия относительно любых внешних помех и облегчает их взаимное перемещение при изгибах кабеля.

Скрученные вместе изолированные жилы носят название элементарной группы жил или просто группы. В одну группу могут быть скручены жилы не только одной цепи, но также двух, трех и даже четырёх различных цепей. Иногда с целью увеличения защищённости цепей от помех скрученную группу заключают в металлический экран. В этом случае она называется экранированной группой.

Сердечник кабеля - составляющие кабель элементарные группы скручиваются между собой, образуя сердечник кабеля. Цель скрутки групп в сердечник — придать кабелю соответствующую механическую устойчивость и гибкость, а также повысить помехозащищённость цепей.

При скрутке групп в сердечник местоположение каждой группы относительно любого направления изгиба периодически изменяется. Поэтому при изгибе кабеля произойдёт лишь частичное перемещение отдельных участков каждой группы по длине кабеля относительно его оси симметрии.

Скрученный сердечник, как правило, обматывается в несколько слоев бумагой или другим изоляционным материалом. Такая обмотка, называемая поясной изоляцией, предназначена, во первых, для механической защиты и скрепления сердечника с тем, чтобы не изменялась его форма в процессе изготовления кабеля, и, во вторых, для защиты изоляции жил от перенапряжений, вызываемых Э.Д.С. Иногда термином «сердечник» обозначается совокупность скрученных групп, покрытых поясной изоляцией.

В симметричных кабелях, состоящих всего лишь из одной элементарной группы, понятия «группа» и «сердечник» совпадают и используются в зависимости от обстоятельств. Применительно к конструкции коаксиальных кабелей понятие «сердечник» имеет смысл только в том случае, когда скручивается несколько коаксиальных элементов между собой или вместе с симметричными группами.

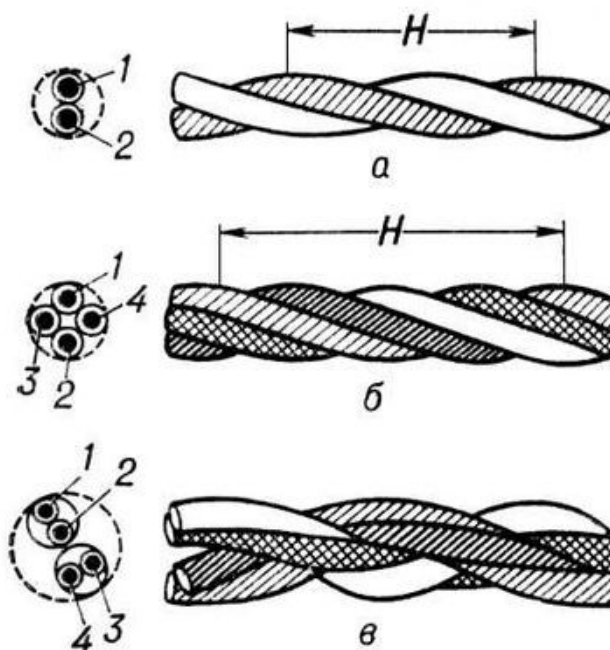


Рисунок 3 - Разрез симметричных кабелей, скрученных — в пары — в звёздные четвёрки (б); — в двойные парные (в);

где 1, 2, 3, 4 — жилы;  $H$  — шаг скрутки.

Защитные оболочки — это обязательно расположенные поверх сердечника кабеля одна или несколько оболочек, назначением которых является защита элементов сердечника от всевозможных внешних воздействий, которые могут препятствовать нормальному осуществлению связи, ухудшить качество или вообще нарушить и её. Внешние воздействия бывают механические, химические, физические и электрические. Оболочки, предохраняющие жилы кабеля от указанных воздействий, носят общее название защитных оболочек и, в свою очередь, разделяются на влагозащитные и на наружнозащитные оболочки, выполняющие функции защиты от механических повреждений и от разрушений, вызываемых химическими процессами.

Кабели бывают одножильными и многожильными. В одножильном проводнике одна монолитная проволока образует проводник. Кабель с такими проводниками относительно жесткий и используется при фиксированном монтаже, где существенные и частые изгибы исключены. Типичное приложение одножильных сигнальных кабелей - телефонная разводка внутри помещения. Это самый экономичный способ получить нужные квадраты сечения при прочих равных условиях.



Рисунок 4 - Конструкция одножильного и многожильного кабелей

Таким образом, конструктивно любой кабель связи состоит и из двух основных частей: сердечника и защитных оболочек.

## 2.2 Параметры кабельной цепи

Основными характеристиками, определяющими величину тока и напряжения в каждой точке цепи, являются четыре первичные параметры передачи: активное электрическое сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$ , емкость  $C$  и проводимость изоляции  $G$ . Следовательно, кабель связи представляет собой однородную линию с равномерно распределенными параметрами. Все эти параметры равномерно распределены по всей длине цепи.

При распространении электромагнитной волны по длинной кабельной линии напряжение между проводниками и ток в проводниках не остаются постоянными, а меняются по абсолютному значению и по фазе. Отношения между током и напряжением в любой точке цепи и током и напряжением в начале цепи зависят от двух параметров — волнового сопротивления  $Z_B$  и коэффициента распространения  $\gamma$ , которые носят название вторичных параметров цепи. Они являются основными показателями, характеризующими электрические свойства цепи. Вторичные параметры передачи являются функциями первичных параметров.

Волновое сопротивление определяется отношением напряжения к току в любой точке цепи и выражается через первичные параметры по формуле:

$$Z_B = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = |Z_B| \cdot e^{-j\varphi_B} \quad (1)$$

где  $R$  — активное сопротивление Ом/км,  $L$  — индуктивность Г/км,  $C$  — емкость Ф/км,  $G$  — проводимость См/км.

В общем виде волновое сопротивление является комплексной величиной. Для всех однородных цепей  $R/L > G/C$ , поэтому угол волнового сопротивления отрицателен.

Для частот выше 10 кГц, волновое сопротивление определяется по следующей упрощенной формуле:

$$Z_B = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

### 2.3 Рабочая ёмкость кабеля

Если к двум проводникам приложить напряжение, то на них появятся равные по количеству, но разные по знаку заряды. Величина этих зарядов пропорциональна напряжению между проводниками:

$$Q = CU \quad (3)$$

Отношение заряда, внесенного на проводник, к потенциалу, до которого зарядился проводник под действием этого заряда, называется электрической емкостью:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (4)$$

Практическая единица емкости — фарада — очень большая величина, и поэтому обычно емкость измеряют в микрофарадах ( $10^{-6}$  ф), нанофарадах ( $10^{-9}$  ф) и пикофарадах ( $10^{-12}$  ф) или в абсолютной системе единиц — в сантиметрах.

$$\left( 1 \text{ см} = \frac{1}{9} \cdot 10^{-11} \text{ к/в} = 1,11 \cdot 10^{-12} \text{ ф} \right) \quad (5)$$

Емкость цилиндрического конденсатора (каким является электрический кабель в металлической оболочке) с радиусами электродов (внутреннего  $r$  и внешнего  $R$ ) и длиной  $l$ :

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \frac{R}{r}} \quad (6)$$

т. е. емкость конденсатора данных геометрических размеров и формы прямо пропорциональна  $\epsilon$  диэлектрика. Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  нейтральных изоляционных материалов не зависит от частоты и слабо зависит от температуры, уменьшаясь при уменьшении последней вследствие теплового расширения вещества. У дипольных изоляционных материалов при повышении частоты

переменного напряжения величина  $\varepsilon$  диэлектрика сначала также остается неизменной, но начиная с некоторой критической частоты, когда поляризация уже не успевает полностью установиться за один полупериод,  $\varepsilon$  начинает уменьшаться, приближаясь при весьма высоких частотах к значениям, характерным для нейтральных изоляционных материалов. В области низких температур, когда вещество обладает большой вязкостью, ориентация дипольных молекул вдоль поля затруднена; при повышении температуры и уменьшении вязкости возможность ориентации диполей облегчается, вследствие чего  $\varepsilon$  возрастает. При сравнительно высоких температурах вследствие усиления тепловых колебаний молекул степень ориентации молекул снижается, что приводит к уменьшению  $\varepsilon$ . Поле заряженного провода (жилы) вызывает перераспределение зарядов на всех соседних с ним проводах. Потенциал заряженного провода обусловлен зарядом этого провода и зарядами, индуцированными им на других проводах. Определение емкости провода в зависимости от формы и расположения смежных с ним проводов связано со значительными математическими трудностями. Поэтому обычно пользуются для расчетов приближенными формулами (6).

Эквивалентное значение диэлектрической проницаемости сложной (комбинированной) изоляции определяют по соотношению объемов составных ее частей. При непрерывной и одинаковой по длине изоляции соотношение объемов можно заменить соотношением площадей поперечного сечения. Для комбинированной двухслойной изоляции (7).

$$\varepsilon_{\text{э}} = \frac{\varepsilon_1 V_1 + \varepsilon_2 V_2}{V_1 + V_2} \quad (7)$$

Для двухслойной изоляции, комбинированной в радиальном направлении, эквивалентные значения

$$\varepsilon_{\text{э},p} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \lg \frac{R}{r}}{\varepsilon_2 \lg \frac{r_1}{r} + \varepsilon_1 \lg \frac{R}{r_1}} \quad (8)$$

Наиболее просто определяется емкость коаксиального кабеля, которую можно рассматривать как емкость цилиндрического конденсатора, равную

$$C_p = \frac{\varepsilon \cdot 10^{-9}}{18 \ln \frac{D}{d}} \quad (9)$$

где  $\varepsilon$  — относительная, эквивалентная диэлектрическая проницаемость изоляционного слоя;  $d$  и  $D$  — диаметр внутреннего и внешнего проводников соответственно.

Эта емкость для данного кабеля является рабочей емкостью, т.е. емкостью действующей цепи (в рабочих, эксплуатационных условиях).

Сложнее понятие рабочей емкости для симметричных цепей. Уже в экранированной паре (рисунок 5,б) приходится считаться с тремя частичными емкостями: емкостью между проводами  $C_{12}$  и емкостями каждого провода относительно экрана  $C_{10}$  и  $C_{20}$ . Рабочая емкость цепи в этом случае представляет собой, как следует из рисунка, параллельное соединение емкости  $C_{12}$  и суммарной емкости, состоящей из последовательно включенных емкостей  $C_{10}$  и  $C_{20}$ , т.е.

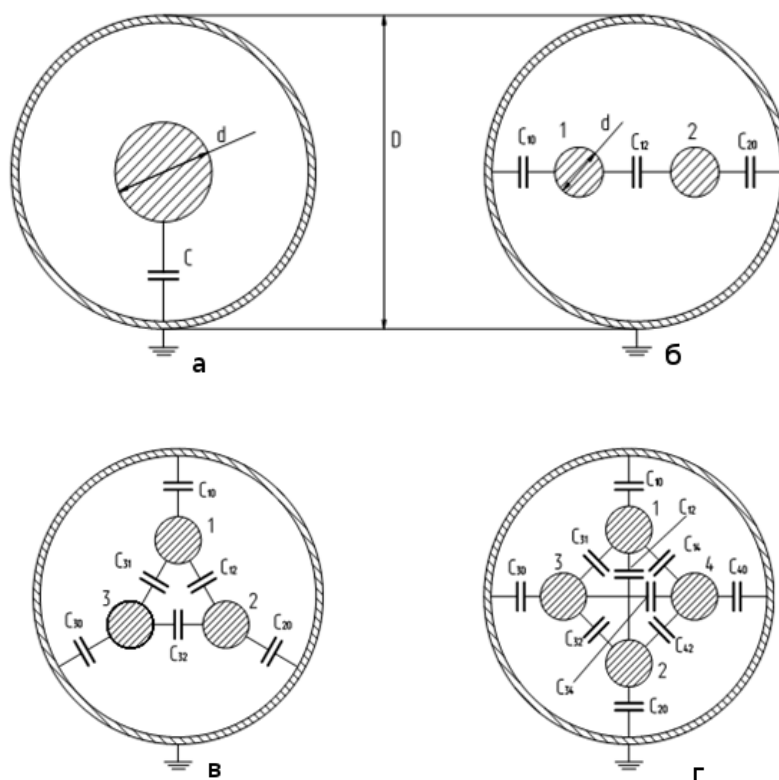


Рисунок 5 - Схемы емкостей в кабелях  
а – одножильный кабель; б – экранированная пара; в – трехжильный экранированный кабель; г – экранированная четверка.

$$C_p = C_{12} + \frac{C_{10} \cdot C_{20}}{C_{10} + C_{20}} \quad (10)$$

где  $C_{10}$ ,  $C_{20}$ ,  $C_{30}$  и  $C_{40}$  — частичные емкости на землю;  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{14}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{24}$  и  $C_{34}$  — частичные емкости между жилами.

При включении или выключении постоянного напряжения или вообще при изменениях величины приложенного напряжения возникает емкостный ток. Длительно емкостный ток существует только в изоляции, находящейся под воздействием переменного напряжения. Ток проводимости существует все время, пока к изоляции приложено напряжение постоянного тока.

Емкостное сопротивление — это сопротивление, которое оказывает переменному току конденсатор:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (11)$$

В силу изложенного для измерения рабочей и частичных емкостей коаксиального и симметричного кабелей могут применяться различные мостовые схемы. Простейшими из них являются мосты, допускающие измерения емкости при наличии одного заземленного полюса (например, емкость коаксиального кабеля). Более сложны мосты с симметричным выходом, обеспечивающие непосредственное измерение рабочей емкости симметричных кабелей. Частичные емкости симметричных кабелей измеряются в тех случаях, когда проводятся специальные исследования. Измерения этих емкостей могут быть выполнены путем комбинирования на несимметричных мостах.

Чаще всего рабочая емкость цепей измеряется на частоте 800 или 1000 Гц, так как на этих частотах она нормируется в технических требованиях на кабели.

### **3. Методы измерения ёмкости**

Понятие емкости было рассмотрено ранее. Существуют некоторые явления, связанные с данной физической величиной. Во-первых, емкость есть отношение количества электричества, внесенного на проводник, к приложенному напряжению (4). С емкостью также связано явление резонанса.

По основному закону электротехники напряжение на конденсаторе не изменяется мгновенно, а именно

$$U = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (12)$$

где  $t$  - время, в течение которого происходит изменение потенциала;  $RC$  – постоянная времени.

Исходя из рассмотренных явлений и законов, можно выделить следующие методы измерения емкости (рисунок 6).

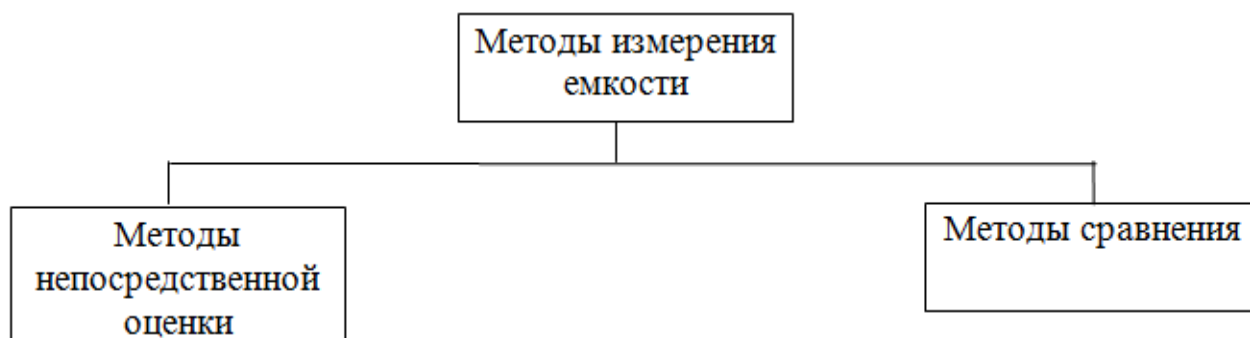


Рисунок 6 - Классификация методов измерения емкости

### **3.1 Методы непосредственной оценки**

#### **3.1.1 Автогенератор как источник гармонических колебаний**

Все устройства с применением емкостных датчиков и преобразователей работают на переменной токе. Характеристиками источников переменного тока являются напряжение, мощность, частота и форма выходного сигнала. Одним из основных условий удовлетворительной работы емкостного устройства является соответствие рабочей частоты источника питания рабочим характеристикам емкостного устройства. Выбор рабочей частоты источника питания не может быть произвольным и зависит не только от параметров емкостного устройства, но и от его назначения.

В настоящее время измерительная техника использует почти весь спектр радиочастот, в связи с этим можно сказать, что практически во всём спектре частот, сложился комплекс современных методов измерений. Поэтому на протяжении всей истории развития измерительной техники с датчиками на емкостной основе систематически совершенствовался, что в последствии привело к возникновению большого количества методов и схем измерений. Любое измерительное устройство, основанное на применении емкостных датчиков и преобразователей, в независимости от метода измерения должно содержать источник переменного тока. В качестве такого источника может служить генератор с самовозбуждением гармонических колебаний.

В зависимости от метода измерений автогенератор должен работать в режиме, обеспечиваем либо постоянство амплитуды и частоты колебаний, либо изменение.

Такое разнообразие рабочих режимов автогенераторов в схемах измерений с

применением емкостных датчиков вызывает необходимость определения наиболее оптимальных соотношений для каждого из режимов, что влечёт за собой рассмотрение основных положений теории генераторов гармонических колебаний.

Рассмотрение этой схемы можно начать с обобщённой эквивалентной схемы автогенератора (рисунок 7). На рисунке специально не указан конкретный тип

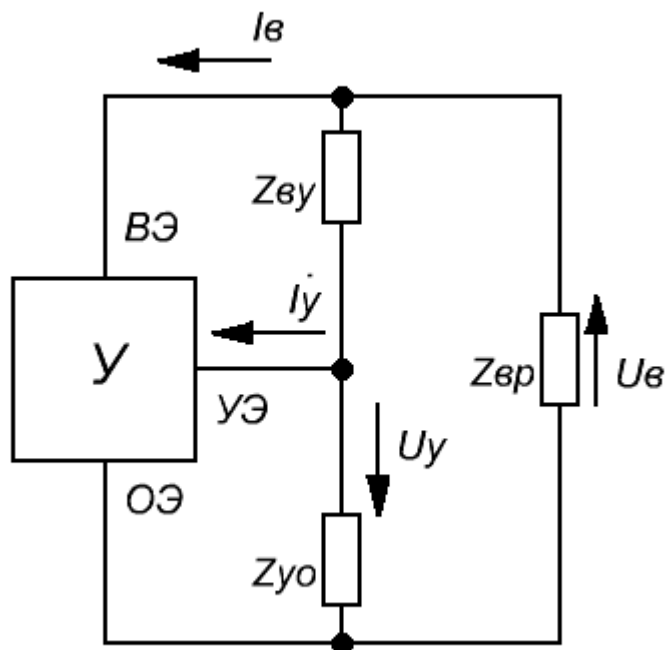


Рисунок 7 - Эквивалентная схема автогенератора гармонических колебаний

усилителя  $У$ , а для упрощения рассмотрения обобщённой схемы электроды усилительного элемента обозначены: ОЭ — общий электрод; УЭ — управляющий электрод; ВЭ — выходной электрод. Комплексные сопротивления обобщённой эквивалентной схемы  $Z_{вo}$ ,  $Z_{вy}$  и  $Z_{yо}$  имеют индексы тех двух электродов к которым они присоединены и могут быть индуктивными, либо емкостными.

В случае, когда эти комплексные сопротивления являются однородными, схема автогенератора будет одноконтурной; если же эти сопротивления будут состоять из параллельно включённых индуктивности и ёмкости, схема автогенератора будет двухконтурной или многоконтурной. Основные положения теории автогенераторов, выведенные для обобщенной эквивалентной схемы, распространяются как на одноконтурные схемы автогенераторов, так и на многоконтурные с учётом их особенностей.

Для обобщенной эквивалентной схемы наиболее общими являются амплитудные и фазовые соотношения, которые можно определить, если считать, что величина напряжения возбуждения  $U_y$  уже точно подобрана через соответствующий коэффициент связи. В этом случае напряжение  $U_y$  на управляющем электроде УЭ вызовет в выходной цепи усилительного элемента такой ток первая гармоника которого определяется уравнением.

$$I_{B1} = S_{CP} \cdot (\dot{U}_y - D \cdot \dot{U}_B) = S_{CP} \cdot \dot{U}'_y, \quad (13)$$

где  $S_{CP} = \left( \frac{\Delta I_B}{\Delta U_B} \right)$  - средняя крутизна характеристики усилительного элемента;

$D = -\left( \frac{\Delta U_y}{\Delta U_B} \right)$  - проницаемость усилительного элемента по постоянному току.

Поскольку напряжение на колебательном контуре равно:

$$\dot{U}_B = I_{B1} \cdot \dot{Z}_\Sigma \quad (14)$$

То решив совместно уравнения (1) и (2), можно получить уравнение колебательной характеристики генератора:

$$I_{B1} = \frac{\dot{U}_y \cdot S_{CP}}{1 + D \cdot \dot{Z}_\Sigma \cdot S_{CP}} \quad (15)$$

где

$$\dot{Z}_\Sigma = \dot{Z}_{BO} - \frac{(\dot{Z}_{BO} + \dot{Z}_{CB})^2}{\dot{Z}_{BO} + \dot{Z}_{BV} + \dot{Z}_{YO} + 2\dot{Z}_{CB}} = \frac{\dot{Z}_{BO} \cdot (\dot{Z}_{BV} + \dot{Z}_{YO}) - \dot{Z}_{CB}^2}{\dot{Z}_{BO} + \dot{Z}_{BV} + \dot{Z}_{YO} + \dot{Z}_{CB}} - \quad \text{эквивалентное}$$

сопротивление в цепи выходного электрода.

Однако напряжение  $U_y$  является частью напряжения на нагрузке  $U_B$  и, следовательно, определяет коэффициент связи

$$\dot{K} = -\frac{\dot{U}_y}{\dot{U}_B} \quad (16)$$

Совместное решение уравнений (14) и (16) относительно напряжения возбуждения  $\dot{U}_y$  дает уравнение прямой обратной связи

$$-\dot{U}_y = \dot{K} \cdot \dot{U}_B = \dot{K} \cdot i_{B1} \cdot \dot{Z}_\Sigma \quad (17)$$

Если же теперь в уравнение (17) подставить значение выходного тока  $i_{B1}$  из уравнения (15) и решить его относительно напряжения возбуждения  $\dot{U}_y$ , получим уравнение, описывающее стационарное состояние автогенератора:

$$\frac{\dot{K} \cdot \dot{Z}_{\text{Э}} \cdot \dot{S}_{\text{CP}}}{1 + \dot{D} \cdot \dot{Z}_{\text{Э}} \cdot \dot{S}_{\text{CP}}} = 1 \quad (18)$$

Отсюда можно определить коэффициент обратной связи для установившегося режима автогенерации  $\dot{K}$  и приведенный коэффициент обратной связи  $\dot{K}'$

$$\dot{K} = \dot{D} + \frac{1}{\dot{Z}_{\text{Э}} \cdot \dot{S}_{\text{CP}}} \quad (19)$$

$$\dot{K}' = (\dot{K} - \dot{D}) + \frac{1}{\dot{Z}_{\text{Э}} \cdot \dot{S}_{\text{CP}}} \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{K}' &= K' e^{j\phi'_k} \\ \dot{S}_{\text{CP}} &= S_{\text{CP}} e^{j\phi_s} \\ \dot{Z}_{\text{Э}} &= Z_{\text{Э}} e^{j\phi_{\text{Э}}} \end{aligned}$$

Так как  $\dot{K}'$ ,  $\dot{S}_{\text{CP}}$  и  $\dot{Z}_{\text{Э}}$  являются величинами комплексными, уравнение (20) в комплексном виде может быть записано следующим образом:

$$\dot{K}' \cdot \dot{Z}_{\text{Э}} \cdot \dot{S}_{\text{CP}} = K' \cdot Z_{\text{Э}} \cdot S_{\text{CP}} e^{j(\phi'_k + \phi_s + \phi_{\text{Э}})} = 1$$

Если же принять, что  $e^{j(\phi'_k + \phi_s + \phi_{\text{Э}})} = 1$ , то условие равновесия амплитуд будет выражаться уравнением

$$\dot{K}' \cdot \dot{Z}_{\text{Э}} \cdot \dot{S}_{\text{CP}} = 1 \quad (21)$$

а условие равновесия фаз — равенством

$$\phi'_k + \phi_s + \phi_{\text{Э}} = 0 \quad (22)$$

Приняв во внимание, что  $R_{\text{B.O.}} \ll x_{\text{B.O.}}$ ;  $R_{\text{B.Y.}} \ll x_{\text{B.Y.}}$  и  $R_{\text{Y.O.}} \ll x_{\text{Y.O.}}$ , можно считать, что

$$\begin{aligned} Z_{\text{B.O.}} &= jx_{\text{B.O.}}; \\ Z_{\text{B.Y.}} &= jx_{\text{B.Y.}}; \\ Z_{\text{Y.O.}} &= jx_{\text{Y.O.}}; \end{aligned}$$

тогда равновесие фаз при резонансе соблюдается при следующем условии:

$$jx_{\text{B.O.}} + jx_{\text{B.Y.}} + jx_{\text{Y.O.}} = 0 \quad (23)$$

В свою очередь, если воспользоваться условием (23) и выразить коэффициент обратной связи через реактивные сопротивления эквивалентной

схемы, получим: 
$$\dot{K} = -\frac{\dot{U}_{\text{Y}}}{\dot{U}_{\text{B}}} = -\frac{\dot{U}_{\text{B}} x_{\text{Y.O.}}}{\dot{U}_{\text{B}} (x_{\text{B.Y.}} + x_{\text{Y.O.}})} = -\frac{x_{\text{Y.O.}}}{x_{\text{B.Y.}} + x_{\text{Y.O.}}}$$

но так как  $(x_{B.Y.} + x_{Y.O.}) = -x_{B.O.}$ , то

$$\dot{K} = \frac{x_{B.Y.}}{x_{Y.O.}} > 0 \quad (24)$$

Проанализировав схему (рисунок 8) и уравнения (26) и (27), можно сделать следующие выводы:

падения напряжений на сопротивлениях обобщенной эквивалентной схемы  $X_{Y.O.}$  и  $X_{B.O.}$ , образующих цепь положительной обратной связи, имеют одинаковый знак, следовательно, эти сопротивления имеют одинаковую природу, вследствие чего обратная связь может быть либо индуктивной, либо емкостной;

падение напряжения на сопротивлении  $x_{B.Y.}$ , входящем в колебательный контур, должно иметь знак, противоположный знаку напряжения на сопротивлении  $x_{Y.O.}$ , следовательно, это сопротивление должно иметь другую природу;

разнородность сопротивлений ( $X_{Y.O.}$ ,  $X_{B.O.}$ ) и ( $x_{B.Y.}$ ) позволяет построить три основные схемы одноконтурных (и многоконтурных) автогенераторов: трансформаторную, индуктивную трехточечную и емкостную трехточечную схемы.

На рисунке 8 приведена трансформаторная схема автогенератора, для которой коэффициент обратной связи

$$\dot{K} = -\frac{\dot{U}_Y}{\dot{U}_B} = \frac{\omega M \dot{i}_K}{\omega L_K \dot{i}_K} = \frac{M}{L_K} \quad (25)$$

условие резонанса в колебательном контуре

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_K \cdot C_K}} \quad (26)$$

эквивалентное сопротивление нагруженного колебательного контура

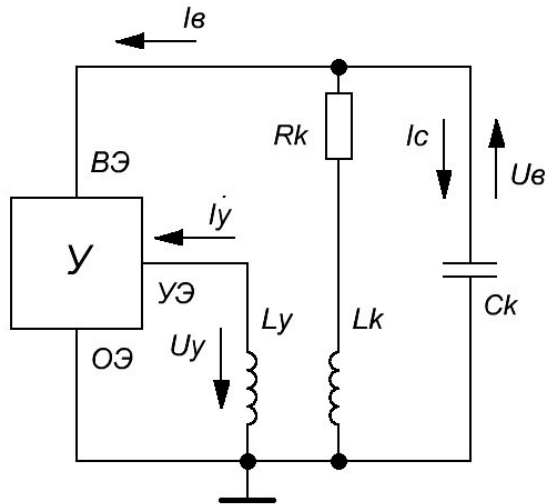


Рисунок 8 - Трансформаторная схема автогенератора

$$R_{\text{э}} = \frac{\rho^2}{R_K} = \frac{L_K}{R_K \cdot C_K} \quad (27)$$

### 3.1.1.1 Измерение ёмкости по изменению частоты измерительного автогенератора

Собственная частота колебательного контура, состоящего из катушки с постоянной индуктивностью и емкостного датчика с изменяющейся емкостью, при отсутствии потерь в колебательном контуре равна:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_K \cdot C_K}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_K \cdot C_{д.о.}}} \quad (28)$$

Если же теперь считать, что каждому значению емкости датчика будет соответствовать свое значение резонансной частоты колебательного контура, то текущее значение емкости датчика будет определяться соотношением

$$C_{д} = \phi(f) = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L_K} = \frac{A}{f^2} \quad (29)$$

где  $A = 0.0253/L_K$ .

Поскольку ёмкость датчика  $C_{д}$  является функцией от воздействующего параметра  $X$ , то величина измеряемого параметра будет равна:

$$X = F(C_{д}) = F \cdot \frac{A}{f^2} \quad (30)$$

При этом необходимо иметь в виду, что изменение емкости в колебательном контуре автогенератора, а следовательно, и изменение частоты колебаний не

должны нарушать стабильность амплитуды и устойчивость работы автогенератора. Поскольку на условия стабильности амплитуды и устойчивости оказывает влияние изменение обратной связи, то необходимо чтобы при изменении емкости колебательного контура величина обратной связи оставалась неизменной. Этому требованию удовлетворяют трансформаторная и индуктивная трехточечная схемы автогенераторов, у которых в уравнения обратной связи, а также и в уравнения условий устойчивой работы, значение емкости колебательного контура не входит.

Таким образом, для измерения изменения емкости по изменению частоты автогенератора наиболее пригодными являются трансформаторная схема и индуктивная трехточечная схема автогенераторов, в цепь обратной связи которых емкость колебательного контура не входит.

Если же емкостный датчик  $C_{д.о.}$  имеет значительные потери, определяемые большим значением  $\operatorname{tg} \delta$ , то частота генерируемых колебаний автогенератора  $f$  не будет равна собственной резонансной частоте колебательного контура  $f_0$ . При включении емкостного преобразователя в цепь управляющего электрода текущее значение емкости, найденное по частоте автогенератора, равно:

$$C_{д.в.} = \frac{\left( \frac{L_y}{L_K \cdot R_i} + \frac{S \cdot M}{L_K} \right)}{2\pi f_0 \left( \frac{f_0^2}{f^2} - 1 \right)} \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (31)$$

Если же емкостный преобразователь будет включен в цепь выходного электрода, то текущее значение емкости, определяемое частотой автогенератора, равно:

$$C_{д.в.} = \frac{\left( \frac{S \cdot M}{L_K} + \frac{1}{R_i} \right)}{2\pi f_0 \left( 1 - \frac{f_0^2}{f^2} \right)} \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (32)$$

Схемы автогенераторов для измерения ёмкости  $C_d$  по изменению частоты приведены на рисунке 9.

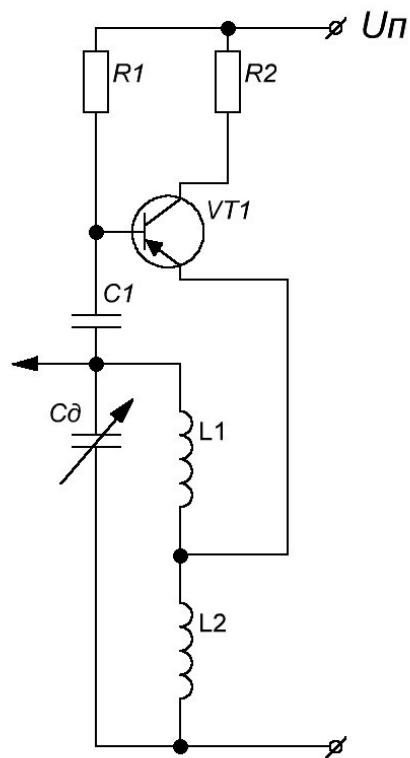


Рисунок 9 - Схема автогенератора для измерения ёмкости по изменению частоты

На выход измерительного генератора обычно подключается измерительная схема с указателем, шкала которого градуируется в единицах величины, измеряемой емкостным преобразователем в соответствии с уравнением (30).

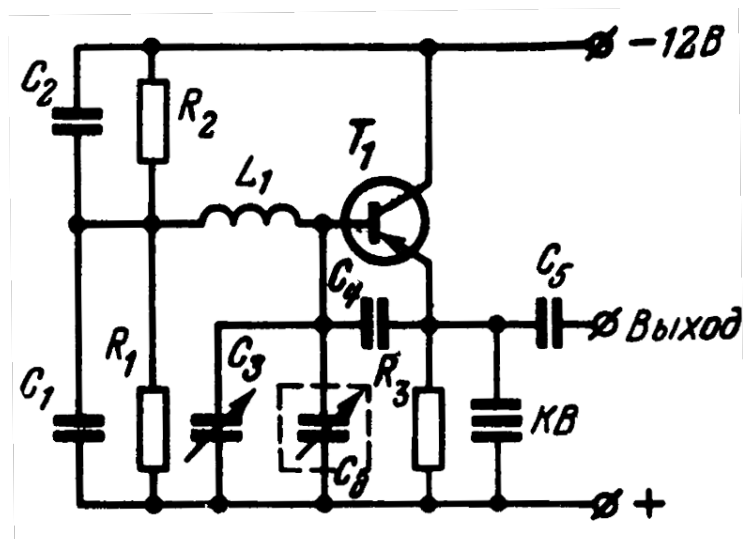


Рисунок 10 - Схема автогенератора со срывом колебаний (на транзисторе)

### 3.1.1.2 Резонансный метод измерения ёмкости конденсаторов с большими потерями

Измерение ёмкости конденсатора с большими потерями резонансным методом, несмотря на множество различных способов технического выполнения, состоит в сравнении характеристик двух колебательных контуров, один из которых содержит конденсатор с потерями, ёмкость которого надо измерить, что позволяет затем определить как действительную, так и мнимую части потерь диэлектрика конденсатора. Измерения могут производиться на частотах до 200 МГц включительно. Приведенная на рисунке 11 схема измерения ёмкости обладает высокой точностью, так как результаты измерений не зависят от величины потерь. Схема состоит из генератора и двух колебательных контуров с очень малой ёмкостной связью. Один из контуров  $L_1C_1$  индуктивно связан с измерительным прибором, измеряющим ток, пропорциональный резонансному току в контуре. Второй колебательный контур  $L_3C_3$  может настраиваться в резонанс либо только при помощи конденсатора  $C_3$ , либо с помощью совместно подключенных конденсаторов  $C_3$  и  $C_d$ .

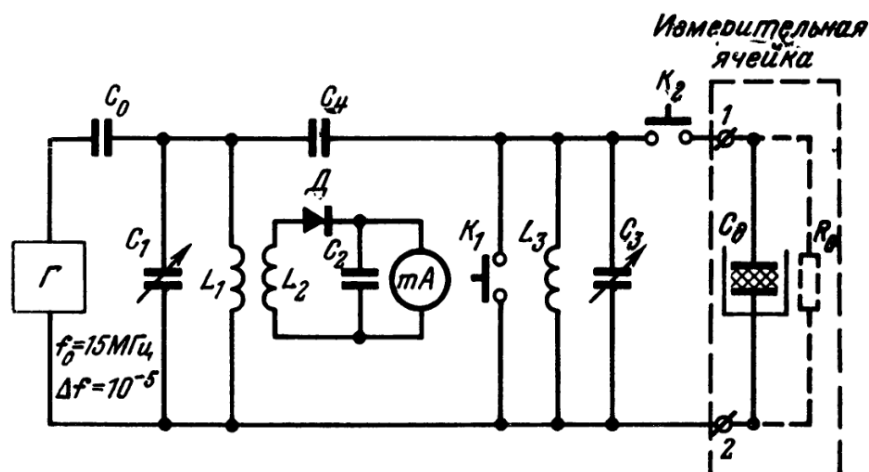


Рисунок 11 - Резонансный метод измерения ёмкости конденсатора с большими потерями

При замкнутых контактах кнопки  $K_1$  конденсатор  $C_4$  оказывается подключенным параллельно конденсатору  $C_1$ , при помощи которого колебательный контур настраивается в резонанс с частотой генератора  $f_0$ . При этом стрелка индикатора настройки отклонится на угол  $\alpha_1$ , который в процессе всех измерений будет наибольшим. Вторым шагом в производстве измерений является настройка в резонанс с частотой генератора  $f_0$  колебательного контура  $L_3C_3$  при разомкнутых контактах кнопки  $K_1$ . При этом сопротивление контура будет очень велико и конденсатор  $C_4$  окажется как бы отключенным от колебательного контура  $L_1C_1$ , который получит некоторую расстройку, в результате чего ток через индикатор значительно уменьшится и стрелка его переместится в положение, характеризуемое углом  $\alpha_2$ , меньшим угла  $\alpha_1$ , т. е.

$$\alpha_2 < \alpha_1$$

При этом резонанс наступит при

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_3 \cdot C_3}} \quad (33)$$

Измеряемый конденсатор или емкостный датчик подключается к зажимам 1 и 2.

При замкнутых контактах кнопки  $K_2$  производится повторная настройка резонансного контура  $L_3(C_3 + C_d)$ , при которой емкость конденсатора  $C_3$  уменьшится на величину  $C_d$ . Поскольку конденсатор  $C_d$  обладает потерями, то резонансное сопротивление контура будет равно:

$$Z_0 = \sqrt{R_d^2 + X_C^2 + X_L^2} = \sqrt{R_d^2} \quad (34)$$

В данной схеме измерения конденсатор  $C_4$  подключается параллельно конденсатору  $C_1$  через сопротивление  $R_d$ , при этом, чем меньше сопротивление  $R_d$ , тем ближе к первоначальной настройке будет приближаться настройка контура  $L_1$ ,  $C_1$ ,  $C_4$ ,  $R_d$ ; стрелка индикатора настройки будет при этом занимать положение, характеризующееся углом  $\alpha_3$ , причем  $\alpha_2 < \alpha_3 < \alpha_i$ .

Абсолютная разница между отклонениями  $\alpha_3$  и  $\alpha_2$  будет пропорциональна активной проводимости диэлектрика конденсатора  $C_d$  и не влияет на точность измерений, так как минимальные отклонения  $\alpha_3$  и  $\alpha_2$  получаются при зависимости

$$C_3 + C_d = \frac{1 - \omega_0^2 L_3 \cdot C_4}{\omega_0^2 \cdot L_3} \quad (35)$$

### 3.1.2 Метод преобразования ёмкости в сдвиг фаз

Измерение емкости кабеля в процессе изготовления имеет ряд особенностей. Во-первых, при измерении учитывается то, что длина кабеля много больше его диаметра. Во-вторых, измерение проводится при движении кабеля через датчик. Эта особенность требует наличия специальных датчиков, учитывающих при измерении скорость движения кабеля. Кроме этого необходимо учесть и то условие, что измерение производится в процессе производства, на стадии нанесения изоляции на проводящую жилу. То есть, кабель не имеет второго электрода, функции которого на практике выполняет экран, либо другие жилы кабеля.

Поскольку, измерение емкости кабеля производится при отсутствии экранирующего слоя, в качестве второго электрода используется вода. В этом случае исключается возможность появления воздушных зазоров между кабелем и вторым электродом и, соответственно, уменьшается погрешность измерения. Контроль емкости проводится в охлаждающей ванне, куда помещается кабель после нанесения изоляционного слоя.

Суть метода заключается в том, что измеряемая ёмкость, включённая в RC-цепь первого порядка (рисунок 12), преобразовывается в смещение фазы.

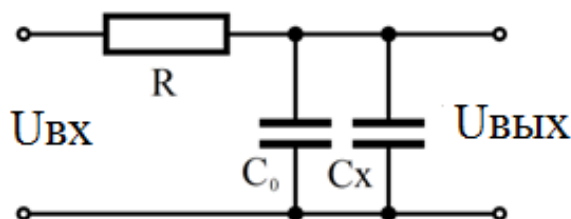


Рисунок 12 - Измеряемая ёмкость в RC-цепи первого порядка

При отсутствии кабеля в преобразователе, возникает сдвиг фаз, который равен

$$\varphi_0 = \arctg(\omega \cdot R \cdot C_0) \quad (36)$$

где  $R, C_0$  — параметры RC-цепи;  $\omega = 2\pi f$ .

Когда кабель будет внесён в первичный преобразователь, возникнет новая ёмкость  $C = C_x + C_0$ , соответственно изменится и фазовый сдвиг

$$\varphi_x = \arctg(\omega \cdot R \cdot (C_0 + C_x)) \quad (37)$$

Измерив разность фаз  $\Delta\varphi_x = \varphi_x - \varphi_0$ , можно определить ёмкость кабеля, используя для измерения этого значения фазометр. Оно будет прямо пропорционально значению ёмкости кабеля.

$$C_x = \frac{\operatorname{tg} \Delta\varphi_x \cdot (1 + a^2)}{b \cdot (1 - a \cdot \operatorname{tg} \Delta\varphi_x)} = \frac{(1 + a^2)}{b \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \Delta\varphi_x} - a \right)} \quad (38)$$

где  $a = \omega \cdot R \cdot C_0$ ,  $b = \omega \cdot R$ .

### 3.2 Методы сравнения

#### 3.2.1 Мостовой метод измерения ёмкости

Мостовые методы измерений используются для измерения полных сопротивлений, индуктивности и ёмкости, тангенса угла потерь и добротности пассивных компонентов электрических цепей. Мосты для измерения параметров компонентов электрических цепей делят на мосты постоянного тока и мосты переменного тока. Мосты постоянного тока бывают одинарные и двойные. Мосты переменного тока отличаются большим разнообразием. Схема моста переменного тока для измерения параметров конденсаторов приведена на рисунке 13.

Исследуемый конденсатор, представленный последовательной схемой  $R_x, C_x$ , включают в первое плечо. Образцовую ёмкость  $C_3$  соединяют последовательно с  $R_3$ . Уравновешивание моста осуществляют изменением сопротивлений образцовых резисторов и ёмкости образцового конденсатора. Условие равновесия моста при измерении ёмкости, так чтобы  $I_0 = 0$ , следующее:

$$\left[ R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right] \cdot R_4 = R_2 \cdot \left[ R_3 + \frac{1}{j\omega C_3} \right] \quad (39)$$

Откуда измеряемая ёмкость:

$$C_x = C_3 \left( \frac{R_4}{R_2} \right) \quad (40)$$

Сопротивление потерь в последовательной схеме замещения:

$$R_x = R_2 \left( \frac{R_3}{R_4} \right) \quad (41)$$

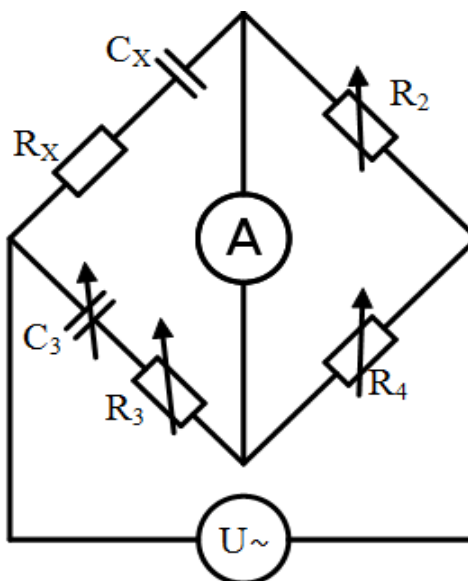


Рисунок 13 - Схема моста для измерения ёмкости

Обычно вместо  $R_x$  измеряют тангенс угла потерь  $\operatorname{tg} \delta = \omega C_x R_x$  в конденсаторе, либо добротность  $Q = 1/\operatorname{tg} \delta$ . Подставив в выражение  $\operatorname{tg} \delta$  значения  $R_x C_x$ , получают

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_x R_x = \omega R_3 C_3 \quad (42)$$

Из выражений (47) для  $C_x$  и (48) для  $\operatorname{tg} \delta$  видно, что при уравнивании моста резисторами  $R_3$  и  $R_4$  получается отдельный отсчет по измеряемой емкости  $C_x$  и тангенсу угла потерь  $\operatorname{tg} \delta$ . При этом резистор  $R_4$  градуируют в единицах ёмкости, а резистор  $R_3$  – в значениях  $\operatorname{tg} \delta$ .

Точность измерения зависит от точности изготовления образцовых сопротивлений и конденсаторов. Класс точности приборов от 0.5 до 5%. С более высокой точностью ёмкость конденсаторов в пределах 0,001÷1000 пФ рекомендуется измерять с помощью трансформаторных мостов.

Широкое применение мостовых схем объясняется большой точностью измерений, высокой чувствительностью, возможностью измерения различных величин и т.д.

## 4. Методы измерения сдвига фазы

### 4.1 Компенсационный метод

Компенсационный метод измерения угла сдвига фаз заключается в сравнении измеряемого фазового сдвига с фазовым сдвигом, вносимым образцовым фазовращателем. Известны две разновидности компенсационного метода; разностный и нулевой.

При использовании разностного метода по показаниям прибора определяют разность  $\phi_x - \phi_0 = \Delta\phi$ , где  $\phi_x$  - измеряемый угол сдвига фаз,  $\phi_0$  - фазовый сдвиг, установленный по калиброванному фазовращателю. Зная  $\phi_0$  и измерив  $\Delta\phi$ , находят  $\phi_x$ .

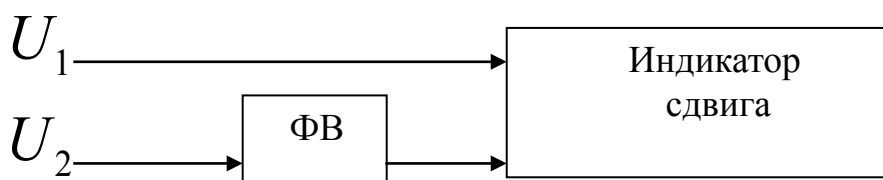


Рисунок 14 - Схема измерения компенсационным методом

При использовании нулевого метода разность фаз  $\Delta\phi$  сводят к нулю и угол сдвига фаз определяют по показаниям калиброванного фазовращателя. Схема измерения угла сдвига фаз компенсационным методом произведена на рисунке 14, а в качестве сравнивающего устройства использован электронный осциллограф ЭО. Одно из исследуемых напряжений  $U_1$  поступает непосредственно на вход Y осциллографа, а другое  $U_2$  поступает на вход X через фазовращатель «ФВ». Таким образом:

$$\phi_x - \phi_0 = \Delta\phi \quad (43)$$

где

$\Delta\phi$  - разность фаз между двумя напряжениями.

$\Delta\phi_x$  - измеряемый фазовый сдвиг.

$\Delta\phi_0$  - фазовый сдвиг, устанавливаемый фазовращателем.

Измерения компенсационным методом выполняют следующим образом. При помощи фазовращателя ФВ добиваются нулевого сдвига фаз между напряжениями  $U_1$  и  $U_2$ . При нулевом угле сдвига фаз эллипс на экране ЭО выражается в наклонную прямую линию. Отсчет угла сдвига фаз выполняют по показаниям фазовращателя.

Знак Фазового угла можно установить так же как и при осциллографическом методе. Временные диаграммы поясняющие работу схемы представлены на рисунке 15.

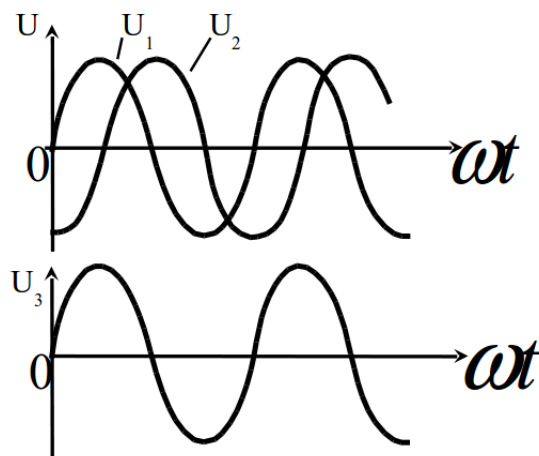


Рисунок 15 - Осциллограммы сигналов

#### 4.2 Суммарно-резонансный метод

При измерении угла сдвига фаз суммарно-разностным методом используется свойство гармонических сигналов, согласно которому

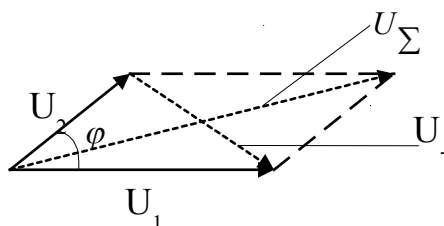


Рисунок 16 - Схема суммирования двух сигналов

$$U_{\Sigma}^2 = (U_1 + U_2)^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos \varphi$$

или

$$U_{-}^2 = (U_1 - U_2)^2 = U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos \varphi$$

откуда

$$\varphi = \arccos[(U_{\Sigma}^2 - U_1^2 - U_2^2) / 2U_1U_2] \quad (44)$$

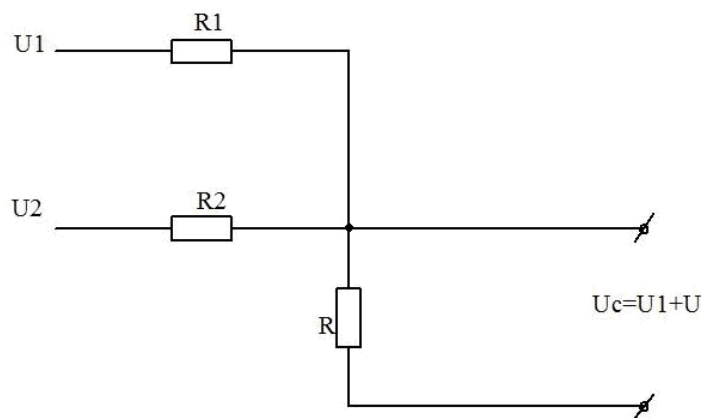


Рисунок 17 - Схема измерения суммарно-разностным методом

Таким образом, совместное включение суммирующих элементов и устройств для уравнивания амплитуд складываемых (вычитаемых) напряжений позволяет построить фазометр со шкалой, непосредственно проградуированной в значениях фазового угла.

У суммарно-разностного метода существует два основных недостатка:

- 1) Необходима стабилизация амплитуды (синусоидального напряжения т.е.  $U_1 = U_2 = \text{const}$ ).
- 2) Измеряется не сам угол, а значение косинуса ( $U_1 \equiv \cos \phi$  и  $U_2 \equiv \cos \phi$ ).

### 4.3 Методы измерения с помощью осциллографа

#### 4.3.1 Метод линейной развёртки

При методе линейной развёртки на экране двухлучевого или двухканального осциллографа, наблюдают оба напряжения  $U_1$  и  $U_2$ . Измеряя отрезки  $ab$  и  $ad$  на осциллограмме, определяют фазовый сдвиг по формуле

$$\phi = \frac{ab}{ad} 360^\circ \quad (45)$$

#### 4.3.2 Метод эллипса

При использовании метода эллипса на входы  $X$  и  $Y$  электронного осциллографа подают исследуемые напряжения  $U_x = U_1 \sin \omega t$  и  $U_y = U_2 \sin(\omega t + \phi)$  на экране осциллографа появляется изображение эллипса (рисунок 18), уравнение которого имеет вид

$$y = \frac{B}{A} (x \cos \phi + \sqrt{A^2 - x^2} \sin \phi) \quad (46)$$

где A и B размеры эллипса по осям X и Y.

Приняв  $X = 0$ , получим  $Y_0 = B \sin \phi$ . Аналогично при  $Y=0$ , получим  $X_0 = A \sin \phi$ .

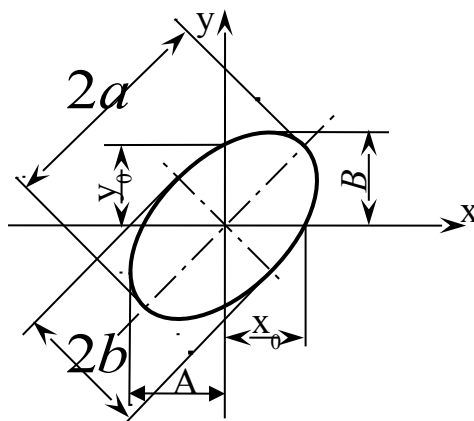


Рисунок 18 - Осциллограмма суммы сигналов

Из этих уравнений находим значение угла сдвига фаз

$$\sin \phi = \pm \frac{Y_0}{B} = \pm \frac{X_0}{A} \quad (47)$$

Если перед началом измерений уравнивать максимальные отклонения луча по осям X и Y, т.е. сделать  $A=B$ , то угол сдвига фаз можно определить по формуле

$$\phi = \pm \arcsin \frac{2Y_0}{2A} \quad (48)$$

Угол сдвига фаз можно вычислить по длинам большой и малой осей эллипса

$$\phi = 2 \arctg \frac{2B}{2a}$$

Другой способ измерения угла сдвига фаз сводится к вычислению площади эллипса. При обозначениях принятых на рисунке 20, площадь эллипса  $S_{\phi} = \pi ab$ , а угол сдвига фаз рассчитывают по формуле

$$\sin \phi = \frac{4S_{\phi}}{\pi S_0} \quad (49)$$

где  $S_0 = 4AB$  - площадь прямоугольника, в который вписан эллипс.

К недостаткам метода эллипса относится сложность установления знака угла сдвига фаз. Установить знак фазового угла можно, если учесть, что при положительных углах луч, описывающий эллипс, вращается в одну сторону, а при отрицательных в другую.

#### 4.4 Метод преобразования временного интервала в напряжение

Значительно популярнее метод измерения разности фаз, основанный на преобразовании интервала времени в напряжение. В фазометре такого типа оба входных сигнала  $V_1$  и  $V_2$  с помощью компараторов преобразуются в прямоугольные колебания. На рисунке 19 эти прямоугольные сигналы обозначены  $U_{вх}$ . Временной интервал между двумя положительными фронтами этих сигналов измеряется с помощью фазового детектора, в котором формируются импульсы с известной амплитудой и той же самой длительностью. На выходе фильтра нижних частот получаем среднее значение этих импульсов.

Если  $T$  – период входных сигналов, то напряжение на выходе фильтра равно

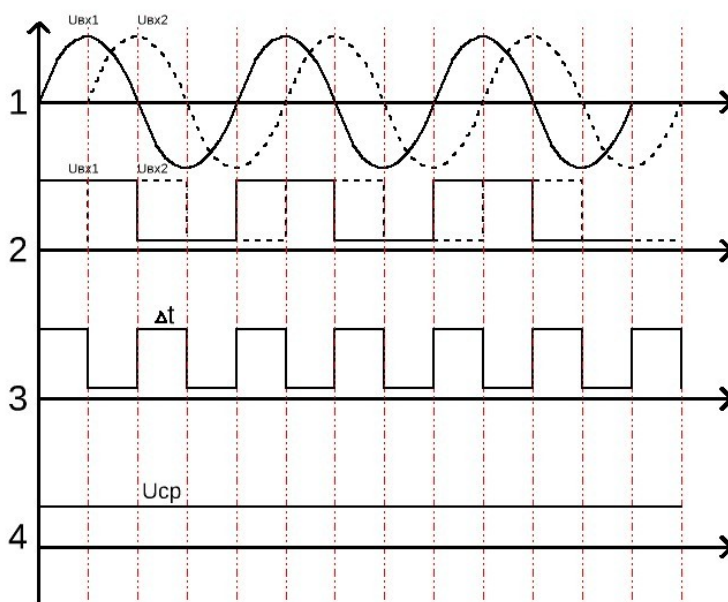


Рисунок 19 - Осциллограммы преобразования сдвига фаз в напряжение

$$U_{CP} = U_A \cdot \frac{\Delta t}{T} \quad (50)$$

Поэтому фазовый угол  $\phi = \frac{2\pi\Delta t}{T}$  составляет:

$$\phi = 2\pi \frac{U_{CP}}{U_A} \quad (51)$$

Частотный диапазон этого метода измерения разности фаз со стороны низких частот ограничен фильтром нижних частот. Ограничение со стороны высоких частот

зависит от быстродействия логических схем. Точность измерения определяется точностью задания напряжения  $U_{CP}$  разностью задержек во входных блоках фазового детектора и погрешностью, с которой компараторы реагируют на пересечение водными сигналами нуля. Эта погрешность является результатом различия напряжений смещения у компараторов. При наличии смещения момент срабатывания компаратора зависит от скорости изменения входного сигнала.

В рассмотренном методе фактически измеряется время между моментами пересечения входными сигналами нуля. Следовательно, форма входного сигнала не будет оказывать влияния на результат измерения, если момент пересечения нуля остается в одном и том же месте.

Часто мы хотим измерить разность фаз двух синусоидальных сигналов или, когда входные сигналы искажены, разность фаз двух первых гармоник. В общем случае из-за искажений возникают ошибки измерения, поскольку присутствие более высоких гармоник может изменить момент пересечения сигналов нулевого уровня или даже привести к появлению дополнительных пересечений нуля. Коэффициент гармонических искажений  $d_n$ , вызванных  $n$ -ой гармоникой с амплитудой  $a_n$  определяется как:

$$d_n = \frac{a_n}{a_1} \quad (n = 2, 3, \dots) \quad (52)$$

где  $a_1$  - амплитуда первой гармоники.

Когда дополнительных пересечений нуля не появится, это можно проверить графически. В практической ситуации следует полагать, что допустимый уровень искажений не настолько велик, чтобы возникали дополнительные пересечения нуля. В противном случае ошибки измерения были бы чрезмерно велики.

Если искажения меньше указанных, то это, как правило, вызовет сдвиг момента пересечения нуля по отношению к моменту пересечения нуля первой гармоникой. Только в том случае, когда гармоника находится в фазе или в противофазе с первой гармоникой, этого не произойдет. Если гармоники имеют различные фазы, то необходимо отдельно рассмотреть влияние четных и нечетных гармоник. Чётные гармоники вызовут сдвиги моментов пересечения нуля на нарастающем и на спадающем отрезках сигнала в противоположных направлениях, в то время как нечётные гармоники будут вызывать сдвиги в одном и том же направлении. Следовательно, можно компенсировать сдвиг, вызванный искажениями

из-за чётных гармоник, но этого нельзя сделать при искажениях, связанных с наличием нечётных гармоник. В случае искажения чётными гармониками разность фаз двух сигналов определяется сначала по моментам пересечения ими нуля снизу вверх, а затем по моментам пересечения ими нуля сверху вниз. Компенсация достигается путём вычисления среднего значения по результатам этих двух измерений.

Можно сказать, что максимальная ошибка  $\Delta\varphi$  при изменении разности фаз  $\varphi$ , вызванная смещением момента прохождения через нуль из-за искажения нечётной гармоникой, равна:

$$\Delta\varphi = d_n \text{ радиан} = 57d_n \text{ градусов}$$

Это выражение применимо так же для определения максимальной ошибки измерения при искажении чётной гармоникой, если не применяется упомянутая выше компенсация.

Недостатки: показания счетчика пропорциональны измеряемому сдвигу фаз  $\varphi_x$  только при постоянных  $f_x$  и  $T_0$ . Для определения числового значения сдвига фаз  $\varphi_x$  должна быть точно известна частота  $f_x$  или период  $T_x$ , поэтому такой тип цифрового фазометра мало удобен. Грубо говоря, схема будет работать только на малых частотах, т.к. при высоких частотах сильно растет абсолютная погрешность квантования. Кроме погрешности квантования, в данных приборах возникает погрешность от неточности выделения моментов прохождения мгновенных значений напряжений через нулевые значения, от фазовых сдвигов в формирователях импульсов, от нестабильности частоты опорного генератора, от нелинейных искажений исследуемых напряжений.

## 5. Выбор метода и структурной схемы

Из всех методов, приведённых выше, наиболее подходящим для разрабатываемого прибора будет метод преобразования разности фаз в напряжение. Такой метод имеет маленькую погрешность сдвига фаз (0.5% при шкале 360 градусов), легкость измерения. Для реализации фазометра, будет использоваться структурная схема приведённая на рисунке 23.

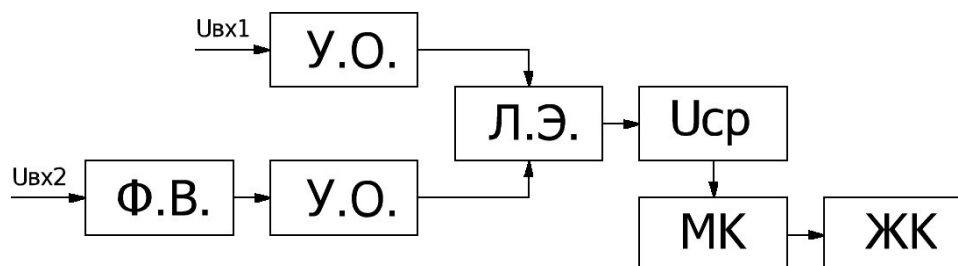


Рисунок 20 - Структурная схема фазометра

где

УО — усилитель-ограничитель; ФВ — фазовращатель; ЛЭ — логический элемент; МК — микроконтроллер; ЖК — жидкокристаллический дисплей.

Измерения угла сдвига фаз  $\phi_x$  между двумя синусоидальными сигналами одинаковой частоты осуществляется методом преобразования  $\phi_x$  во временной интервал с последующим его преобразованием в постоянное напряжение, которое измеряется и обрабатывается микроконтроллером и затем отображается на жидкокристаллическом дисплее.

От генератора формируется два импульса, которые в свою очередь формируют две последовательности импульсов в момент перехода входных напряжений  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$  через нуль из области отрицательных значений в область положительных. При наличии угла сдвига фаз  $\phi_x$  между напряжениями  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$  импульсы одной последовательности будут сдвинуты относительно импульсов другой последовательности на интервал времени  $\Delta t$ , связанный с  $\phi_x$

соотношением  $\phi_x = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360^\circ$

где  $T$  - период изменения входных напряжений  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$ .

Временные диаграммы на разных участках структурной схемы приведены на рисунке 24.

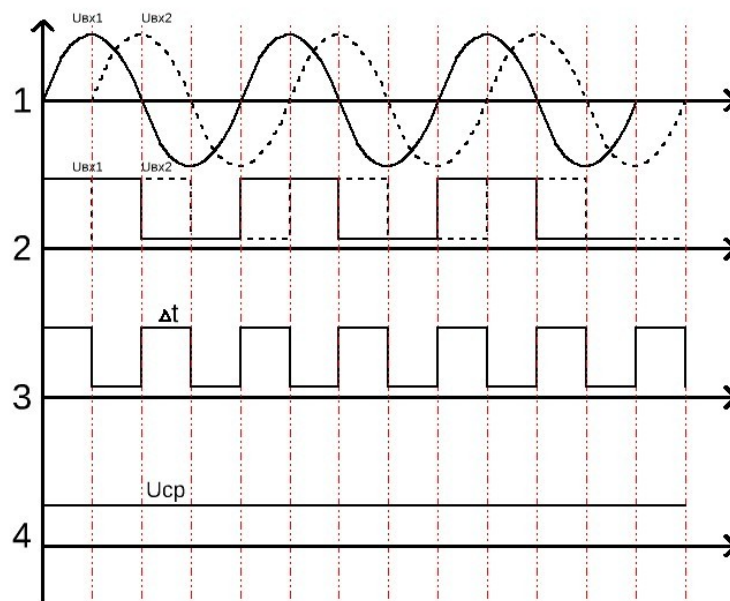


Рисунок 21 - Временные диаграммы фазометра

## 6. Конструктивно-технологическая часть

### 6.1 Выбор первичного преобразователя

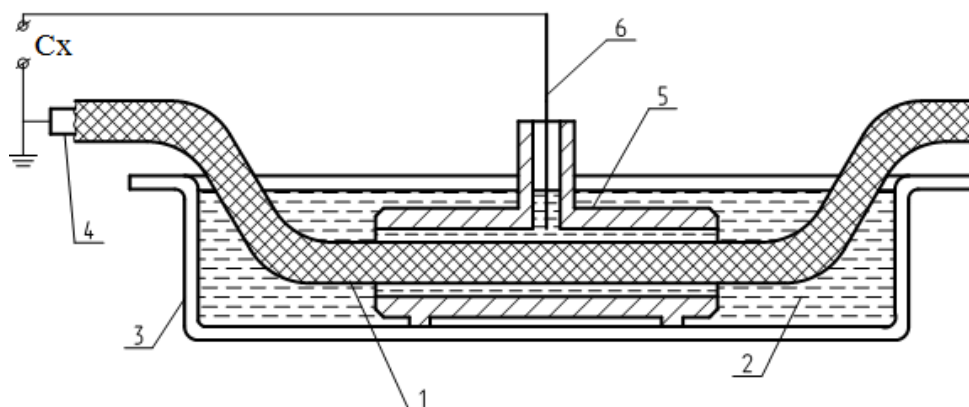


Рисунок 22 - Схема измерения ёмкости

Поскольку на рассматриваемом этапе производства кабель не имеет ни второй жилы ни экранирующего слоя. Поэтому конструкция преобразователя, заменяющего второй электрод, должна обеспечивать полный контакт с кабелем на протяжении всего рабочего участка. Под рабочим участком кабеля понимается отрезок кабеля, на котором производится измерение. Такому условию удовлетворяет конструкция на рисунке 25.

где

1 — контролируемый кабель;

2 — проводящая жидкость;

3 — ванна;

4 — жила кабеля;

5 — первичный преобразователь

6 — сигнальный провод (подводящий потенциал к жидкости).

Структурная схема преобразователя представлена на рисунке 26.

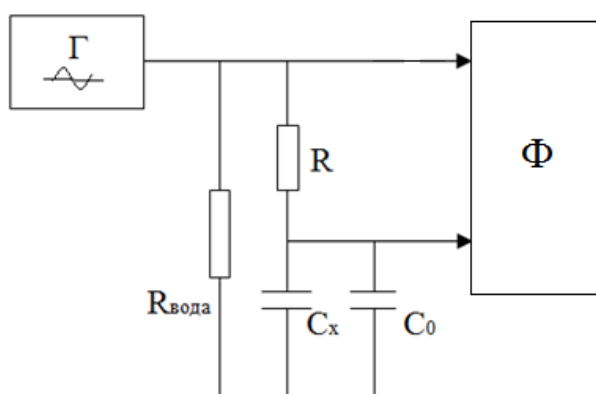


Рисунок 23 - Структурная схема преобразователя  
Г — генератор; Ф — Фазометр

В этом случае исключается возможность появления воздушных зазоров между кабелем и вторым электродом и, соответственно, уменьшается погрешность измерения. Контроль емкости проводится в охлаждающей ванне, куда помещается кабель после нанесения изоляционного слоя. Преобразователь выполнен (Приложение В) в виде полого цилиндра и включает в себя 2 электрода: электрод питания (ЭП) и рабочий электрод (РЭ). Электроды расположены на внутренней стороне измерительной трубы. Также имеются вывод для подачи напряжения питания, информационный вывод, металлический корпус. Для проведения измерения, корпуса ванны и преобразователя, а также жила кабеля заземляются.

Эксперимент проводился при трёх значениях  $\omega$  (10кГц, 30кГц, 60кГц). Результаты представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1 — Эксперимент при  $\omega=10\text{кГц}$

| $C_0 = 500\text{пФ}, \varphi_0 = 30^\circ \rightarrow R = 115.5\text{кОм}$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $C_x = \Delta C (n\Phi)$                                                   | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
| $\varphi_x (^\circ)$                                                       | 30,49 | 30,98 | 31,47 | 31,95 | 32,42 | 32,89 | 33,35 | 33,81 | 34,27 | 34,72 |
| $\Delta \varphi (^\circ)$                                                  | 0,49  | 0,98  | 1,47  | 1,95  | 2,42  | 2,89  | 3,35  | 3,81  | 4,27  | 4,72  |
| $S = \frac{\Delta \varphi_{i+1} - \Delta \varphi_i}{\Delta C_x}$           | 0.049 | 0.049 | 0.049 | 0.048 | 0.047 | 0.047 | 0.046 | 0.046 | 0.046 | 0.045 |
| Нелинейность,<br>$\gamma = \frac{S_i - S_{cp}}{S_{cp}}$                    | 3.8   | 3.8   | 3.8   | 1.7   | -0.42 | -0.42 | -2.5  | -2.5  | -2.5  | -4.7  |

Эксперимент проводится при:  $\omega = 10\text{кГц}$ ,  $C_0 = 500\text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 45^\circ \rightarrow R = 200\text{кОм}$

| $C_x (n\Phi)$                                                    | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
|------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\varphi_x (^\circ)$                                             | 45,57 | 46,12 | 46,67 | 47,20 | 47,73 | 48,24 | 48,74 | 49,24 | 49,72 | 50,19 |
| $\Delta \varphi (^\circ)$                                        | 0,57  | 1,12  | 1,67  | 2,2   | 2,73  | 3,24  | 3,74  | 4,24  | 4,72  | 5,19  |
| $S = \frac{\Delta \varphi_{i+1} - \Delta \varphi_i}{\Delta C_x}$ | 0.057 | 0.055 | 0.055 | 0.053 | 0.053 | 0.051 | 0.05  | 0.05  | 0.048 | 0.047 |
| Нелинейность,<br>$\gamma = \frac{S_i - S_{cp}}{S_{cp}}$          | 9.8   | 6     | 6     | 2.1   | 2.1   | -1.7  | -3.7  | -3.7  | -7.5  | -9.4  |

Эксперимент проводится при:  $\omega = 10\text{кГц}$ ,  $C_0 = 500\text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 60^\circ \rightarrow R = 346.4\text{кОм}$

| $C_x = \Delta C (n\Phi)$                                         | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
|------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\varphi_x (^\circ)$                                             | 60,49 | 60,96 | 61,42 | 61,87 | 62,31 | 62,73 | 63,14 | 63,54 | 63,93 | 64,31 |
| $\Delta \varphi (^\circ)$                                        | 0,49  | 0,96  | 1,42  | 1,87  | 2,31  | 2,73  | 3,14  | 3,54  | 3,93  | 4,31  |
| $S = \frac{\Delta \varphi_{i+1} - \Delta \varphi_i}{\Delta C_x}$ | 0.049 | 0.047 | 0.046 | 0.045 | 0.044 | 0.042 | 0.041 | 0.04  | 0.039 | 0.038 |
| Нелинейность,<br>$\gamma = \frac{S_i - S_{cp}}{S_{cp}}$          | 13.7  | 9     | 6.7   | 4.4   | 2.1   | -2.6  | -4.9  | -7.2  | -9.5  | -11.8 |

Таблица 2 — Эксперимент при  $\omega=30\text{кГц}$

| $C_0 = 500\text{пФ}, \varphi_0 = 30^\circ \rightarrow R = 38.5\text{кОм}$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $C_x = \Delta C (n\Phi)$                                                  | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
| $\varphi_x (^\circ)$                                                      | 30,49 | 30,98 | 31,47 | 31,95 | 32,42 | 32,89 | 33,35 | 33,81 | 34,27 | 34,72 |
| $\Delta \varphi (^\circ)$                                                 | 0,49  | 0,98  | 1,47  | 1,95  | 2,42  | 2,89  | 3,35  | 3,81  | 4,27  | 4,72  |

Эксперимент проводится:  $\omega = 30\text{кГц}$ ,  $C_0 = 500\text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 45^\circ \rightarrow R = 66.7\text{кОм}$

| $C_x = \Delta C (n\Phi)$  | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\varphi_x (^\circ)$      | 45,57 | 46,12 | 46,67 | 47,20 | 47,73 | 48,24 | 48,74 | 49,24 | 49,72 | 50,19 |
| $\Delta \varphi (^\circ)$ | 0,57  | 1,12  | 1,67  | 2,2   | 2,73  | 3,24  | 3,74  | 4,24  | 4,72  | 5,19  |

Эксперимент проводится:  $\omega = 30\text{кГц}$ ,  $C_0 = 500\text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 60^\circ \rightarrow R = 115.5\text{кОм}$

| $C_x = \Delta C (n\Phi)$  | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\varphi_x (^\circ)$      | 60,49 | 60,96 | 61,42 | 61,87 | 62,31 | 62,73 | 63,14 | 63,54 | 63,93 | 64,31 |
| $\Delta \varphi (^\circ)$ | 0,49  | 0,96  | 1,42  | 1,87  | 2,31  | 2,73  | 3,14  | 3,54  | 3,93  | 4,31  |

Таблица 3 - Эксперимент при  $\omega=60\text{кГц}$

|                                                                              |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $C_0 = 500\text{пФ}$ , $\varphi_0 = 30^\circ \rightarrow R = 19,3\text{кОм}$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| $C_x = \Delta C (\text{пФ})$                                                 | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
| $\varphi_x (^\circ)$                                                         | 30,49 | 30,98 | 31,47 | 31,95 | 32,42 | 32,89 | 33,35 | 33,81 | 34,27 | 34,72 |
| $\Delta\varphi (^\circ)$                                                     | 0,49  | 0,98  | 1,47  | 1,95  | 2,42  | 2,89  | 3,35  | 3,81  | 4,27  | 4,72  |

Эксперимент проводится:  $\omega = 60\text{кГц}$ ,  $C_0 = 500\text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 45^\circ \rightarrow R = 33,3\text{кОм}$

|                              |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $C_x = \Delta C (\text{пФ})$ | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
| $\varphi_x (^\circ)$         | 45,57 | 46,12 | 46,67 | 47,20 | 47,73 | 48,24 | 48,74 | 49,24 | 49,72 | 50,19 |
| $\Delta\varphi (^\circ)$     | 0,57  | 1,12  | 1,67  | 2,2   | 2,73  | 3,24  | 3,74  | 4,24  | 4,72  | 5,19  |

Эксперимент проводился при:  $\omega = 60\text{кГц}$ ,  $C_0 = 500\text{пФ}$ ,  $\varphi_0 = 60^\circ \rightarrow R = 57,8\text{кОм}$

|                              |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $C_x = \Delta C (\text{пФ})$ | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
| $\varphi_x (^\circ)$         | 60,49 | 60,96 | 61,42 | 61,87 | 62,31 | 62,73 | 63,14 | 63,54 | 63,93 | 64,31 |
| $\Delta\varphi (^\circ)$     | 0,49  | 0,96  | 1,42  | 1,87  | 2,31  | 2,73  | 3,14  | 3,54  | 3,93  | 4,31  |

Следующим шагом, было построение графиков (рисунки 24-26) по данным таблицам.

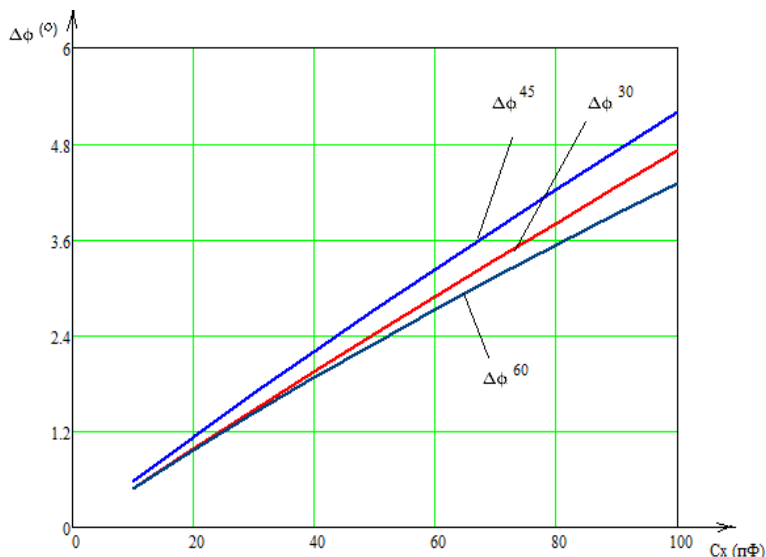


Рисунок 24 - Зависимость фаз от измеряемой емкости

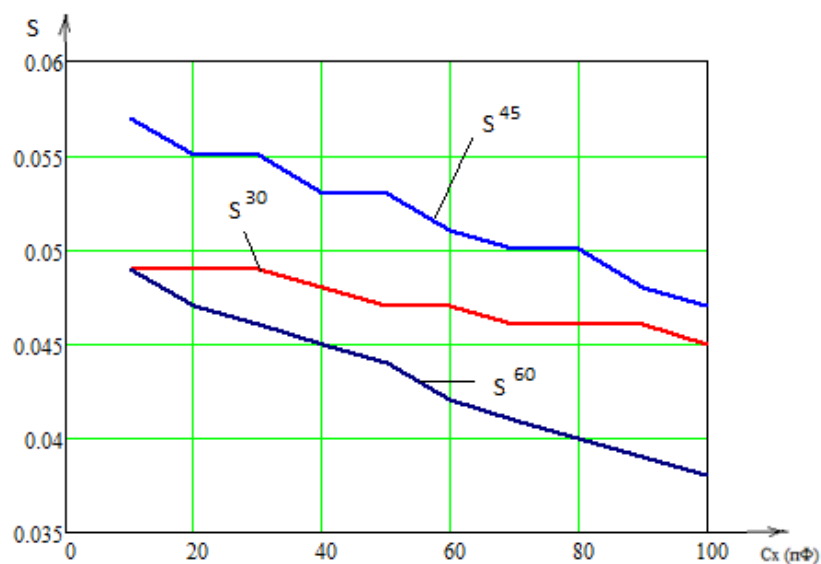


Рисунок 25 - Зависимость чувствительности от ёмкости

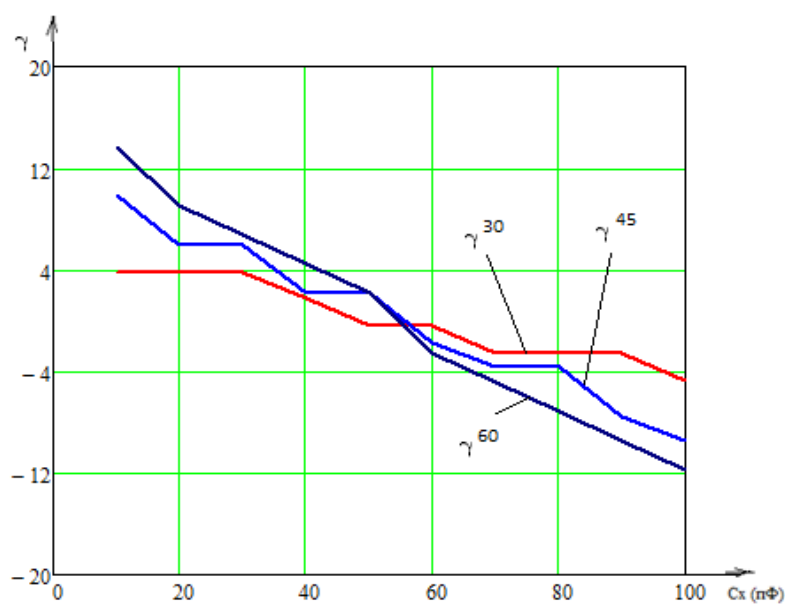


Рисунок 26 - Нелинейность разности фаз от измеряемой емкости

Из графиков и таблиц результатов измерения, можно сделать вывод о том, что разность фаз  $\Delta\varphi$  и изменение емкости  $C_x = \Delta C$  почти прямо пропорциональны при малых отношениях  $\frac{C_x}{C_0}$ . Результаты измерения не зависят от частоты. Эксперимент проводился на частоте среза первого порядка ( $\varphi = 45^\circ$ ) для получения максимальной чувствительности измерения. Можно также использовать RC-цепи 2-ого или 3-ого. К достоинствам этого метода можно отнести

маленькие погрешности; недостатки - сложная реализация.

## 6.2 Составление уравнение преобразования и определение чувствительности

Сдвиг фазы зависит от ёмкости согласно формуле 53.

$$\Delta \phi = -\arctg(\omega R(C_0 + C_X)) \quad (53)$$

Из этого следует, что:

$$C_X = \frac{\operatorname{tg}(-\Delta \phi)}{\omega \cdot R} - C_0 \quad (54)$$

где  $C_0$  - ёмкость датчика;  $C_X$  - измеряемая ёмкость.

Измеряемая разность фаз в результате будет определена выражением:

$$\Delta \phi = \frac{U_{cp}}{U_{min}} \cdot 180^\circ \quad (55)$$

где  $U_{cp}$  - величина среднего выходного напряжения;  $U_{min}$  - величина напряжения питания. Поскольку вольтметр измеряет величину постоянного напряжения  $U_{cp}$ , то уравнение преобразования запишется в виде:

$$U_{cp} = \frac{U_{min}}{180^\circ} \cdot \Delta \phi = \frac{5}{180^\circ} \cdot \Delta \phi \quad (56)$$

Чувствительность прибора была определена опытным путём и составила 27 мВ/град. И подтверждается аналитическим путём:

$$U_{cp} = \frac{5}{180^\circ} \cdot 1^\circ \approx 27 \text{ мВ} \quad (57)$$

, из этого выходит, что максимальное значение, которое можно получить на выходе, составит

$$U_{cp} = \frac{5}{180^\circ} \cdot 180^\circ \approx 5 \text{ В} \quad (58)$$

Зависимость выходного напряжения от смещения фаз является прямой и представлена на рисунке 30.

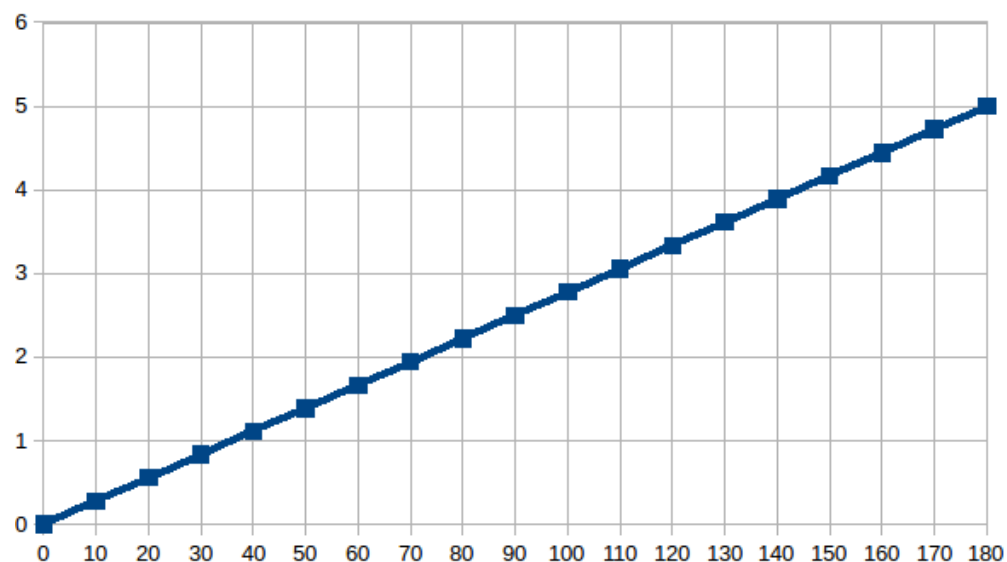


Рисунок 27 - Зависимость напряжения от смещения фаз

### 6.3 Расчёт элементов устройства

Для работы фазометра необходимо рассчитать такие элементы как фазовращатель, компаратор, элемент для преобразования сдвига фаз в промежуток времени, цифровой блок, генератор и блок питания.

#### 6.3.1 Расчёт фазовращателя

Схема простого фазовращателя представлена на рисунке 31. Его работа основана на важнейшем эффекте, который имеет место в усилителе с ОЭ, — инверсии сигнала, проходящего через усилитель. Имея в своем распоряжении два противоположных по фазе сигнала, один из которых снимается с коллектора, а другой — с эмиттера транзистора (как в усилителе с ОК), можно комбинировать их в различных пропорциях. Именно это и происходит в представленной схеме.

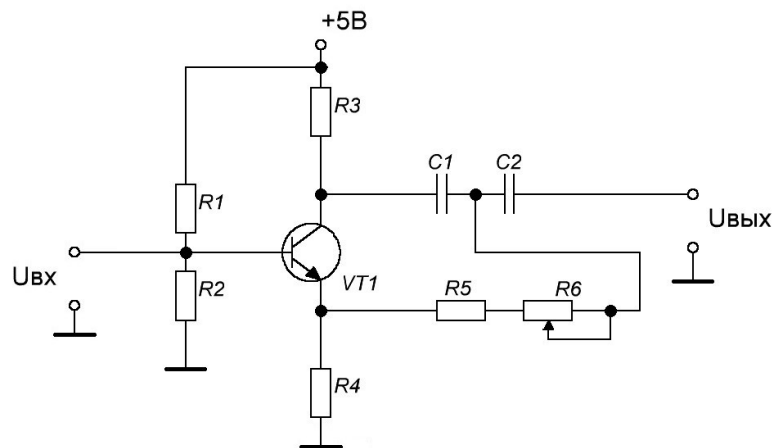


Рисунок 28 - Принципиальная схема фазовращателя

При заданных номиналах резисторов коэффициент усиления каскада по напряжению равен единице, т.е. усиления не происходит. Поступающий на вход сигнал расщепляется на два идентичных, но инверсных друг относительно друга сигнала, сигнал на эмиттере транзистора в точности повторяет входной сигнал. Можно Обратить внимание на то, что для обеспечения симметрии оба выхода усилительного звена должны нагружаться на одинаковые или очень большие импедансы.

RC-цепочка является простейшим схемотехническим решением, обеспечивающим получение сигнала, сдвинутого по фазе относительно входного. В общем случае выходной сигнал этой схемы не повторяет в точности входной сигнал. Основным условием здесь является синусоидальная форма сигнала. Т.е., если входной сигнал имеет форму синусоиды, то и сигнал на выходе будет синусоидальным. Фазовый сдвиг при этом будет определяться положением движка потенциометра  $R6$ .

Для данной схемы был использован транзистор КТ815Г с предельным напряжением  $U_{кэ} > 80В$ . Нагрузочное сопротивление инвертора можно рассчитать если принять  $I_{Кmax} = 10мА$ :

$$R_3 + R_4 = \frac{2E_{num}}{I_{Кmax}} = \frac{10}{10 \cdot 10^{-3}} = 1 кОм \quad (59)$$

а так как  $R_3 = R_4$ , то они равны 500Ом.

### 6.3.2 Расчёт компаратора

Ограничитель предшествующий ОУ состоит из и двух диодов для обеспечения прямоугольника на выходе. Для работы были выбраны диоды КД269-А.

Для возможности измерения фазы сигнала на верхней частоте, диапазон работы компаратора должен быть не ниже:  $f_T = 20 \cdot f_B = 20 \text{ кГц}$

Исходя из этого выбирается компаратор LM311P. Это дифференциальный компаратор со стробированием. Со сверхнизким значением входного напряжения шума. Компаратор имеет открытый коллектор на выходе, что позволяет задать уровень логической единицы желаемого уровня. Предназначен для построения малошумящих широкополосных схем с большим коэффициентом усиления. Корпус LM311P - типа DIP-8. Ниже приведена таблица с основными электрическими параметрами и условиями эксплуатации (таблица 4) и цоколевка микросхемы (рисунок 29).

Таблица 4 — Основные электрические параметры и условия эксплуатации микросхемы LM311P.

| Основные электрические характеристики |          |
|---------------------------------------|----------|
| Количество каналов                    | 1        |
| Напряжение питания, В                 | 3.5...30 |
| Время задержки, нс                    | 115      |
| Ток потребления, мА                   | 7.5      |
| Тип корпуса                           | dip8     |
| Напряжение компенсации, мВ            | 7.5      |
| Условия эксплуатации                  |          |
| Температурный диапазон, С             | 0...70   |

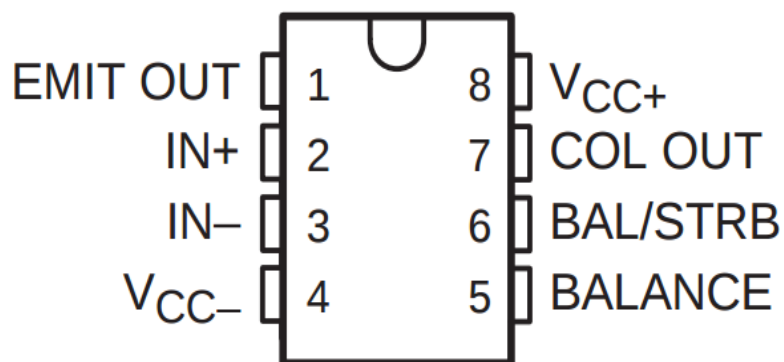


Рисунок 29 - Общий вид микросхемы LM311P

- 1,4 - общий;
- 2 - вход неинвертирующий;
- 3 - вход инвертирующий;
- 5 - баланс;
- 6 - стробирование;
- 7 - выход;
- 8 - напряжение питания +Uп.

Принципиальная схема включения компаратора LM311P представлена на рисунке 33.

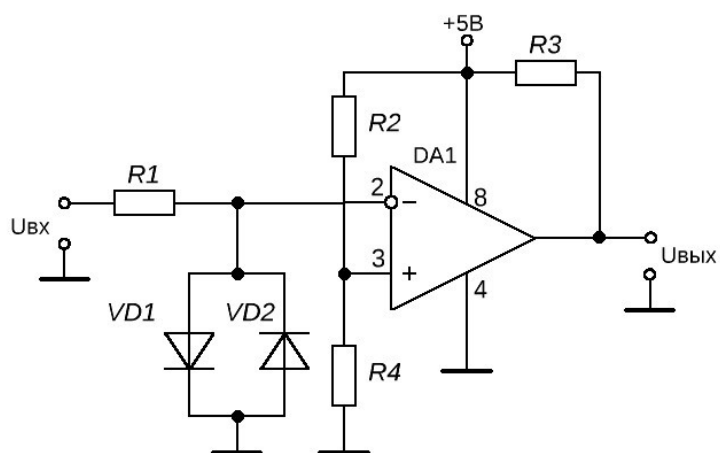


Рисунок 30 - Принципиальная схема включения компаратора с ограничителями

### 6.3.3 Преобразование сдвига фаз в промежуток времени

Для преобразования величины напряжения в период времени будет необходима логика исключающее — ИЛИ. В качестве микросхемы будет использоваться ТТЛ микросхема КМ155ЛП5, её цоколёвка приведена ниже (рисунок 31).

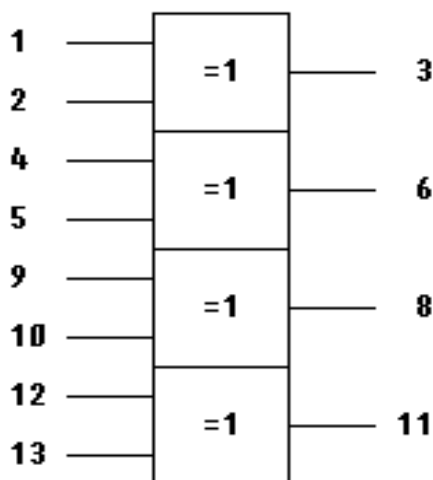


Рисунок 31 - Цоколевка  
микросхемы КМ155ЛП5

Логика ТТЛ использует два уровня напряжений для выходного сигнала:  
0 – 0.4В и 1 – 2.4В.

### 6.3.4 Цифровой блок

При проектировании устройства, был сделан выбор в пользу микроконтроллеров на архитектуре ARM в силу того, что они имеют ряд преимуществ по сравнению с такими архитектурами как AVR или PIC. Их производительность значительно выше при той же цене, объём памяти как внутренней так и оперативной превышает в несколько раз. В данной работе был выбран микроконтроллер STM32F103C8T6 по причине его достаточно невысокой цены и наличию всей необходимой периферии. Серия STM32 F1 представляет собой популярный МК, который удовлетворяет потребности промышленных, медицинских и потребительских рынков. В данной серии используется ядро ARM Cortex™ - M3. Данное ядро имеет основное преимущество на сегодняшний день – универсальность. Также простая архитектура с простыми в использовании инструментами - облегчает работу с данными микроконтроллерами.

Ниже представлена таблица с основными характеристиками которыми обладает микроконтроллер (таблица 5) и цоколевка микросхемы (рисунок 32).

Таблица 5 - Основные характеристики микроконтроллера STM32F103C8T6

| Основные электрические характеристики |                       |
|---------------------------------------|-----------------------|
| Корпус                                | LQFP48                |
| Ядро                                  | ARM Cortex-M3, 32-бит |
| RAM память                            | 20480 байт            |
| FLASH память                          | 65536 байт            |
| Количество каналов АЦП                | 2                     |
| Разрядность АЦП                       | 12                    |
| Скорость АЦП                          | 1 МГц                 |
| Наличие интерфейсов                   | UART, CAN, USB-DEV    |
| Минимальное напряжение питания ядра   | 2 В                   |
| Максимальное напряжение питания ядра  | 3.6 В                 |
| Условия эксплуатации                  |                       |
| Минимальная рабочая температура       | -40°C                 |
| Максимальная рабочая температура      | +80°C                 |

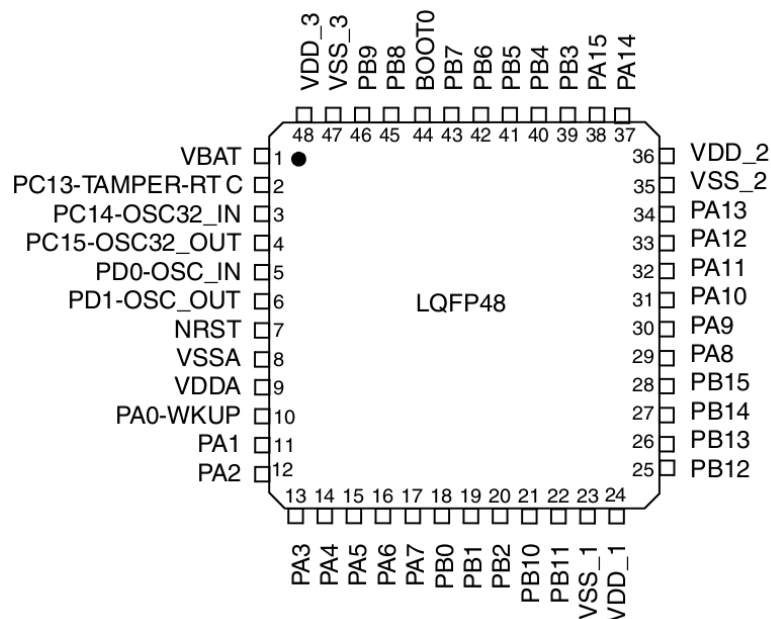


Рисунок 32 - Цоколевка микроконтроллера  
STM32F103C8T6

В связи с тем, что выгодной сигнал с логического элемента представляет из себя ШИМ, скважность которого изменяется в зависимости от измеряемой ёмкости, для проведения измерения среднего напряжения при помощи данного микроконтроллера была использована интегрирующая RC-цепь первого порядка.

### 6.3.5 Программное обеспечение

Для измерения напряжения был использован один из двух двенадцати битных АЦП. Фрагмент программы с основными функциями преобразования представлен ниже.

```
double tg;
uint32_t adc_res;
float Usr, phi, Cx;
int U=2500;
#define PI 3.14159

while(1)
{
    adc_res=ADC1->JDR1;
    delay(250);
    GPIO_WriteBit(GPIOC,GPIO_Pin_13,Bit_RESET);
```

```

delay(250);
GPIO_WriteBit(GPIOC,GPIO_Pin_13,Bit_SET);

lcd_set_xy(5,0);
lcd_out("Capacity");

adc_res=((3.31/4095)*adc_res)*1000;
Usr=adc_res-U;
phi=(Usr/5)*180;

tg=tan(phi-90);
Cx=tg/(2*PI*10500*340000)-47;
lcd_set_xy(4,1);

BCD_4IntLcd(Cx);
lcd_set_xy(7,1);
lcd_out("pF");
}

```

### 6.3.6 Генератор

Генератор был построен на основе моста Вина и операционного усилителя. Генераторы с мостом Вина при довольно простой схемотехнике отличаются высоким качеством генерируемого сигнала.

Структурная схема генератора показана на рисунке 33.

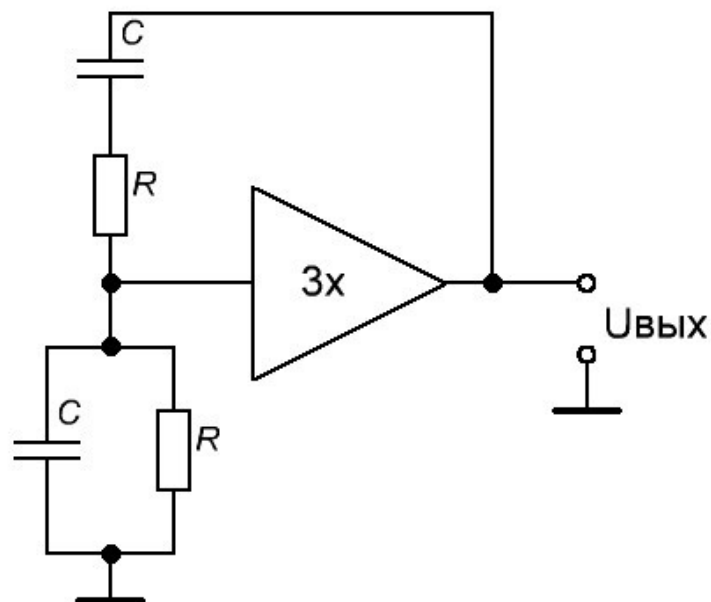


Рисунок 33 - Структурная схема генератора

Необходимый сдвиг фаз обеспечивают последовательная и параллельная RC-цепи. Так как они дают ослабление сигнала в 3 раза, то для возникновения устойчивых колебаний необходим усилитель с коэффициентом усиления равный трём.

При всей простоте схемы генератора на основе моста Вина есть несколько моментов, которые обязательно необходимо принять во внимание.

Во-первых, для получения низкого уровня гармоник сам усилитель должен быть практически идеальным. Современные операционные усилители позволяют довольно просто решить эту проблему.

Во-вторых, система стабилизации амплитуды сигнала должна работать эффективно, чтобы исключить перегрузку усилителя и как следствие рост гармонических искажений. Эту проблему можно решить за счёт применения обычной лампы накаливания.

Принципиальная схема генератора изображена на рисунке 34.

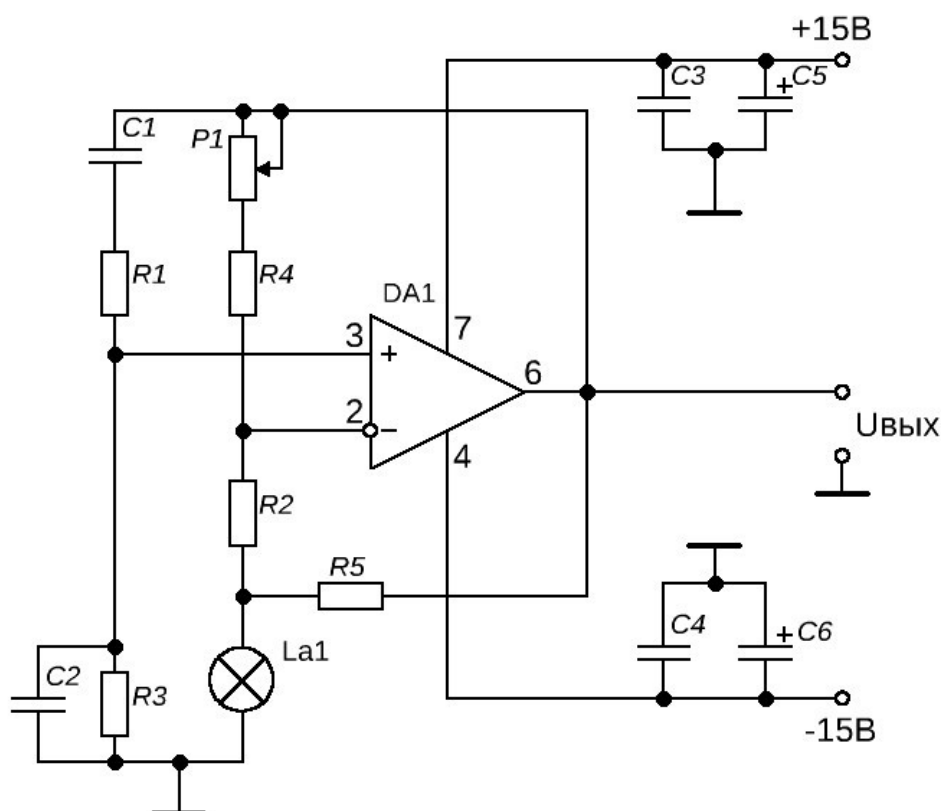


Рисунок 34 - Принципиальная схема генератора

Мост Вина построен на элементах C1R1 и C2R3 и настроен на частоту 10 кГц. Усилитель выполнен на основе ОУ NE5534N. Его коэффициент усиления задаётся элементами P1, R2, R4, La1. В этой цепи лампа работает как резистор с положительным температурным коэффициентом сопротивления, так как сопротивление нити накала лампы зависит от её температуры. Когда нить холодная, её сопротивление составляет около 25 Ом. При достижении номинальной рабочей температуры сопротивление нити накала удваивается.

За счёт этого в схеме изменяется глубина обратной связи. Когда лампа холодная, коэффициент передачи усилителя в основном определяется отношением R3/R4. При повышении выходного напряжения, ток через цепь обратной связи возрастает, и как следствие, возрастает сопротивление лампы. В результате чего глубина отрицательной обратной связи увеличивается, и коэффициент усиления ОУ уменьшается. В результате выходное напряжение падает, и ток, протекающий через лампу, также будет уменьшаться, в результате чего коэффициент усиления ОУ снова будет расти. После короткого разогрева уровень выходного сигнала генератора стабилизируется.

Электронным «противовесом» лампы является триммер P1, который (совместно с R4) образует мост, что позволяет более точно сбалансировать схему. Резистор R5 служит источником тока для лампы, что также повышает стабильность сигнала.

Частота генератора была рассчитана по формуле 60.

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (60)$$

### 6.3.7 Блок питания

Для данного прибора необходим двухполярный, стабильный источник питания. Наличие отрицательного напряжения необходимо для работы генератора. За основу были взяты микросхемы LM2576T-ADJ. LM2576T-ADJ является импульсным стабилизатором напряжения с высоким КПД и имеет низкий шум на выходе. Принципиальная схема блока питания изображена на рисунке 35.

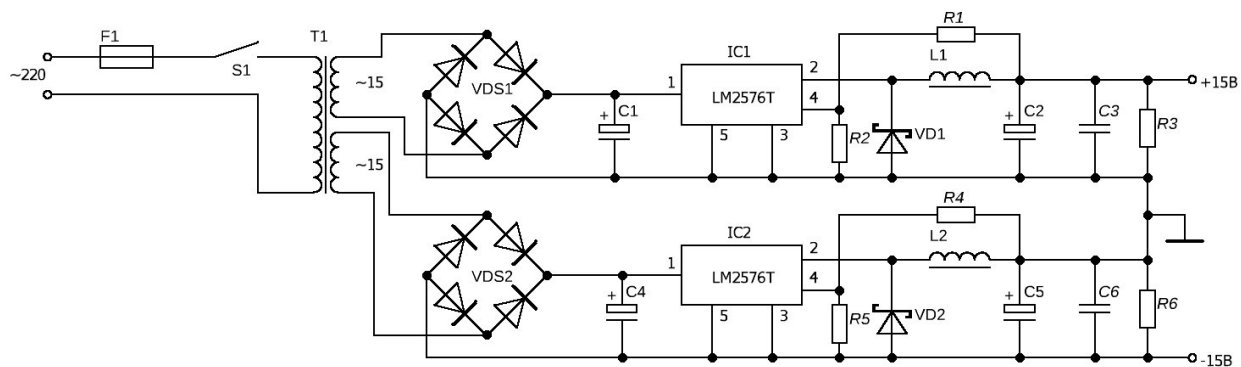


Рисунок 35 - Принципиальная схема блока питания

Одним из плюсов блока питания на lm2576 это отказ от дорогостоящего радиатора, без которого трудно представить линейный стабилизатор на аналогичный ток стабилизации, радиатор не требуется вообще, что так-же существенно уменьшает габариты значительно меньшими габаритами БП на LM2576 стабилизатор. Выходное напряжение устанавливается при помощи обратной связи и делителя напряжения.

### 6.3.5 Изготовление фазометра

Изготовление устройства необходимо начинать с общей принципиальной схемы (рисунок 36).

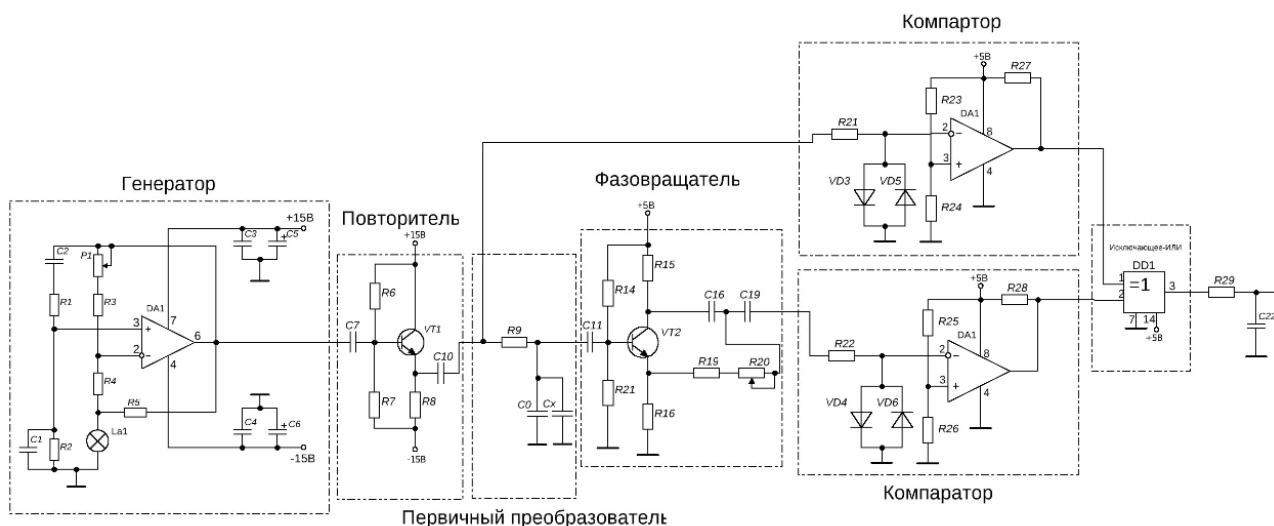


Рисунок 36 - Принципиальная схема прибора (без цифрового блока и блока питания)

Далее необходимо развести по данной схеме плату. Трассировка платы была проведена в программе Sprint Layout (рисунок 37).

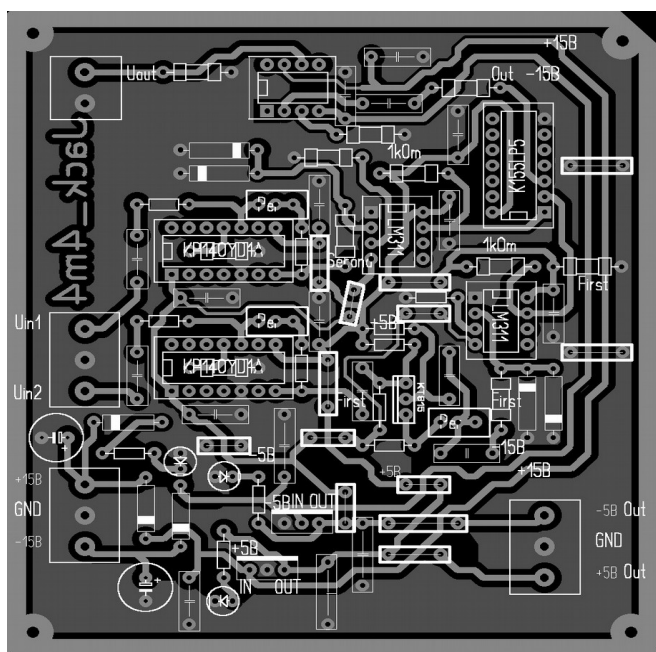


Рисунок 37 - Разведённая плата фазометра

Печатная плата была выполнена на основе одностороннего стеклотекстолита с применением негативного фоторезиста. Экспонирование выбиралось экспериментальным путём и составило 5,5 минут. После нанесения рисунка платы

на текстолит, было произведено травление, сверление, лужение и последующая сборка устройства. Готовый фазометр представлен на рисунке 34.

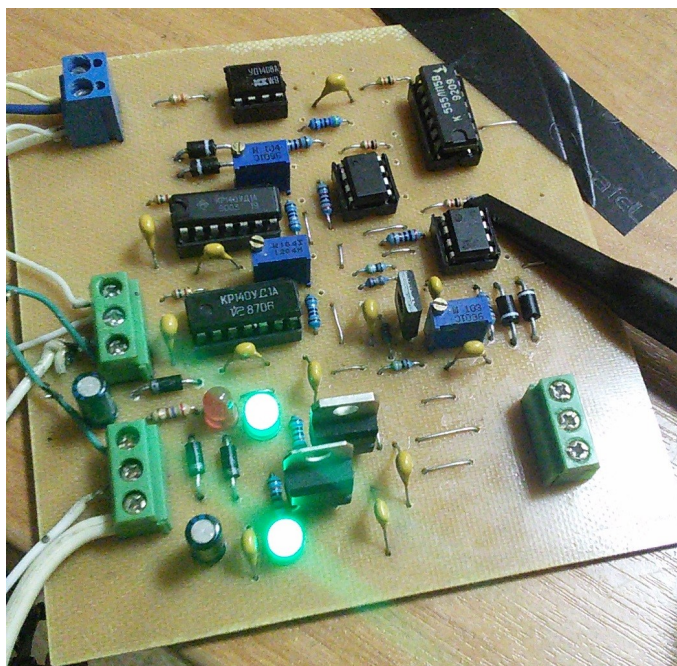


Рисунок 38 - Готовый вариант фазометра

### 6.3.6 Изготовление цифрового блока

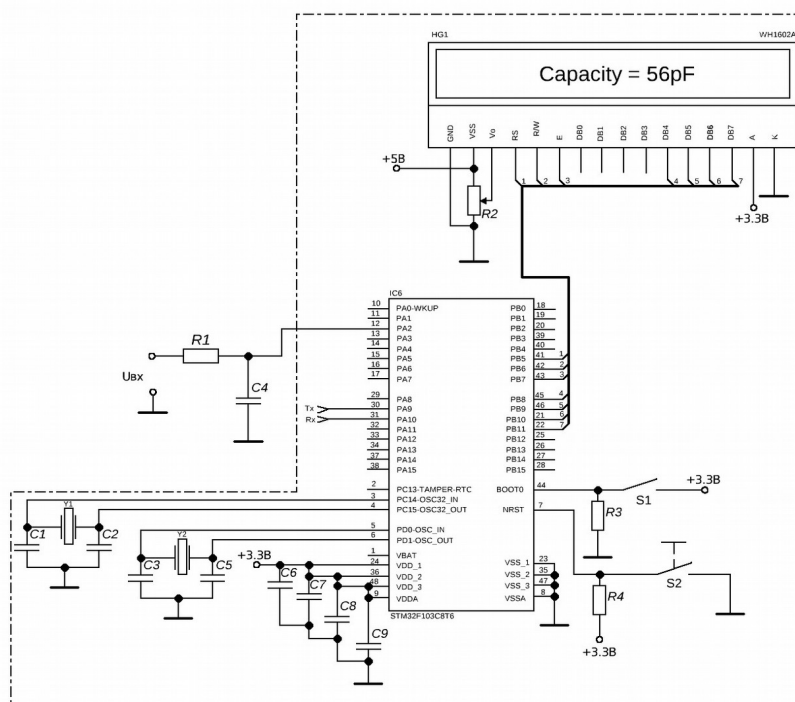


Рисунок 39 - Принципиальная схема цифрового блока

Цифровой блок базировался на микроконтроллере STM32F103C8T6. Ниже приведённая схема (рисунок 39) была взята от разработчиков отладочной платы на данной микросхеме.

По данной принципиальной схеме так-же была разведена плата и по такой же технологии изготовлена печатная плата. После сборки было получено готовое устройство (рисунок 40).

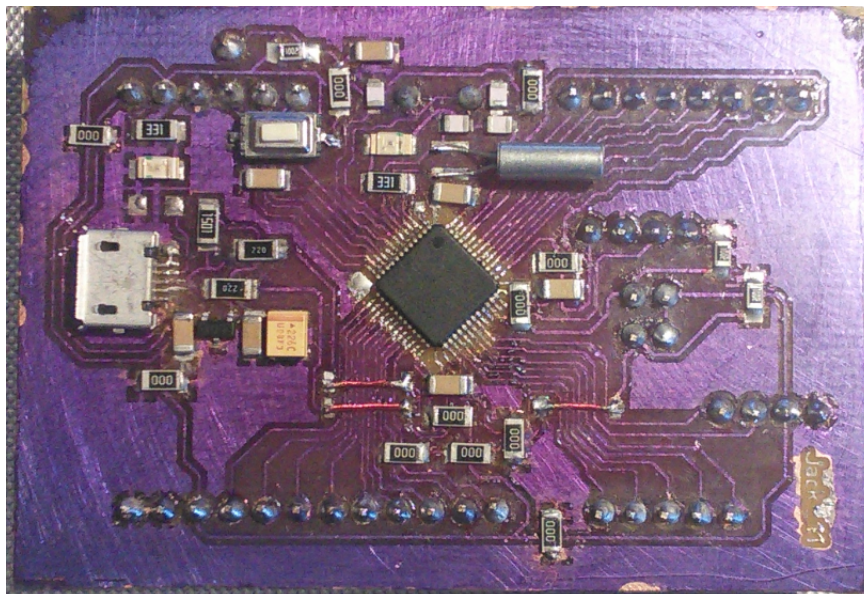


Рисунок 40 - Цифровой блок

После этого, был также разработан переходник на основе CP2102 для проведения прошивки микроконтроллера. Распиновка микросхемы изображена на рисунке 41.

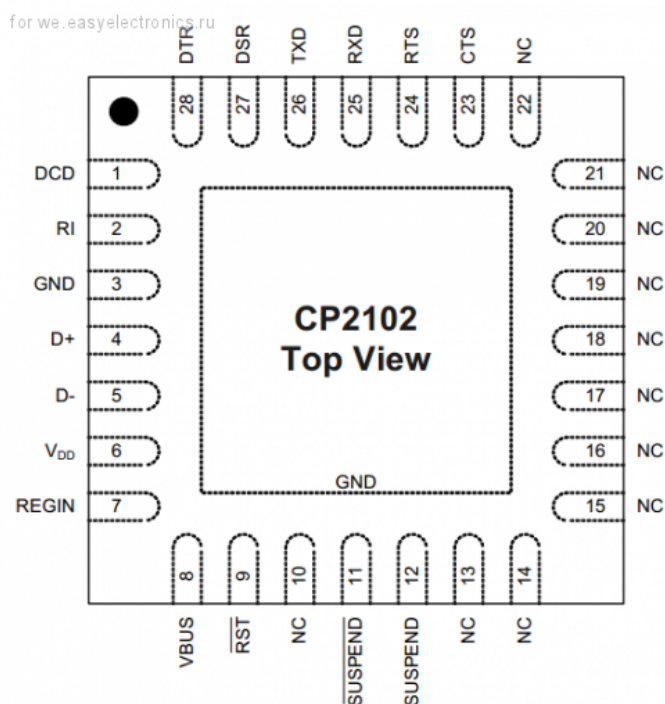


Рисунок 41 - Распиновка микросхемы CP2102

Код основной программы и её алгоритм были рассмотрены ранее. В работе микроконтроллера был задействован один АЦП и 7 цифровых портов для связи с ЖК-дисплеем.

### **6.3 Сборка устройства**

Для сборки устройства был использован корпус фирмы Gainta G716. Данный корпус производится из ударопрочного жаростойкого ABS пластика UL-94V0. Обеспечивает защиту от проникновения пыли и влаги по стандарту IP54. Общий вид корпуса изображён на рисунке 42.

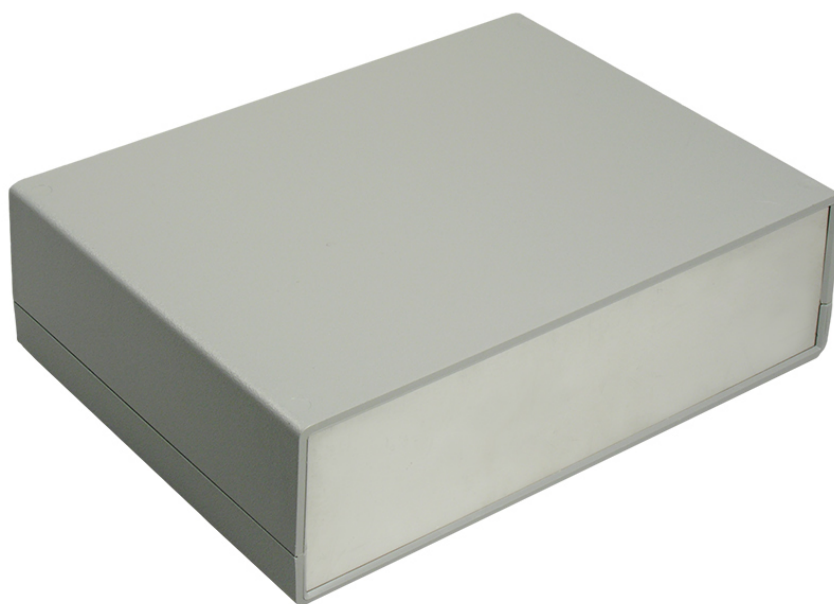


Рисунок 42 - Общий вид корпуса

Расположение печатных плат внутри корпуса изображено на рисунке 43.

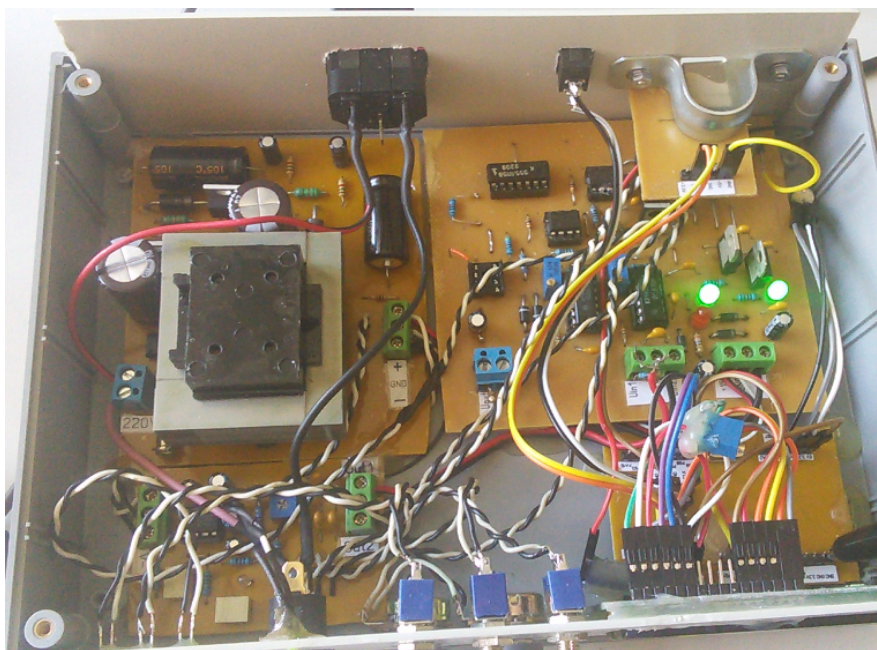


Рисунок 43 - Расположение печатных плат в устройстве

Где по часовой стрелке с левого верхнего угла: двухполярный блок питания; фазометр, над ним переходник USB-UART; цифровой блок с ЖК-дисплеем; генератор.

На задней панели располагаются: сетевой разъём, USB разъём для прошивки микроконтроллера, и переключатель для установки микроконтроллера в режим загрузки ПО.

На передней панели (рисунок 44) слева направо располагаются: светодиоды отвечающие за индикацию во время прошивки микроконтроллера, выключатель с индикацией и работе устройства, тумблеры для включения дополнительных ёмкостей в генераторе для поверки устройства и снизу два переменных резистора для настройки устройства (установка нуля), ЖК-дисплей для вывода показаний.



Рисунок 44 - Передняя панель устройства

После сборки и проверки работоспособности всех блоков были проведены эксперименты. В таблице 6 представлены значения экспериментальных данных

полученных при работе с устройством.

Таблица 6 — Экспериментальные данные

| <b>C<sub>x</sub>, пф (номинальная)</b> | <b>C<sub>x</sub>, пф (измеренная)</b> | <b>Относительная погрешность, %</b> |
|----------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 0,95                                   | 0,93                                  | 2,11                                |
| 2,05                                   | 2,10                                  | 2,44                                |
| 3,25                                   | 3,19                                  | 1,85                                |
| 4,63                                   | 4,54                                  | 1,94                                |
| 9,9                                    | 9,72                                  | 1,82                                |
| 22,04                                  | 21,7                                  | 1,54                                |
| 32,8                                   | 32,59                                 | 0,64                                |
| 46,8                                   | 46,50                                 | 0,64                                |
| 100,1                                  | 99,28                                 | 0,82                                |

На основе полученных данных была построена зависимость (рисунок 45) для оценки зависимости погрешности от величины измеряемой ёмкости.

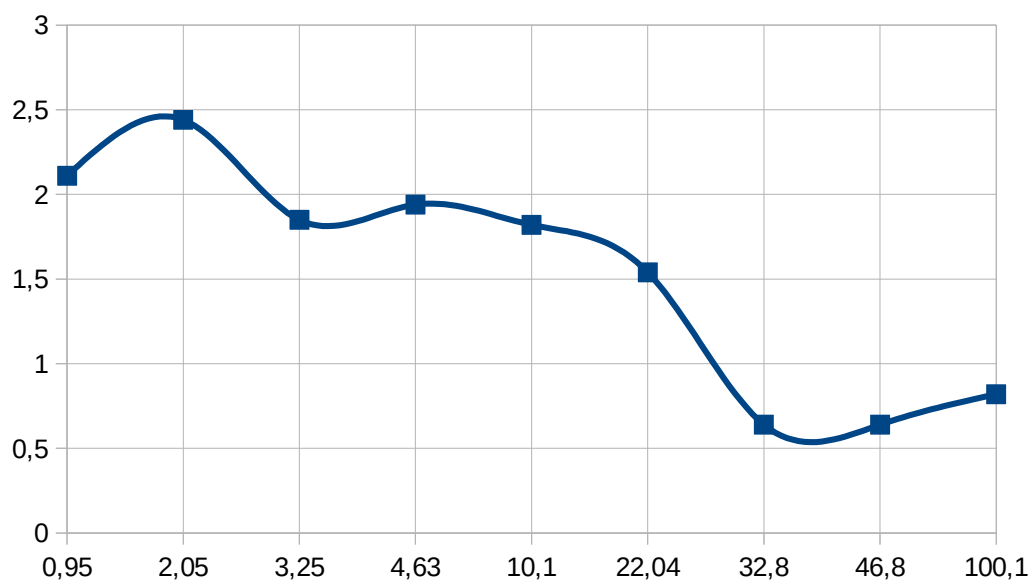


Рисунок 45 - Корреляция относительной погрешности от величины измеряемой ёмкости

По полученным результатам можно сделать вывод о том что погрешность составляет в среднем 1,53%.

## 7. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности

### 7.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевым рынком выполненной работы является компании занимающиеся производством и продажей кабелей.

Сегментом этого рынка являются мелкие и средние коммерческие организации имеющие отношение к производству коаксиальных (радиочастотных) кабелей. Значимыми критериями для данного сегмента рынка, являются размер предприятия и выпускаемая продукция.

### 7.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Таблица 7 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

| Критерии оценки                                         | Вес критерия | Баллы          |                 |                 | Конкурентоспособность |                 |                 |
|---------------------------------------------------------|--------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|
|                                                         |              | Б <sub>Ф</sub> | Б <sub>К1</sub> | Б <sub>К2</sub> | К <sub>Ф</sub>        | К <sub>К1</sub> | К <sub>К2</sub> |
| 1                                                       | 2            | 3              | 4               | 5               | 6                     | 7               | 8               |
| <b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b> |              |                |                 |                 |                       |                 |                 |
| 1. Повышение производительности труда пользователя      | 0.09         | 5              | 3               | 4               | 0,5                   | 0,3             | 0,4             |
| 2. Удобство в эксплуатации                              | 0.07         | 4              | 4               | 4               | 0,4                   | 0,4             | 0,4             |
| 3. Помехоустойчивость                                   | 0.09         | 3              | 4               | 4               | 0,3                   | 0,4             | 0,4             |
| 4. Энергоэкономичность                                  | 0.01         | 5              | 5               | 5               | 0,25                  | 0,25            | 0,25            |
| 5. Надежность                                           | 0.03         | 3              | 5               | 5               | 0,3                   | 0,5             | 0,5             |
| 6. Уровень шума                                         | 0.07         | 5              | 3               | 3               | 0,5                   | 0,3             | 0,3             |
| 7. Безопасность                                         | 0.079        | 3              | 4               | 4               | 0,15                  | 0,2             | 0,2             |
| 8. Потребность в ресурсах памяти                        | 0.001        | 3              | 3               | 3               | 0,09                  | 0,09            | 0,09            |
| 9. Функциональная мощность                              | 0.02         | 5              | 5               | 5               | 0,25                  | 0,25            | 0,25            |
| 10. Простота эксплуатации                               | 0.06         | 3              | 5               | 5               | 0,3                   | 0,5             | 0,5             |
| 11. Качество интеллектуального интерфейса               | 0.06         | 5              | 3               | 3               | 0,5                   | 0,3             | 0,3             |

|                                        |      |   |   |   |     |     |     |
|----------------------------------------|------|---|---|---|-----|-----|-----|
| 12. Возможность подключения в сеть ЭВМ | 0.03 | 4 | 4 | 4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
|----------------------------------------|------|---|---|---|-----|-----|-----|

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot \bar{B}_i = 20.3 \quad (61)$$

где  $\bar{B}_i$  – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$\bar{B}_i$  – средневзвешенное значение  $i$ -го показателя.

После расчёта средневзвешенного показателя, который составил 20.3, можно судить о том, что перспективность данного продукта крайне низкая. Необходимо повышать некоторые характеристики устройства.

### 7.3 FAST-анализ

Проведение FAST-анализа предполагает шесть стадий:

1. Выбор объекта FAST-анализа — в качестве объекта выступает устройство для измерения ёмкости коаксиального кабеля.

2. Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом приведено в таблице 8.

Таблица 8.

| Наименование узла         | Кол-во деталей на узел | Выполняемая функция                             | Ранг функции |          |                 |
|---------------------------|------------------------|-------------------------------------------------|--------------|----------|-----------------|
|                           |                        |                                                 | Главная      | Основная | Вспомогательная |
| Блок стабилизации питания | 6                      | Стабилизация напряжения питания                 |              |          | X               |
| Усилитель                 | 8                      | Усиление входных сигналов                       |              |          | X               |
| Фазовращатель             | 5                      | Настройка прибора                               |              | X        |                 |
| Формирователь             | 4                      | Формирование прямоугольных импульсов            | X            |          |                 |
| Логический элемент        | 1                      | Преобразование сдвига фазы в промежутки времени | X            |          |                 |

|                         |   |                               |  |  |  |
|-------------------------|---|-------------------------------|--|--|--|
| Усилитель<br>напряжения | 2 | Повышение<br>чувствительности |  |  |  |
|-------------------------|---|-------------------------------|--|--|--|

### 3. Определение значимости выполняемых функций объектом

Для оценки значимости функций будем использовать метод расстановки приоритетов, предложенный Блумбергом В.А. и Глуценко В.Ф. В основу данного метода положено расчетно-экспертное определение значимости каждой функции.

На первом этапе необходимо построить матрицу смежности функции (таблица 9).

Таблица 9.

|                                                             | Стабилизация<br>напряжения<br>питания | Усиление<br>входных<br>сигналов | Настройка<br>прибора | Формирование<br>прямоугольных<br>импульсов | Преобразование<br>сдвига<br>фазы в<br>промежутки<br>и времени | Повышение<br>чувствительности |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Стабилизация<br>напряжения<br>питания                       | =                                     | <                               | <                    | <                                          | <                                                             | <                             |
| Усиление<br>входных<br>сигналов                             | >                                     | =                               | <                    | <                                          | <                                                             | <                             |
| Настройка<br>прибора                                        | >                                     | >                               | =                    | =                                          | <                                                             | >                             |
| Формирование<br>прямоугольных<br>импульсов                  | >                                     | >                               | =                    | =                                          | =                                                             | >                             |
| Преобразование<br>сдвига<br>фазы в<br>промежутки<br>времени | >                                     | >                               | >                    | =                                          | =                                                             | >                             |
| Повышение<br>чувствительности                               | >                                     | >                               | <                    | <                                          | <                                                             | =                             |

Второй этап связан в преобразованием матрицы смежности в матрицу количественных соотношений функций (таблица 10)

Таблица 10.

|                                                 | Стабилизация напряжения питания | Усиление входных сигналов | Настройка прибора | Формирование прямоугольных импульсов | Преобразование сдвига фазы в промежутки времени | Повышение чувствительности | Итого |
|-------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|-------|
| Стабилизация напряжения питания                 | 1                               | 0,5                       | 0,5               | 0,5                                  | 0,5                                             | 0,5                        | 3,5   |
| Усиление входных сигналов                       | 1,5                             | 1                         | 0,5               | 0,5                                  | 0,5                                             | 0,5                        | 4,5   |
| Настройка прибора                               | 1,5                             | 1,5                       | 1                 | 1                                    | 0,5                                             | 0,5                        | 6     |
| Формирование прямоугольных импульсов            | 1,5                             | 1,5                       | 1                 | 1                                    | 1                                               | 1,5                        | 7,5   |
| Преобразование сдвига фазы в промежутки времени | 1,5                             | 1,5                       | 1,5               | 1                                    | 1                                               | 1,5                        | 8     |
| Повышение чувствительности                      | 1,5                             | 1,5                       | 0,5               | 0,5                                  | 0,5                                             | 1                          | 5,5   |
|                                                 |                                 |                           |                   |                                      |                                                 |                            | 35    |

В рамках третьего этапа происходит определение значимости функций путем деления балла, полученного по каждой функции, на общую сумму баллов по всем функциям таблица 11.

Таблица 11.

| Функция                         | Балл | Значимость функции |
|---------------------------------|------|--------------------|
| Стабилизация напряжения питания | 3,5  | 0,1                |
| Усиление входных                | 4,5  | 0,13               |

|                                                       |     |      |
|-------------------------------------------------------|-----|------|
| сигналов                                              |     |      |
| Настройка прибора                                     | 6   | 0,17 |
| Формирование<br>прямоугольных импульсов               | 7,5 | 0,21 |
| Преобразование сдвига<br>фазы в промежутки<br>времени | 8   | 0,23 |
| Повышение<br>чувствительности                         | 5,5 | 0,16 |

#### 4. Анализ стоимости функций выполняемых объектом исследования.

Задача данной стадии заключается в том, что с помощью специальных методов оценить уровень затрат на выполнение каждой функции. Сделать это возможно с помощью применения нормативного метода. Расчет стоимости функций приведен в таблице 12.

Таблица 12.

| Наименование узла         | Количество деталей узла | Выполняемая функция                             | Норма расхода, г | Трудоёмкость детали, нормо-ч | Стоимость материала, руб. | Заработная плата, руб. | Себестоимость, руб. |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|
| Блок стабилизации питания | 6                       | Стабилизация напряжения питания                 | —                | —                            | 15                        | —                      | 20                  |
| Усилитель                 | 8                       | Усиление входных сигналов                       | —                | —                            | 6                         | —                      | 17                  |
| Фазовращатель             | 5                       | Настройка прибора                               | —                | —                            | 5                         | —                      | 15                  |
| Формирователь             | 4                       | Формирование прямоугольных импульсов            | —                | —                            | 20                        | —                      | 26                  |
| Логический элемент        | 1                       | Преобразование сдвига фазы в промежутки времени | —                | —                            | 5                         | —                      | 5                   |
| Усилитель напряжения      | 2                       | Повышение чувств.                               | —                | —                            | 12                        | —                      | 15                  |

В дальнейшем путем суммирования затрат по каждой функции определяется общая стоимость каждой из них. Данная информация используется для построения функционально-стоимостной диаграммы на следующей стадии.

#### 5. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и её анализ.

Информация об объекте исследования, собранная в рамках предыдущих стадий, на данном этапе обобщается в виде функционально-стоимостной диаграммы (рисунок 46).

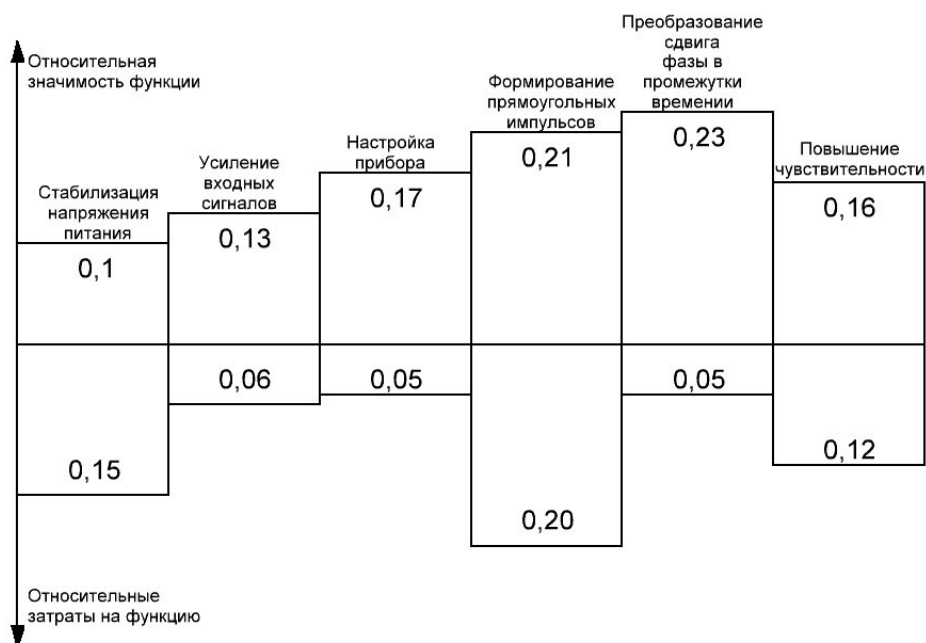


Рисунок 46 - Функционально-стоимостной диаграммы

#### 6. Оптимизация функций выполняемых объектом.

Построенная функционально-стоимостная диаграмма позволяет выявить некоторые диспропорции между полезностью функций и затратами на них.

Вышеприведённый анализ показывает небольшое наличие рассогласования по первой функции (стабилизация напряжения питания). Можно провести работы по ликвидации данных диспропорций.

В результате проведения FAST-анализа данной разработки должно быть снижение затрат на единицу полезного эффекта, достигаемое путем изменения схемотехники данного блока и как следствие элементной базы.

#### 7.4 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). Необходимые данные внесены в специальную форму (таблица 13) содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта.

Таблица 13 – 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                                      | 4                                        | 4                                       |
| 2     | Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела  | 4                                        | 4                                       |
| 3     | Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке         | 5                                        | 4                                       |
| 4     | Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок   | 5                                        | 4                                       |
| 5     | Определены авторы и осуществлена охрана их прав                                   | 4                                        | 4                                       |
| 6     | Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности                         | 5                                        | 4                                       |
| 7     | Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта                                 | 4                                        | 2                                       |
| 8     | Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки                        | 3                                        | 2                                       |
| 9     | Определены пути продвижения научной разработки на рынок                           | 3                                        | 2                                       |
| 10    | Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки                       | 3                                        | 1                                       |
| 11    | Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок    | 1                                        | 1                                       |
| 12    | Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот | 2                                        | 1                                       |
| 13    | Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки            | 4                                        | 3                                       |
| 14    | Имеется команда для коммерциализации научной разработки                           | 2                                        | 2                                       |
| 15    | Проработан механизм реализации научного проекта                                   | 3                                        | 2                                       |
|       | <b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>                                                               | <b>52</b>                                | <b>40</b>                               |

При проведении анализа, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. Система измерения по каждому направлению (степень

проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. Оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаком с теорией и практическим примером применения, 4 – знаком с теорией и способен самостоятельно выполнить, 5 – знаком с теорией, способен самостоятельно выполнить и консультировать.

Исходя из полученной оценки, можно сделать вывод, что перспективность выполняемого проекта выше среднего.

### **7.5 Инициация проекта**

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Устав проекта документирует бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать.

Цели и результат проекта: разработка измерителя электрической ёмкости коаксиального кабеля в процессе производства. Заинтересованные стороны проекта представлены в таблице 14.

Таблица 14 - заинтересованные стороны проекта

| <b>Заинтересованные стороны проекта</b> | <b>Ожидания заинтересованных сторон</b>           |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Руководитель проекта                    | Качественное выполнение работ в оговоренные сроки |
| Исполнитель проекта                     | Разработка измерителя ёмкости                     |

В таблице 15 представлена информация об иерархии целей проекта и

требованиях к результату. Цели проекта должны включать цели в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Таблица 15 - цели и результат проекта

|                                         |                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Цели проекта:</b>                    | Разработка измерителя электрической ёмкости коаксиального кабеля в процессе производства. Разработка ресурсоэффективного и экономически выгодного способа измерения ёмкости. |
| <b>Ожидаемые результаты проекта:</b>    | Разработка прибора                                                                                                                                                           |
| <b>Требования к результату проекта:</b> | Выполнение в срок                                                                                                                                                            |

Участники рабочей группы представлены в таблице 16.

Таблица 16 - рабочая группа проекта

| <b>№ п/п</b>  | <b>ФИО,<br/>основное<br/>место работы,<br/>должность</b>             | <b>Роль в<br/>проекте</b> | <b>Функции</b>                                         | <b>Трудозатраты,<br/>час.</b> |
|---------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1             | Фёдоров<br>Евгений<br>Михайлович,<br>каф. ФМПК<br>доцент             | Руководитель<br>проекта   | Координирует<br>деятельность<br>исполнителя<br>проекта | 300                           |
| 2             | Киселёв<br>Евгений<br>Константинович<br><br>каф. ФМПК,<br>магистрант | Исполнитель<br>проекта    | Выполнение<br>проектных<br>работ                       | 2200                          |
| <b>ИТОГО:</b> |                                                                      |                           |                                                        | 2500                          |

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а так же «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта. Ограничения представлены в таблице 17.

Таблица 17 - ограничения проекта

| <b>Фактор</b>                                     | <b>Ограничения/допущения</b>   |
|---------------------------------------------------|--------------------------------|
| 3.1. Бюджет проекта                               | 6500                           |
| 3.1.1. Источник финансирования                    | Киселёв Евгений Константинович |
| 3.2. Сроки проекта:                               | 01.09.2014-01.06.2016          |
| 3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом | 15.10.2014                     |

## 7.6 Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

### 7.6.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта. На рисунке 47 представлена структура по разработки измерительного устройства.



Рисунок 47 - Иерархическая структура работ

### 7.6.2 Контрольные события проекта

В рамках данного раздела были определены ключевые события проекта, их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты. Эта информация сведена в таблицу 18.

Таблица 18 - контрольные события проекта

| № п/п | Контрольное событие | Результат (подтверждающий документ) |
|-------|---------------------|-------------------------------------|
| 1     | Постановка ТЗ       | Техническое задание                 |

|   |                                                |                                                                                    |
|---|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 2 | Подготовительные работы                        | Отчеты НИР, патентный поиск                                                        |
| 3 | Теоретические и экспериментальные исследования | Проведены теоретические расчёты, которые были подтверждены экспериментальным путём |
| 4 | Заключительный этап                            | Пояснительная записка                                                              |

### 7.6.3 План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевой графики проекта.

Линейный график представляется в виде таблицы 19.

Таблица 19 - календарный план проекта

| Название                                          | Длительность, рабочие дни | Длительность, календарные дни | Дата начала работ | Дата окончания работ | Состав участников         |
|---------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------|----------------------|---------------------------|
| Получение технического задания                    | 2                         | 2                             | 14.09.14          | 30.10.14             | Исполнитель, руководитель |
| Анализ задачи                                     | 38                        | 45                            | 30.10.14          | 20.12.14             | Исполнитель, руководитель |
| Сбор информации, анализ технических возможностей. | 43                        | 50                            | 20.12.14          | 10.03.15             | Исполнитель               |
| Изучение основ и методов                          | 58                        | 80                            | 10.03.15          | 30.04.15             | Исполнитель               |
| Ознакомление с принципами работы                  | 43                        | 50                            | 30.04.15          | 14.06.15             | Исполнитель               |
| Разработка принципиальной схемы устройства        | 37                        | 45                            | 10.09.15          | 20.10.15             | Исполнитель               |
| Проведение экспериментов                          | 34                        | 40                            | 20.10.14          | 4.11.15              | Исполнитель               |
| Анализ полученных                                 | 13                        | 15                            | 4.11.15           | 25.11.15             | Исполнитель, руководитель |

|                                   |     |     |          |          |             |
|-----------------------------------|-----|-----|----------|----------|-------------|
| результатов                       |     |     |          |          |             |
| Подготовка графического материала | 17  | 20  | 25.11.15 | 16.05.16 | Исполнитель |
| Оформление работы                 | 146 | 180 | 14.09.14 | 30.10.14 | Исполнитель |
| Итого:                            | 431 | 527 |          |          |             |

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм, который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

| Код работ<br>ы | Вид работ                                                    | Т <sub>к</sub> ,<br>ка<br>л,<br>дн. | Продолжительность выполнения работ |    |    |    |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |      |   |   |   |   |  |  |
|----------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|----|----|----|------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|------|---|---|---|---|--|--|
|                |                                                              |                                     | 2014                               |    |    |    | 2015 |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 2016 |   |   |   |   |  |  |
|                |                                                              |                                     | 9                                  | 10 | 11 | 12 | 1    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1    | 2 | 3 | 4 | 5 |  |  |
| 1              | Получение<br>технического<br>задания                         | 2                                   |                                    |    |    |    |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |      |   |   |   |   |  |  |
| 2              | Анализ задачи                                                | 45                                  |                                    |    |    |    |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |      |   |   |   |   |  |  |
| 3              | Сбор<br>информации,<br>анализ<br>технических<br>возможностей | 50                                  |                                    |    |    |    |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |      |   |   |   |   |  |  |
| 4              | Изучение<br>основ и<br>методов                               | 80                                  |                                    |    |    |    |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |      |   |   |   |   |  |  |
| 5              | Ознакомление<br>с принципами<br>работы                       | 50                                  |                                    |    |    |    |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |      |   |   |   |   |  |  |
| 6              | Разработка<br>принципиальн<br>ой схемы<br>устройства         | 45                                  |                                    |    |    |    |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |      |   |   |   |   |  |  |
| 7              | Проведение<br>эксперименто<br>в                              | 40                                  |                                    |    |    |    |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |      |   |   |   |   |  |  |
| 8              | Анализ<br>полученных<br>результатов                          | 15                                  |                                    |    |    |    |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |      |   |   |   |   |  |  |
| 9              | Подготовка<br>графического<br>материала                      | 20                                  |                                    |    |    |    |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |      |   |   |   |   |  |  |
| 10             | Оформление<br>работы                                         | 180                                 |                                    |    |    |    |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |      |   |   |   |   |  |  |

- исполнитель

- руководитель

#### 7.6.4 Бюджет научного исследованиями

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения.

1. Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты.

В эту статью включены затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода. Группировка затрат по статьям приведена в таблице 26.

Расчет стоимости материальных затрат проводится по действующим ценам. В стоимость материальных затрат включены транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включены затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье занесены в таблицу 20.

Таблица 20 - сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

| Наименование            | Марка, размер | Кол-во  | Цена за единицу, руб. | Сумма, руб. |
|-------------------------|---------------|---------|-----------------------|-------------|
| Интегральные микросхемы | КР140УД22     | 1       | 25                    | 25          |
| Интегральные микросхемы | КР544УД2      | 10      | 20                    | 200         |
| Логические микросхемы   | К561ЛП2       | 1       | 20                    | 20          |
| Диоды                   | 1N4004        | 4       | 2                     | 8           |
| Конденсаторы            | К10-176       | 20      | 5                     | 100         |
| Переменные резисторы    | СПЗ-4АМ       | 1       | 50                    | 50          |
| Подстроечные резисторы  | СП5-2ВБ       | 2       | 25                    | 50          |
| Транзисторы             | КТ361Б        | 1       | 2                     | 2           |
| Транзисторы             | КТ837Д        | 1       | 5                     | 5           |
| Провод монтажный        | МГШВ          | 30 м    | 5                     | 150         |
| Припой                  | ПОС-61        | 5 м     | 20                    | 100         |
| Канифоль                |               | 0,250 л | 290                   | 290         |
| Плата                   |               | 1       | 50                    | 50          |

|                                            |  |   |     |        |
|--------------------------------------------|--|---|-----|--------|
| монтажная                                  |  |   |     |        |
| Корпус                                     |  | 1 | 500 | 500    |
| Прочие расходы                             |  |   | 500 | 500    |
| Всего за материалы                         |  |   |     | 2050   |
| Транспортно-заготовительные расходы (3-5%) |  |   |     | 61,5   |
| Итого по статье $C_m$                      |  |   |     | 2111,5 |

## 2. Специальное оборудование для научно-исследовательских работ.

В данную статью включены все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

При приобретении специального оборудования учтены затраты по его доставке и монтажу в размере 15 % от его цены. Все расчеты по приобретению спецоборудования, сводятся в таблицу 21.

Таблица 21 - Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

| № п/п          | Наименование оборудования                      | Кол-во единиц оборудования | Цена единицы оборудования, тыс.руб. | Общая стоимость оборудования, тыс.руб. |
|----------------|------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|
| 1              | Компьютер высокой мощности                     | 1                          | 25000                               | 25000                                  |
| 2              | Паяльная станция                               | 1                          | 2000                                | 2000                                   |
| 3              | Цифровой осциллограф                           | 1                          | АСК-2061                            | 30000                                  |
| 4              | Генератор                                      | 1                          | VC-2002                             | 8000                                   |
| 5              | Источник питания постоянного напряжения и тока | 1                          | ATH-4235                            | 46000                                  |
| Итоговая сумма |                                                |                            |                                     | 111000                                 |

### 3. Основная заработная плата

В настоящую статью включена основная заработная плата научных и инженерно-технических работников непосредственно участвующих в выполнении работ по теме. Величина расходов по заработной плате определена исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. Расчет основной заработной платы сводится в таблице 22.

Таблица 22 - Расчет основной заработной платы

| № п/п | Наименование этапов                              | Исполнители по категориям | Трудоемкость, чел.-дн. | Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс.руб. | Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб. |
|-------|--------------------------------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1.    | Получение технического задания                   | Руководитель              | 2                      | 1278,62                                                   | 2557,24                                               |
|       |                                                  | Студент                   | 2                      | 0                                                         | 0                                                     |
| 2.    | Анализ задачи                                    | Руководитель              | 38                     | 1278,62                                                   | 48587,56                                              |
|       |                                                  | Студент                   | 38                     | 0                                                         | 0                                                     |
| 3.    | Сбор информации, анализ технических возможностей | Студент                   | 43                     | 0                                                         | 0                                                     |
| 4.    | Изучение основ и методов                         | Студент                   | 58                     | 0                                                         | 0                                                     |
| 5.    | Ознакомление с принципами работы                 | Студент                   | 43                     | 0                                                         | 0                                                     |
| 6.    | Разработка принципиальной схемы устройства       | Студент                   | 37                     | 0                                                         | 0                                                     |
| 7.    | Проведение экспериментов                         | Студент                   | 34                     | 0                                                         | 0                                                     |
| 8.    | Обсуждение полученных результатов                | Студент                   | 13                     | 0                                                         | 0                                                     |
|       |                                                  | Руководитель              | 13                     | 1278,62                                                   | 16622,06                                              |
| 9.    | Подготовка графического                          | Студент                   | 17                     | 0                                                         | 0                                                     |

|                 |                   |         |     |   |   |
|-----------------|-------------------|---------|-----|---|---|
|                 | материала         |         |     |   |   |
| 10.             | Оформление работы | Студент | 146 | 0 | 0 |
| Итого: 67766,86 |                   |         |     |   |   |

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

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} , \quad (62)$$

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

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата руководителя и инженера (дипломника) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб} , \quad (63)$$

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

$T_{р}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (таблица 24);

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} , \quad (64)$$

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. (таблица 23).

Таблица 23 - баланс рабочего времени

| Показатели рабочего времени                  | Руководитель | Исполнитель |
|----------------------------------------------|--------------|-------------|
| Календарное число дней                       | 365          | 365         |
| Количество нерабочих дней                    | 71           | 71          |
| - выходные дни                               | 51           | 51          |
| - праздничные дни                            | 20           | 20          |
| Потери рабочего времени на отпуск            | 48           | 0           |
| Действительный годовой фонд рабочего времени | 246          | 294         |

Среднедневная заработная плата руководителя:

$$З_{дн.р} = \frac{30244,32 \cdot 10,4}{246} = 1278,62 \text{ руб.}$$

Среднедневная заработная плата исполнителя:

$$З_{дн.с} = \frac{0 \cdot 12}{294} = 0 \text{ руб.}$$

Исходя из количества рабочих, основная заработная плата составит для руководителя:

$$З_{осн.р} = 1278,62 \cdot 53 = 67766,86 \text{ руб.}$$

для исполнителя:

$$З_{осн.и} = 0 \cdot 431 = 0 \text{ руб.}$$

Таблица 24 - расчет основной заработной платы

| Исполнители  | З <sub>м</sub> , руб | З <sub>дн</sub> , руб. | Т <sub>р</sub> , раб.дн. | З <sub>осн</sub> , руб. |
|--------------|----------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Руководитель | 30244,32             | 1278,62                | 53                       | 67766,86                |
| Исполнитель  | 0                    | 0                      | 431                      | 0                       |

4. Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала составляет в среднем 12% от суммы основной заработной платы.

Таким образом, дополнительная заработная плата:

для руководителя:

$$З_{д.р} = 67766,86 \cdot 0,12 = 8132,02 \text{ руб.}$$

для исполнителя:

$$З_{д.и} = 0 \cdot 0,12 = 0 \text{ руб.}$$

В таблице 24 представлена заработная плата рабочей группы проекта.

Таблица 24 - заработная плата исполнителей ВКР

| Зарплата                        | Руководитель | Исполнитель |
|---------------------------------|--------------|-------------|
| Основная зарплата               | 67766,86     | 0           |
| Дополнительная зарплата         | 8132,02      | 0           |
| Итого                           | 75898,88     | 0           |
| Итого по статье С <sub>зп</sub> | 75898,88     |             |

5. Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) \quad , \quad (65)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды, составляет 30%.

Отчисления во внебюджетные фонды для руководителя:

$$C_{внеб} = 0,3 \cdot 75898,88 = 22769,66 \text{ руб.}$$

#### 6. Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями

На эту статью относится стоимость работ, выполненных сторонними организациями и предприятиями по заказу данной научно-технической организации, результаты которых используются в конкретном НТИ. В таблице 25 представлены затраты на услуги сторонних организаций.

Таблица 25 - затраты на услуги сторонних организаций

| Услуга                           | Количество | Стоимость одной единицы, руб. | Сумма затрат, руб. |
|----------------------------------|------------|-------------------------------|--------------------|
| Распечатка на принтере формат А3 | 4          | 5                             | 20                 |
| Доступ в Internet                | 2 месяца   | 390 (в мес.)                  | 780                |
| Итого:                           |            |                               | 800                |

#### 7. Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему.

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Примем коэффициент накладных расходов  $k_{\text{накл}}$  равным 90%,

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}})$$

$$C_{\text{накл}} = 0.9 \cdot 75898,88 = 68308,99 \text{ руб.}$$

Таблица 26 - группировка затрат по статьям

| № п/п                        | Статьи затрат                                                                    | Сумма, руб |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1.                           | Сырье, материал(за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты | 2111,5     |
| 2.                           | Специальное оборудование для научных работ                                       | 111000     |
| 3.                           | Основная заработная плата                                                        | 67766,86   |
| 4.                           | Дополнительная заработная плата                                                  | 8132,02    |
| 5.                           | Отчисления на социальные нужды                                                   | 22769,66   |
| 6.                           | Оплата работ, выполняемых сторонними организациями                               | 800        |
| 7.                           | Накладные расходы                                                                | 68308,99   |
| Итого плановая себестоимость |                                                                                  | 285812,53  |

## 7.7 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 финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп. } i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (66)$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп. } i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно- исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп1}} = \frac{4344555,7}{5419612,6} = 0,8; I_{\text{финр}}^{\text{исп2}} = \frac{5419612,6}{5419612,6} = 1; I_{\text{финр}}^{\text{исп3}} = \frac{2845459,64}{5419612,6} = 0,52.$$

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

$$I_{pi} = \sum a^i \cdot b^i \quad (67)$$

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

$a^i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i^a$ ,  $b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы 27.

Таблица 27 - сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

| Объект исследования Критерии | Весовой коэффициент параметра | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 |
|------------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|
|------------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|

|                                                             |      |      |      |     |
|-------------------------------------------------------------|------|------|------|-----|
| 1. Надежность                                               | 0,2  | 5    | 5    | 4   |
| 2. Универсальность                                          | 0,2  | 4    | 4    | 5   |
| 3. Уровень материалоемкости                                 | 0,15 | 4    | 4    | 5   |
| 4. Функциональная мощность<br>(предоставляемые возможности) | 0,20 | 5    | 5    | 4   |
| 5. Ремонтопригодность                                       | 0,1  | 5    | 5    | 5   |
| 6. Энергосбережение                                         | 0,15 | 4    | 4    | 5   |
| ИТОГО                                                       | 1    | 4,65 | 3,15 | 3,8 |

$$I_{p-ucn1} = 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 = 4,5;$$

$$I_{p-ucn2} = 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 = 4,5;$$

$$I_{p-ucn3} = 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,1 = 4,55.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ( $I_{ucni}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{ucni} = \frac{I_{p-ucni}}{I_{фин. i}} \quad (68)$$

$$I_{ucn1} = \frac{4,5}{0,8} = 5,625; I_{ucn2} = \frac{4,5}{1} = 4,5; I_{ucn3} = \frac{4,55}{0,52} = 8,75.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (таблица 28) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{cp}$ ):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{ucni}}{I_{ucnmax}} \quad (69)$$

Таблица 28 - Сравнительная эффективность разработки

| п/п | Показатели                                              | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 |
|-----|---------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| 1   | Интегральный финансовый показатель разработки           | 0,8   | 1     | 0,52  |
| 2   | Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки | 4,5   | 4,5   | 4,55  |
| 3   | Интегральный показатель эффективности                   | 5,625 | 4,5   | 8,75  |
| 4   | Сравнительная эффективность вариантов исполнения        | 0,64  | 0,51  | 1     |

Сравнив значения интегральных показателей эффективности можно сделать вывод, что реализация технологии в третьем исполнении является более эффективным вариантом решения задачи, поставленной в данной работе с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

## 8. Социальная ответственность

В данной выпускной работе был произведён обзор известных методов измерения ёмкости кабеля, а также разрабатывался прибор для измерения ёмкости кабеля. В процессе разработки устройства, были задействованы такие приборы как, паяльная станция, блок питания, генератор, различные измерительные приборы.

Согласно ГОСТ 12.0.003-74 [1] опасные и вредные факторы, возникающие при проведении данной работы, приведены в таблице 28.

Производственный фактор - фактор, воздействие которого на работающего при определенных условиях, приводит к травмам или резкому ухудшению здоровья, возникновению хронических заболеваний или снижению работоспособности.

Таблица 28 - Опасные и вредные факторы при разработке устройства

| Источник фактора, наименование видов работ                                                                                           | Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)                                                                                                                                                  |                                          | Нормативные документы                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                      | Вредные                                                                                                                                                                        | Опасные                                  |                                                                                                                                                                                                                        |
| Прибор для измерения ёмкости кабеля.                                                                                                 | Электромагнитное поле.<br>Электростатическое поле.<br>Недостаточная освещённость выводимой на дисплей информации.                                                              | Электрический ток.                       | Система стандартов безопасности труда.<br>Электробезопасность - ГОСТ 12.1.038-82;<br>Нормы параметров электромагнитного и электростатического поле описаны в СанПиН 2.2.4.1191-03 и в ГОСТ 12.1.045-84 соответственно. |
| Измерительные устройства: мультиметр, осциллограф.<br>Генератор.<br>Блок питания.<br>Паяльное оборудование.<br>Лампы дневного света. | Электромагнитное поле.<br>Электростатическое поле.<br>Шум.<br>Повышенная температура внешней среды.<br>Недостаточная освещённость.<br>Повышенная концентрация вредных веществ. | Электрический ток.<br>Термические ожоги. |                                                                                                                                                                                                                        |

## **8.1 Производственная безопасность**

### **8.1.1 Анализ вредных и опасных факторов при разработке устройства**

#### **Электромагнитное поле**

ЭМП создается магнитными катушками отклоняющей системы, находящимися около цокольной части электронно-лучевой трубки монитора осциллографа или магнито-электрического вольтметра. ЭМП обладает способностью биологического, специфического и теплового воздействия на организм человека.

Биологическое воздействие зависит от длины волны, интенсивности, продолжительности и режимов воздействия ЭМП, размеров, анатомического строения органа, подвергающегося воздействию ЭМП.

Специфическое воздействие ЭМП обусловлено биохимическими изменениями, происходящими в клетках и тканях. Наиболее чувствительными являются центральная и сердечно-сосудистая системы. Наблюдаются нарушения условно-рефлекторной деятельности, снижение биоэлектрической активности мозга, изменение межнейронных связей.

Тепловое воздействие ЭМП характеризуется повышением температуры тела, локальным избирательным нагревом тканей, органов, клеток вследствие перехода ЭМП в тепловую энергию. Интенсивность нагрева зависит от количества поглощенной энергии и скорости оттока тепла от облучаемых участков тела. Отток тепла затруднен в органах и тканях с плохим кровообращением. К ним, в первую очередь, относят хрусталик глаза.

Нормы параметров электромагнитного поля описаны в СанПиН 2.2.4.1191-03 [2].

#### **Электростатическое поле**

Электростатическое поле возникает в результате облучения экрана потоком заряженных частиц. Неприятности, вызванные им, связаны с пылью, накапливающейся в электростатически заряженных экранах, которая летит на человека во время его работы за осциллографом. Электростатический потенциал, возникающий в теле человека при его работе за монитором, различен и колеблется в пределах  $\pm 0,6 \text{ кВ/м}$ . Потенциал человека служит решающим фактором при осаждении частиц пыли на поверхности тела, что, в свою очередь, может служить причиной кожных заболеваний, порчи контактных линз, при катаракте развивается помутнение хрусталика глаза.

Уровень электростатического поля не должен превышать максимального

уровня согласно ГОСТ 12.1.045-84 [3].

### **Шум**

Шум на рабочих местах создается рабочим оборудованием, преобразователями напряжения, работающими осветительными приборами дневного света, а также проникает из вне. Шум является общебиологическим раздражителем и в определенных условиях может влиять на органы и системы организма человека.

Прежде всего, шум влияет на различные отделы головного мозга, изменяя нормальные процессы высшей нервной деятельности (жалобы на утомляемость, общую слабость, апатию, ослабление памяти и т.д.). При воздействии шума наступают изменения в органах зрения человека (понижается устойчивость острота и чувствительность зрения), а также и в вестибулярном аппарате; нарушаются функции желудочно-кишечного тракта; повышается внутричерепное давление; происходят нарушения в обменных процессах организма и т.п. Шум ухудшает точность выполнения рабочих операций, затрудняет прием и восприятие информации.

В результате неблагоприятного воздействия шума на работающего человека происходит снижение производительности труда, увеличивается брак в работе, создаются предпосылки к возникновению несчастных случаев. Поэтому в помещениях уровень шума не должен превышать 65дБ согласно СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [4].

Шум на рабочих местах создается внутренними источниками — элементы питания осциллографа и других измерительных приборов, и внешними источниками - шум с улицы.

### **Повышенная температура внешней среды**

При повышении температуры воздуха уменьшается теплоотдача во внешнюю среду, происходит повышение температуры внутренних органов. Исследователями установлено, что при температуре воздуха более 30°С работоспособность человека начинает падать. Длительное воздействие высокой температуры может привести к значительному накоплению теплоты в организме и перегреванию организма.

В результате воздействия высоких температур на организм человека, происходит снижение производительности труда, повышается утомляемость и раздражительность. Поэтому в рабочих помещениях, температура не должна превышать 22-24°С согласно СанПиН 2.2.4.548-96 [5].

### **Недостаточная освещённость**

Для оптимизации условий труда имеет большое значение освещение рабочих мест. Задачи организации освещённости рабочих мест следующие: обеспечение различаемости рассматриваемых предметов, уменьшение напряжения и утомляемости органов зрения. Производственное освещение должно быть равномерным и устойчивым, иметь правильное направление светового потока, исключать слепящее действие света и образование резких теней.

Недостаточное освещение влияет на функционирование зрительного аппарата, то есть определяет зрительную работоспособность, на психику человека, его эмоциональное состояние, вызывает усталость центральной нервной системы, возникающей в результате прилагаемых усилий для опознания четких или сомнительных сигналов.

Согласно СП 52.13330.2011 [6], уровень общей освещённости в лаборатории при проведении исследований должно составлять не менее 500 лк и цветовой температурой 400-600 К.

Для разрабатываемого устройства согласно ГОСТ Р 50948-2001 [7] яркость знака должна быть  $20 \text{ кд/м}^2$  для плоских дискретных экранов. С учётом минимального объекта различения (пиксель на ЖК дисплее) размером 1 мм, освещённость не должна быть ниже 150 лк.

### **Повышенная концентрация вредных веществ в воздухе**

Вредные вещества которые могут содержаться в воздухе при производстве печатных плат и пайка включают в себя хлорид железа или персульфат аммония, гидроксид калия, а также сплав Вуда, в состав которого входит кадмий. Согласно ГН 2.1.6.695-98 [8], ПДК хлорида железа и персульфата аммония в воздухе составляет  $0,004 \text{ мг/м}^3$  и  $0,1 \text{ мг/м}^3$  соответственно. Кадмия должно содержаться в воздухе не более  $0,0003 \text{ мг/м}^3$  исходя из ГН 2.1.6.695-98 [8]. Для обеспечения минимального воздействия вредных веществ или их полного отсутствия на организм человека, необходимо предусмотреть дополнительную вентиляцию, а также средства индивидуальной защиты, такие как респиратор или марлевая повязка.

### **Поражение электрическим током**

В качестве источника поражения тока может выступать блок питания или оголённые токоведущие линии.

Чтобы исключить опасность поражения электрическим током, необходимо соблюдать следующие правила электрической безопасности:

- перед включением приборов в сеть должна быть визуально проверена его электропроводка на отсутствие возможных видимых нарушений изоляции, а также на отсутствие замыкания токопроводящих частей на корпус;
- при появлении признаков замыкания необходимо немедленно отключить от электрической сети приборы общим выключателем и устранить неисправность;
- запрещается при включенном технике одновременно прикасаться к приборам имеющим естественное заземление (например, радиаторы отопления, водопроводные краны и др.).

Существуют следующие способы защиты от поражения электрическим током в электроустановках:

- защитное заземление;
- зануление;
- защитное отключение;
- защитное разделение сетей;
- предохранительные устройства.

Самый распространенный способ защиты от поражения электрическим током при эксплуатации измерительных приборов и устройств - защитное заземление, которое предназначено для превращения “замыкания на корпус” в “замыкание на землю”, с тем, чтобы уменьшить напряжение прикосновения и напряжение шага до безопасных величин (выравнивание потенциала).

### **Термические ожоги**

При не аккуратном обращении с паяльной станцией, есть большая вероятность получить сильные ожоги. Для избежания травм паяльник оснащён специальной теплоизоляционной ручкой и подставкой в строенной в саму станцию. Для предотвращения ожогов при контакте с токоведущими частями приборов или при контакте с корпусом прибора во время короткого замыкания, все приборы должны быть заземлены.

### **8.2 Экологическая безопасность.**

При выполнении данной работы и разработке устройства был задействован флюс для пайки. При работе с которым происходило его испарение. Каких либо негативных воздействий на окружающую среду эти пары не оказывали. Также при работе самого устройства, в окружающую среду ничего не выделяется.

После того как устройство отработает свой срок, его необходимо будет утилизировать как обычный бытовой прибор.

### **8.3 Безопасность в ЧС**

Наиболее вероятной ЧС, которая может возникнуть при проведении исследований, является пожар.

Пожар может возникнуть при коротком замыкании в процессе разработки или эксплуатации прибора.

При возникновении пожара необходимо сообщить об этом в городскую пожарную охрану по телефону 01 (при этом необходимо сообщить точный адрес здания, место возникновения пожара или обнаружения признаков пожара, вероятную возможность угрозы людям, а также другие сведения, необходимые диспетчеру пожарной охраны). Кроме того, следует назвать себя и номер телефона, с которого делается сообщение о пожаре.

Оповестить о пожаре или его признаках людей, находящихся поблизости, и принять необходимые меры для эвакуации всех людей из здания (из опасной зоны). При появлении опасных факторов пожара (дым, потеря видимости, высокая температура, токсичные пары горения) немедленно эвакуироваться в безопасную зону. При возможности сообщить о пожаре руководителям, должностным лицам и всем людям, находящимся в здании.

Также, для предотвращения пожара, необходимо иметь рабочий огнетушитель, план эвакуации и разработанные мероприятия при возникновении пожара. Дополнительно следует провести инструктаж перед началом проведения исследовательских работ.

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

В связи с тем что в разработке и производстве устройства используются опасные химические вещества и соединения, к данной работе не допускаются беременные женщины и люди имеющие болезни связанные с дыхательной системой. Продолжительность действия на человека в течение определённого отрезка времени химических веществ в концентрации, равной максимально разовой ПДК, не должна превышать 15 мин для газообразных химических веществ и 30 мин - для аэрозолей преимущественно фиброгенного действия.

### **8.5 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны**

Согласно ГОСТ 12.2.003-91 [9], органы управления производственным оборудованием должны обеспечивать оптимальные условия для управления

производственным оборудованием и соответствовать антропометрическим, физиологическим и психофизиологическим свойствам человека, а также характеру работы, должны обеспечивать эффективное управление производственным оборудованием как в обычных условиях эксплуатации, так и в аварийных ситуациях. Органы управления и функционально связанные с ними средства отображения информации необходимо располагать вблизи друг друга функциональными группами таким образом, чтобы орган управления или рука работающего при манипуляции с ним не закрывали индикаторы. Органы управления в необходимых случаях (например при возможности воздействия на них смежного органа управления, случайного прикосновения, сотрясения и т.п.) должны быть защищены от произвольного или самопроизвольного изменения их положения.

Форма и размеры приводных элементов кнопочных и клавишных выключателей и переключателей должны обеспечивать удобство их применения. Рабочая поверхность кнопок и клавиш, предназначенных для управления пальцем, должна иметь плоскую или слегка вогнутую форму. Рабочая поверхность кнопок, управляемых ладонью, должна быть выпуклой (иметь грибовидную форму). Расстояние между ближайшими точками приводных элементов кнопочных и клавишных выключателей и переключателей при размещении их на производственном оборудовании должно быть не менее 15 мм, а при работе в средствах индивидуальной защиты - не менее 25 мм. Значение хода приводных элементов кнопочных выключателей и переключателей должно обеспечивать визуальное различие положений «включено» и «выключено».

Данный прибор полностью соответствует требованиям описанным в ГОСТ 12.2.003-91 [9]. Основные и дополнительные надписи крупные и достаточно контрастируют с цветом корпуса. Интерфейс является минималистичным и прост в обращении. Кнопки расположены на достаточно большом расстоянии, чтобы избежать случайного нажатия нескольких сразу.

## **Заключение**

В данной выпускной квалификационной работе рассмотрены методы измерения ёмкости и смещения фаз сигналов. При анализе основным пунктом являлось рассмотрение возможности применения каждого метода к измерению ёмкости кабеля. Особенностью выбранного метода измерения является то, что в процессе производства, на стадии нанесения изоляции, кабель не имеет собственной ёмкости как таковой и для её моделирования необходимо использовать воду как второй проводник кабеля.

Были приведены предложения по проектированию и изготовлению фазометра. Также на основе анализа методов разработана структурная схема фазометра. Прибор основан на преобразовании ёмкости в напряжение. В приборе используется микроконтроллер который позволяет широко применять данный прибор на производстве. Устройство способно быть ведущем в связке с экструдером, тем самым контролировать толщину изоляционного покрытия кабеля и как следствие контроля ёмкости.

## Список литературы

1. Вавилова, Галина Васильевна. Разработка методов и средств контроля погонной емкости одножильного электрического провода в процессе производства [Электронный ресурс]. - <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/a/2016/08.pdf>
2. Гольдштейн, Александр Ефремович. Измеритель погонной емкости одножильного провода для технологического контроля [Электронный ресурс] / А. Е. Гольдштейн, Г. В. Вавилова // Ползуновский вестник / Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова (АлтГТУ). — 2015. — № 3. — [С. 38-42]. - [http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pv2015\\_03/pdf/038goldshtein.pdf](http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pv2015_03/pdf/038goldshtein.pdf)
3. Брагин С.М. Электрический кабель (конструкции и основы технологии), М.: Госэнергоиздат, 1966 – 320с
4. Метрологические характеристики средств измерений [Электронный ресурс].-<http://www.km.ru/referats/69C1048F7B5C44A4A5C10E9CF6DE4533#>
5. Кранихфельд Л.И. Теория, расчет и конструирование кабелей и проводов, М.: Энергия 1972 – 356с
6. Привезенцев В.А. Кабели и провода т.1, т.2, т3, М.: Госэнергоиздат, 1962
7. Котур В.И. Электрические измерения и электроизмерительные приборы, М.: Связь, 1986 – 280с
8. Емкостные преобразователи в системах автоматического контроля и управления. Составили. В. П. Бухгольц, Э. Г. Тисевич – Москва: Изд. «ЭНЕРГИЯ», 1972. – 82с.
9. Укстин Э.Ф. Измерения характеристик кабелей электросвязи, М. : Энергия, 1967 - 248
10. Пошерстник М.Ю. Производство кабелей связи, М. – Л. Госэнергоиздат 1949 – 192
11. Кушнир. Ф.В. Измерения в технике связи, М.: Связь, 1976
12. Кулешов В.Н. Электрические измерения междугородных кабелей связи, М.: Связь, 1964 – 340с.
13. Григорьян А.Г. Производство кабелей и проводов с применением пластмасс и резин, М.: Связьиздат, 1992 – 246с
14. Способ измерения углов сдвига фаз [Электронный ресурс]. - <http://www.findpatent.ru/patent/4/43964.html>
15. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ - «Опасные и вредные производственные

факторы. Классификация» [1].

16. СанПиН 2.2.4.1191-03 - "Электромагнитные поля в производственных условиях» [2].

17. ГОСТ 12.1.045-84 - "Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля" [3].

18. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 - «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки» [4].

19. СанПиН 2.2.4.548-96 - «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [5].

20. СП 52.13330.2011 - «Свод правил. Естественное и искусственное освещение» [6].

21. ГОСТ Р 50948-2001 - «Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности» [7].

22. ГН 2.1.6.695-98 - «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населённых мест» [8].

23. ГОСТ 12.2.003-91 - «Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие требования безопасности» [9].

### **Список публикаций**

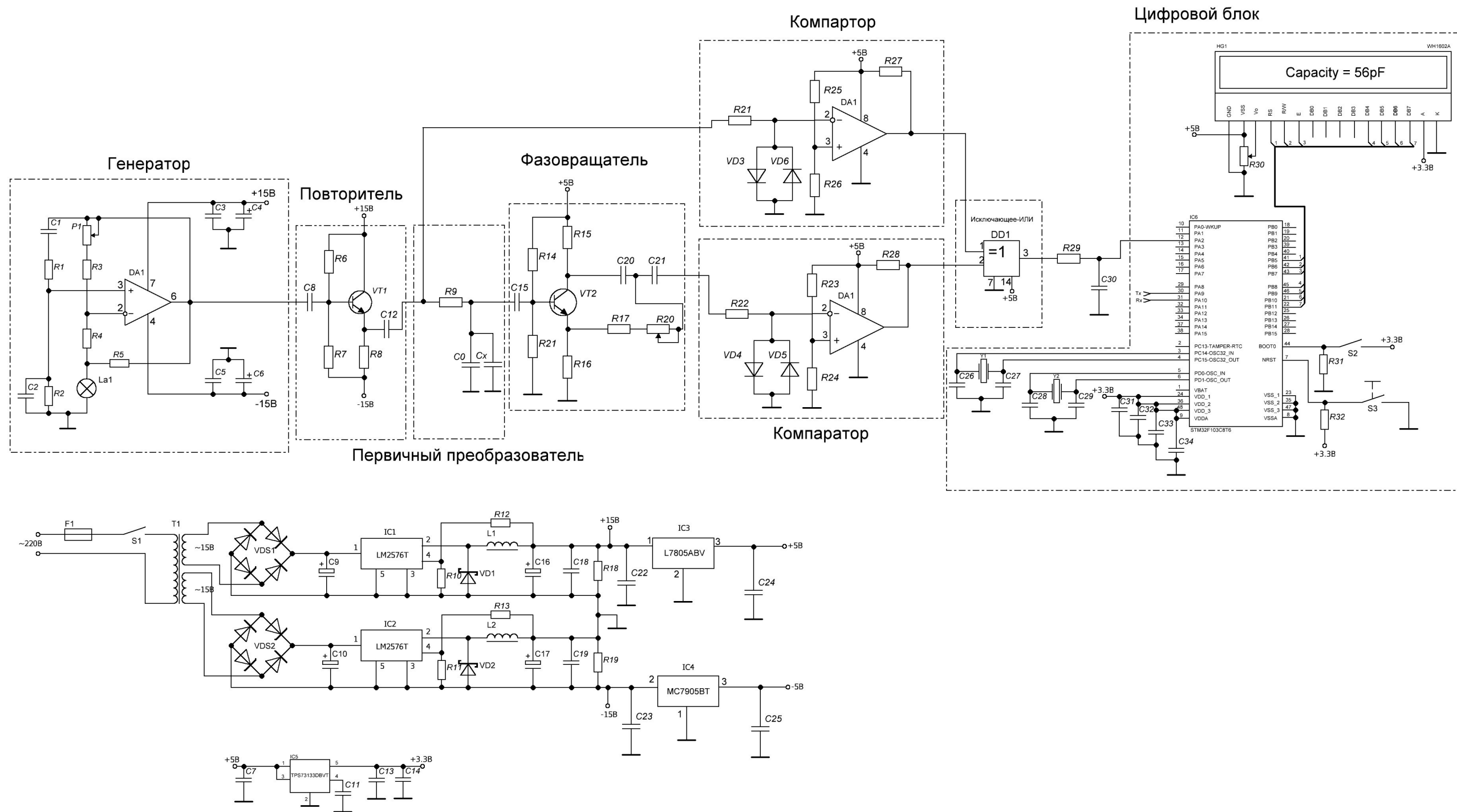
Миляев Д. В. , Нгуен Д. -. , Киселёв Е. К. Фазометрический метод измерения ёмкости кабеля // Ползуновский вестник. - 2014 - №. 2. - С. 102-106

Миляев Д. В. , Нгуен Д. -. , Киселёв Е. К. Фазометрический метод измерения ёмкости кабеля // Контроль. Диагностика. - 2014 - №. 11. - С. 53-57

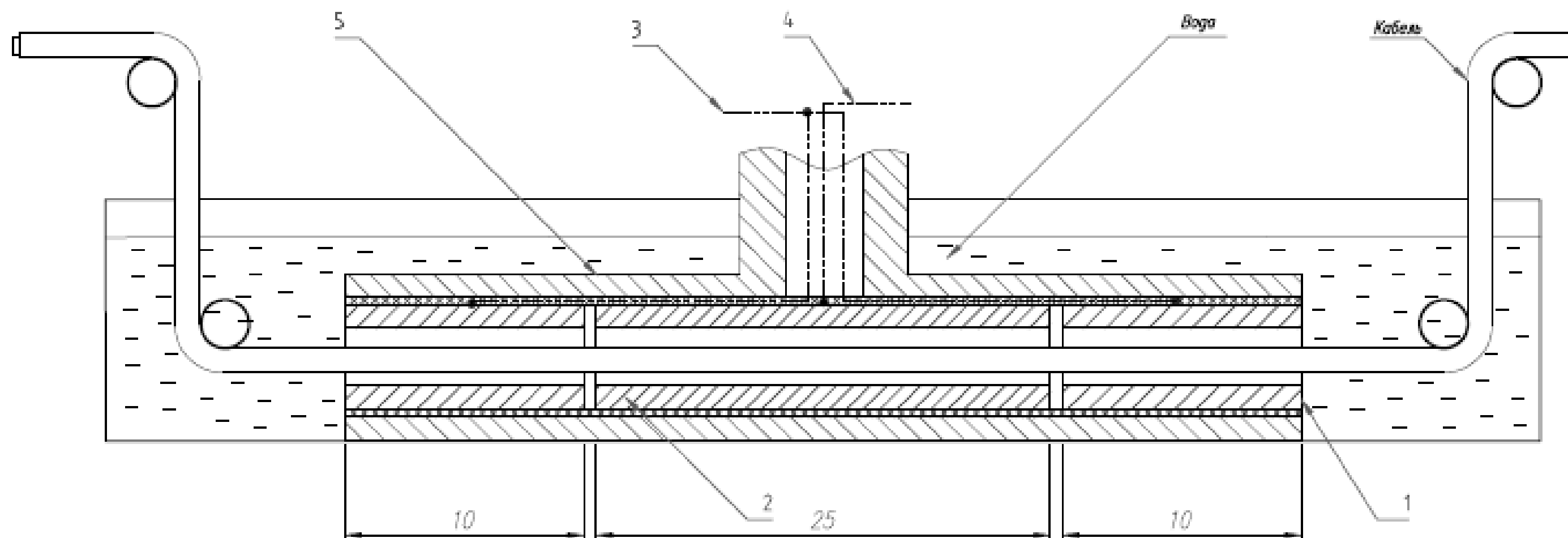
Киселёв Е. К. Измерение качественных и количественных характеристик радиочастотного кабеля // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов III Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых. В 4-х томах, Томск, 6-11 Октября 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 1 - С. 109-111

Гольдштейн А. Е. , Вавилова Г. В. , Киселёв Е. К. Измерение погонной ёмкости одножильного электрического провода в процессе производства [Электронный ресурс] // Информационные технологии неразрушающего контроля: сборник трудов Российской школы конференции с международным участием, Томск, 27-30 Октября 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - С. 286-297

Миляев Д. В. , Нгуен Д. -. , Киселёв Е. К. Фазометрический метод измерения ёмкости кабеля // Информационно-измерительная техника и технологии: материалы V научно-практической конференции с международным участием, Томск, 19-23 Мая 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - С. 22-27



|           |      |              |         |      |                                            |                            |   |          |         |  |
|-----------|------|--------------|---------|------|--------------------------------------------|----------------------------|---|----------|---------|--|
|           |      |              |         |      | ФЮРА.XXXXXX.001                            |                            |   |          |         |  |
|           |      |              |         |      | Принципиальная схема<br>измерителя ёмкости | Лит                        |   | Масса    | Масштаб |  |
| Изм       | Лист | № докум.     | Подпись | Дата |                                            |                            | У |          |         |  |
| Разраб.   |      | Киселёв Е.К. |         |      |                                            |                            |   |          |         |  |
| Провер.   |      | Фёдоров Е.М. |         |      |                                            |                            |   |          |         |  |
| Т. контр. |      |              |         |      |                                            |                            |   |          |         |  |
| Реценз.   |      |              |         |      |                                            | Лист 1                     |   | Листов 3 |         |  |
| Н. контр. |      |              |         |      |                                            | НИ ТПУ ИНК<br>Группа 1БМ4Б |   |          |         |  |
| Утверд.   |      |              |         |      |                                            |                            |   |          |         |  |



1 — электрод питания; 2 — рабочий электрод; 3 — вход питания; 4 — выход; 5 — корпус.

## Приложение Г

Раздел  
Методы измерения ёмкости  
Methods of measurement of capacity

Студент:

| Группа | ФИО                            | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------------|---------|------|
| 1БМ4Б  | Киселёв Евгений Константинович |         |      |

Консультант кафедры ФМПК :

| Должность | ФИО                        | Ученая степень,<br>звание               | Подпись | Дата |
|-----------|----------------------------|-----------------------------------------|---------|------|
| Доцент    | Фёдоров Евгений Михайлович | Кандидат<br>технических<br>наук, доцент |         |      |

Консультант – лингвист кафедры ИЯФТ :

| Должность | ФИО                   | Ученая степень,<br>звание          | Подпись | Дата |
|-----------|-----------------------|------------------------------------|---------|------|
| Доцент    | Ковалёва Юлия Юрьевна | Кандидат<br>педагогических<br>наук |         |      |

### 3. Methods of measurement of capacity

The concept of capacity was considered earlier. There are some phenomena connected to this physical quantity. First, capacity is the relation of amount of the electricity entered on a conductor to applied voltage. The resonance phenomenon is also connected to capacity.

According to the fundamental law of electrical engineering, tension on the condenser does not change instantaneous, namely

$$U = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (12)$$

where  $t$  - time during which there is a change of potential;  $RC$  – time constant.

Proceeding from the considered phenomena and laws, it is possible to select the following methods of measurement of capacity (a figure 6).

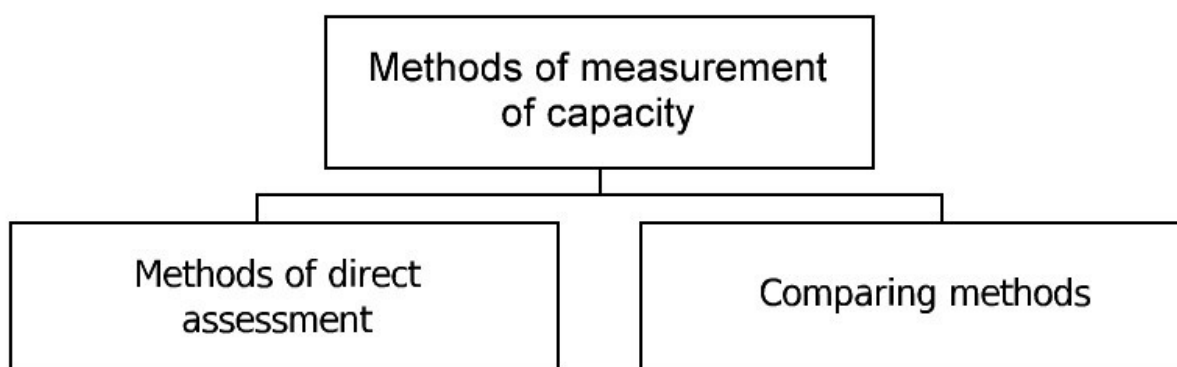


Figure 6 - Classification of methods of measurement of capacity

#### 3.1 Methods of direct assessment

##### 3.1.1 Self-oscillator as a source of harmonic oscillations

All devices using capacitive transducers and transformers work at a variable current. Characteristics of sources of an alternating current are tension, power, frequency and the form of an output signal. One of the main conditions of satisfactory operation of the capacity device is compliance of operating frequency of the power supply to operating characteristics of the capacity device. The choice of operating frequency of the power supply can not be arbitrary and depends not only on parameters of the capacity device, but also on its assignment.

Now the measuring technique uses almost all range of radio frequencies, in this

regard it is possible to tell that practically in all a frequency spectrum, there was a complex of the modern methods of measurements. Any measuring device based on use of capacitive transducers and transformers shall contain a source of an alternating current in independence of a method of measurement. The generator with self-excitation of harmonic oscillations can serve as such source.

Depending on the measurement method oscillator must operate in a mode that provides either the constancy of the amplitude and frequency of oscillations of any change.

Such variety of operating modes of self-oscillators in diagrams of measurements using capacitive transducers causes the necessity of determination of the most optimum ratios for each of the modes that involves reviewing of basic provisions of the theory of generators of harmonic oscillations.

Reviewing of this diagram can start with the generalized equivalent circuit of the self-oscillator (a figure 7).

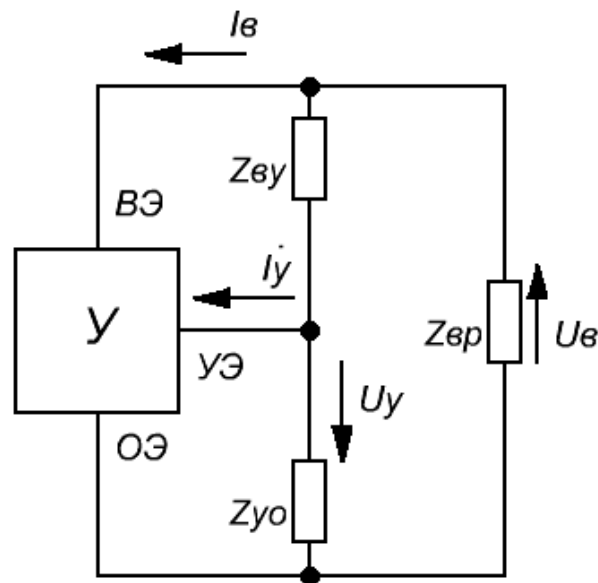


Figure 7 - Equivalent scheme of the self-oscillator of harmonic oscillations

In drawing the specific type of the amplifier  $Y$  is specially not specified, and for simplification of consideration of the generalized scheme electrodes of an intensifying element are designated:  $O\Theta$  — the general electrode;  $Y\Theta$  — the control electrode;  $B\Theta$  — an output electrode. Complex resistance of the generalized equivalent scheme  $Z_{\text{Bp}}$ ,  $Z_{\text{By}}$  and  $Z_{\text{yo}}$  have indexes of those two electrodes to which they are attached and can be

inductive, or capacity.

In a case when these complex resistance are homogeneous, the scheme of the self-oscillator will be single-circuit; if these resistance consist of inductance connected in parallel and capacity, the scheme of the self-oscillator will be double-circuit or multicircuit. The basic provisions of the theory of self-oscillators removed for the generalized equivalent scheme extend both to single-circuit schemes of self-oscillators, and on multicircuit taking into account their features.

For the generalized equivalent scheme the most general are amplitude and phase ratios which can be defined if to consider that the size of exciting voltage of  $YY$  is picked already precisely up through the corresponding coefficient of communication. In this case  $YY$  tension on a managing electrode of  $Y\Theta$  will cause such current in an output chain of an intensifying element the first harmonic of which is defined by the equation.

$$\dot{I}_{B1} = \dot{S}_{CP} \cdot (\dot{U}_Y - D \cdot \dot{U}_B) = \dot{S}_{CP} \cdot \dot{U}'_Y, \quad (13)$$

where  $\dot{S}_{CP} = \left( \frac{\Delta I_B}{\Delta U_B} \right)$  - average steepness of the characteristic of an intensifying element;

$D = - \left( \frac{\Delta U_Y}{\Delta U_B} \right)$  - permeability of an intensifying element on a direct current.

As tension on an oscillatory contour is equal:

$$\dot{U}_B = \dot{I}_{B1} \cdot \dot{Z}_{\Theta} \quad (14)$$

Having solved that jointly the equation (1) and (2), it is possible to receive the equation of the oscillatory characteristic of the generator:

$$\dot{I}_{B1} = \frac{\dot{U}_Y \cdot \dot{S}_{CP}}{1 + D \cdot \dot{Z}_{\Theta} \cdot \dot{S}_{CP}} \quad (15)$$

where

$$\dot{Z}_{\Theta} = \dot{Z}_{BO} - \frac{(\dot{Z}_{BO} + \dot{Z}_{CB})^2}{\dot{Z}_{BO} + \dot{Z}_{BY} + \dot{Z}_{YO} + 2\dot{Z}_{CB}} = \frac{\dot{Z}_{BO} \cdot (\dot{Z}_{BY} + \dot{Z}_{YO}) - \dot{Z}_{CB}^2}{\dot{Z}_{BO} + \dot{Z}_{BY} + \dot{Z}_{YO} + \dot{Z}_{CB}} - \text{equivalent resistance in a}$$

chain of an output electrode.

However, tension of  $\dot{U}_Y$  is a part of tension of  $\dot{U}_B$  on loading and, therefore, defines coupling coefficient.

$$\dot{K} = - \frac{\dot{U}_Y}{\dot{U}_B} \quad (16)$$

The joint solution of the equations (14) and (16) concerning exciting voltage of  $\dot{U}_Y$ , gives the equation of direct back coupling

$$-\dot{U}_Y = \dot{K} \cdot \dot{U}_B = \dot{K} \cdot \dot{I}_{B1} \cdot \dot{Z}_{\Theta} \quad (17)$$

If now in the equation (17) to add value of an output current of  $i_{B1}$  of the equation (15) and to solve it concerning exciting voltage of  $U_y$ , we will come into the equation describing a steady state of the self-oscillator:

$$\frac{\dot{K} \cdot \dot{Z}_\varnothing \cdot \dot{S}_{CP}}{1 + \dot{D} \cdot \dot{Z}_\varnothing \cdot \dot{S}_{CP}} = 1 \quad (18)$$

From here it is possible to define feedback factor for the set self-oscillators mode  $\dot{K}$  given feedback factor  $\dot{K}'$

$$\dot{K} = \dot{D} + \frac{1}{\dot{Z}_\varnothing \cdot \dot{S}_{CP}} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{K}' &= (\dot{K} - \dot{D}) + \frac{1}{\dot{Z}_\varnothing \cdot \dot{S}_{CP}} \\ \dot{K}' \cdot \dot{Z}_\varnothing \cdot \dot{S}_{CP} &= 1 \end{aligned} \quad (20)$$

where

$$\begin{aligned} \dot{K}' &= K' e^{j\phi'_K} \\ \dot{S}_{CP} &= S_{CP} e^{j\phi_S} \\ \dot{Z}_\varnothing &= Z_\varnothing e^{j\phi_\varnothing} \end{aligned}$$

As  $\dot{K}'$ ,  $\dot{S}_{CP}$  and  $\dot{Z}_\varnothing$  are values complex, the equation (20) in a complex look can be written as follows:

$$\dot{K}' \cdot \dot{Z}_\varnothing \cdot \dot{S}_{CP} = K' \cdot Z_\varnothing \cdot S_{CP} e^{j(\phi'_K + \phi_S + \phi_\varnothing)} = 1$$

If to accept that  $e^{j(\phi'_K + \phi_S + \phi_\varnothing)} = 1$ , then the equilibrium condition of amplitudes will express the equation

$$\dot{K}' \cdot \dot{Z}_\varnothing \cdot \dot{S}_{CP} = 1 \quad (21)$$

and an equilibrium condition of phases — equality

$$\phi'_K + \phi_S + \phi_\varnothing = 0 \quad (22)$$

Having taken into account that  $R_{B.O.} \ll x_{B.O.}$ ;  $R_{B.Y.} \ll x_{B.Y.}$  and  $R_{Y.O.} \ll x_{Y.O.}$ , it is possible to read that

$$\begin{aligned} Z_{B.O.} &= jx_{B.O.}; \\ Z_{B.Y.} &= jx_{B.Y.}; \\ Z_{Y.O.} &= jx_{Y.O.}; \end{aligned}$$

then equilibrium of phases in case of a resonance is observed under the following condition:

$$jx_{B.O.} + jx_{B.Y.} + jx_{Y.O.} = 0 \quad (23)$$

In turn, if to use a condition (23) and to express feedback factor through reactive impedances of the equivalent circuit, we will receive:

$$\dot{K} = -\frac{\dot{U}_Y}{\dot{U}_B} = -\frac{\dot{U}_B x_{Y.O.}}{\dot{U}_B (x_{B.Y.} + x_{Y.O.})} = -\frac{x_{Y.O.}}{x_{B.Y.} + x_{Y.O.}}$$

but as  $(x_{B.Y.} + x_{Y.O.}) = -x_{B.O.}$ , then

$$\dot{K} = \frac{x_{B.Y.}}{x_{Y.O.}} > 0 \quad (24)$$

Having analyzed the diagram (a figure 7) and the equation (26) and (27), it is possible to draw the following conclusions:

falling of tension on resistance of the generalized equivalent circuit XY.O. and XB.O., forming a circuit of the positive back coupling, have an identical sign, therefore, these resistance have the identical nature owing to what back coupling can be either the inductive, or capacity;

voltage drop on resistance xB.Y, entering an oscillating circuit, shall have the sign opposite to tension sign on resistance, therefore, this resistance shall have other nature;

heterogeneity of resistance (XY.O, XB.O) and (xB.Y) allows to construct three main diagrams single-circuit (and multiple loop) self-oscillators: transformer, the inductive three-point and capacity three-point diagrams.

The transformer diagram of the self-oscillator for which feedback factor is given in a figure 8.

$$\dot{K} = -\frac{\dot{U}_Y}{\dot{U}_B} = \frac{\omega M \dot{i}_K}{\omega L_K \dot{i}_K} = \frac{M}{L_K} \quad (25)$$

resonance condition in an oscillating circuit

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_K \cdot C_K}} \quad (26)$$

the equivalent resistance of the loaded oscillating circuit

$$R_{\mathcal{O}} = \frac{\rho^2}{R_K} = \frac{L_K}{R_K \cdot C_K} \quad (27)$$

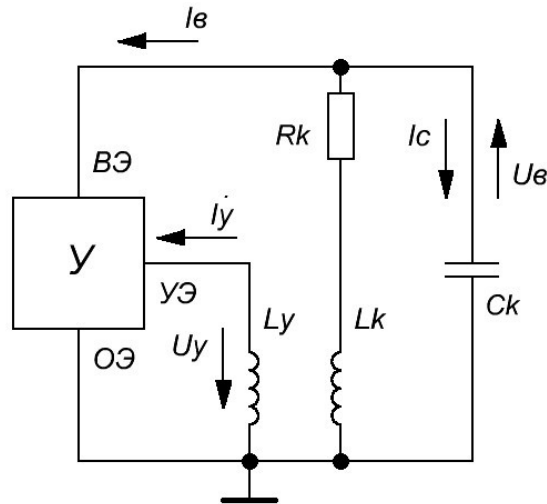


Figure 8 - Transformer diagram of the self-oscillator

### 3.1.1.1 Measurement of capacity on frequency change of the measuring self-oscillator

Natural frequency of the oscillating circuit consisting of the coil with constant inductivity and the capacitive transducer with the changing capacity in the absence of losses in oscillatory is equal to the doghouse:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_K \cdot C_K}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_K \cdot C_{d.o.}}} \quad (28)$$

If we assume that each value of the sensor capacitance will match its value of the resonant frequency of the oscillatory circuit, the current value of the sensor capacitance is determined by a ratio

$$C_d = \phi(f) = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L_K} = \frac{A}{f^2} \quad (29)$$

where  $A = 0.0253/L_K$ .

As the capacity of the sensor  $C_d$  is function from the influencing parameter  $X$ , value of the measured parameter will be equal:

$$X = F(C_d) = F \cdot \frac{A}{f^2} \quad (30)$$

At the same time it must be kept in mind that change of capacity in an oscillating circuit of the self-oscillator and consequently, and stability of amplitude and stability of operation of the self-oscillator shall not break frequency change of oscillations. As change of back coupling exerts impact on conditions of stability of amplitude and stability, it is

necessary that in case of change of capacity of an oscillating circuit value of back coupling remained invariable. Transformer also the inductive meet this requirement three-point diagrams of self-oscillators at which, as well as in the equations of conditions of steady operation, value of capacity of an oscillating circuit is not included into the equations of back coupling.

Thus, for measurement of change of capacity on frequency change of the self-oscillator the transformer diagram and the inductive three-point diagram of self-oscillators into which circuit of back coupling the capacity of an oscillating circuit is not included are the most suitable.

If capacitive transducer of  $C_{д.о.}$  has the considerable losses determined by great value  $\text{tg } \delta$ , the frequency of the generated oscillations of the self-oscillator  $f$  will not be equal to natural resonance frequency of an oscillating circuit of  $f_0$ . In case of switching on of the capacity transformer in a circuit of the controlling electrode the current value of capacity found on self-oscillator frequency is equal:

$$C_{д.в.} = \frac{\left( \frac{L_y}{L_K \cdot R_i} + \frac{S \cdot M}{L_K} \right)}{2\pi f_0 \left( \frac{f_0^2}{f^2} - 1 \right)} \cdot \text{tg } \delta \quad (31)$$

If the capacity transformer is switched on in a circuit of an output electrode, then the current value of capacity determined by self-oscillator frequency is equal:

$$C_{д.в.} = \frac{\left( \frac{S \cdot M}{L_K} + \frac{1}{R_i} \right)}{2\pi f_0 \left( 1 - \frac{f_0^2}{f^2} \right)} \cdot \text{tg } \delta \quad (32)$$

Diagrams of self-oscillators for measurement of capacity of  $C_{д.}$  on frequency change are given in a figure 9.

On an output of the measuring generator the pointerful measuring circuit which scale is graduated in terms of the value measured by the capacity transformer according to the equation (30) is usually connected.

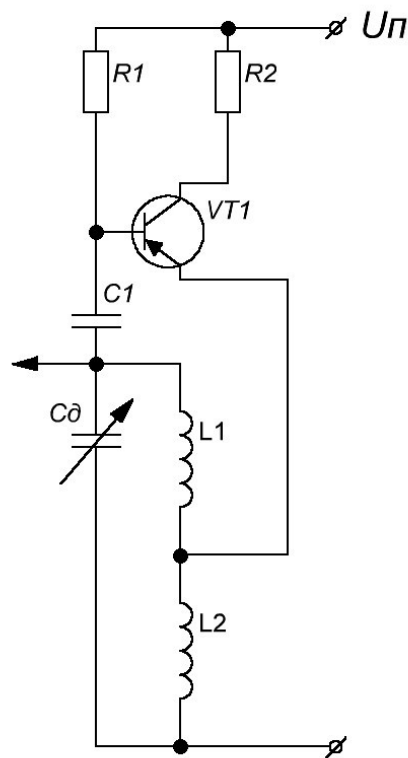


Figure 9 - The diagram of the self-oscillator for measurement of capacity on frequency change

### 3.1.1.2 Resonant method of measurement of capacitor capacity with big losses

Measurement of capacitor capacity with big losses by a resonant method, despite a set of different methods of technical execution, consists in comparing of characteristics of two oscillating circuits, one of which contains the condenser with losses which capacity should be measured that allows then to define both the valid, and imaginary parts of losses of dielectric of the condenser. Measurements can be performed at frequencies up to 200 MHz inclusively. The 14th diagram of measurement of capacity given on a figure 10 possesses high accuracy as results of measurements don't depend on value of losses. The diagram consists of the generator and two oscillating circuits with very small capacitive coupling. One of circuits of  $L_i C_i$  is inductively connected to the measuring instrument measuring current, proportional to resonant current in a circuit. The second oscillating circuit of  $L_3 C_3$  can be set up in a resonance or only by means of the  $C_3$

condenser, or by means of jointly connected  $C_3$  condensers and  $C_D$ .

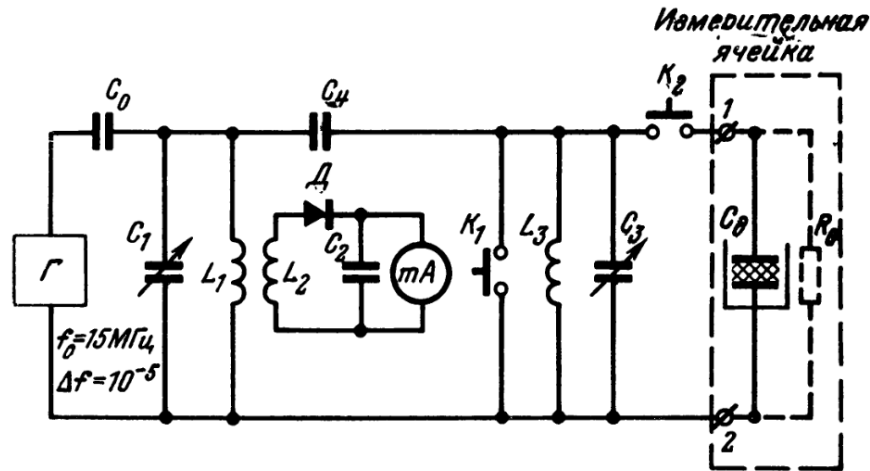


Figure 10 - Resonant method of measurement of capacitor capacity with big losses

In case of closed contacts of the  $K_1$  button the  $C_4$  condenser is connected parallel to the  $C_1$  condenser by means of which the oscillating circuit is set up in a resonance with a  $f_0$  generator frequency. At the same time the arrow of the tuning meter will deviate on an angle  $\alpha_1$  which in the course of all measurements will be the greatest. The second step in production of measurements is setup in a resonance with a frequency of the  $f_0$  generator of an oscillating circuit of  $L_3C_3$  in case of break contacts of the  $K_1$  button. At the same time resistance of a circuit will be very big and the  $C_4$  condenser will be as if  $L_1C_1$  disconnected from an oscillating circuit which will receive some detuning therefore current via the indicator considerably will decrease and his shooter will move to the situation characterized by an angle  $\alpha_2$ , smaller an angle  $\alpha_1$  i.e.

$$\alpha_2 < \alpha_1$$

At the same time the resonance will come in case of

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_3 \cdot C_3}} \quad (40)$$

The measured condenser or the capacitive transducer is connected to clamps 1 and 2.

In case of closed contacts of the  $K_2$  button repeated setup of a resonant circuit  $L_3(C_3 + \text{is made by } C_D)$  in case of which the capacitor capacity of  $C_3$  will decrease by value of  $S_d$ . As the condenser of  $C_D$  possesses losses, the resonant resistance of a circuit will be equal:

$$Z_0 = \sqrt{R_D^2 + X_C^2 + X_L^2} = \sqrt{R_D^2} \quad (41)$$

In this diagram of measurement the  $C_4$  condenser is connected parallel to the  $C_1$

condenser through  $P_d$  resistance, at the same time, the  $P_d$  resistance is less, the closer setup of a circuit  $L_1$ ,  $S_1$ ,  $S_4$ ,  $P_d$  will approach original setup; the arrow of the tuning meter will hold at the same time the position which is characterized by an angle  $\alpha_3$ , and  $\alpha_2 < \alpha_3$ .

The absolute difference between deviations  $\alpha_3$  and  $\alpha_2$  will be proportional to the active admittance of dielectric of the condenser of  $C_d$  and doesn't influence the accuracy of measurements as the minimum deviations  $\alpha_3$  and  $\alpha_2$  turn out in case of dependence

$$C_3 + C_d = \frac{1 - \omega_0^2 L_3 \cdot C_4}{\omega_0^2 \cdot L_3} \quad (42)$$

### 3.1.2 Method of conversion of capacity to phase shift

Measurement of cable capacitance in the course of manufacture has a row of features. First, in case of measurement the fact that the cable length is much more than its diameter is considered. Secondly, measurement is taken in case of movement of a cable via the sensor. This feature requires existence of the special sensors considering motion speed of a cable in case of measurement. Besides it is necessary to consider also that condition that measurement is performed in the course of production, at a stage of plotting of insulation on the carrying-out core. That is, the cable has no second electrode which functions in practice are executed by the screen, or other cable cores.

As, measurement of cable capacitance is performed in the absence of the screening layer, as the second electrode water is used. In this case the possibility of appearance of air gaps between a cable and the second electrode is excluded and, respectively, the measurement error decreases. Monitoring of capacity is carried out in the cooling trough where the cable after plotting of an isolation layer is located.

The essence of a method is that the measured capacity switched on in a RC circuit of first order (a figure 11), is transformed to offset of a phase.

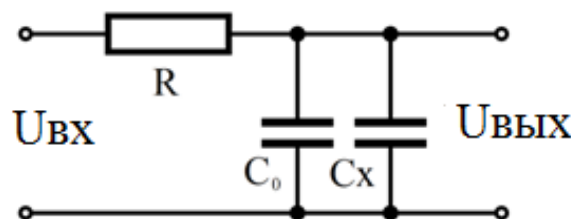


Figure 11 - The measured capacity in a RC circuit of first order

In the absence of a cable in the transformer, there is a phase shift which is equal to

$$\varphi_0 = \arctg(\omega \cdot R \cdot C_0) \quad (43)$$

where  $R, C_0$  — RC circuit parameters;  $\omega = 2\pi f$ .

When the cable is entered in primary transformer, there will be a new capacity  $C = C_x + C_0$ , also phase shift respectively will change.

$$\varphi_x = \arctg(\omega \cdot R \cdot (C_0 + C_x)) \quad (44)$$

Having measured a phase difference  $\Delta\varphi_x = \varphi_x - \varphi_0$ , it is possible to define cable capacitance, using the phase meter for measurement of this value. It will be in direct ratio to value of cable capacitance.

$$C_x = \frac{\operatorname{tg} \Delta\varphi_x \cdot (1 + a^2)}{b \cdot (1 - a \cdot \operatorname{tg} \Delta\varphi_x)} = \frac{(1 + a^2)}{b \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \Delta\varphi_x} - a \right)} \quad (45)$$

где  $a = \omega \cdot R \cdot C_0$ ,  $b = \omega \cdot R$ .

### 3.2 Comparing methods

#### 3.2.1 Bridge method of measurement of capacity

Bridge methods of measurements are used for measurement of total resistances, inductivity and capacity, a tangent of angle of losses and good quality of passive components of electrical circuits. Bridges for measurement of parameters of components of electrical circuits divide into direct current bridges and alternating current bridges. Direct current bridges happen unary and double. Alternating current bridges differ in big variety. The diagram of the alternating current bridge for measurement of parameters of condensers is given in a figure 16.

The researched condenser provided by the sequential diagram  $R_x, C_x$  is turned on in the first shoulder. Sample capacity of  $C_3$  is connected sequentially to  $R_3$ . Equilibrating of the bridge is realized change of resistance of sample resistors and by capacities of the sample condenser. A bridge equilibrium condition in case of measurement of capacity, so that  $I_0 = 0$ , the following:

$$\left[ R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right] \cdot R_4 = R_2 \cdot \left[ R_3 + \frac{1}{j\omega C_3} \right] \quad (46)$$

From where the measured capacity:

$$C_x = C_3 \left( \frac{R_4}{R_2} \right) \quad (47)$$

Loss resistance in a sequential equivalent circuit:

$$R_x = R_2 \left( \frac{R_3}{R_4} \right) \quad (48)$$

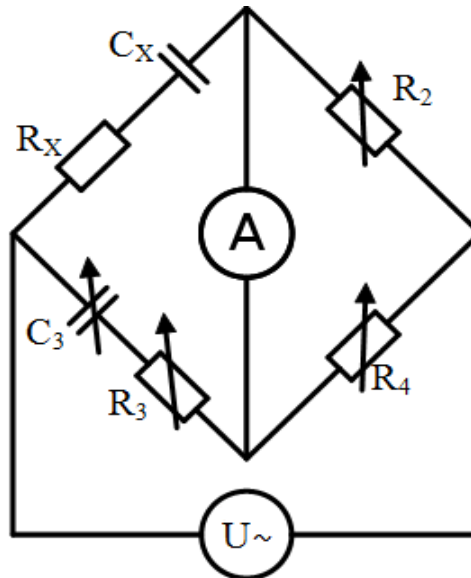


Figure 12 - The diagram of the bridge for measurement of capacity

Usually instead of  $R_x$  measure a tangent of angle of losses of  $\operatorname{tg} \delta = \omega C_x R_x$  in the condenser, or good quality of  $Q = 1/\operatorname{tg} \delta$ . Having added in expression of  $\operatorname{tg} \delta$  of  $R_x C_x$  value, receive

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_x R_x = \omega R_3 C_3 \quad (49)$$

From expressions (47) for  $C_x$  and (48) for  $\operatorname{tg} \delta$  it is visible that when equilibrating the bridge  $R_3$  and  $R_4$  resistors separate counting on  $C_x$  and a tangent of angle of losses of  $\operatorname{tg} \delta$  measured capacities turns out. At the same time the  $R_4$  resistor is graduated in terms of capacity, and the  $R_3$  resistor – in  $\operatorname{tg} \delta$  values.

Measuring accuracy depends on the accuracy of manufacture of sample resistance and condensers. Class of accuracy of instruments from 0.5 to 5%. With higher accuracy capacitor capacity within 0,001÷1000 of pF it is recommended to measure by means of transformer bridges.

Broad application of bridge circuits is explained by the big accuracy of measurements, high sensitivity, a possibility of measurement of different values, etc.