

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

*На правах рукописи*

СОЛОВЬЁВ Игорь Валерьевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАЦИЕЙ ЕМКОСТНЫХ  
ТОКОВ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Специальность 05.14.02  
Электрические станции и электроэнергетические системы

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Булычев Александр Витальевич

Чебоксары – 2018

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 Сравнительный анализ способов управления компенсацией емкостных токов замыкания на землю в распределительных электрических сетях.....	10
1.1 Распределительные сети с компенсацией емкостного тока. Задачи компенсации емкостного тока при однофазных замыканиях на землю .....	10
1.2 Способы контроля и автоматического управления компенсацией емкостного тока.....	13
1.3 Типы дугогасящих реакторов и их характеристика .....	21
1.4 Концепция совершенствования автоматического управления компенсацией емкостных токов замыкания на землю .....	24
1.5 Требования к устройству автоматического управления компенсацией емкостного тока .....	25
Выводы .....	26
Глава 2 Разработка и исследование способа оценки параметров контура нулевой последовательности сети на основе измерения частоты свободных колебаний .....	28
2.1 Разработка математической модели электрической сети с компенсацией емкостных токов при однофазном замыкании на землю. Переходный процесс в контуре нулевой последовательности сети.....	28
2.2 Оценка частоты свободных колебаний и коэффициента демпфирования контура .....	32
2.3 Анализ граничных условий способа оценки параметров контура нулевой последовательности сети.....	40
2.4 Методическая погрешность оценки частоты свободных колебаний и коэффициента демпфирования .....	42
2.5 Исследование способа оценки параметров контура нулевой последовательности сети на модели .....	45
Выводы .....	46

Глава 3 Разработка и исследование алгоритмов автоматического управления компенсацией емкостного тока.....	47
3.1 Реализация способа настройки компенсации емкостного тока на заданный режим .....	47
3.2 Алгоритм параллельной работы устройств автоматики.....	51
3.3 Исследование способа автоматического управления компенсацией емкостного тока на макете сети.....	59
3.4 Определение устойчивости усовершенствованного алгоритма автоматического управления .....	65
Выводы .....	70
Глава 4 Экспериментальные исследования устройства автоматического управления компенсацией емкостного тока.....	71
4.1 Структура аппаратного и программного обеспечения устройства автоматики .....	71
4.2 Результаты опытной эксплуатации .....	77
4.3 Оценка точностных характеристик устройства автоматики .....	85
Выводы .....	89
Заключение .....	90
Список литературы .....	92
Приложение А .....	102
Приложение Б.....	106
Приложение В.....	110
Приложение Г .....	115

## Введение

Стремление повысить надежность и электробезопасность, обеспечить бесперебойность электроснабжения и долговечность изоляции электрооборудования, в условиях постоянно изменяющейся конфигурации распределительной сети, вызывает необходимость в компенсации емкостных токов однофазных замыканий на землю (ОЗЗ). Для этих целей в сетях среднего напряжения применяют дугогасящие реакторы (ДГР), позволяющие компенсировать основную гармонику емкостной составляющей тока ОЗЗ.

Причины возникновения ОЗЗ разнообразны. Они появляются вследствие повреждения изоляции, вызванного старением, увлажнением, загрязнением, механического разрушения линий электропередачи, электрических пробоях в результате воздействия грозových и внутренних перенапряжений. Последствиями таких замыканий являются повреждения и выход из строя электрооборудования, а также недоотпуск электрической энергии.

В России исторически сложилось и нормативно закреплено [63, 67, 79], что распределительные сети напряжением 6-35 кВ работают с изолированной, заземленной через дугогасящий реактор или резистор нейтралью.

ДГР позволяют компенсировать основную гармонику емкостной составляющей тока ОЗЗ. Индуктивность ДГР подбирается таким образом, чтобы в контуре, образованном этой индуктивностью и суммарной емкостью фаз сети на землю, образовывался резонанс на промышленной частоте. Ток ОЗЗ при этом снижается до безопасных значений, позволяющих продолжать безопасную эксплуатацию поврежденного участка сети в течение продолжительного времени. Возможность работы в режиме ОЗЗ является ключевым достоинством распределительных сетей с изолированной нейтралью.

В последнее десятилетие рост городов и крупных промышленных предприятий, естественное старение изоляции и связанное с этим повышение аварийности в распределительных сетях, а также постепенная замена кабеля с бумажно-масляной изоляцией на кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена,

обладающего большей удельной емкостью, привели к росту токов ОЗЗ, следовательно, сделали задачу поддержания точной резонансной настройки ДГР еще более актуальной [43].

В связи с этим возникает необходимость автоматической настройки плавно регулируемых ДГР, обусловленная изменением конфигурации (емкости) сети в процессе эксплуатации.

В настоящее время в распределительных сетях России применяются устройства автоматического управления компенсацией емкостного тока, использующие различные принципы настройки. Имеется ряд авторских свидетельств, как на устройства автоматической настройки, так и на конструкцию дугогасящих реакторов. Известными в этой области являются устройства и принципы настройки предложенные В.К. Обабковым [9, 25, 33-35, 42, 52-55, 58], М.И. Гуминым [46], А.П. Труханом [3, 5, 7, 56], А.Г. Долгополовым [59, 61] и др. Большинство способов автоматической настройки компенсации во многих случаях некорректны, требуют искусственного смещения нейтрали либо являются громоздкими в реализации и, как следствие, применяются ограниченно и работают нестабильно. Все это приводит к необходимости пересмотра алгоритмов автоматической настройки ДГР в части новых способов оценки параметров сети и алгоритмов автоматической настройки на резонансный режим компенсации.

В таких условиях совершенствование способов оценки параметров сети и алгоритмов автоматической настройки на резонансный режим компенсации в распределительных электрических сетях с нейтралью, заземленной через ДГР, играет важную роль в повышении надежности и электробезопасности, обеспечении бесперебойности электроснабжения и долговечности изоляции электрооборудования и представляет собой значимую и актуальную научно-техническую задачу, решение которой и составляет содержание настоящего диссертационного исследования.

**Цель работы** – совершенствование управления компенсацией емкостных токов ОЗЗ в распределительных электрических сетях на основе разработанного и исследованного автором способа оценки параметров контура нулевой

последовательности (КНП) сети и алгоритмов для автоматической настройки ДГР.

В диссертационной работе для достижения поставленной цели решены следующие **основные задачи**:

- анализ существующих способов управления компенсацией емкостных токов замыкания на землю в электрических сетях;
- обоснование направления совершенствования способов оценки параметров КНП сети и автоматического управления компенсацией емкостных токов замыкания на землю в электрических сетях;
- разработка и исследование способа оценки параметров КНП сети с компенсацией емкостного тока;
- разработка и исследование способа автоматической настройки ДГР на заданный режим компенсации емкостного тока.

**Объект исследования** – распределительные сети с компенсацией емкостного тока однофазного замыкания на землю.

**Предмет исследования** – свойства сетей с компенсацией емкостного тока и устройств автоматической настройки ДГР.

**Методы научных исследований** базируются на фундаментальных положениях общей теории электрических цепей, теоретических основ электротехники, теории автоматического управления, теории релейной защиты, методах статистических испытаний, методах математического, физического и программного моделирования.

**Достоверность и обоснованность результатов** обеспечивается за счет корректного применения общей теории электрических цепей, теоретических основ электротехники, теории автоматического управления, теории релейной защиты и подтверждается совпадением результатов исследований автора, проведенных на макете КНП сети, с результатами натурных испытаний на ряде подстанций, а также косвенными показателями правильного режима компенсации.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Способ оценки параметров сети с компенсацией емкостного тока, позволяющий проводить расчет текущего значения расстройки и добротности КНП сети.

2. Способ автоматической настройки ДГР по отклонению текущего значения расстройки компенсации от её целевого значения, позволяющий повысить точность автоматической настройки плавнорегулируемых ДГР.

3. Новые алгоритмы оценки параметров сети и управления режимами компенсации емкостной составляющей тока ОЗЗ и программы реализации этих алгоритмов.

**Научная новизна работы:**

1. Предложенный и исследованный способ оценки параметров сети с компенсацией емкостного тока, позволяющий проводить расчёт текущего значения расстройки и добротности КНП сети, отличается от известных тем, что основан на оценке частоты и коэффициента затухания сигнала свободной составляющей, выделенной из переходного процесса, протекающего в результате импульсного воздействия на контур.

2. Отличие предложенного и исследованного способа автоматической настройки ДГР в том, что он реализуется по отклонению текущего значения расстройки компенсации от ее целевого значения. Это позволяет повысить точность настройки плавнорегулируемых ДГР в сетях с большими потерями и учитывать режим параллельной работы секций.

3. В разработанных алгоритмах оценки параметров сети и управления режимами компенсации емкостной составляющей тока ОЗЗ, в отличие от имеющихся, учтены все существенные ограничения реализуемости новых способов настройки ДГР, возникающие в действующих электрических сетях.

**Практическая значимость и реализация результатов работы:**

1. Предложенные способы оценки параметров сети, автоматической настройки ДГР и реализующие их алгоритмы позволяют повысить надежность и

бесперебойность электроснабжения, электробезопасность и долговечность изоляции электрооборудования.

2. Разработанный способ оценки параметров сети с компенсацией емкостного тока использован ООО «НПП Бреслер» при создании типовых устройств и шкафов автоматики ДГР для распределительных сетей среднего напряжения. Применение способа оценки параметров сети позволяет повысить точность настройки на резонанс, расширить круг сетей, в которых обеспечивается стабильная работа устройства автоматики без применения дополнительных мер по созданию искусственной несимметрии.

3. Теоретические и практические результаты работы использованы в учебном процессе в Чувашском государственном университете и в Институте повышения квалификации специалистов релейной защиты и автоматики.

#### **Апробация диссертационной работы**

Результаты исследований обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: III и V Республиканских конференциях молодых специалистов «Электротехника, электромеханика, электроэнергетика» (Чебоксары, 2005, 2007), VI Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (Чебоксары, 2006), XXVIII, XXIX и XXX Всероссийских семинарах «Кибернетика энергетических систем» (Новочеркасск, 2006, 2007, 2008), VII Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (Чебоксары, 2007), XX, XXI и XXII Международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологиях» (Ярославль, 2007; Саратов, 2008; Псков, 2009), IV Международной научно-практической конференции «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России» (Чебоксары, 2017).

#### **Публикации**

Основные положения и результаты диссертации отражены в 39 печатных работах, в том числе: 7 статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской



Федерации, получено 4 патента на изобретение, 2 патента на полезную модель и 1 свидетельство о регистрации программ для ЭВМ.

#### **Личный вклад соискателя**

В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежит разработка способов оценки частоты собственных колебаний в КНП сети, их практическая реализация для настройки ДГР, анализ и интерпретация экспериментальных данных, обработка сигналов и математическое моделирование, постановка и участие в экспериментальных исследованиях, разработка и реализация алгоритмов, синтез и анализ систем управления.

При работе над диссертацией и практической реализации теоретических решений и рекомендаций автор пользовался консультациями главного конструктора ООО «НПП Бреслер», кандидата технических наук, доцента В.Н. Козлова.

#### **Объем и структура работы**

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 87 наименований, 4 приложений, 57 рисунков. Общий объем работы – 120 страниц: текст диссертации – 91 страниц, список литературы – 10 страниц, приложения – 19 страниц.

## Глава 1 Сравнительный анализ способов управления компенсацией емкостных токов замыкания на землю в распределительных электрических сетях

### 1.1 Распределительные сети с компенсацией емкостного тока. Задачи компенсации емкостного тока при однофазных замыканиях на землю

В условиях постоянного изменения конфигурации распределительной сети и сопутствующего изменения величины тока ОЗЗ возникает задача компенсации емкостной составляющей тока ОЗЗ токами дугогасящего реактора. Эффективное решение задачи компенсации заключается в поддержании резонансной настройки ДГР. Этим достигается подготовка сети к возможному возникновению режима ОЗЗ и обеспечивается повышение надежности электроснабжения и электробезопасность.

Рост напряжения и мощности распределительной сети, ее суммарной протяженности, приводит к увеличению влияния на работу сети паразитных параметров линий электропередачи. Одним из таких параметров является емкость фаз сети относительно земли, из-за большой величины которых происходит увеличение тока в месте ОЗЗ. В крупных городских распределительных сетях величина емкостного тока ОЗЗ может достигать нескольких сотен ампер.

Основной причиной повреждения электрооборудования и ухудшения условий электробезопасности в распределительных сетях напряжения 6-35 кВ с изолированной нейтралью являются ОЗЗ [45, 65, 68, 75, 81, 83, 85]. При металлическом (при нулевом сопротивлении в месте ОЗЗ) замыкании провода на землю, потенциал поврежденной фазы снижается до нуля, при этом треугольник линейных напряжений не искажается, напряжения неповрежденных фаз увеличиваются относительно земли до линейного, а напряжение на нейтрали приближается к фазному. В месте замыкания возникает ток ОЗЗ, обусловленный емкостной и активной проводимостью неповрежденных фаз сети на землю. При этом емкостная составляющая промышленной частоты является определяющей и составляет порядка 90-95% полного тока ОЗЗ [18, 29].

Достоинство сетей с изолированной нейтралью – сохранение формы треугольника линейных напряжений при ОЗЗ, что позволяет не ограничивать питание потребителя даже в режиме ОЗЗ на протяжении нескольких часов [57, 60].

Для уменьшения тока в месте ОЗЗ до безопасных значений, нейтраль сети заземляют через катушку индуктивности большой мощности – ДГР. При настройке индуктивности реактора в резонанс с емкостью сети, так чтобы ток ДГР был равен емкостному току сети, в месте замыкания остается лишь ток, обусловленный активной проводимостью фаз сети на землю, и токи высших гармонических составляющих, в совокупности не представляющие какой-либо опасности. Дополнительным благоприятным фактором резонансной настройки реактора является снижение перенапряжений в распределительной сети [64, 66, 87].

Преимущества компенсации емкостных токов ОЗЗ индуктивными токами ДГР показаны в ряде научных трудов [1, 2, 8, 12, 13, 14, 47, 49].

Отклонение от резонансной настройки, называемое расстройкой компенсации, возникает при изменениях конфигурации сети и должно быть ликвидировано путем изменения настройки ДГР. Возникает задача непрерывного слежения за параметрами сети и настройки ДГР на резонанс.

Очевидно, что в условиях постоянно изменяющейся конфигурации (емкости) сети, задача может быть эффективно решена лишь с использованием устройств автоматической настройки ДГР.

Ток ОЗЗ в общем виде содержит несколько составляющих, циркулирующих в разных контурах (рисунок 1.1). При правильном выборе мощности ДГР емкостная составляющая тока ОЗЗ компенсируется индуктивной составляющей тока ДГР. Условие точной компенсации

$$I_L = I_C, \text{ или } 1/\omega L = 3\omega C_\Phi. \quad (1.1)$$

Точная (полная) компенсация происходит при резонансе токов в контуре LC.

Реактивная составляющая основной частоты (первой гармоники) обусловлена тем, что на практике всегда существует отклонение от условия

полной компенсации, т.е.  $1/\omega L \neq 3\omega C_\Phi$ . Данное отклонение от резонансной настройки называют расстройкой компенсации  $\vartheta$ , которая определяется выражением

$$\vartheta = \frac{I_C - I_L}{I_C} = 1 - \frac{I_L}{I_C}, \quad (1.2)$$

где  $I_L = E_\Phi \frac{1}{\omega L}$  – индуктивная составляющая тока ДГР;

$I_C = E_\Phi \cdot 3\omega C_\Phi$  – емкостная составляющая тока замыкания на землю.

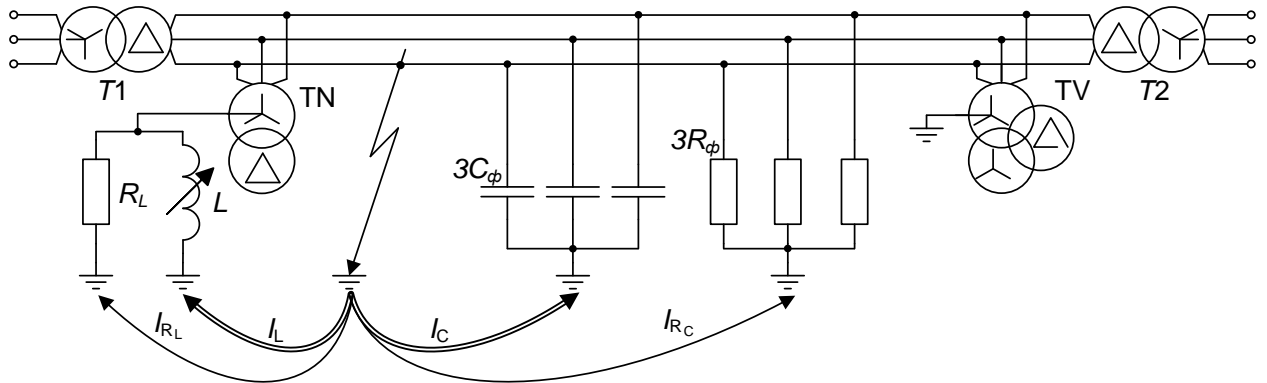


Рисунок 1.1 – Схема сети с компенсацией емкостного тока

Указанное условие полной компенсации емкостной составляющей (1.1) и формула расстройки компенсации (1.2) справедливы только для промышленной частоты сети (50 Гц).

В случае полной компенсации индуктивная составляющая тока ДГР равна емкостной составляющей тока ОЗЗ и  $\vartheta = 0$ . В случае  $I_L < I_C$  происходит недокомпенсация ( $\vartheta > 0$ ), при  $I_L > I_C$  – перекомпенсация ( $\vartheta < 0$ ). Расстройка компенсации  $\vartheta$  может быть выражена также через соотношение частот:

$$\vartheta = 1 - \frac{1}{\omega L \cdot 3\omega C_\Phi} = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2},$$

где  $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{3LC_\Phi}}$  – резонансная частота колебательного контура, образованного емкостью сети и индуктивностью ДГР.

Активная составляющая тока замыкания может быть представлена в виде двух слагаемых: утечки по изоляции сети и потери в ДГР. Активную составляющую тока в КНП характеризуют безразмерной величиной  $d$

$$d = \frac{I_R}{I_C} = \frac{3G_\Phi + G_L}{3\omega C_\Phi} = \frac{1}{3\omega C_\Phi R},$$

которую принято называть коэффициентом демпфирования, или коэффициентом успокоения сети.

Затухание свободных колебаний в контуре нулевой последовательности компенсированной сети определяется коэффициентом затухания

$$\delta = \frac{1}{2R(3C_{\Phi})} = \frac{\omega d}{2}.$$

Величину, обратную коэффициенту демпфирования, называют добротностью контура

$$Q = \frac{I_C}{I_R} = \frac{1}{d} = \frac{\omega}{2\delta} = 3\omega RC_{\Phi}.$$

Высшие гармонические составляющие в токе ОЗЗ определяются степенью искажения фазных напряжений. Промышленные предприятия все чаще используют установки, питаемые постоянным током. Для получения постоянного тока применяют различные выпрямители, потребляющие несинусоидальный ток, содержащий нечетные гармоники. Таким образом, происходит искажение фазных напряжений и, как следствие, – появление высокочастотных составляющих в токе замыкания.

Относительно небольшие по амплитуде гармоники в составе фазного напряжения создают значительный емкостный ток ОЗЗ. Это происходит по причине увеличения проводимости емкости с ростом гармоники (частоты сигнала). Токи высших гармонических составляющих не компенсируются ДГР и при больших значениях значительно ухудшают условия гашения дуги.

## 1.2 Способы контроля и автоматического управления компенсацией емкостного тока

Известно несколько базовых способов автоматической настройки компенсации в распределительных электрических сетях напряжения 6-35 кВ. Каждый способ и реализующие его устройства имеют свои достоинства и недостатки [6, 11, 15, 17, 19, 20, 23, 24, 27, 30, 31, 37, 38, 40, 44, 48, 50, 77, 78, 80].

К базовым способам настройки компенсации КНП сети можно отнести следующие:

- настройка по амплитудной характеристике КНП сети;
- настройка по фазовой характеристике КНП сети;
- способ наложения сигнала непромышленной частоты;
- способ наложения сигнала переменной частоты.

#### Настройка по амплитудной характеристике

Напряжение на нейтрали компенсированной сети определяется выражением [12]:

$$U_0 = \frac{U_{\text{НС}}}{\sqrt{\vartheta^2 + d^2}}, \quad (1.3)$$

где  $U_{\text{НС}}$  – напряжение несимметрии;  $\vartheta$  – расстройка КНП сети;  $d$  – коэффициент демпфирования сети.

Способ заключается в поиске точки глобального экстремума амплитудной характеристики с помощью поискового изменения индуктивности ДГР. Направление изменения тока ДГР считается правильным при росте контролируемого напряжения  $U_0$  и ошибочным при его уменьшении. Регулировка считается выполненной при равенстве производной функции (1.3) нулю.

На практике известная в теории задача экстремального регулирования, осложняется из-за конечной чувствительности измерительных трактов устройств автоматики, определяющих производную функции (1.3).

При относительно большом значении  $U_{\text{НС}}$ , малом значении коэффициента демпфирования сети  $d$  в области резонанса точка экстремума является четко выраженной, производная напряжения  $U_0$  достигает больших абсолютных значений и является четко различимой устройством измерения (рисунок 1.2, кривая d1). При малом  $U_{\text{НС}}$ , большом значении коэффициента демпфирования сети  $d$  в области резонанса функция напряжения  $U_0$  в области экстремума является сглаженной (пологой), а ее производная на несколько порядков меньше, чем в предыдущем случае (рисунок 1.2, кривая d3)[62].

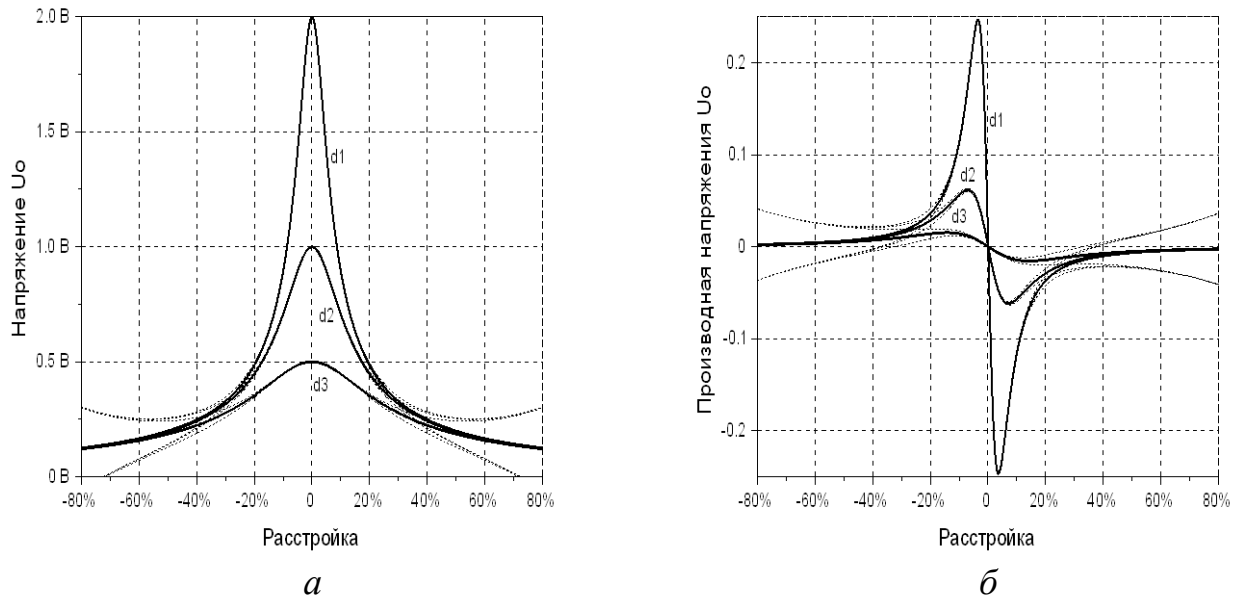


Рисунок 1.2 – Амплитудная характеристика КНП сети (а) и ее производная (б)

В случае возникновения большой расстройки поисковое изменение расстройки приводит к значительно меньшему изменению напряжения  $U_0$ , дополнительно к этому на малое напряжение начинают оказывать влияние наводки различного рода, сопоставимые с полезным сигналом, приводящие к ошибкам регулирования.

Создание условий повышенной искусственной несимметрии  $U_{НС}$  в сети позволяет лишь частично разрешить обозначенные сложности. В целом обеспечить на практике стабильную работу устройств, основанных на анализе амплитудной характеристики КНП сети, особенно при возникновении больших расстроек компенсации, не всегда возможно.

К *преимуществам* способа можно отнести непрерывность регулировочного критерия и простоту практической реализации.

*Недостатки* способа:

- нестабильная работа в случаях низкой добротности контура и в области глубоких расстроек;
- частые ложные поисковые пуски, вызванные колебаниями напряжения несимметрии;
- 50% первоначальных поисковых пусков являются ошибочными;

– невозможность настройки на заданное не равное нулю значение расстройки компенсации.

### Настройка по фазовой характеристике

Напряжение на нейтрали компенсированной сети определяется выражением [12]

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_{\text{НС}}}{\vartheta - jd}. \quad (1.4)$$

Выражение (1.4) является комплексной формой выражения (1.3).

При резонансной настройке ( $\vartheta = 0$ ) выражение (1.4) примет следующий вид:

$$U_{0\text{рез}} = \frac{U_{\text{НС}}}{-jd} = j \frac{U_{\text{НС}}}{d},$$

угол между  $U_{0\text{рез}}$  и  $U_{\text{НС}}$  равен  $90^\circ$ .

Поскольку вектор напряжения естественной несимметрии, особенно в симметричных кабельных сетях, относительно мал, его направление хаотично меняется под действием различных сопоставимых помех и наводок. В связи с этим стабильная работа способа настройки по фазовой характеристике возможна только при создании искусственной несимметрии. При этом напряжение искусственной несимметрии должно существенно превышать напряжение естественной несимметрии.

Настройка по фазовой характеристике КНП сети для измерения фазы напряжения  $U_0$  подразумевает использование опорного напряжения  $U_{\text{оп}}$ . Вектор напряжения искусственной несимметрии для удобства реализации способа может совпадать по направлению с вектором одного из фазных напряжений. Это происходит, например, при подключении высоковольтного конденсатора между фазой и землей. Тогда в качестве опорного напряжения  $U_{\text{оп}}$  для контроля фазы удобно использовать линейное напряжение, формируемое фазными напряжениями, не совпадающими по направлению с напряжением  $U_{\text{НС}}$  (рисунок 1.3). В этом случае контролируемый угол  $\varphi$  между вектором опорного



напряжения  $U_{оп}$  и контролируемым напряжением  $U_0$  в случае резонанса будет равен нулю.

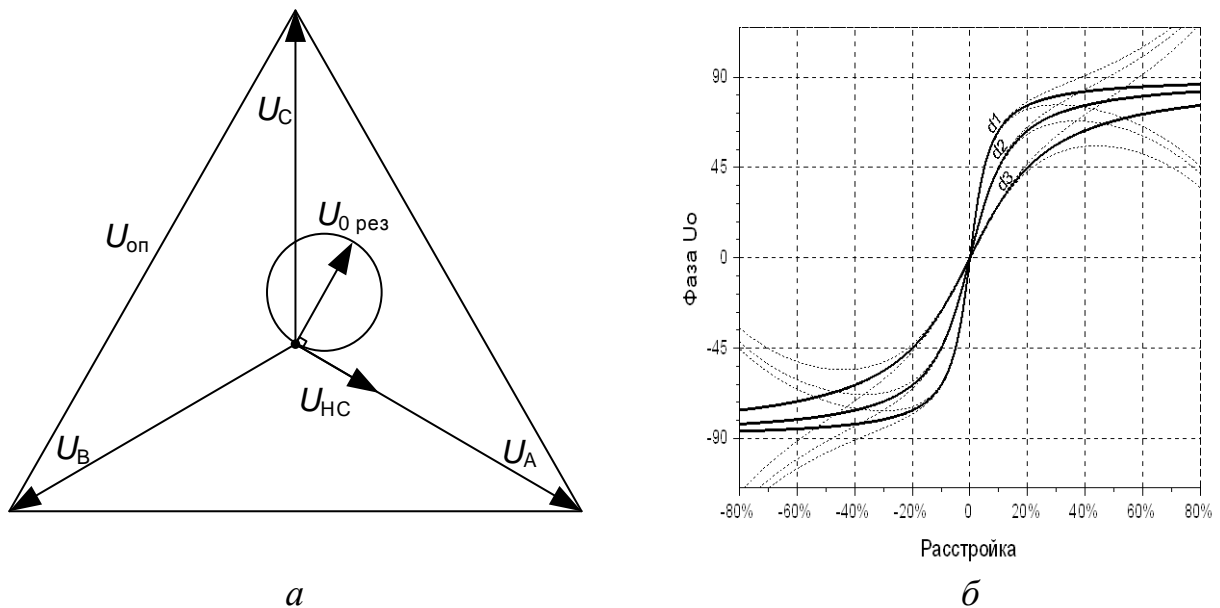


Рисунок 1.3 – Векторная диаграмма (а) и фазовая характеристика КНП сети (б)

В общем случае угол  $\varphi$  между контролируемым напряжением  $U_0$  и опорным напряжением  $U_{оп}$  связан со степенью расстройки компенсации соотношением:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\vartheta}{d}\right) \quad (1.5)$$

Из выражения (1.5) видно, что в отличие от способа настройки КНП по амплитудной характеристике, результаты настройки по фазовой характеристике принципиально не зависят от абсолютного значения измеряемой величины, но зависимость от коэффициента демпфирования сети  $d$  сохраняется. При этом способ подвержен влиянию случайно изменившегося вектора напряжения естественной несимметрии, что приводит к искажению положения результирующего вектора  $U_{НС}$  и является причиной ошибочной настройки. Ситуация усугубляется при увеличении коэффициента демпфирования сети  $d$ , а также в сетях с воздушными линиями электропередач, где вектор напряжения естественной несимметрии имеет относительно большее значение.

К преимуществам способа можно отнести: непрерывность регулировочного критерия, простоту практической реализации и в отличие от способа настройки

по амплитудной характеристике – известное направление необходимого изменения расстройки.

*Недостатки* способа настройки по фазовой характеристике:

- сложность применения в сетях, имеющих воздушные линии электропередачи, по причине влияния нестабильного вектора напряжения естественной несимметрии сети на точность измерения фазы;
- нестабильная работа в случаях низкой добротности контура и в области глубоких расстроек.

### Способ наложения сигнала непромышленной частоты

Способ наложения сигнала непромышленной частоты в отличие от ранее рассмотренных, является активным, т.е. подразумевает наложение в КНП сети сигнала непромышленной частоты. Известно несколько методов основанных на наложении сигнала непромышленной частоты [59, 84, 86]. Практически все они основаны на измерении проводимости контура на частоте наложения. Наибольший интерес представляет способ [73, 74], в котором в качестве накладываемого используется сигнал, формируемый из синусоидального сигнала с частотой 50 Гц. При этом практически вся его энергия сосредоточена в двух основных гармониках, не кратных промышленной частоте (рисунок 1.4).

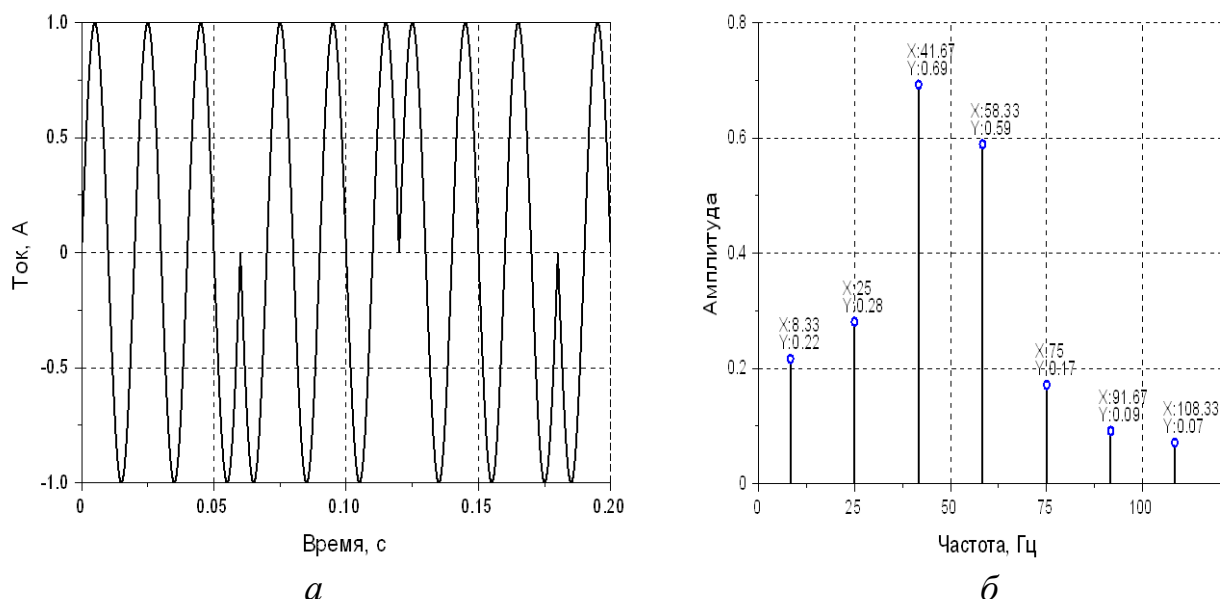


Рисунок 1.4 – Форма накладываемого сигнала (а) и его спектральный состав (б)

Проанализируем однолинейную схему замещения КНП сети с источником наложения тока (рисунок 1.5).

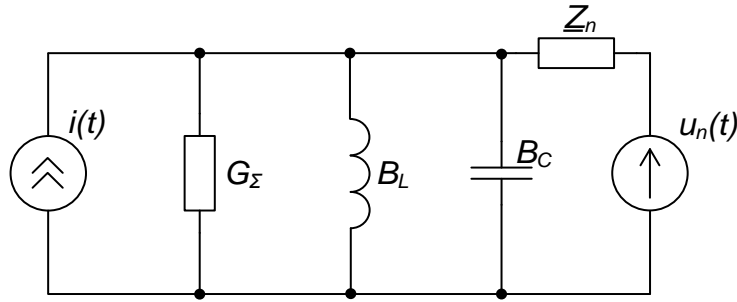


Рисунок 1.5 – Схема замещения КНП сети с источником наложения тока:

$i(t)$  – источник наложения тока;  $G_\Sigma$  – суммарная активная проводимость контура: активная проводимость фаз сети на землю, активная проводимость ДГР и внутреннее сопротивление источника наложения;  $B_L$  – индуктивная проводимость реактора;  $B_C$  – емкостная проводимость сети;  $u_n(t)$  – эквивалентный источник несимметрии и его эквивалентное сопротивление  $Z_n$

Для частоты  $f_n$  полная проводимость контура на зажимах источника наложения тока определяется выражением

$$\underline{Y}_{f_n} = \frac{\underline{i}_{f_n}}{\underline{u}_{f_n}} = \underline{Z}_n + G_\Sigma + B_L + B_C, \quad (1.6)$$

где  $\underline{i}_{f_n}$  – ток источника наложения с частотой  $f_n$ ;  $\underline{u}_{f_n}$  – напряжение несимметрии контура с частотой  $f_n$ .

В симметричных сетях с большим значением  $\underline{Z}_n$  формула (1.6) может быть представлена в виде

$$\underline{Y}_{f_n} = \frac{\underline{i}_{f_n}}{\underline{u}_{f_n}} \approx G_\Sigma + j \left( \omega_n C - \frac{1}{\omega_n L} \right).$$

Используя две разных частоты  $f_1$  и  $f_2$ , можно получить систему двух комплексных уравнений:

$$\begin{cases} \underline{Y}_1 = G_\Sigma + j \left( \omega_1 C - \frac{1}{\omega_1 L} \right) \\ \underline{Y}_2 = G_\Sigma + j \left( \omega_2 C - \frac{1}{\omega_2 L} \right) \end{cases} \quad (1.7)$$

Решением системы (1.7) будут следующие соотношения:

$$\begin{aligned} G_\Sigma &= \operatorname{Re}(\underline{Y}_1) = \operatorname{Re}(\underline{Y}_2), \\ C &= \frac{\operatorname{Im}(\underline{Y}_1) \cdot \omega_1 - \operatorname{Im}(\underline{Y}_2) \cdot \omega_2}{\omega_1^2 - \omega_2^2}, \\ L &= \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\operatorname{Im}(\underline{Y}_1) \cdot \omega_2^2 \cdot \omega_1 - \operatorname{Im}(\underline{Y}_2) \cdot \omega_1^2 \cdot \omega_2}. \end{aligned}$$

Найденные значения  $L$  и  $C$  позволяют осуществить настройку КНП сети на резонанс исходя из равенства емкостной и индуктивной проводимостей на промышленной частоте  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot 50$

$$\omega C = \frac{1}{\omega L}.$$

Степень расстройки компенсации в этом случае определяется формулой:

$$\vartheta = 1 - \frac{1}{\omega^2 LC} \quad (1.8)$$

*Преимущества* способа:

- работа в сетях без создания искусственной несимметрии, и в сетях с низкой добротностью;
- определение значений элементов контура  $C, L, G$ ;
- относительно высокая помехоустойчивость и хорошая точность.

*Недостатки* способа:

- необходимость применения технически сложного источника наложения сигнала непромышленной частоты с изменяемой мощностью;
- дискретность измерения параметров, вызванная временем наложения сигнала и его последующей обработкой;
- энергозатратность наложения сигнала непромышленной частоты;
- сложность технической реализации.

#### Способ наложения сигнала переменной частоты

Как и способ наложения сигнала непромышленной частоты, метод наложения сигнала переменной частоты является активным. Суть способа – сканирование КНП сети сигналом переменной частоты, отыскание частоты резонанса индуктивности реактора и емкости сети на непромышленной частоте и последующее вычисление емкостного тока на промышленной частоте сети по формуле [59]

$$I_C = I_L \left( \frac{f_{\text{пром}}}{f_{\text{рез}}} \right)^2.$$

К *преимуществам* способа можно отнести отсутствие зависимости от нестабильного напряжения естественной несимметрии, возможность измерения емкостного тока сети.

*Недостатки* способа:

- необходимость создания сложного источника наложения сигнала переменной частоты с изменяемой мощностью;
- дискретность измерения, вызванная временем наложения сигнала и его последующей обработкой;
- энергозатратность наложения сигнала переменной частоты;
- сложность технической реализации, особенно для случая параллельной работы ДГР нескольких секций;
- ограниченность в применении с реакторами, настраиваемыми в резонанс в нормальном режиме работы сети.

### 1.3 Типы дугогасящих реакторов и их характеристика

ДГР (дугогасящая катушка, катушка Петерсена) представляет собой регулируемую катушку индуктивности большой мощности (в среднем от 80 до 1600 кВА), предназначенную для компенсации емкостной составляющей тока ОЗЗ своей индуктивной составляющей тока. Предложено и разработано множество различных способов изменения индуктивного тока (индуктивности) ДГР, однако по различным причинам большинство из них выпущено в единичных экземплярах [4, 10, 21, 22, 26, 28, 32, 36, 39, 41, 71, 72].

В действующих распределительных сетях наиболее широкое применение нашли ДГР, индуктивную составляющую тока которых возможно регулировать в автоматическом режиме, без отключения ДГР от сети. По способу регулирования тока, реакторы можно разделить на две основные группы: с плавным и ступенчатым регулированием тока.

Среди ДГР с плавной регулировкой индуктивности наиболее распространены плунжерные, регулирование которых осуществляется при

помощи изменения немагнитного зазора в сердечнике, и реакторы, управляемые подмагничиванием, индуктивность которых изменяется в зависимости от значения постоянного тока в специальных обмотках управления.

К *преимуществам* ДГР плунжерного типа можно отнести практически линейную характеристику, кратность регулирования (отношение максимального тока к минимальному) порядка 5, сохранение настройки при переходе сети в режим ОЗЗ, добротность больше 50.

Из *недостатков* плунжерных ДГР следует отметить: время перестройки от минимального до максимального значения тока – от 30 с до 2 мин, наличие механической части, ограниченный ресурс и вероятность выхода из строя концевых выключателей. Изменение немагнитного зазора осуществляется за счет электродвигателя, вращательные движения которого посредством редуктора, червячного механизма и вала преобразуются в поступательные движения стержня. Наиболее распространены плунжерные ДГР типов РЗДПОМ (ОАО ХК «Электрозавод», г. Москва), РДМР (ООО «ВП НТБЭ», г. Екатеринбург) и ZTC (EGE, Чехия).

Второй разновидностью ДГР с плавным изменением тока являются ДГР с подмагничиванием. Их *преимуществом* является относительно высокая скорость настройки 1-3 с во всем диапазоне и отсутствие подвижных механических частей. К *недостаткам* ДГР с подмагничиванием можно отнести нелинейные регулировочные характеристики, меньшую по сравнению с ДГР плунжерного типа добротность, генерация реактором токов высших гармонических составляющих, изменение настройки при переходе сети в режим ОЗЗ, затраты энергии на подмагничивание при настройке на резонанс в нормальном режиме работы сети. Ток подмагничивания таких реакторов изменяется посредством изменения угла открытия тиристорных ключей, позволяющих плавно изменять действующее значение тока подмагничивания. Наиболее распространенным реактором с подмагничиванием является ДГР типа РУОМ (ОАО «РЭТЗ Энергия»).

Выделяют ДГР со ступенчатым изменением индуктивного тока: реакторы с мелкоступенчатым и крупноступенчатым изменением индуктивного тока. Из ДГР с крупноступенчатым изменением тока широкое распространение получили реакторы типа ЗРОМ или РЗДСОМ, (ОАО ХК «Электрозавод») имеющие пять ответвлений. Индуктивность таких ДГР изменяется путем ручного переключения числа витков, что делает невозможным их применение совместно с устройствами автоматики ДГР. Ступенчатые реакторы характеризуются малым количеством ответвлений и большим шагом изменения тока. Тем не менее задача измерения расстройки и величины емкостного тока в сетях с указанным типом ДГР в условиях комбинированного заземления нейтрали или в сети с большими потерями является актуальной.

Из реакторов с мелкоступенчатым изменением индуктивного тока получили распространение ДГР с конденсаторным регулированием. Эквивалентное реактивное сопротивление этих реакторов изменяется путем подключения конденсаторов необходимой емкости к специальной обмотке ДГР. При этом емкости ступеней конденсаторной батареи пропорциональны степеням двойки, что при использовании семи ступеней дает 128 комбинаций их включения, а при использовании восьми ступеней – 256 комбинаций. Другими словами, весь диапазон регулирования тока разделен (в зависимости от мощности) на 128 или 256 значений, что позволяет с высокой степенью точности проводить настройку на заданный режим компенсации. Реактор характеризуется высокой скоростью настройки (просто включается нужная комбинация конденсаторов) и отсутствием подвижных механических частей. К *недостаткам* можно отнести наличие дополнительного шкафа конденсаторных батарей и необходимость его размещения. Управление реактором осуществляется путем включения и отключения необходимых контакторов, коммутирующих конденсаторы. Наиболее распространенными реакторами с мелкоступенчатым регулированием являются ДГР типа РДМК (ООО «НПП Бреслер»).

#### 1.4 Концепция совершенствования автоматического управления компенсацией емкостных токов замыкания на землю

Контур нулевой последовательности распределительной сети в первом приближении может быть представлен эквивалентной однолинейной схемой замещения. Схема замещения представляет собой параллельный колебательный контур, включающий следующие элементы:  $C$  – эквивалентная емкость фаз сети на землю;  $L$  – эквивалентная индуктивность ДГР;  $G$  – эквивалентные активные потери через изоляцию сети и активные потери в ДГР.

Параллельный колебательный контур является звеном второго порядка, и переходный процесс в нем описывается дифференциальным уравнением второго порядка. Решение дифференциального уравнения второго порядка состоит из двух слагаемых: принужденной составляющей, обусловленной действующими в сети источниками, и свободной составляющей, частота свободных колебаний и коэффициент затухания которой обусловлены исключительно параметрами элементов колебательного звена.

Выделение из сигнала переходного процесса свободной составляющей и последующее извлечение частоты свободных колебаний, и коэффициента демпфирования сети позволит вычислить величину расстройки КНП сети и осуществить его настройку на резонанс.

Вычисление расстройки с учетом (1.8) может быть также выполнено по формуле

$$\vartheta = 1 - \frac{\omega_{\text{рез}}^2}{\omega_{\text{пром}}^2}, \quad (1.9)$$

где  $\omega_{\text{рез}}$  – резонансная частота КНП сети;  $\omega_{\text{пром}}$  – промышленная частота.

Очевидно, что для целей применения предлагаемой концепции в устройстве автоматической настройки ДГР переходный процесс в сети по времени возникновения должен быть спровоцирован устройством.

Для реализации предлагаемой концепции необходимо решить следующие задачи:



- сформулировать основные требования к устройству автоматического управления компенсацией емкостного тока;
- разработать способ оценки параметров КНП сети с компенсацией емкостного тока;
- разработать способ автоматической настройки ДГР на заданный режим компенсации;
- провести исследования и натурные испытания разработанных способов.

### 1.5 Требования к устройству автоматического управления компенсацией емкостного тока

В соответствии с общей концепцией построения устройств автоматики, требования к устройству автоматического управления режимом компенсации емкостного тока с учетом позиции В.К. Обабкова [35] можно сформулировать следующим образом:

1. Работоспособность в широком диапазоне изменения параметров сети:  $L$ ,  $C$ ,  $G$  и напряжения естественной несимметрии  $U_0$ . Требование по работоспособности в широком диапазоне изменения напряжения  $U_0$  особенно актуально для сетей с воздушными линиями электропередачи. Это обусловлено большим и нестабильным как по фазе, так и по значению напряжения естественной несимметрии. Требование по широкому диапазону изменения эквивалентных активных потерь  $G$  или коэффициента демпфирования  $d$  вызвано, как различной степенью старения изоляции распределительных сетей, так и тенденцией к искусственному увеличению потерь в КНП за счет комбинированного заземления нейтрали [16, 69, 70].

2. Возможность настройки на резонанс в нормальном режиме работы сети. Требование обусловлено тем, что для заблаговременной подготовки сети к моменту возможного ОЗЗ и реализации эффекта самозащиты сети от ОЗЗ КНП сети к моменту пробоя должен находиться в настроенном на резонанс состоянии. Настройка КНП сети в режиме ОЗЗ зачастую ограничена возможностями применяемых ДГР. Так, например, плунжерные ДГР, регулируемые путем

изменения немагнитного зазора в сердечнике, не предназначены для их настройки в режиме ОЗЗ.

3. Принципиальная совместимость устройства автоматического управления компенсацией с любым типом ДГР. В случае использования ДГР ступенчатого типа устройство должно измерять расстройку компенсации, таким образом сигнализируя персоналу на необходимость его переключения. При применении управляемых плунжерных ДГР или ДГР с конденсаторным регулированием устройство должно осуществлять автоматическую настройку реактора на заданный пользователем режим компенсации емкостного тока.

4. Погрешность автоматической настройки на заданный режим компенсации не должна превышать 1%. Данное требование указано в действующим в ПАО «Россети» СТО 34.01-3.2-008-2017 «Реакторы заземляющие дугогасящие 6-35 кВ. Типовые технические требования», но по мнению автора и как показал С.Н. Березницкий [62] является чрезмерно завышенным.

5. Корректная работа устройства при использовании параллельно включенных реакторов, например, при объединении секций шин.

## Выводы

1. Компенсация емкостных токов в условиях роста городов, увеличения удельной емкости кабельных линий, естественного старения изоляции является одним из способов повышения электробезопасности и надежности электроснабжения. Эффективная компенсация возможна лишь при автоматическом поддержании резонансной настройки ДГР.

2. Применяемые в настоящее время способы настройки КНП сети не обеспечивают работу в широком диапазоне изменения параметров сети. Практическая реализация способа настройки КНП сети по амплитудной характеристике имеет ряд недостатков, обусловленных конечной чувствительностью цепей измерения и большим диапазоном изменения производной напряжения на нейтрали при изменении расстройки компенсации и

при увеличении коэффициента демпфирования. Способ подвержен влиянию различного рода наводок и помех в областях настройки, далеких от точки резонанса, что в некоторых случаях удается решить с помощью создания искусственной несимметрии.

3. Фазовый метод настройки принципиально подвержен влиянию случайного по модулю и фазе напряжения естественной несимметрии, что в некоторых случаях приводит к возникновению существенной погрешности при настройке и, как следствие к возможности возникновения дуги в месте ОЗЗ.

4. Способы настройки, основанные на наложении в КНП сигнала непромышленной частоты и сканировании контура источником сигнала переменной частоты не подвержены влиянию нестабильного вектора напряжения естественной несимметрии, но являются громоздкими и сложными в практической реализации, особенно в случаях параллельного включения ДГР нескольких секций.

5. Разработка способа оценки параметров сети и алгоритма автоматической настройки компенсации, с учетом недостатков, присущих существующим методам, позволят создать устройство автоматической настройки ДГР, функционирующее в широком диапазоне изменения параметров сети, в условиях нестабильного вектора напряжения естественной несимметрии и выполняющего автоматическую настройку компенсации с высокой точностью, что позволит повысить электробезопасность и надежность электроснабжения потребителей.

6. Контур нулевой последовательности сети представляет собой колебательное звено второго порядка. Выделение частоты свободных колебаний колебательного звена позволяет оценить расстройку компенсации КНП сети.

7. Ключевыми требованиями к устройствам автоматической настройки КНП сети на резонансный режим можно отнести:

- работоспособность в широком диапазоне изменения параметров  $L$ ,  $C$ ,  $G$ ,  $U_0$ ;
- работоспособность при параллельном включении ДГР;
- погрешность настройки на заданный режим компенсации – не более 1%.

## Глава 2 Разработка и исследование способа оценки параметров контура нулевой последовательности сети на основе измерения частоты свободных колебаний

### 2.1 Разработка математической модели электрической сети с компенсацией емкостных токов при однофазном замыкании на землю. Переходный процесс в контуре нулевой последовательности сети

Применительно к решаемой задаче, трехфазную распределительную сеть с учетом корректных допущений, можно представить упрощенной эквивалентной схемой (рисунок 2.1).

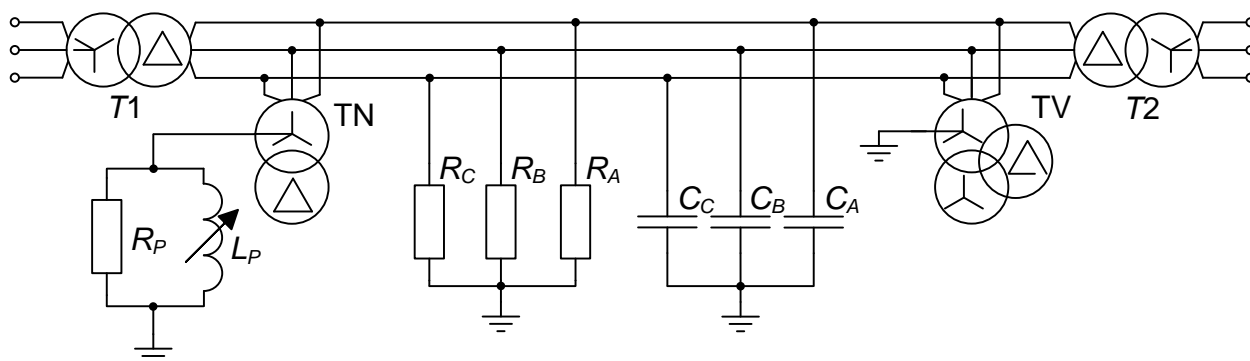


Рисунок 2.1 – Упрощенная эквивалентная схема трехфазной электрической сети:  
 $T1$ ,  $T2$  – силовые трансформаторы;  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  – сопротивления изоляции фаз сети на землю;  
 $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$  – емкости фаз сети на землю;  $TV$  – измерительный трансформатор напряжения;  
 $TN$  – нейтралеобразующий трансформатор;  $R_P$  – активные потери в ДГР;  $L_P$  – индуктивность ДГР

Для анализа переходных процессов, протекающих в КНП сети, целесообразно рассмотреть однолинейную схему замещения. При осуществлении такого перехода приняты следующие допущения:

1. Эквивалентное сопротивление нейтралеобразующего трансформатора несущественно на фоне сопротивления ДГР. При дальнейшем анализе параметрами трансформатора  $TN$  можно пренебречь.

2. Эквивалентное продольное сопротивление нулевой последовательности линий электропередачи на порядки меньше сопротивления нейтралеобразующего трансформатора [62]. При дальнейшем анализе продольным сопротивлением линий можно пренебречь.

3. Для упрощения математического анализа все активные потери ДГР, состоящие из потерь в стали и потерь в меди, и потери контура в линиях электропередачи представим одной эквивалентной проводимостью  $G$ .

С учетом принятых допущений для описания переходных процессов в КНП сети упрощенная эквивалентная схема представлена в виде однолинейной эквивалентной схемы замещения (рисунок 2.2).

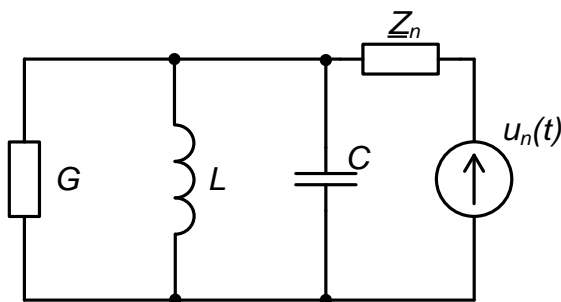


Рисунок 2.2 – Однолинейная эквивалентная схема замещения КНП сети:

$G$  – эквивалентная активная проводимость контура;  $u_n(t)$  – напряжение смещения нейтрали;  $Z_n$  – внутреннее сопротивление источника смещения нейтрали;  $L$  – эквивалентная индуктивность ДГР и нейтралеобразующего трансформатора;  $C$  – эквивалентная емкость сети

Любая коммутация участков распределительной сети является возмущением и приводит к возникновению переходного процесса. Для большинства сетей внутреннее сопротивление  $Z_n$  источника смещения нейтрали очень велико, а сам источник  $u_n(t)$  не влияет на характер переходного процесса в КНП. Полная проводимость контура в операторном виде представлена соотношением [51]

$$Y(p) = G + pC + \frac{1}{pL}.$$

Приравняв операторное выражение нулю и умножив обе части уравнения на  $p/C$ , получим следующее характеристическое уравнение:

$$p^2 + p \frac{G}{C} + \frac{1}{LC} = 0. \quad (2.1)$$

Приведенное характеристическое уравнение (2.1) можно получить и из дифференциального уравнения для рассматриваемой цепи.

Приняв, что переходный процесс в цепи вызван ненулевыми начальными условиями и до начала переходного процесса емкость  $C$  обладала зарядом с

разностью потенциалов на зажимах  $u$ . В момент начала переходного процесса для цепи справедливы следующие соотношения:

$$i_C + i_L + i_G = 0, \quad (2.2)$$

$$u_C = u_L = u_G = u. \quad (2.3)$$

Токи емкости  $C$  и проводимости  $G$  цепи с учетом соотношения (2.3) можно записать следующим образом

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{du}{dt}, \quad i_G = u_G G = uG. \quad (2.4)$$

После подстановки в выражение (2.2) величин из соотношения (2.4), с учетом того, что  $u = u_L = L \frac{di_L}{dt}$ , получим

$$LC \frac{d^2 i_L}{dt^2} + GL \frac{di_L}{dt} + \frac{1}{LC} i = 0.$$

Поделив все члены уравнения на коэффициент при члене с высшей производной и введя обозначение  $i_L = i$ , получим дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{G}{C} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = 0.$$

Характеристическое уравнение (2.1) получается путем замены производных множителями  $p$  соответствующей степени.

Переходный процесс в рассматриваемой цепи описывается решением приведенного дифференциального уравнения второго порядка и в общем случае представляет выражение вида

$$i(t) = i_\infty + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (2.5)$$

где  $i(t)$  – искомая переменная;  $i_\infty$  – принужденная составляющая решения;  $A_1, A_2$  – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий;  $p_1$  и  $p_2$  – корни характеристического уравнения (2.1).

Корни характеристического уравнения (2.1) имеют вид:

$$p_{1,2} = -\frac{G}{2C} \pm \sqrt{\left(\frac{G}{2C}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \frac{1}{LC}}. \quad (2.6)$$

При этом имеют место три случая:

1. Контур с высокой добротностью (малыми потерями), в котором происходит колебательный разряд. Для данного контура справедливо

$$\left(\frac{G}{2C}\right)^2 < \left(\frac{1}{LC}\right), \text{ т.е. } R > \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}, \text{ или } 2R > \rho,$$

где  $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$  – волновое, или характеристическое, сопротивление контура.

Второе слагаемое в выражении (2.6) может быть представлено в следующей форме

$$\sqrt{\left(\frac{G}{2C}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = \sqrt{(-1)\left(\frac{1}{LC} - \left(\frac{G}{2C}\right)^2\right)} = j\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{G}{2C}\right)^2} = j\omega_{\text{св}}.$$

Решением характеристического уравнения в данном случае является комплексно-сопряженная пара корней

$$p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} = -\delta \pm j\omega_{\text{св}}, \quad (2.7)$$

где  $\omega_{\text{св}} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$  – угловая частота свободных колебаний;  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – угловая резонансная частота колебательного контура;  $\delta = \frac{1}{2RC}$  – коэффициент затухания свободных колебаний.

При подстановке в решение (2.5) корней (2.7) характеристического уравнения после математических преобразований свободная составляющая переходного процесса примет вид

$$i_{\text{св}}(t) = Ie^{-\delta t} \sin(\omega_{\text{св}}t + \varphi), \quad (2.8)$$

где  $i_{\text{св}}(t)$  – ток через индуктивный элемент контура в любой момент времени;  $I$  – ток индуктивности до начала переходного процесса;  $\varphi = \omega_{\text{св}}/\delta$  – начальная фаза свободных колебаний.

С учетом проделанных преобразований выражение (2.5) представлено в виде

$$i(t) = i_{\infty} + i_{\text{св}}(t). \quad (2.9)$$

Аналогично, напряжение на элементах контура описывается уравнением вида

$$u(t) = u_{\infty} + u_{\text{св}}(t). \quad (2.10)$$

2. Контур с низкой добротностью (большими потерями), в котором происходит апериодический разряд (конденсатора). Для этого контура справедливо

$$\left(\frac{G}{2C}\right)^2 > \left(\frac{1}{LC}\right), \text{ т.е. } R < \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}, \text{ или } 2R < \rho.$$

В данном случае корни характеристического уравнения являются вещественными и разными. Контур с подобными характеристиками является частным случаем колебательного контура, процесс в нем отображается аналогичным выражением (2.5), но при этом не носит колебательного характера, а свободная составляющая изменяется по закону, близкому к экспоненциальному:

$$u_{\text{св}}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}.$$

3. Критический режим – пограничный режим между колебательными и аperiodическим. Для него справедливо:

$$\left(\frac{G}{2C}\right)^2 = \left(\frac{1}{LC}\right), \text{ т.е. } R = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}, \text{ или } 2R = \rho.$$

В данном случае корни характеристического уравнения являются вещественными и равными.

Для параллельного колебательного контура, в котором наблюдается резонанс токов, добротность  $Q$  определяется из соотношения

$$Q = \frac{I_C}{I_R} = \frac{U/(1/\omega_0 C)}{U/R} = \omega_0 RC,$$

или что эквивалентно

$$Q = \frac{I_L}{I_R} = \frac{U/\omega_0 L}{U/R} = \frac{R}{\omega_0 L}.$$

Коэффициент затухания свободных колебаний  $\delta$  с учетом выражения (2.7) можно представить в виде

$$\delta = \frac{1}{2RC} = \frac{\omega_0}{2\omega_0 RC} = \frac{\omega_0}{2Q}.$$

## 2.2 Оценка частоты свободных колебаний и коэффициента демпфирования контура

Способ оценки частоты свободных колебаний КНП сети, предложенный в работе, основан на анализе переходного процесса, протекающего в контуре во временной области.



Переходный процесс в КНП может быть вызван, как естественными событиями (переключениями, включениями и отключениями оборудования), так и создан искусственным возмущением. С целью реализации устройства автоматики, контролирующего расстройку в непрерывном режиме, очевидно, что возмущение должно быть искусственным, поскольку является более детерминированным, как по величине, так и по времени возникновения. Принципиально возмущение в КНП можно осуществить различными методами. Для иллюстрации процесса оценки параметров контура можно использовать схему содержащую источник наложения (рисунок 2.3). Наглядно, создание переходных процессов в распределительной сети можно продемонстрировать при помощи программного моделирования (Приложение А).

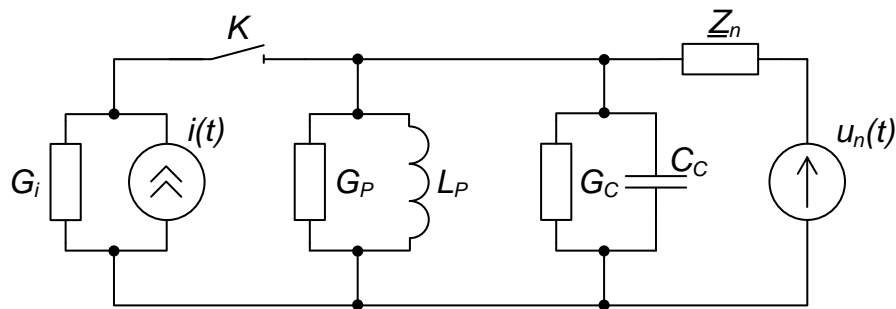


Рисунок 2.3 – Схема подключения источника возмущения к КНП сети

Как было показано ранее, функция, описывающая переходный процесс (2.9, 2.10) состоит из двух составляющих: принужденной и свободной.

При анализе процессов, протекающих в контуре, можно выделить три следующих друг за другом временных участка (рисунок 2.4).

На *первом* участке времени, от 0 до 60 мс установившиеся значения напряжений и токов элементов контура обусловлены действующим в сети напряжением несимметрии и представляют собой сигналы принужденной составляющей. *Второй* кратковременный участок от 60 мс до 80 мс начинается с момента замыкания ключа *K* и длится до момента его размыкания, элементы контура в этот момент времени дополнительно подвержены воздействию источника наложения  $i(t)$ , а переходный процесс в этот момент определяется из схемы контура, дополненной источником наложения. *Третий* участок от 80 мс до

140 мс начинается с момента размыкания ключа  $K$ . В этом режиме в контуре протекает переходный процесс, соответствующий (2.5).

Для выделения сигнала свободной составляющей (рисунок 2.4, б), соответствующего функции (2.8), из сигнала переходного процесса (третий участок) необходимо вычесть сигнал принужденной составляющей (первый участок), т.е. выполнить

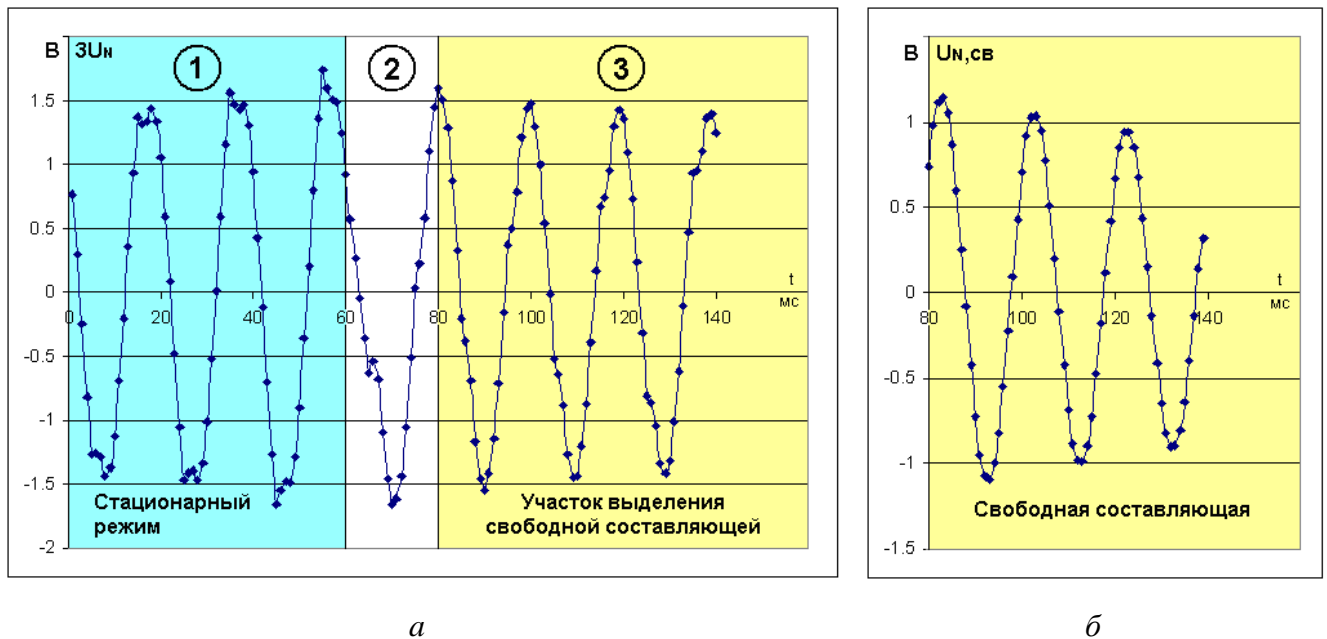


Рисунок 2.4 – Переходный процесс в КНП сети (а) и выделенный из него сигнал свободной составляющей (б)

$$u_{св}(t) = u(t) - u_{\infty}.$$

В случае представления сигнала в дискретном виде общей длительностью  $2N+M$  выборок, где  $N$  – число точек на первом (третьем) участке, а  $M$  – число выборок на втором временном интервале,  $n$ -ю точку сигнала свободной составляющей можно определить из выражения

$$u_{св}(n) = u(N + M + n) - u(n).$$

Дополнительные аспекты выделения сигнала свободной составляющей приведены в Приложении Б.

Сигнал свободной составляющей несет в себе информацию о частоте свободных колебаний КНП сети и коэффициенте затухания свободных колебаний (рисунок 2.5) [82].

Частоту свободных колебаний КНП сети из сигнала свободной составляющей (рисунок 2.5) можно определить по формуле

$$f_{\text{св}} = \frac{1}{X_3 - X_1}; \omega_{\text{св}} = 2\pi f_{\text{св}}. \quad (2.11)$$

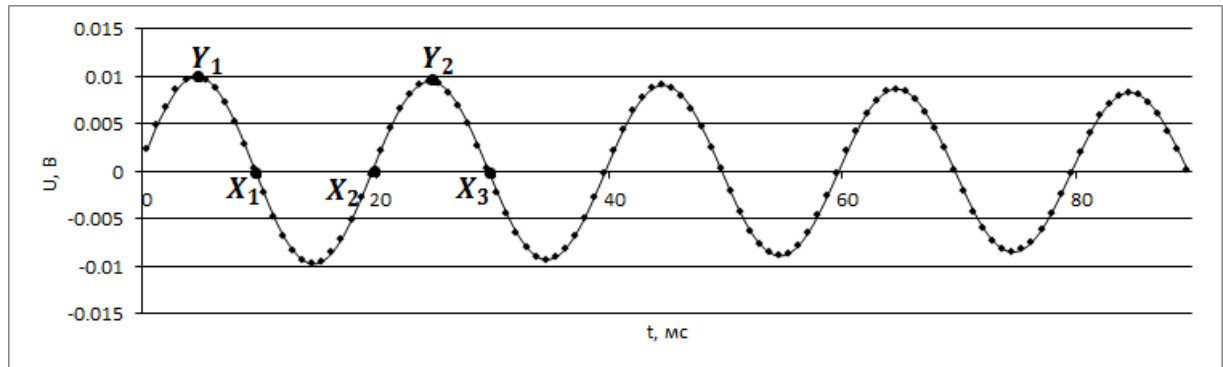


Рисунок 2.5 – Сигнал свободной составляющей переходного процесса

Коэффициент затухания свободных колебаний можно определить по формуле

$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{Y_1}{Y_2}\right)}{t_{Y_2} - t_{Y_1}} = \frac{\lambda}{T_{\text{св}}}, \quad (2.12)$$

где  $\lambda$  – логарифмический декремент затухания.

Для практического применения формулу (2.11) необходимо преобразовать. Сигнал свободной составляющей является дискретным и практически не имеет общих точек, совпадающих с осью абсцисс. Все выборки расположены либо выше, либо ниже оси. Поскольку сигнал свободной составляющей в области пересечения с осью абсцисс имеет большую крутизну (максимальную производную), то пересечение с осью можно с достаточной точностью найти используя линейную аппроксимацию по двум точкам, расположенным по разные стороны от оси. Используя линейную аппроксимацию, период сигнала свободной составляющей можно определить по формуле

$$T_{\text{св}} = \frac{u(t_3)t_4 - u(t_4)t_3}{u(t_3) - u(t_4)} - \frac{u(t_1)t_2 - u(t_2)t_1}{u(t_1) - u(t_2)}, \quad (2.13)$$

где  $t_1$  и  $t_3$  – ближайшее время до перехода сигнала с одинаковой полярностью через нуль;  $t_2$  и  $t_4$  – ближайшее время после перехода сигнала с одинаковой полярностью через нуль, при этом  $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ .

Практическое применение формулы (2.12) осложняется несовпадением реальных выборок сигнала с действительными экстремумами функции. Это приводит к некоторой погрешности измерения коэффициента затухания свободных колебаний, которую целесообразно уменьшить, используя экспоненциальную аппроксимацию сигнала по точкам вблизи амплитудных значений. Для применения метода наименьших квадратов экспоненциальная функция линеаризуется. Коэффициент затухания при этом можно определить по формуле

$$\delta = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i \cdot \ln(Y_i)) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(Y_i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i}, \quad (2.14)$$

где  $Y_i$  – выборка, ближайшая к амплитуде сигнала в момент времени  $t_i$ ;  $n$  – число выборок для расчета.

Таким образом, используя значения частоты свободных колебаний  $\omega_{св}$  и коэффициента затухания  $\delta$ , с учетом формулы (1.9) можно вычислить расстройку  $\vartheta$  и добротность  $Q$  КНП сети:

$$\vartheta = 1 - \frac{\omega_{рез}^2}{\omega_{пром}^2} = 1 - \frac{\omega_{св}^2 + \delta^2}{\omega_{пром}^2}, \quad (2.15)$$

$$Q = \frac{1}{2} \frac{\omega_0}{\delta}. \quad (2.16)$$

Формулы (2.15) и (2.16), позволяющие определить параметры КНП сети, являются основополагающими для построения устройств автоматики ДГР.

В качестве примера можно показать оценку параметров сети на реальном сигнале свободной составляющей переходного процесса, возникшего в сети после создания возмущающего воздействия (рисунок 2.6).

Для определения частоты полученного сигнала по выражению (2.13) определяются значения выборок, между которыми сигнал пересекает ось абсцисс. Поскольку в области нуля производная исследуемого сигнала достигает максимального значения, то для уменьшения погрешности определения частоты сигнала используется метод кусочно-линейной интерполяции. Первый момент пересечения оси абсцисс сигналом свободной составляющей определяется из выражения

$$t = \frac{(U_{CB}(t_1)t_2 - U_{CB}(t_2)t_1)}{U_{CB}(t_1) - U_{CB}(t_2)} = \frac{-284 \cdot 11 - 1011 \cdot 10}{-284 - 1011} = 10,219.$$

Все последующие точки вычисляются аналогичным способом. Исследуемый сигнал пересекает ось абсцисс в моменты времени, равные 10,219, 22,242, 34,198, 46,230, 58,175, 70,212, 82,155, 94,197. Значения полупериодов  $\frac{T_i}{2}$  определяются как разности между смежными моментами пересечения.

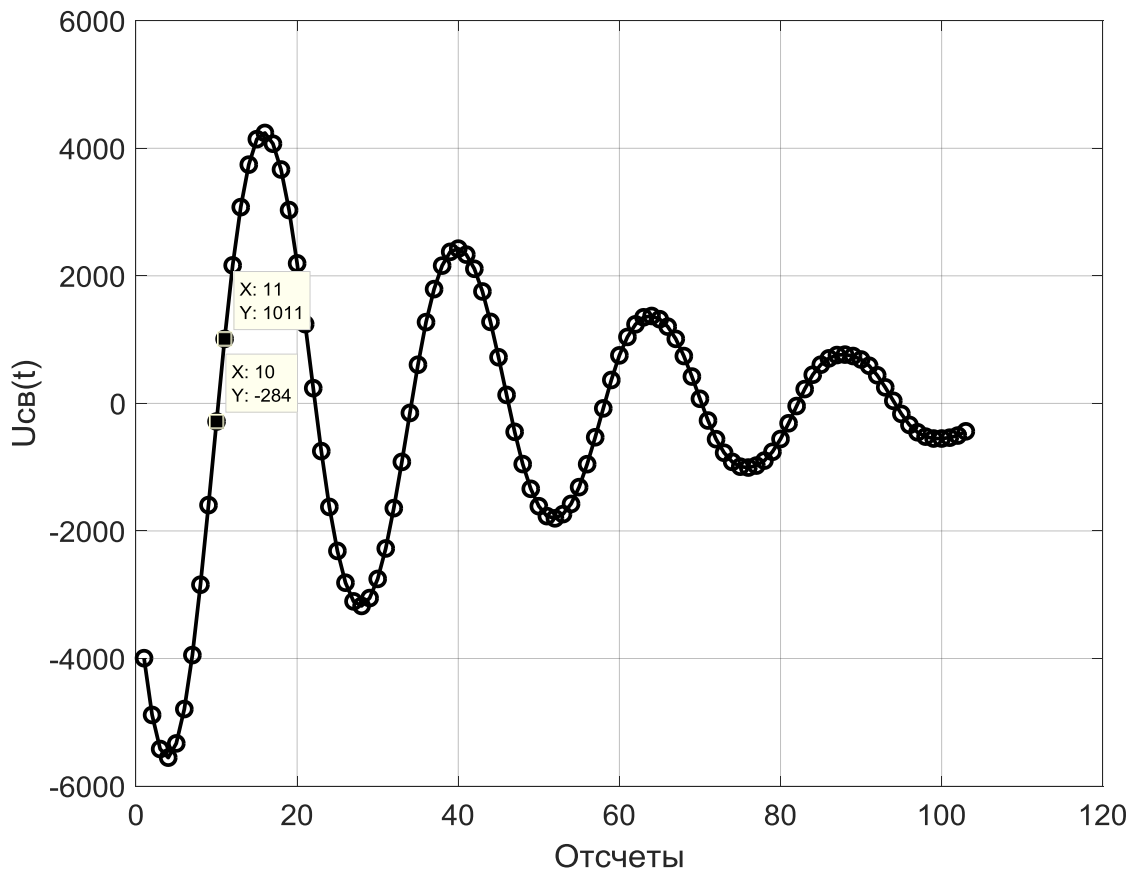


Рисунок 2.6 – Сигнал свободной составляющей переходного процесса

Итоговое значение полупериода свободной составляющей переходного процесса в КНП сети является средним арифметическим полученных полупериодов:

$$\frac{T}{2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{2} = \frac{12,0227 + 11,9564 + 12,0318 + 11,9451 + 12,0372 + 11,9428 + 12,0418}{9} = 11,9968.$$

Частота исследуемого сигнала с учетом частоты дискретизации, определяется по формуле

$$f_{CB} = \frac{f_{\text{дискр}}}{2 \cdot \frac{T}{2}} = \frac{1200}{2 \cdot 11,9968} = 50,0132 \text{ Гц.}$$

Выполняется оценка величины коэффициента затухания исследуемого сигнала. Для этого определяется множество выборок, которые являются экстремумами рассматриваемого сигнала в порядке их следования: 5554,4, 4240,8, 3175,6, 2426,8, 1802, 1370,8, 1005,8, 765,2, 550,8. Им соответствуют следующие временные значения: 0,003, 0,013, 0,023, 0,033, 0,043, 0,053, 0,063, 0,073, 0,083. Данные выборки отражают экспоненциальную зависимость (рисунок 2.7).

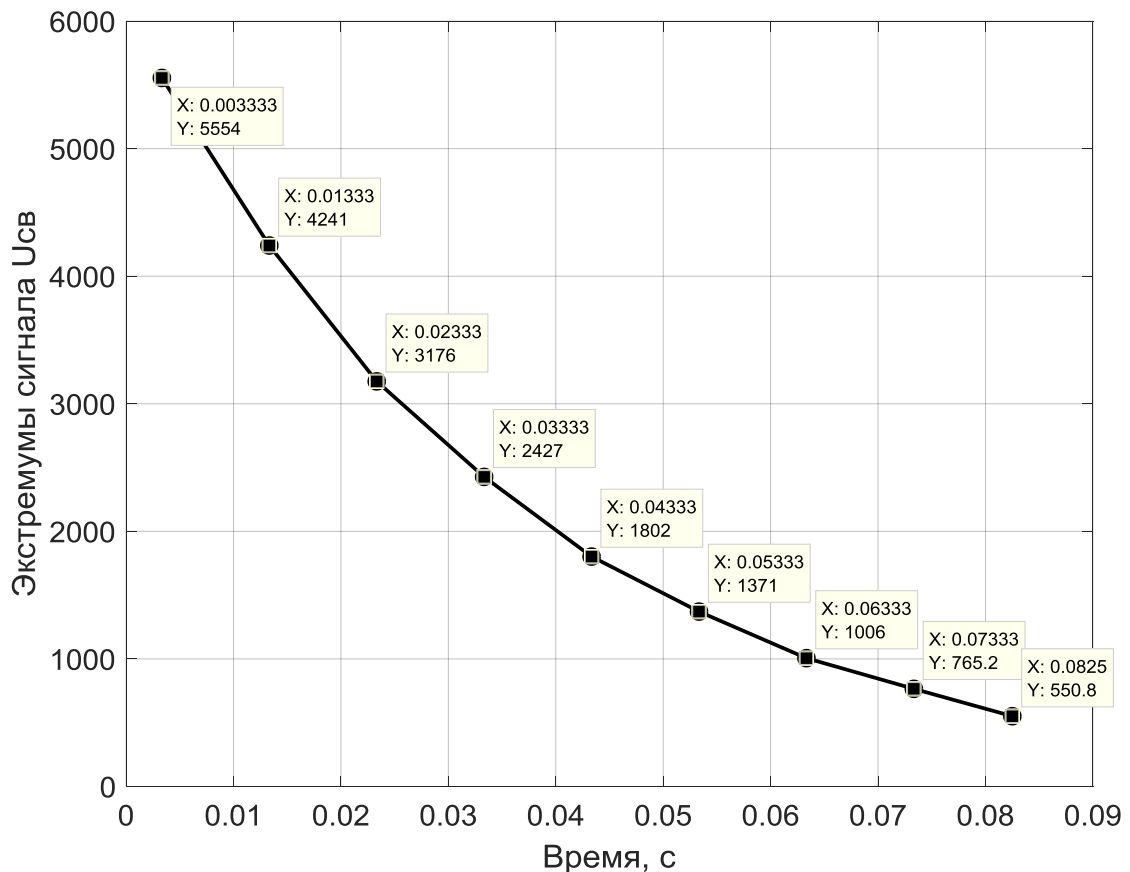


Рисунок 2.7 – Экспоненциальная зависимость сигнала свободной составляющей

Для повышения точности оценки коэффициента затухания, экспоненциальная функция (рисунок 2.7), линеаризуется логарифмированием (рисунок 2.8).

К полученным значениям линеаризованных выборок применяется метод наименьших квадратов. Для этого вычисляются значения следующих коэффициентов:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{9} (0,0033 + 0,0133 + 0,0233 + 0,0333 + 0,0433 + 0,0533 + 0,0633 + 0,0733 + 0,0825) = 0,0432;$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i = \frac{1}{9} (8,6223 + 8,3525 + 8,0633 + 7,7943 + 7,4976 + 7,2231 + 6,9135 + 6,6401 + 6,3114) = 7,4908;$$

$$\overline{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i = \frac{1}{9} (0,0033 \cdot 8,6223 + 0,0133 \cdot 8,3525 + 0,0233 \cdot 8,0633 + 0,0333 \cdot 7,7943 + 0,0433 \cdot 7,4976 + 0,0533 \cdot 7,2231 + 0,0633 \cdot 6,9135 + 0,0733 \cdot 6,6401 + 0,0825 \cdot 6,3114) = 0,3048;$$

$$\overline{x^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 = \frac{1}{9} ((1,111 \cdot 10^{-5})^2 + (1,778 \cdot 10^{-4})^2 + (5,444 \cdot 10^{-4})^2 + 0,0011^2 + 0,0019^2 + 0,0028^2 + 0,004^2 + 0,0054^2 + 0,0062^2) = 0,0025.$$

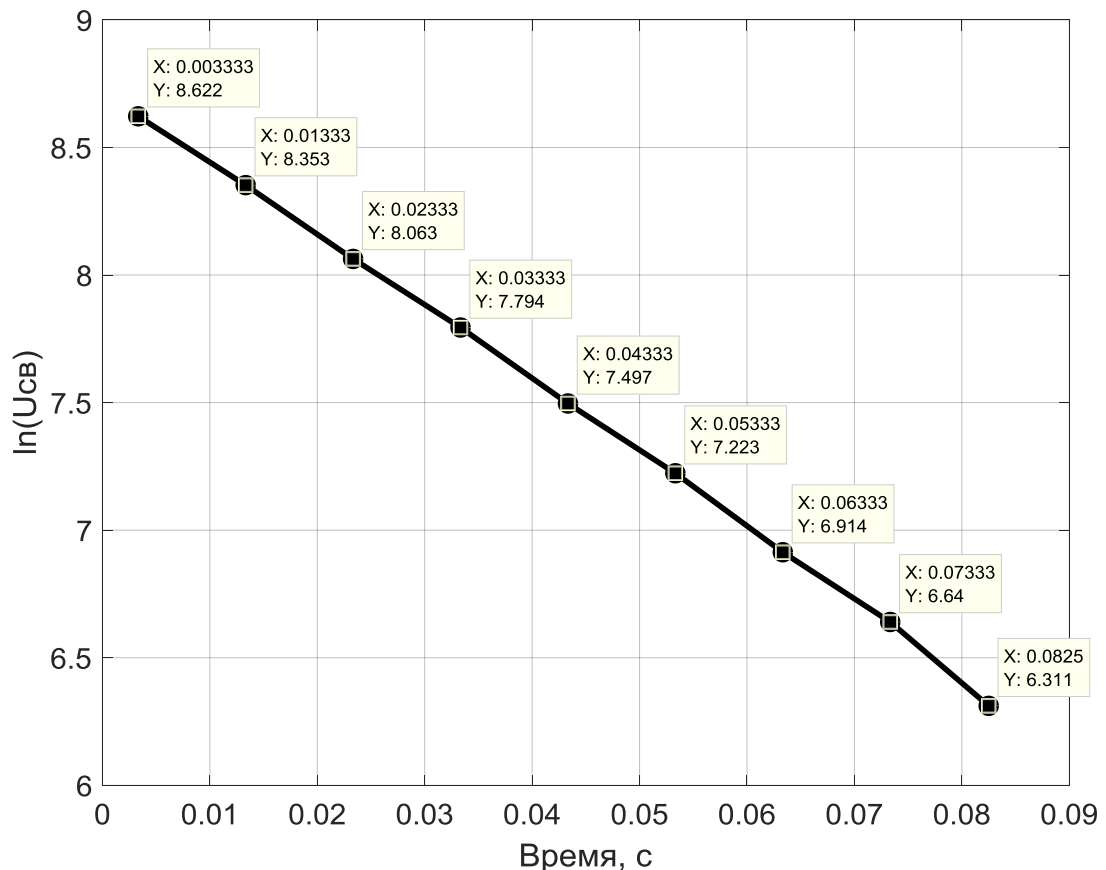


Рисунок 2.8 – Линеаризованная экспоненциальная зависимость

Определяются значения коэффициентов  $a$  и  $b$  линейной зависимости вида  $y=ax+b$

$$a = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} = \frac{0,3048 - 0,0432 \cdot 7,4908}{0,0025 - 0,0432^2} = -29,6683;$$

$$b = \bar{y} - a \cdot \bar{x} = 7,4908 + 29,6683 \cdot 0,0432 = 8,7724.$$

Полученные коэффициенты  $a$  и  $b$  линейной зависимости преобразуются в коэффициенты первоначальной экспоненциальной зависимости вида  $Y = Y_0 \cdot e^{\delta}$ , откуда определяется коэффициент затухания:

$$Y_0 = e^b = e^{8,7724} = 6453,643;$$

$$\delta = a = -29,6683.$$

Расстройка  $\vartheta$  и добротность  $Q$  КНП сети, полученные в результате анализа сигнала свободной составляющей, определяются из выражений:

$$\begin{aligned} \vartheta &= \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega_{\text{сети}}^2}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{\omega_{\text{св}}^2 + \delta^2}{\omega_{\text{сети}}^2}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{(2 \cdot \pi \cdot 50,0132)^2 + (-29,6683)^2}{(2 \cdot \pi \cdot 50,0)^2}\right) \times \\ &\quad \times 100\% = -0,9448\%; \\ Q &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega_0}{\delta} = 6,0731. \end{aligned}$$

### 2.3 Анализ граничных условий способа оценки параметров контура нулевой последовательности сети

Параметром КНП, ограничивающим практическую реализуемость способа, является его эквивалентное сопротивление  $R$ . Рассматриваемая величина зависит как от состояния (степени старения) изоляции контура, так и от способа заземления нейтрали. Так, комбинированный (активно-индуктивный) способ заземления нейтрали снижает добротность контура в целом. Последнее в совокупности с критическим состоянием изоляции, может привести к возникновению граничных условий, упомянутых в 2.1, в частности к выполнению условия

$$R \leq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.17)$$

В данном случае переходный процесс в КНП будет иметь апериодический характер, при котором оценка частоты свободных колебаний описанным ранее способом не представляется возможной. Таким образом, соотношение (2.17) является условием реализуемости предлагаемого способа.

Активные потери, обеспечивающие выполнение условия (2.17), в КНП сети приводят к чрезмерно большому активному току в месте ОЗЗ. Этот факт нивелирует цель настройки и функционирования ДГР – снижение тока в месте ОЗЗ в идеале до нуля, а режим заземления нейтрали приближается по своим свойствам к сети с глухим заземлением нейтрали. Данные обстоятельства



позволяют сделать вывод о том, что рассматриваемые активные потери в КНП сети являются исключением, а изоляцию сети с компенсацией емкостного тока с такими большими потерями необходимо восстанавливать.

Предлагаемый способ накладывает ограничения на частоту дискретизации анализируемого сигнала и длительность измерения, исходя из диапазона изменения измеряемой величины. Так, в большинстве сетей расстройка компенсации  $\vartheta$  изменяется в диапазоне от -400% до 80%. С учетом выражения (1.9) диапазон измеряемых частот свободных колебаний составит от 20 Гц до 115 Гц.

Требование точного измерения частоты сигнала 20 Гц (с периодом колебаний 50 мс), определяет ограничения по длительности осциллографируемого временного интервала. Так, для измерения длительности одного полупериода свободных колебаний указанной частоты, требуется сигнал свободных колебаний, длительностью не менее 25 мс. Этот сигнал, в соответствии с предлагаемым способом, можно получить из осциллограммы, состоящей из трех временных интервалов: принужденной составляющей, длительностью не менее 25 мс; интервала для наложения возмущающего воздействия, длительностью не менее 20 мс, и интервала переходного процесса, длительностью 25 мс. Таким образом, минимальным временем измерения и осциллографирования сигнала является время порядка 70 мс. Данное время может быть уменьшено за счет применения других алгоритмов оценки частоты сигнала.

Измерение частоты сигнала с периодом колебаний 8 мс обуславливает требования к минимальной частоте дискретизации сигнала. Из теоремы Котельникова следует, что частота дискретизации должна быть не менее чем в два раза больше частоты измеряемого сигнала. На практике для определения частоты сигнала по переходам через ноль этого недостаточно из-за большой погрешности получаемых после обработки параметров сигнала. Минимальное значение частоты дискретизации исходя из экспериментальной оценки – 500 Гц.

Необходимо отметить, что приведенные оценки длительности осциллографирования и частоты дискретизации даны для граничных случаев, в

которых для автоматической настройки требуется приблизительное значение измеряемых параметров. Высокая точность измерений требуется вблизи нулевой расстройки компенсации, при которой обозначенные минимальные значения времени осциллографирования и частоты дискретизации будут достаточными.

#### 2.4 Методическая погрешность оценки частоты свободных колебаний и коэффициента демпфирования

Относительную методическую погрешность измеряемых параметров можно оценить по формуле

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{true}}} \cdot 100\%,$$

где  $\Delta x$  – абсолютная погрешность измерения;  $x_{\text{true}}$  – действительное значение измеряемой величины.

Оценка относительной методической погрешности измерения периода сигнала свободной составляющей, (с учетом факторов реализуемости), получена численным способом по формуле

$$\delta_T = \frac{|T_{\text{изм}} - T_{\text{true}}|}{T_{\text{true}}} \cdot 100\%,$$

где  $T_{\text{изм}}$  – измеренное значение периода свободных колебаний с использованием формулы (2.13);  $T_{\text{true}}$  – действительное значение измеряемого периода.

Для оценки был использован сигнал, описываемый функцией (2.8). Частота измеряемого сигнала варьировалась в диапазоне от 20 до 80 Гц, частота дискретизации – от 1 до 6 кГц. Прочие параметры сигнала являлись неизменными. Результаты оценки относительной погрешности измерения периода синтезированного сигнала свободной составляющей приведены на рисунке 2.9. Как видно на рисунке, относительная погрешность измерения периода свободных колебаний не превышает 0,2%, что свидетельствует о достаточной точности предлагаемого способа оценки частоты.

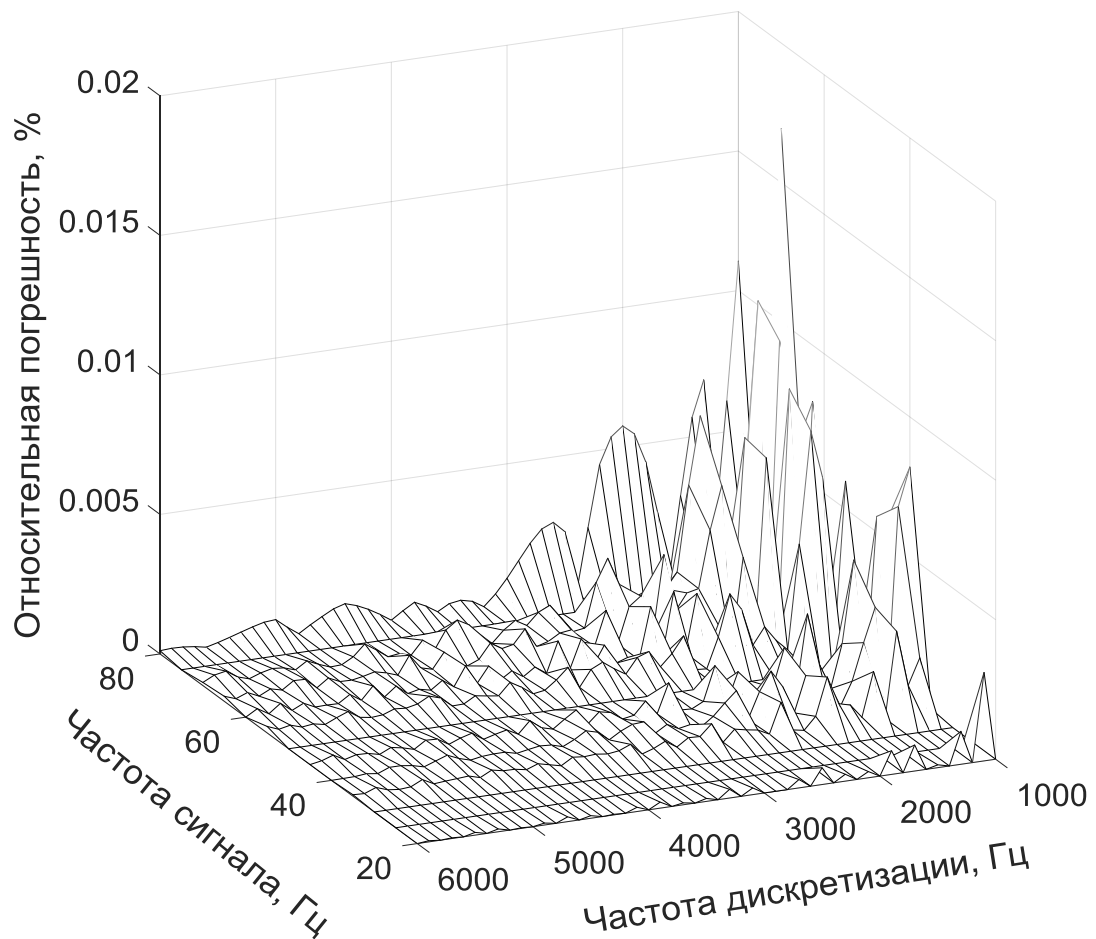


Рисунок 2.9 – Зависимость относительной погрешности измерения периода свободных колебаний от частоты дискретизации и частоты сигнала

Оценка относительной методической погрешности измерения коэффициента затухания свободной составляющей получена численным способом по формуле

$$\delta_{\delta} = \frac{|\delta_{\text{изм}} - \delta_{\text{true}}|}{\delta_{\text{true}}} \cdot 100\%,$$

где  $\delta_{\text{изм}}$  – измеренное значение коэффициента затухания свободных колебаний с использованием формулы (2.14);  $\delta_{\text{true}}$  – действительное значение измеряемого коэффициента затухания.

Для выполнения оценки был использован сигнал, описываемый функцией (2.8). Коэффициент затухания измеряемого сигнала варьировался в диапазоне от 1 до 100, частота дискретизации – от 1 до 6 кГц. Прочие параметры сигнала являлись неизменными. Результаты оценки относительной погрешности измерения коэффициента затухания синтезированного сигнала свободной составляющей приведены на рисунке 2.10. Как видно на рисунке, относительная

погрешность измерения коэффициента затухания свободных колебаний не превышает 1,5%. Данный коэффициент, в условиях реальной сети, на порядок меньше угловой частоты свободных колебаний и поэтому не оказывает существенного влияния на результирующее значение расстройки контура. Таким образом, точность предлагаемого способа оценки коэффициента затухания можно считать удовлетворительной.

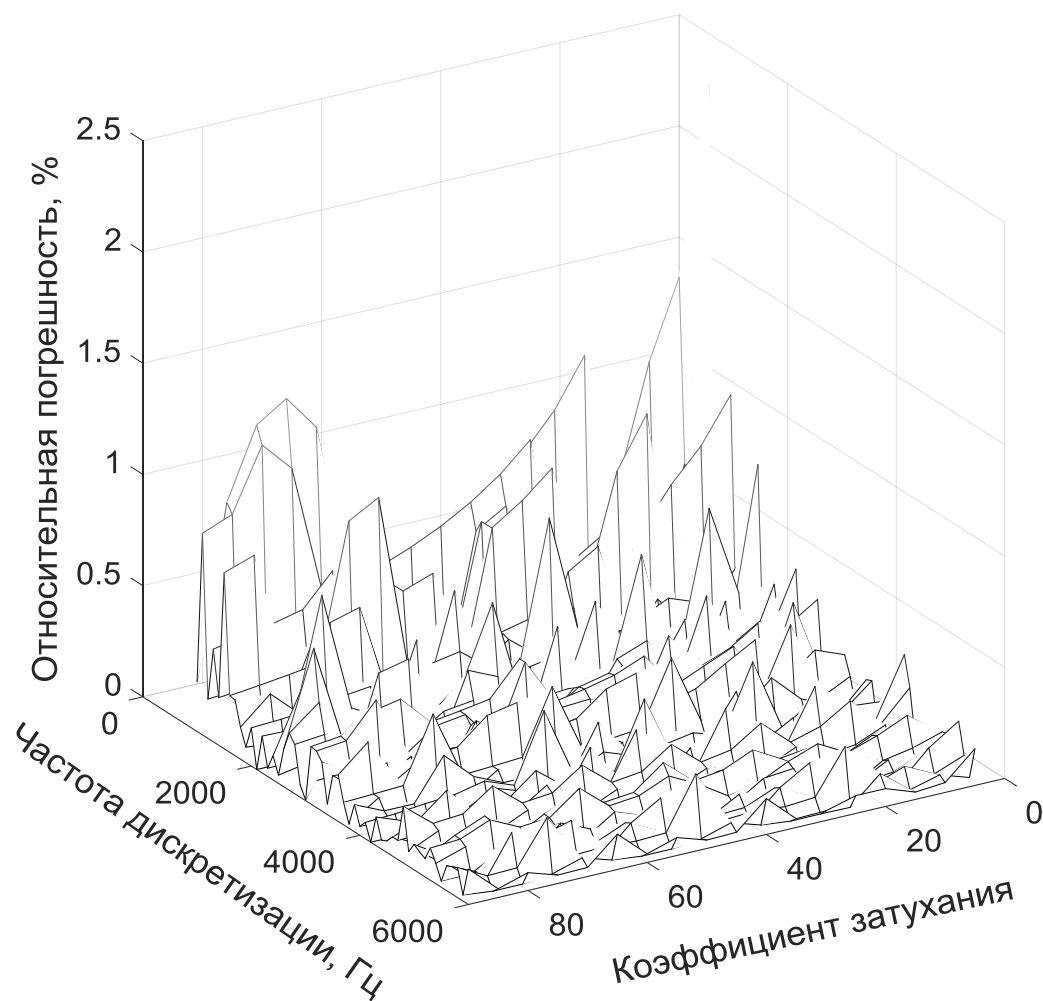


Рисунок 2.10 – Зависимость относительной погрешности измерения коэффициента затухания свободных колебаний от частоты дискретизации и коэффициента затухания сигнала

Программа оценки относительной методической погрешности определения частоты и коэффициента затухания для среды MatLab приведена в Приложении В.

## 2.5 Исследование способа оценки параметров контура нулевой последовательности сети на модели

В ходе диссертационного исследования способ измерения параметров КНП сети был проанализирован на модели. В качестве модели использован параллельный колебательный контур с известными параметрами индуктивности и емкости, в качестве индуктивности – первичная обмотка трансформатора типа ОСМ1-1,0 УЗ. Индуктивность обмотки была измерена методом амперметра-вольтметра в режиме холостого хода и составила 1,4 Гн. В качестве емкости использован конденсатор Siemens емкостью  $(15 \pm 6)\%$  мкФ. Схема исследования приведена на рисунке 2.11.

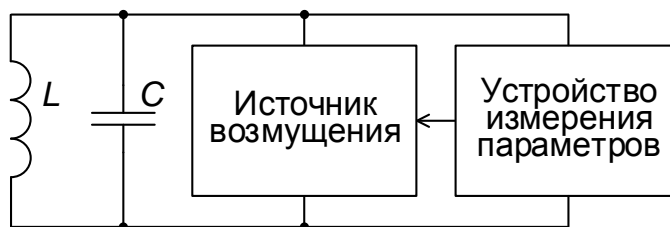


Рисунок 2.11 – Схема исследования способа оценки параметров КНП сети

Действительное значение резонансной частоты контура, образованного индуктивностью и емкостью, можно вычислить следующим образом

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (2.18)$$

Вычисленное по формуле (2.18) значение резонансной частоты равно  $(34,73 \pm 1)$  Гц.

Для оценки резонансной частоты контура предлагаемым способом параллельно к колебательному контуру подключается источник возмущения. Источник, питаемый переменным напряжением 220 В, управляется устройством измерения параметров. Резонансная частота контура, измеренная устройством, реализующим исследуемый метод, составила 34,7 Гц, что с учетом разброса емкости конденсатора свидетельствует о реализуемости предлагаемого способа измерения параметров и его высоких метрологических характеристиках.

## Выводы

1. Контур нулевой последовательности распределительной сети с компенсацией емкостного тока можно представить в виде эквивалентного колебательного контура второго порядка. Переходные процессы в контуре описываются дифференциальным уравнением, решение которого состоит из суммы принужденной и свободной составляющих.

2. Свободная составляющая, выделенная из сигнала переходного процесса, полученного в результате импульсного воздействия на КНП, несет информацию о частоте свободных колебаний и коэффициенте затухания свободных колебаний. Данные параметры КНП сети позволяют с высокой степенью точности вычислить расстройку контура.

3. Предложенный способ оценки параметров сигнала свободной составляющей обладает высокими метрологическими характеристиками и не подвержен влиянию регулярно изменяющегося как по фазе, так и по амплитуде напряжения несимметрии. Способ работоспособен в широком диапазоне изменения параметров контура, в том числе при активно-индуктивном заземлении нейтрали сети.

4. Путем опробования предлагаемого способа на модели контура доказана возможность его натурной реализации. Погрешность измерения частоты собственных колебаний на модели контура составляет не более 1%.

## Глава 3 Разработка и исследование алгоритмов автоматического управления компенсацией емкостного тока

### 3.1 Реализация способа настройки компенсации емкостного тока на заданный режим

Методической основой реализации способа настройки компенсации емкостного тока является предложенный ранее способ оценки параметров сети. Значение расстройки КНП сети, определяемое выражением (2.15), использовано в качестве критерия для автоматической настройки ДГР на заданный режим компенсации.

Рассмотрим алгоритм автоматической настройки реакторов плунжерного типа, управляемых электродвигателем и оснащенных концевыми выключателями для ограничения хода механической части. Схема алгоритма для автоматической настройки сети на заданный режим компенсации приведена на рисунке 3.1.

Настройка КНП сети на заданный режим компенсации начинается с оценки текущего значения расстройки. В зависимости от измеренной величины выполняется одно из следующих действий:

- если расстройка КНП за пределами зоны нечувствительности и положение реактора не концевое, то включить реле изменения тока ДГР, соответствующее необходимому направлению;

- если расстройка КНП за пределами зоны нечувствительности и ДГР находится в концевом положении, то выключить реле изменения тока ДГР, включить соответствующий сигнал «Концевое положение»;

- если расстройка в пределах зоны нечувствительности, то выключить реле изменения тока ДГР, включить сигнал «Настройка в норме».

Эффективность применения представленного алгоритма и точность автоматической настройки существенно зависят от скорости изменения расстройки, зависящей, в свою очередь, от скорости изменения индуктивного тока ДГР. Так, при относительно малой скорости изменения расстройки отключение двигателя произойдет вблизи границы зоны нечувствительности, что

приведет к увеличению погрешности настройки и пускам при малейшем изменении расстройки за пределы зоны нечувствительности.

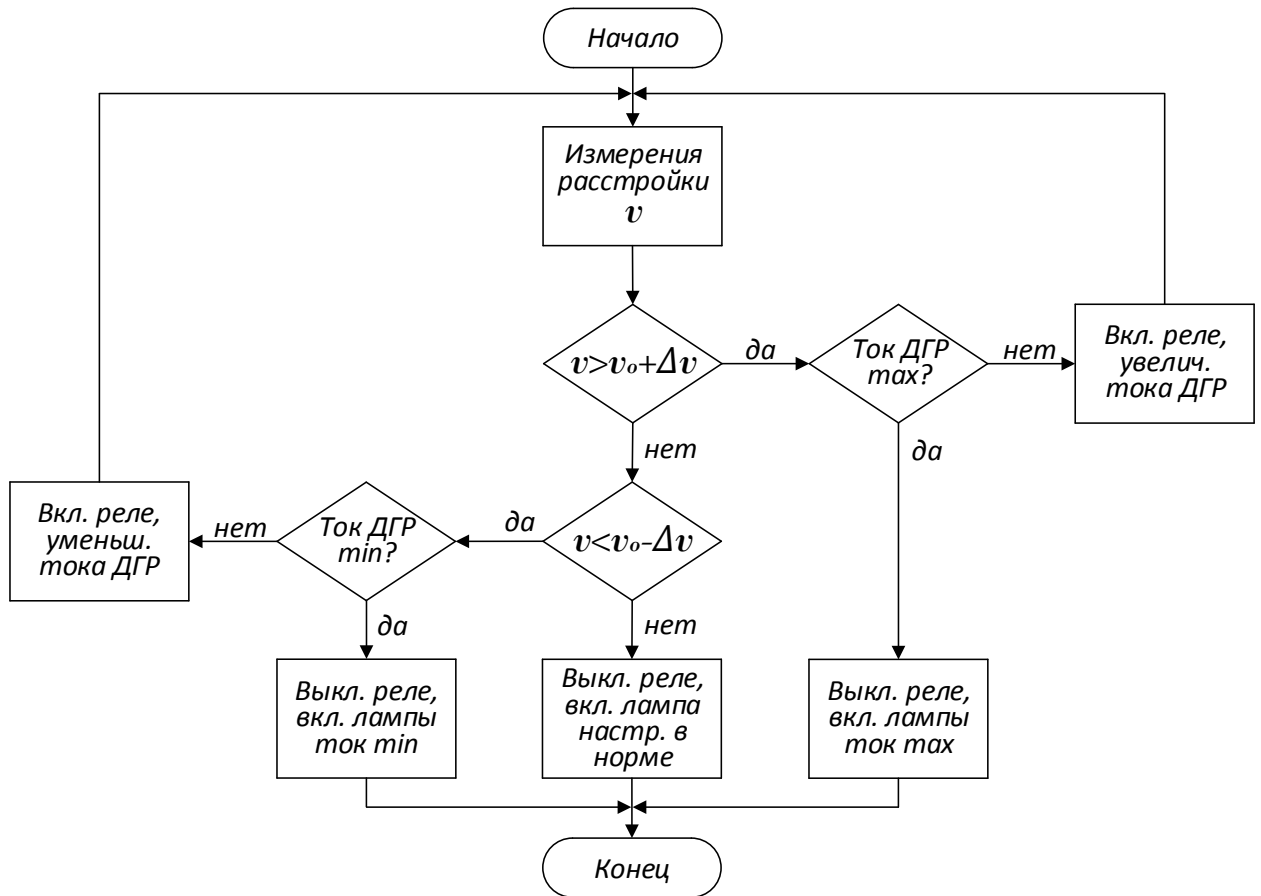


Рисунок 3.1 – Схема алгоритма настройки плунжерного ДГР

Слишком большая скорость изменения расстройки может привести к эффектам перерегулирования. Для увеличения эффективности алгоритма может быть дополнительно использована оценка времени, оставшегося до достижения заданной расстройки компенсации. Оценка времени может быть выполнена во время непрерывного изменения индуктивного тока ДГР по формуле

$$t = \frac{|\vartheta_{\text{тек}} - \vartheta_0|}{\frac{|\vartheta_{\text{тек}} - \vartheta_{\text{пред}}|}{t_{\text{тек}} - t_{\text{пред}}}}, \quad (3.1)$$

где  $\vartheta_{\text{тек}}$  – текущее значение расстройки;  $\vartheta_0$  – целевое значение расстройки;  $\vartheta_{\text{пред}}$  – значение расстройки, полученное при предыдущем измерении;  $t_{\text{тек}}$  и  $t_{\text{пред}}$  – время текущего и предыдущего измерения соответственно.

Время, оставшееся до отключения, вычисленное по формуле (3.1), для увеличения точности с очередным новым замером может быть пересчитано и



скорректировано на константы, учитывающие разгон и выбег асинхронного двигателя в соответствующем направлении.

Непрерывный контроль за скоростью изменения расстройки дополнительно позволяет выявить неисправность в управлении плунжерным ДГР. При поданной команде на изменение тока и фактического отсутствия соответствующего изменения расстройки можно сделать вывод о неисправности в цепях управления двигателем.

Как было показано в первой главе, общеизвестны способы настройки компенсации емкостных токов замыкания на землю на основе экстремального и фазового методов регулирования индуктивности ДГР. Указанные методы помимо простоты реализации имеют еще два положительных качества с точки зрения возможностей построения устройства автоматики на основе данных параметров, а именно:

- непрерывность – возможность получать результат измерения амплитуды и фазы сигнала с частотой дискретизации, что позволяет устройству автоматики осуществлять практически непрерывное слежение за изменением параметров сети – повышает чувствительность устройства;

- пассивность – для получения сигнала об изменении параметров сети достаточно наблюдения (осциллографирования) без каких-либо возмущений в сети, что позволяет устройству быть незамеченным для других возможных устройств, отслеживающих состояние сети.

Представленный во второй главе способ измерения параметров контура является воздействующим на КНП сети. Поэтому применение исключительно предлагаемого способа хоть и возможно, но является нецелесообразным по следующим соображениям. Частое воздействие на сеть приведет к возникновению не свойственных для нее частот – частот воздействия и частот переходных процессов, вызванных воздействием. Данный факт не является критичным, но он, все же, не желателен. Вторым недостатком частого наложения является повышенная мощность источника, что потребует усложнения структуры и увеличения стоимости устройства.

В данных условиях оптимальным решением является совмещение активного метода наложения с пассивными методами слежения. Для слежения за текущим состоянием КНП сети в режиме реального времени используется непрерывное измерение и анализ на предмет изменения амплитуды и/или фазы контрольного сигнала, в качестве которого используется напряжение  $3U_0$  сети либо напряжение сигнальной обмотки ДГР. Это позволяет выявить изменения конфигурации сети, после которых необходимо выполнить повторную настройку контура на резонанс. После фиксации изменения параметров контрольного сигнала за заданные пределы активизируется предлагаемый способ оценки параметров сети, проверяется расстройка контура.

Таким образом, непрерывное слежение за возможным изменением параметров КНП сети осуществляется за счет измерения параметров нестабильного вектора напряжения несимметрии, чем достигается высокая чувствительность устройства автоматики. А предлагаемый метод оценки частоты свободных колебаний КНП сети, принципиально не зависящий от нестабильного контрольного сигнала, обуславливает отсутствие ложных поисковых включений привода реактора и высокую точность настройки в широком диапазоне изменения параметров регулируемого контура. Подобное благоприятное сочетание характеристик устройства автоматической настройки невозможно получить известными способами.

Нормативные документы [74, 90] предписывают выполнять периодические замеры емкостного тока сети обслуживающим персоналом. Выполнение этого требования может быть осуществлено при помощи предлагаемого метода оценки параметров КНП сети следующим образом.

При известном значении расстройки компенсации  $\vartheta$  емкостный ток сети может быть вычислен по формуле

$$\vartheta = \left(1 - \frac{I_L}{I_C}\right) \cdot 100\%. \quad (3.2)$$

Для реализации алгоритма измерения емкостного тока на основе формулы (3.2) необходимо измерить величину расстройки сети при известном значении индуктивного тока ДГР. В случае применения ДГР плунжерного типа

индуктивный ток известен лишь в крайних конечных положениях. В связи с этим устройство автоматики для измерения емкостного тока перед измерением параметров сети должно перестроить плунжерный ДГР в крайнее положение, а по завершении замера выполнить резонансную настройку. В случае же применения ДГР ступенчатого или конденсаторного типа управления перестройка ДГР не требуется, поскольку индуктивный ток для каждой ступени ступенчатых реакторов известен, а для конденсаторных реакторов вычисляем для любой комбинации включения конденсаторов.

### 3.2 Алгоритм параллельной работы устройств автоматики

Одним из штатных режимов работы электрической сети является режим параллельной работы нескольких секций. Включение секционного выключателя приводит к возникновению общей гальванически связанной сети с двумя и более дугогасящими реакторами. В связи с этим, выполнение измерения параметров КНП общей сети и последующей настройки управляемых ДГР, требует согласования (разнесения) по времени работы устройств автоматики работающих в параллельном режиме секций.

Существенным недостатком алгоритмов, основанных на наложении сигналов не промышленной частоты, являются сложности измерения параметров, возникающие при параллельном включении ДГР [73].

Предлагаемый метод оценки параметров сети работоспособен и при параллельном включении ДГР. Однако при объединении секций возникает задача согласования работы нескольких устройств автоматики. Нужно это в первую очередь для того, чтобы не возникало взаимных помех при одновременном наложении измерительного импульса на КНП сети. Для исключения одновременной работы нескольких устройств в общей сети все устройства автоматики в пределах одной ПС подключены к общей линии связи с целью передачи информации для согласования очередности работы (работа в режиме «ведущий – ведомый»). Алгоритм решения задачи автоматического

согласованного управления режимом компенсации при объединении секций шин представлен ниже.

Для решения поставленной задачи требуется возможность обмена цифровой информацией между устройствами автоматики. Устройства, объединенные в общую информационную сеть, имеют клиент-серверную архитектуру. Под сервером и клиентом в данном контексте понимаются программные части устройства автоматики (либо само устройство), при этом в сети одно из устройств выполняет как функции сервера, так и клиента, а все остальные устройства выполняют только функции клиента. Каждый клиент при этом обладает своим уникальным сетевым адресом.

Сервер и клиент функционируют следующим образом. Сервер, выполняя непрерывный опрос всех клиентов, получает их текущее состояние и режим работы клиента (работает ли клиент параллельно и с каким клиентом). На основе собранной от клиентов информации о текущем состоянии сервер формирует команду нового состояния и режим его работы для каждого клиента. Задача клиента – формировать ответы на запросы сервера и обрабатывать полученные от сервера команды. Инициатором информационного обмена всегда является сервер. Формат запроса сервера и ответа клиента представлен на рисунке 3.2.

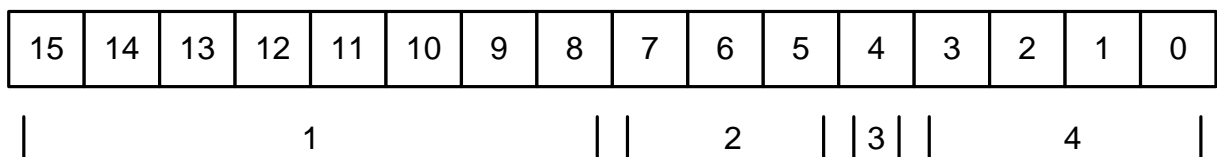


Рисунок 3.2 – Формат запроса сервера и ответа клиента

Поля запроса сервера имеют следующее назначение:

- поле 1 занимает 8 старших бит. Каждый установленный бит этого поля свидетельствует о наличии связи между клиентом с номером установленного бита (15-й бит соответствует клиенту 1, 14-й – клиенту 2 и т.д.) и клиентом, которому предназначался запрос;

- поле 2 занимает три бита – 7, 6-й и 5-й. В этом поле передается номер клиента, которому предназначается запрос, например, коду 000 соответствует клиент 1, коду 111 – клиент 8.

– поле 3 занимает один (4-й) бит и обозначает направление передачи. Если бит равен 1, то запрос идет от сервера к клиенту, иначе – от клиента к серверу. В данном случае этот бит всегда равен 1, так как это запрос от сервера;

– поле 4 занимает 4 младших бита, при помощи которых закодирована команда сервера, посылаемая клиенту. Возможны следующие коды команд. Код 0000 означает, что клиенту разрешена работа, клиент может самостоятельно производить измерения параметров электрической сети и выполнять настройку ДГР. Код 0001 блокирует работу клиента, ему нельзя выполнять измерение расстройки и регулировку ДГР (переводит клиента в режим ведомого). Данная команда передается, когда ведущим является другое устройство из текущей группы клиентов. При этом клиенту также запрещена индикация ошибок, которые имеются в данный момент. Код 0010 блокирует работу клиента и разрешает показать ошибки, если они имеются. Данная команда поступает в случае, когда все клиенты текущей группы находятся в состоянии 0011 (см. формат ответа клиента), т.е. все клиенты по какой-либо причине не могут настроить электрическую сеть на заданный режим компенсации емкостного тока.

Поля ответа клиента имеют следующее назначение:

– поле 1 занимает 8 старших бит. Каждый установленный бит этого поля соответствует состоянию дискретного входа устройства, отражающего состояние секционного выключателя (СВ). Дискретный вход информирует клиента о включении СВ, который гальванически соединяет электрическую сеть, в которой работает клиент, с электрической сетью с клиентом  $j$ . Например, установленный в единицу 11 бит означает, что включен секционный выключатель, связывающий сеть текущего клиента с сетью клиента 5. Бит, соответствующий текущему клиенту, всегда устанавливается в единицу, так как клиент всегда соединен сам с собой;

– поле 2 занимает три бита – 7, 6-й и 5-й, и содержит номер (адрес) клиента, который сформировал данный ответ;

– поле 3 занимает один (4-й) бит. Обозначает направление передачи. В данном случае этот бит всегда равен нулю, так как это ответ клиента;

– поле 4 занимает 4 младших бита, предназначенных для кодирования текущего состояния клиента. Коды состояний клиента могут иметь следующие значения. Код 0000 означает, что у клиента нет ошибок и он нормально функционирует. Код 0001 соответствует состоянию ведомого устройства. Это означает, что клиенту запрещено проводить измерения параметров сети и регулировку ДГР. Такая ситуация возможна, когда сервер прислал команду запрета работы и устройство перешло в данное состояние. Код 0010 соответствует состоянию ведомого устройства с дополнительным разрешением индикации ошибок, если они имеются. Данное состояние может быть вызвано сервером при посылке клиенту команды с кодом 0010. Код 0011 означает, что в процессе работы произошла ошибка, которая привела к невозможности дальнейшей работы. Также причиной перехода в данное состояние может быть переключение режима работы автоматики ДГР из состояния автоматического управления в состояние ручного управления.

Форматы запроса и ответа рассчитывались из допущения, что на подстанции не может быть более 8 устройств (клиентов). Увеличение числа клиентов приведет к увеличению соответствующих структур данных.

Дальнейшее понимание алгоритма взаимодействия сервера и клиентов требует пояснение термина текущей группы клиентов. На рисунке 3.3 представлен вариант схемы включения устройств (клиентов) и объединения секций.

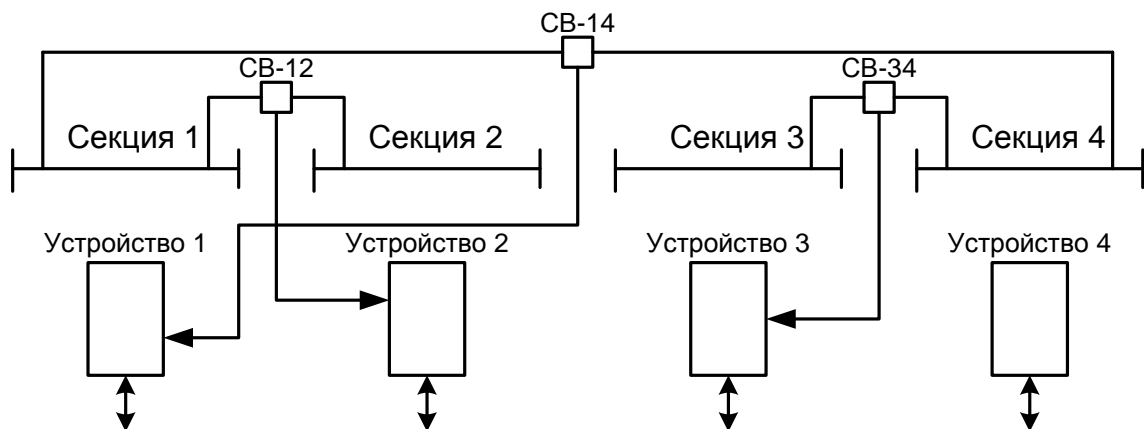


Рисунок 3.3 – Схема включения устройств

Текущая группа клиентов – некоторая группа взаимосвязанных устройств, работа которых зависит друг от друга. Секции, которыми управляют эти устройства, связаны между собой посредством СВ. В подмножестве может находиться два и более устройств.

На примере схемы включения устройств (рисунок 3.3), возможны ниже приведенные комбинации включения секционных выключателей и образующихся при этом групп клиентов. Код текущего состояния СВ включает три битовых поля: наличие 2-го бита соответствует включению СВ-12, 1-го бита – включению СВ-14, а 0-го бита – включению СВ-34.

При данной наиболее часто употребляемой схеме соединения секций подстанции возможны следующие 8 комбинаций включения всех СВ:

- 000 – все секции работают отдельно, клиенты независимы друг от друга. При этом нет ни одной группы устройств;
- 001 – секции 1 и 2 работают отдельно, секции 3 и 4 объединены. При этом устройства (клиенты) 3 и 4 образуют одну группу клиентов;
- 010 – секции 2 и 3 работают отдельно, секции 1 и 4 объединены. При этом устройства (клиенты) 1 и 4 образуют одну группу клиентов;
- 011 – секция 2 работает отдельно от секций 1, 3 и 4. Клиенты 1, 3 и 4 образуют одну группу устройств;
- 100 – секции 3 и 4 работают отдельно, секции 1 и 2 объединены. При этом устройства (клиенты) 1 и 2 образуют одну группу клиентов;
- 101 – взаимозависимые секции 1 и 2 работают независимо от взаимозависимых секций 3 и 4. Образуется две группы клиентов: группа клиентов 1 и 2, группа клиентов 3 и 4;
- 110 – секция 3 работает отдельно от секций 1, 2 и 4. Клиенты 1, 2 и 4 образуют одну группу устройств;
- 111 – все секции объединены и работают параллельно. Образуется одна группа клиентов 1, 2, 3 и 4.

Клиент-серверная архитектура подразумевает, что в сети обмена информацией имеется один сервер и несколько клиентов. При этом устройство - сервер, само по себе также является клиентом.

Работа сервера заключается в циклическом опросе всех существующих клиентов с последующим анализом полученной информации. Опрос сервера включает: генерацию слова запроса сервера, обмен сообщениями между сервером и клиентом, а также внесение полученных от него данных в соответствующие структуры для последующей обработки. Рассмотрим используемые сервером структуры данных и алгоритмы их обработки.

Сервер имеет в памяти матрицу соединений размером 8x8, с расчетом максимального числа секций на подстанции, равного 8 (рисунок 3.4).

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	×			×				
2		×						
3			×					
4				×				
5								
6								
7								
8								

Рисунок 3.4 – Матрица соединений сервера

Каждая строка и столбец матрицы соединений принадлежат соответствующей секции, например, строка и столбец с номером 4 принадлежит секции с номером 4. Перед самым первым запросом, после включения сервера, матрица является пустой.

Строка матрицы соответствует информации, полученной от клиента. Например, строка 1 матрицы говорит о том, что от секции с номером 1 получено: секция 1 соединена сама с собой (крестик в ячейке [1, 1]) и соединена с 4-й секцией (крестик в ячейке [1, 4]) (рисунок 3.4). Данная строка полностью заполняется полем 1 ответа клиента.

Столбец матрицы соответствует имеющейся информации у сервера о соединениях клиента, полученной в результате опроса всех других клиентов. Например, 4-й столбец матрицы содержит крестик в ячейке [1, 4]. Это является



информацией для клиента 4, что он образует группу с клиентом 1. Наличие крестика в ячейке [4, 4] свидетельствует о соединении клиента 4 самим с собой. Этот столбец после транспозиции один к одному копируется в поле 1 посылки запроса сервера.

Из приведенного выше примера видно, что текущее состояние всех секций подстанции можно определить, имея такую матрицу соединений. В приведенном примере была показана комбинация 010 включения СВ.

Кроме того, для хранения кодов команд сервера, направляемых клиентам и для хранения текущих их состояний на сервере, предусмотрены два массива по 8 элементов в каждом: массив команд и состояний. Массив команд после пуска сервера содержит только нули. Это означает, что работа всех терминалов в начальный момент времени разрешена. Данный массив заполняется необходимыми командами только после полного прохождения опроса состояний всех устройств сети и содержит числа 0, 1 или 2. Массив состояний заполняется в результате опроса клиентов. Каждая  $i$ -я ячейка данного массива соответствует состоянию устройства  $i$ -й секции. Это состояние заносится в соответствующую ячейку из поля 4 ответа клиента. Массив состояний может содержать числа 0, 1, 2 и 3.

Для формирования команд клиентам серверу необходимо определить все имеющиеся в данный момент группы клиентов. Это осуществляется следующим образом. Для каждой помеченной крестиком ячейки  $[i, j]$  матрицы соединений начинается просмотр текущего столбца  $j$  матрицы вниз от данной ячейки  $[i, j]$ . В случае наличия крестика в какой-либо из ячеек ниже, к примеру, в ячейке  $[k, j]$ , вся  $k$ -я строка матрицы с этой ячейкой переносится и складывается по «ИЛИ» на строку  $i$ . После сложения строка  $k$  полностью очищается. Процедура просмотра матрицы повторяется до тех пор, пока все столбцы матрицы не будут иметь по одному элементу. Так, для матрицы, приведенной на рисунке 3.4, видно, что столбец 4 содержит крестик в строке 4, поэтому эта строка складывается по «ИЛИ» со строкой 1, и результат помещается в строку 1. Другие столбцы пересечений имеют только по одному крестику. Таким образом, формируется

матрица групп клиентов. Каждая строка матрицы групп содержит номера устройств, которые работают в группе. Так, для полученной матрицы образуется одна группа с устройствами 1 и 4 и два независимых клиента с адресами 2 и 3.

Алгоритм формирования массива команд для клиентов является следующим. Для каждой непустой строки матрицы соединений выбирается помеченный элемент данной строки, удовлетворяющий условию: соответствующая ячейка массива команд и ячейка массива состояний должны содержать ноль. В случае нахождения такой ячейки устройство с номером данной ячейки и будет ведущим, а номер этого устройства запоминается. Предварительный выбор ведущего устройства осуществляется с целью исключения возможности переназначения ведущего устройства в последующих итерациях опроса клиентов. Для всех остальных помеченных элементов рассматриваемой строки матрицы соединений формируются следующие команды: для секций с состоянием 0 и 1 – команда 1, для секций с состоянием 2 и 3 – команда 2. При этом если ведущее устройство не было выбрано, то все команды для клиентов данной группы равны 2 (поле 4 посылки команды сервера содержит код 0010). Если же ведущее устройство было выбрано и группа содержит устройства, для которых команда сервера равна 2, то эту команду необходимо перезаписать командой 1, чтобы устройство не начало сигнализировать о наличии ошибки дежурному персоналу.

Работа клиента в отличие от работы сервера несколько проще. Главный цикл клиента сводится к ожиданию запроса от сервера, получению команды, ее последующей обработке и формированию ответа. Обработка команды сервера происходит в том случае, если клиент является членом группы. Данный фактор определяется путем анализа текущего состояния своих дискретных входов, отвечающих за состояния СВ и анализа поля 1 посылки сервера данному устройству. Обработка команды включает два этапа: первый – сразу после получения команды от сервера. На данном этапе для команд 1 и 2 устанавливается флаг запрета работы, по которому клиент выходит из режима настройки (если он в нем находится). Для команды 0 флаг запрета работы,

наоборот, сбрасывается. Второй этап обработки команд сервера предполагает анализ текущего состояния устройства, проверку на наличие ошибок в его работе.

Алгоритм формирования текущего кода состояния устройства следующий. Если ошибок нет и команда сервера 0 (работа разрешена), то состояние клиента 0 (работаю); если ошибок нет и команда сервера 1 (запрет) или 2 (запрет + сигнализация), то состояние 1 (под запретом); при наличии ошибки – состояние 3 (работать не могу); если есть ошибки и команда сервера 2 (запрет + сигнализация), то состояние 2.

### 3.3 Исследование способа автоматического управления компенсацией емкостного тока на макете сети

Для оценки функционирования предложенных и разработанных алгоритмов автоматического управления расстройкой компенсации, и с целью проведения отладки функционала устройства автоматики проведено исследование устройства управления на макете сети (рисунок 3.5).

Макет сети состоит из конденсатора МГБО емкостью 20 мкФ, имитирующего эквивалентную емкость сети, катушки индуктивности с изменяемой индуктивностью в диапазоне 1,0-2,7 Гн. Изменение индуктивности реализовано за счет перемещаемого электродвигателем стального сердечника.

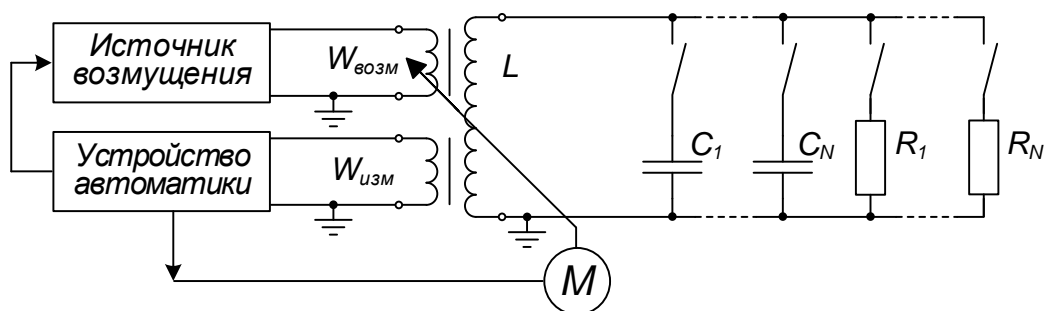


Рисунок 3.5 – Схема макета сети для проверки алгоритмов автоматической настройки

Конструкция изменения индуктивности снабжена концевыми выключателями, отключающими питание двигателя при достижении им крайних положений. Катушка индуктивности состоит из трех гальванически развязанных обмоток. Основная обмотка катушки индуктивности подключена к выводам конденсатора.

Индуктивность и емкость совместно образуют физическую модель КНП сети. Две другие обмотки используются для наложения возмущающего сигнала и осциллографирования сигнала переходного процесса. Для моделирования изменения сети, в макете предусмотрена возможность дополнительного подключения конденсаторов необходимой емкости и резисторов. Устройство автоматки осуществляет измерение параметров контура через дополнительные обмотки катушки индуктивности, и в зависимости от измеренного значения расстройки включает соответствующее реле питания двигателя в необходимом направлении вращения вала. Внешний вид макета сети приведен на рисунке 3.6.

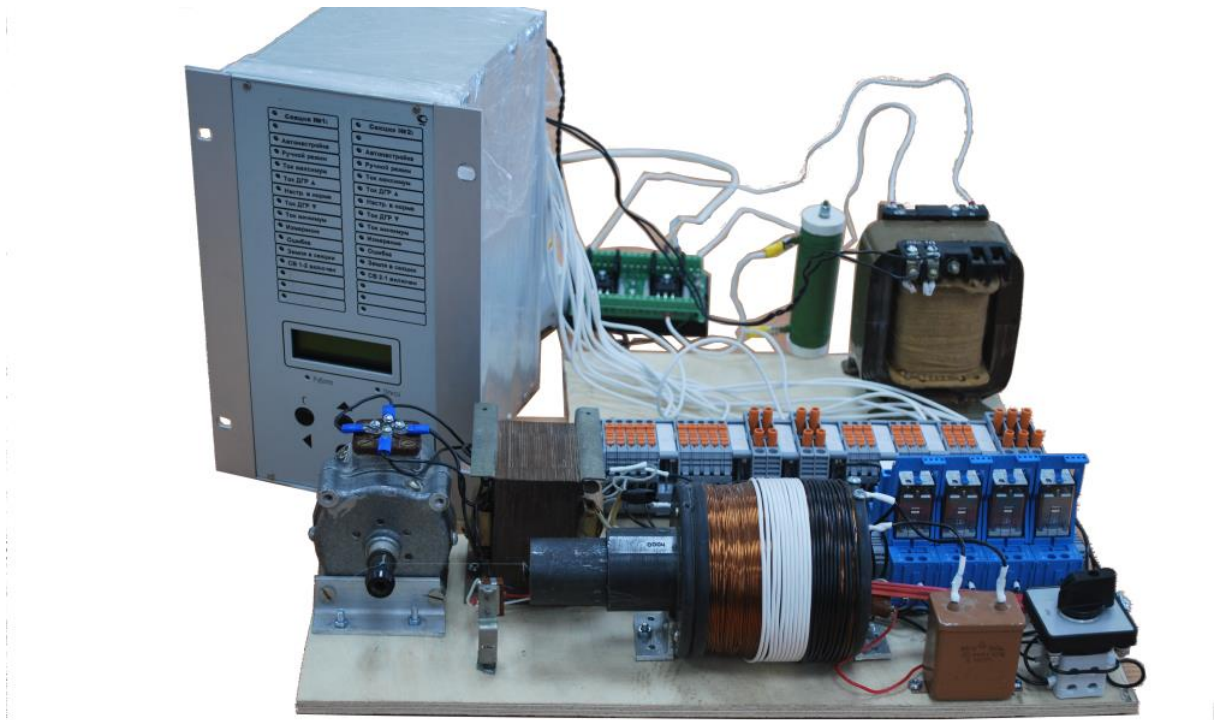


Рисунок 3.6 – Физическая модель сети с компенсацией емкостного тока

На модели сети были исследованы ситуации настройки контура в резонанс из разных начальных положений: глубокой и неглубокой перекомпенсации, глубокой и неглубокой недокомпенсации. Проверялось поведение автоматки при нахождении точки резонанса за пределом диапазона регулирования.

В качестве примера работы устройства автоматки в режиме автоматической настройки проведем анализ записей в журнал событий, создаваемый устройством (таблица 3.1). После перехода в режим автоматической

настройки, устройство выполнило измерение расстройки. Поскольку измеренное значение расстройки составило  $-114,3\%$ , что свидетельствует о перекомпенсации, устройство выдало команду на уменьшение тока компенсации.

Примерно через 17 с. после начала настройки сгенерировано событие «Настройка выполнена успешно». Во время регулировки значение расстройки плавно изменилась с начального значения  $-114,3\%$  до  $-1,06\%$  при установленном целевом значении  $-1\%$ . График изменения расстройки и соответствующее изменение напряжения  $U_0$  приведены на рисунке 3.7 и рисунке 3.8 соответственно.

Таблица 3.1 – Журнал событий, сгенерированный автоматикой

№ п/п	Время события	Расстройка $\vartheta$ , %	Добротность, $Q$	Напряжение $3U_0$ , В	Фазовый угол, °	Событие
1	15:27:12	-114,40	5,10	0,31	0,28	Расстройка -114,4%
2	15:27:12	-114,40	5,10	0,31	0,28	Автонастройка
3	15:27:13	-114,30	5,07	0,30	0,19	Измерение: $t=1200, v=0,0$ %/с
4	15:27:13	-114,30	5,07	0,30	0,19	Уменьшение тока компенсации
5	15:27:13	-114,20	5,04	0,30	0,20	Измерение: $t=1800, v=0,0$ %/с
6	15:27:14	-112,82	5,08	0,27	-5,07	Измерение: $t=2399, v=2,77$ %/с
7	15:27:14	-109,72	5,04	0,28	-5,45	Измерение: $t=2999, v=6,20$ %/с
8	15:27:15	-107,04	4,99	0,29	-6,00	Измерение: $t=3599, v=5,35$ %/с
9	15:27:15	-103,75	4,98	0,30	-6,41	Измерение: $t=4199, v=6,56$ %/с
10	15:27:16	-100,12	4,93	0,32	-7,16	Измерение: $t=4799, v=7,26$ %/с
11	15:27:16	-96,03	4,91	0,34	-8,03	Измерение: $t=5399, v=8,17$ %/с
12	15:27:17	-91,69	4,89	0,36	-8,39	Измерение: $t=5999, v=8,69$ %/с
13	15:27:17	-87,05	4,80	0,38	-9,77	Измерение: $t=6599, v=9,26$ %/с
14	15:27:18	-82,10	4,74	0,40	-10,51	Измерение: $t=7198, v=9,92$ %/с
15	15:27:18	-77,05	4,78	0,43	-11,90	Измерение: $t=7798, v=10,09$ %/с
16	15:27:19	-71,80	4,73	0,46	-13,19	Измерение: $t=8398, v=10,49$ %/с

17	15:27:19	-66,69	4,64	0,49	-14,41	Измерение: $t=8998, v=10,21 \text{ %/с}$
18	15:27:20	-61,77	4,64	0,52	-16,24	Измерение: $t=9598, v=9,84 \text{ %/с}$
19	15:27:20	-56,94	4,59	0,55	-17,89	Измерение: $t=10198, v=9,67 \text{ %/с}$
20	15:27:21	-51,84	4,57	0,59	-19,63	Измерение: $t=10798, v=10,19 \text{ %/с}$
21	15:27:21	-47,42	4,53	0,63	-22,13	Измерение: $t=11398, v=8,84 \text{ %/с}$
22	15:27:22	-42,58	4,50	0,67	-24,77	Измерение: $t=11997, v=9,69 \text{ %/с}$
23	15:27:22	-38,18	4,43	0,71	-27,58	Измерение: $t=12597, v=8,80 \text{ %/с}$
24	15:27:23	-33,42	4,38	0,76	-31,32	Измерение: $t=13197, v=9,50 \text{ %/с}$
25	15:27:23	-28,95	4,39	0,81	-34,94	Измерение: $t=13797, v=8,93 \text{ %/с}$
26	15:27:24	-24,67	4,32	0,87	-39,97	Измерение: $t=14397, v=8,93 \text{ %/с}$
27	15:27:24	-20,29	4,28	0,91	-45,27	Измерение: $t=14997, v=8,55 \text{ %/с}$
28	15:27:25	-16,01	4,24	0,97	-51,53	Измерение: $t=15597, v=8,76 \text{ %/с}$
29	15:27:25	-12,16	4,23	1,00	-58,22	Измерение: $t=16197, v=8,56 \text{ %/с}$
30	15:27:26	-8,22	4,19	1,02	-71,19	До остановки 0,41 с, $v=7,89 \text{ %/с}$
31	15:27:29	-1,10	4,23	1,07	-75,00	Измерение: $t=20299, v=0 \text{ %/с}$
32	15:27:31	-1,06	4,21	1,07	-74,48	Измерение: $t=23299, v=0 \text{ %/с}$
33	15:27:32	-1,06	4,21	1,08	-74,88	Настройка выполнена успешно

Как видно на графиках, расстройка изменяется, практически, линейно, а напряжение во время настройки непрерывно увеличивается, что свидетельствует о приближении к точке резонанса. На графиках изменения расстройки процессов перерегулирования не наблюдается, что свидетельствует об устойчивости модели системы. При сопоставлении полученных при настройке зависимостей с полными регулировочными характеристиками, полученных для макета сети и представленных на рисунке 3.9 и рисунке 3.10, видно, что зависимости являются

частью полных характеристик, а максимальное значение напряжения, полученного при настройке и равного 1,1 В, соответствует максимальному значению напряжения на полной характеристике, что свидетельствует о корректности выполненной настройки на резонанс.

По результатам исследования можно сделать заключение о том, что предлагаемый способ автоматической настройки может быть применим на практике.

Дополнительно выявлена возможность возникновения эффекта перерегулирования, который может наблюдаться в следующих случаях:

- при увеличении скорости изменения индуктивного тока;
- увеличении времени измерения расстройки;
- уменьшении зоны нечувствительности.

Взаимное соотношение значения скорости изменения расстройки, длительности измерения расстройки и ширины зоны нечувствительности, при которых наблюдается перерегулирование, требуется оценить аналитически.

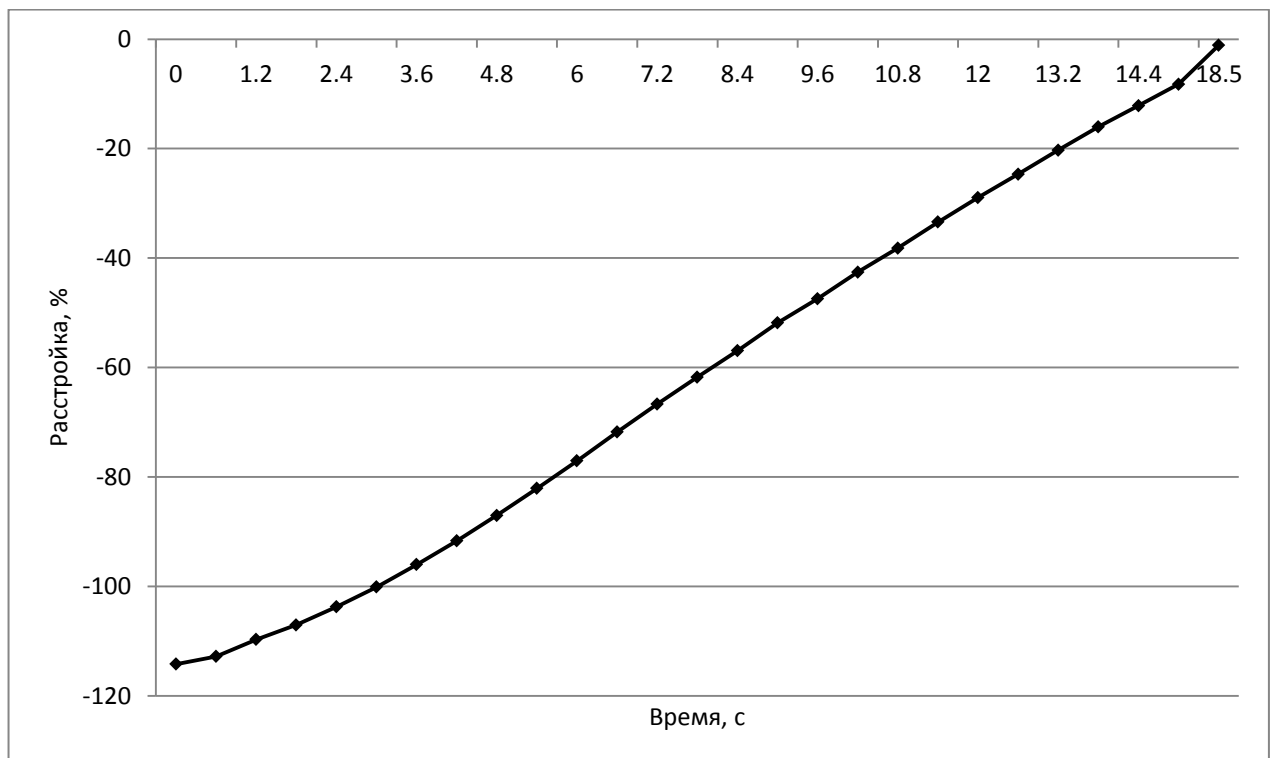


Рисунок 3.7 – Зависимость расстройки от времени движения при настройке

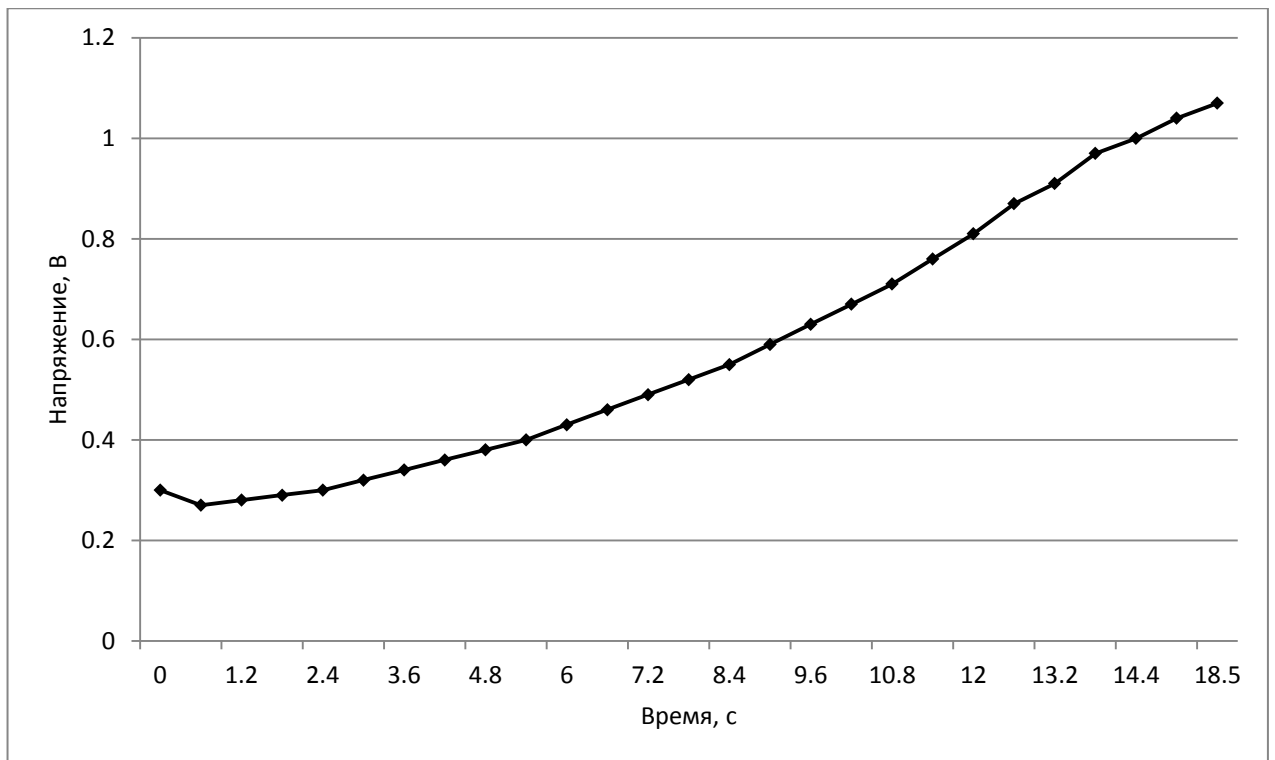


Рисунок 3.8 – Зависимость напряжения от времени настройки при настройке

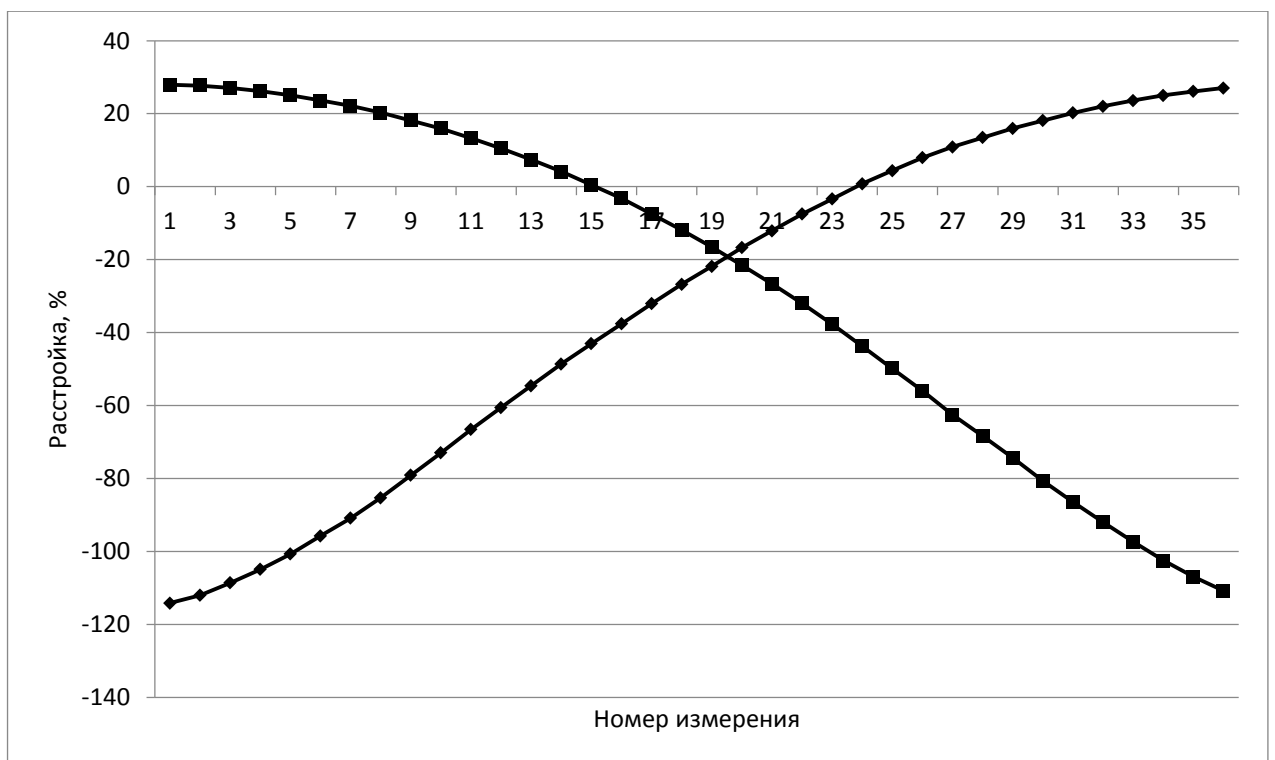


Рисунок 3.9 – Полные зависимости изменения расстройки полученные при перемещении плунжера от максимального тока к минимальному и наоборот



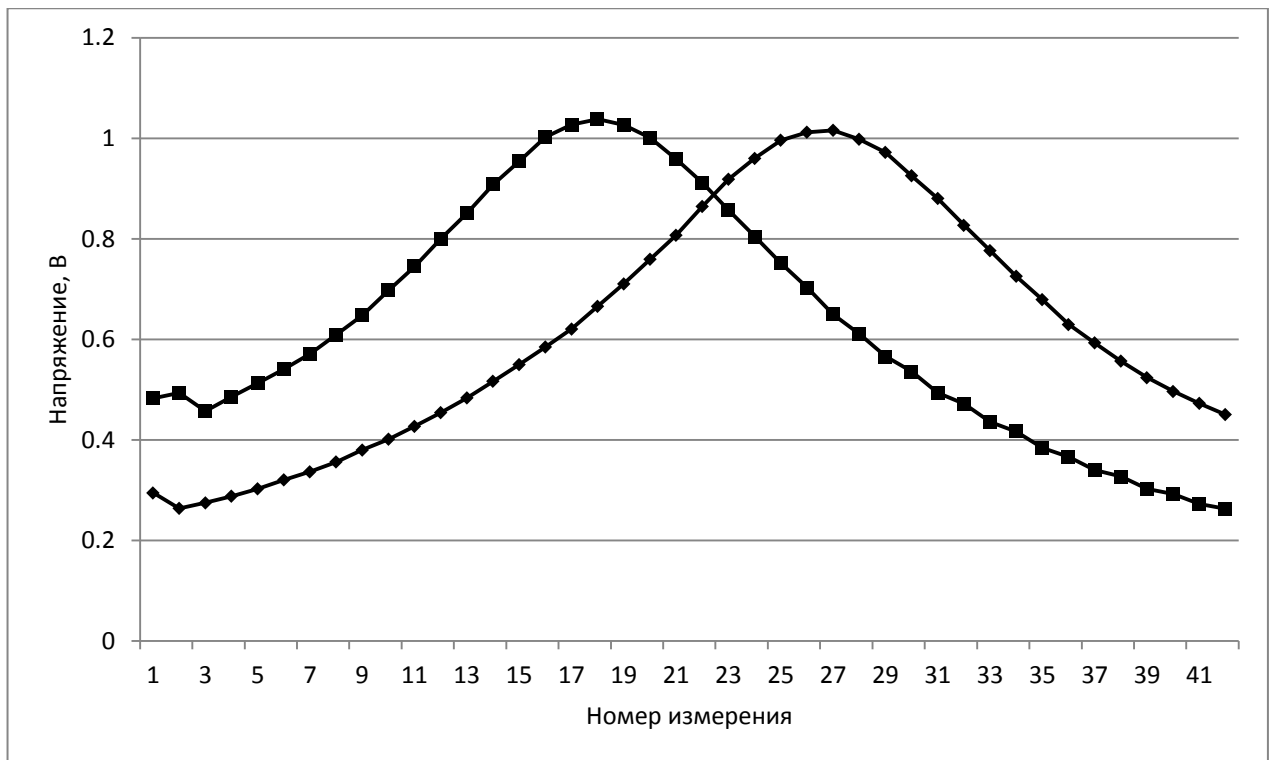


Рисунок 3.10 – Полные зависимости изменения напряжения полученные при перемещении плунжера от максимального тока к минимальному и наоборот

### 3.4 Определение устойчивости усовершенствованного алгоритма автоматического управления

Оценка устойчивости алгоритма автоматической настройки осуществлялась в соответствии со схемой (рисунок 3.11).

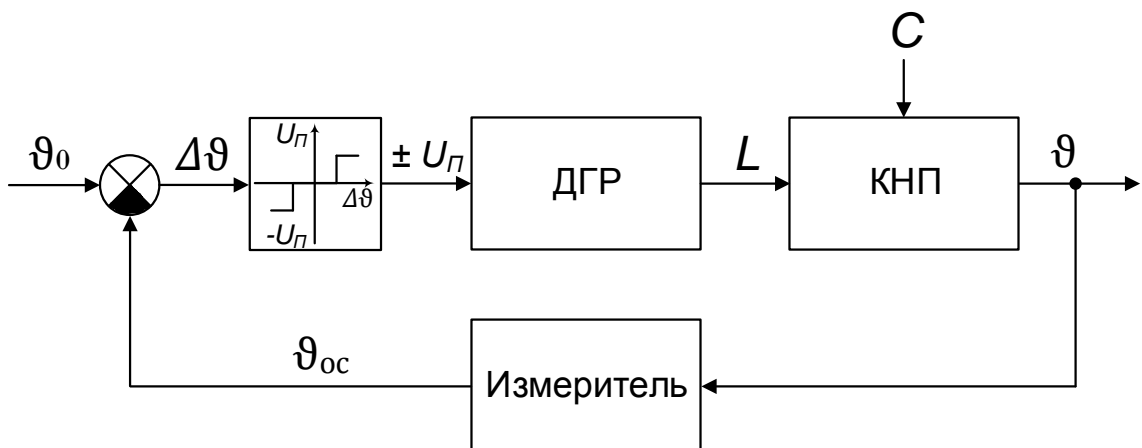


Рисунок 3.11 – Функциональная схема системы автоматической настройки КНП сети

Целевое значение расстройки  $\vartheta_0$  совместно с текущей измеренной расстройкой  $\vartheta_{ос}$  поступают на элемент сравнения, на выходе которого формируется отклонение  $\Delta\vartheta$ . При превышении отклонением ширины зоны

нечувствительности трехпозиционного реле, последнее выдает сигнал на изменение индуктивности ДГР. Блок ДГР преобразует поступающий на него сигнал  $\pm U_{\text{п}}$  в соответствующее изменение индуктивности  $L$ . Блок ДГР состоит из апериодического звена первого порядка, параметры которого учитывают механические процессы в ДГР и функционального блока, преобразующего текущее положение сердечника в индуктивность реактора  $L$ . Блок КНП сети представлен в виде функционального блока, выходным значением которого является расстройка  $\vartheta$  определяемая значением входных  $L$  и  $C$  по формуле (1.8). Полученное на выходе системы значение расстройки измеряется блоком измерителя, особенностью которого является наличие встроенного дискретизатора, чем моделируется длительность измерительного процесса.

Исследование устойчивости алгоритма автоматической настройки выполнено в пакете Simulink среды MatLab, для чего функциональная схема была представлена в виде структурной схемы системы автоматической настройки (рисунок 3.12).

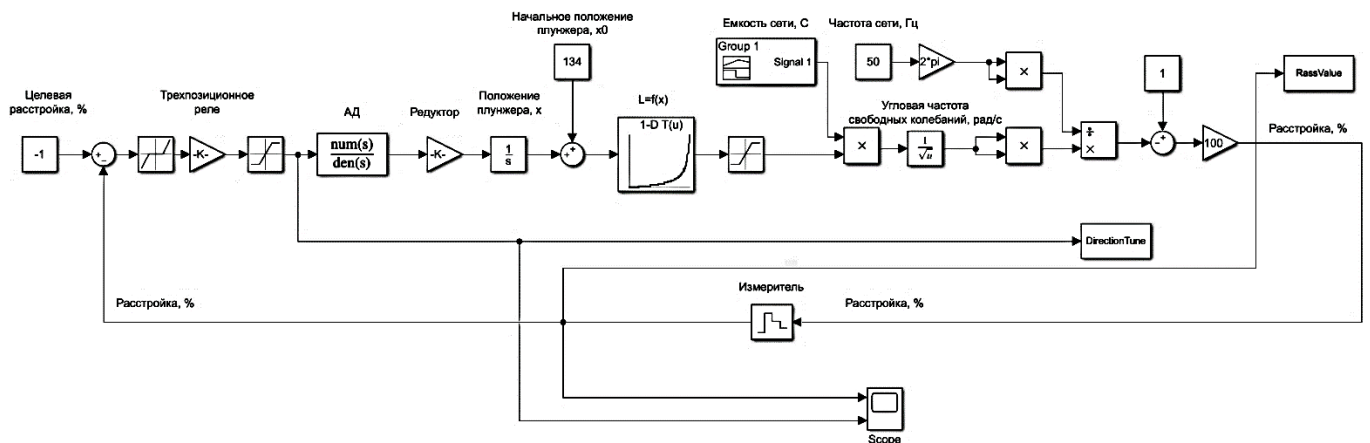


Рисунок 3.12 – Структурная схема системы автоматической настройки в среде MatLab

В результате проведенного анализа сделаны следующие выводы:

- устойчивость системы определяется соотношением трех параметров: частоты измерений расстройки, ширины зоны нечувствительности трехпозиционного реле и скорости изменения индуктивности ДГР. Поскольку ширина зоны нечувствительности (точность настройки) определяется требованием нормативных документов, скорость изменения индуктивности

зависит от конструктивных особенностей самого ДГР, то единственным, доступным для изменения параметром остается частота измерений расстройки компенсации, которая для повышения точности настройки должна стремиться к максимуму. Переходные процессы для случая устойчивой и неустойчивой системы приведены на рисунке 3.13 и рисунке 3.14, соответственно. В случае необходимости для уменьшения скорости изменения индуктивности возможно применение в схеме управления двигателем ДГР частотного привода;

- в системе присутствует статическая ошибка, обусловленная зоной нечувствительности нелинейного блока типа «трехпозиционное реле»;

- время регулирования определяется скоростью изменения индуктивности – т.е. динамическими свойствами самого ДГР, и прямо пропорционально изменению емкости сети.

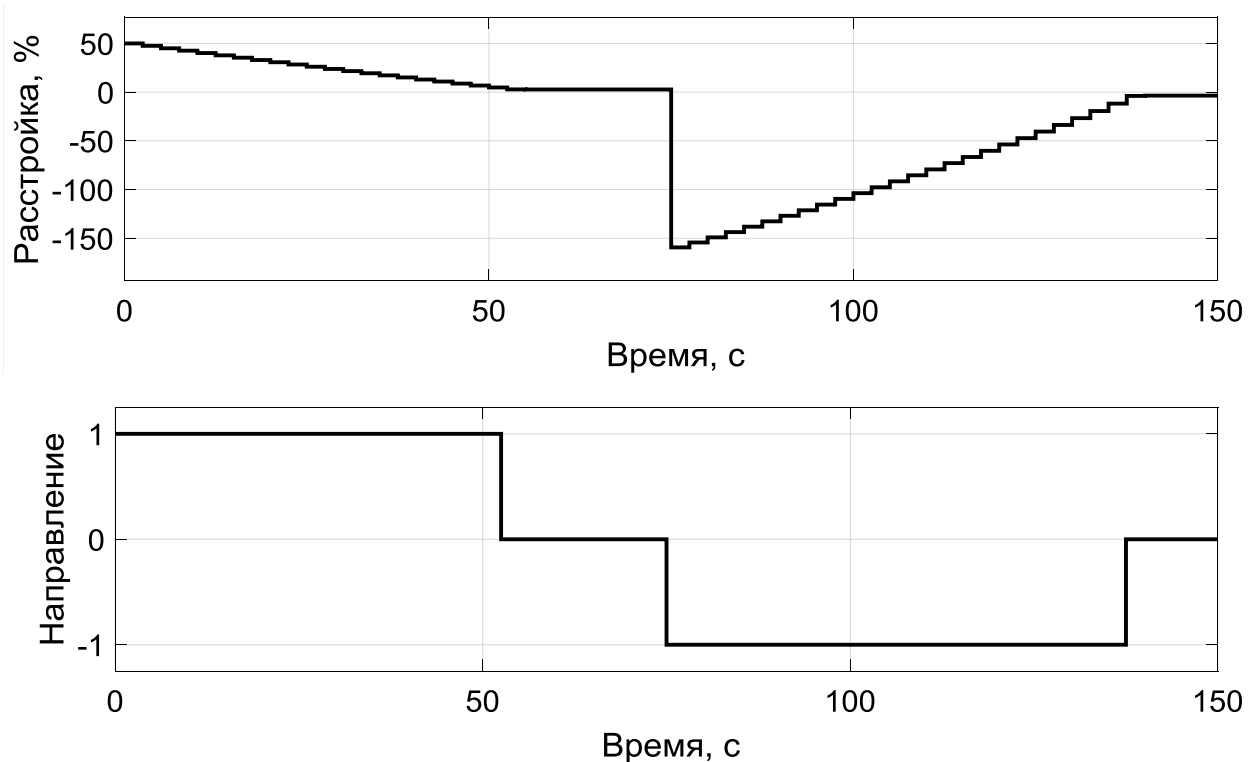


Рисунок 3.13 – Диаграммы переходных процессов при изменении емкости сети для устойчивой системы управления ДГР

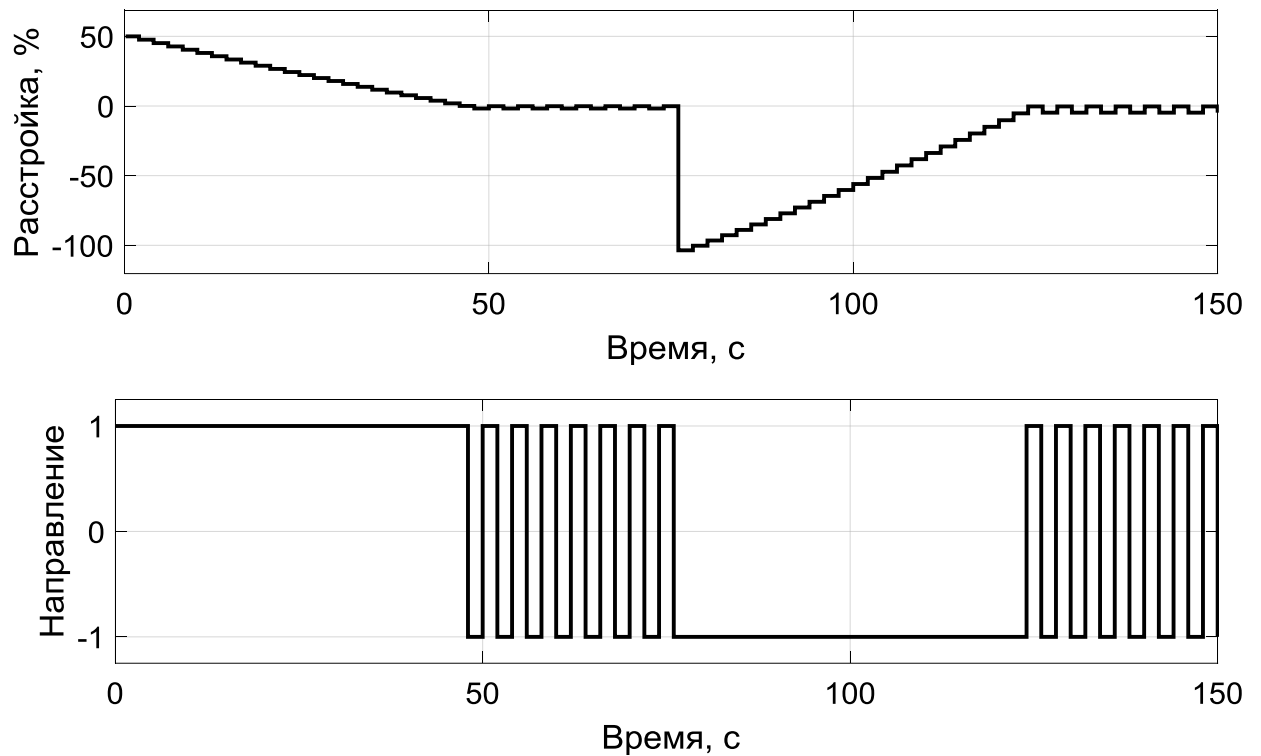


Рисунок 3.14 – Диаграммы переходных процессов при изменении емкости сети для не устойчивой системы управления ДГР

Устойчивость системы, зависящую от времени между измерениями расстройки  $\Delta t_{\text{изм}}$ , ширины зоны нечувствительности  $\Delta\vartheta$  и скорости изменения расстройки КНП сети  $v_{\text{изм}}$ , в случае пренебрежения инерционными свойствами системы может быть определена из выражения:

$$\Delta t_{\text{изм}} < \frac{\Delta\vartheta}{v_{\text{изм}}}. \quad (3.3)$$

При выполнении условия (3.3), система будет устойчивой. Зависимость минимального времени между измерениями от значения ширины зоны нечувствительности  $\Delta\vartheta$  и скорости изменения расстройки КНП сети  $v_{\text{изм}}$  приведена на рисунке 3.15.

Значение интервала между измерениями расстройки для получения устойчивой системы должно стремиться к минимуму (рисунок 3.15). Например, при интервале между измерениями порядка 0,6 с и скорости изменения расстройки 9%/с, ширина зоны нечувствительности  $\Delta\vartheta$  для устойчивости системы не может быть менее 5,4%.

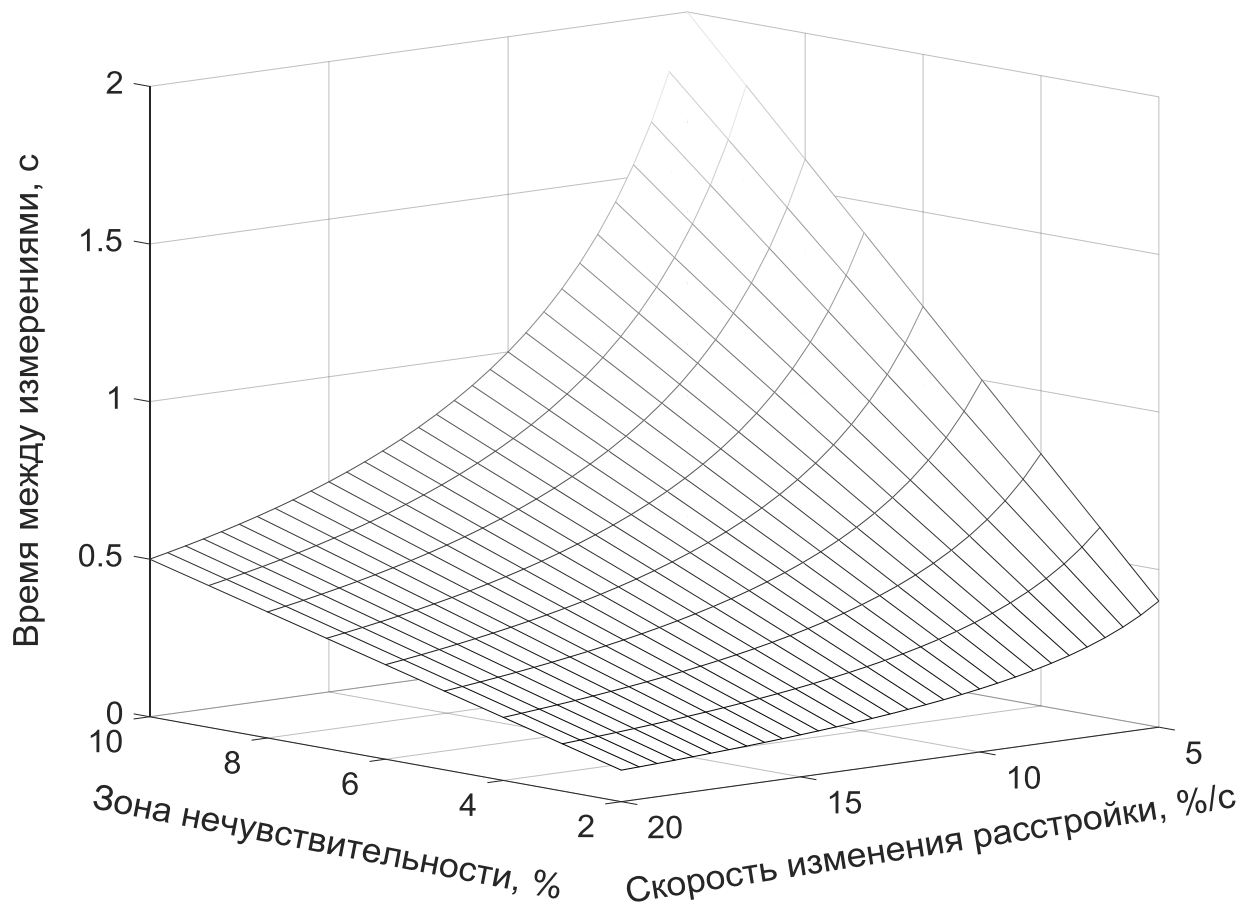


Рисунок 3.15 – Зависимость времени между измерениями от зоны нечувствительности и скорости изменения расстройки

Необходимо отметить, что оценка устойчивости выполнена для алгоритма настройки, не учитывающего скорость изменения расстройки и, соответственно не прогнозирующего время, оставшееся до отключения двигателя. Учет скорости и времени, оставшегося до отключения привода, позволяет увеличить устойчивость системы и точность настройки.

В случае использования реакторов с мелкоступенчатым конденсаторным регулированием оценка устойчивости системы не требуется. Это объясняется конструкцией реактора, предполагающей множество устойчивых состояний, и устройством автоматики, включающим оптимальную комбинацию конденсаторов. Расстройка компенсации, при использовании реакторов с конденсаторным регулированием, является максимально приближенной к целевому значению.

## Выводы

1. Разработан и исследован алгоритм автоматической настройки контура нулевой последовательности сети на заданный режим компенсации емкостного тока, основанный на оценке текущего значения расстройки контура, полученного из сигнала свободной составляющей. Алгоритм не подвержен влиянию различного рода помех и наводок в областях расстроек, далеких от точки резонанса.

2. Разработаны алгоритмы измерения емкостного тока сети на основе оценки текущей расстройки контура и паспортного значения тока ДГР. Алгоритмы позволяют безопасно выполнять измерения текущего значения емкостного тока сети без проведения сложных опытов искусственного однофазного замыкания на землю.

3. Разработан алгоритм согласования работы в режиме ведущий – ведомый для нескольких устройств в случае объединения секций шин. Алгоритм позволяет выполнять согласованное управление несколькими ДГР. При возможности определения степени загрузки ДГР по мощности (наличие у плунжерных ДГР потенциометров либо управления конденсаторными ДГР) возможна реализация их оптимальной загрузки.

4. Экспериментальная оценка предлагаемого метода настройки показала возможность его реализации и высокую точность настройки. Выявлено, что при некотором сочетании скорости регулирования, ширины зоны нечувствительности и интервала измерения параметров контура для плунжерных ДГР возможно возникновение эффекта перерегулирования.

5. В результате анализа структурной схемы системы автоматической настройки установлено, что для повышения точности настройки частоту измерений расстройки во время движения привода надо увеличивать. Получено условие, при выполнении которого система автоматической настройки будет устойчивой.

## Глава 4 Экспериментальные исследования устройства автоматического управления компенсацией емкостного тока

### 4.1 Структура аппаратного и программного обеспечения устройства автоматики

Основные научные положения изложенных в работе способов оценки параметров сети и алгоритмов автоматической настройки ДГР реализованы в устройстве автоматического управления ДГР типа «Бреслер-0107.060», выпускаемого серийно в составе панелей и шкафов ООО «НПП Бреслер» (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Устройство автоматического управления ДГР Бреслер-0107.060

Устройство предназначено для измерения параметров КНП сети и настройки на заданный режим компенсации ДГР плунжерного и конденсаторного типов управления. Основные функции устройства автоматической настройки ДГР:

- управление ДГР при комбинированном режиме заземления нейтрали;
- управление реакторами параллельно включенных секций шин;
- выбор оптимальной отпайки катушки реактора для ступенчатых ДГР;
- регистрация событий (ОЗЗ, процессы регулирования, состояния датчиков первичного оборудования);

- увеличение количества обслуживаемых секций (ДГР) за счет установки нескольких терминалов и объединения их в сеть.

Устройство содержит шестнадцать аналоговых входов, восемь выходных электромеханических реле, два выходных твердотельных полупроводниковых реле, сорок четыре дискретных входа. Для взаимодействия с пользователем устройство оснащено тридцатью четырьмя светодиодами, символьным дисплеем на шесть строк и четырьмя клавишами управления. Устройство также содержит цифровые порты связи, благодаря которым обеспечена поддержка различных протоколов связи с верхним уровнем автоматизированной системы управления (АСУ). Основные технические характеристики устройства приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные технические характеристики устройства Бреслер-0107.060

Параметр	Значение параметра
Номинальный переменный ток $I_{\text{ном}}$ , А	1 или 5
Номинальное фазное напряжение переменного тока $U_{\text{ном}}$ , В	$100/\sqrt{3}$
Номинальное напряжение оперативного переменного/постоянного тока $U_{\text{пит}}$ , В	110 или 220
Номинальная частота, Гц	50 или 60
Количество управляемых одним терминалом ДГР, шт	до 2
Точность измерения расстройки, %	$\pm 0,5$
Диапазон измерения расстройки, %	-400...+85

Устройство имеет ряд аппаратных особенностей, из которых можно выделить две основных: первая – наличие твердотельных полупроводниковых реле, с помощью которых производится управление источником возмущения для создания переходного процесса в контуре нулевой последовательности сети. Применение полупроводниковых реле обусловлено требованиями к длительности их срабатывания, которое в случае полупроводниковой структуры не превышает одной миллисекунды.



Вторая – наличие двух аналоговых входов для измерения напряжения естественной несимметрии (напряжения  $3U_0$ ). При этом один из входов регистрирует значение сигнала не более 10 В, второй аналоговый вход – сигнал более 10 В. Данное техническое решение обусловлено малой величиной анализируемых сигналов (порядка 1 В) в нормальном режиме работы сети, которые для повышения точности требуется получить с высоким разрешением по уровню. При этом для анализа характера протекающих процессов при ОЗЗ используется второй аналоговый вход с меньшей разрешающей способностью по уровню.

Третьей особенностью является наличие вынесенного за пределы корпуса устройства автоматики, силового тиристорного ключа для управления источником возмущения. Схема организации импульсного возмущения приведена на рисунке 4.2.

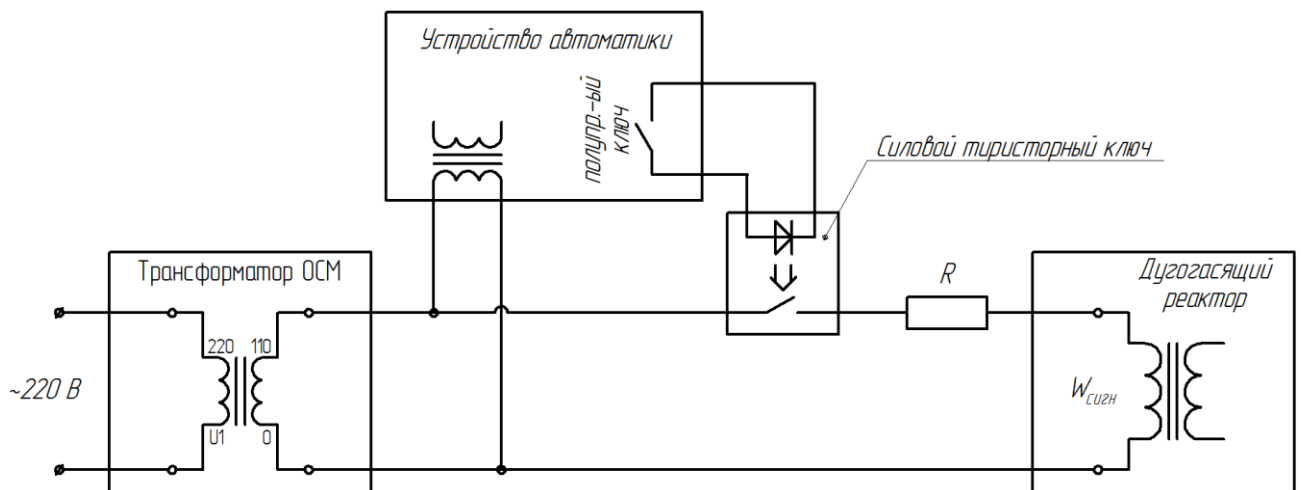


Рисунок 4.2 – Схема управления источником возмущения

Источником накладываемого на контур сигнала является трансформатор типа ОСМ1. Он обеспечивает гальваническую развязку и защищен с первичной стороны автоматическим выключателем. Устройство автоматики, контролирующее фазу вторичного напряжения трансформатора ОСМ, в необходимый момент времени замыкает контакты полупроводникового реле, таким образом включая силовой тиристорный ключ. Кратковременное импульсное воздействие накладывается на контур через вторичную сигнальную обмотку ДГР, при этом ток в цепи наложения ограничивается резистором  $R$ . При

необходимости энергия, накладываемая в контур, может быть скорректирована за счет: изменения мощности трансформатора ОСМ1; изменения номинала токоограничивающего резистора  $R$  и изменения длительности включения тиристорного ключа.

В программной части устройства реализованы алгоритмы измерения параметров сети на основе оценки частоты сигнала свободной составляющей и автоматической настройки дугогасящих реакторов на заданный режим компенсации. Устройство содержит встроенную операционную систему реального времени, в которой с заданной частотой дискретизации происходит обработка дискретных и аналоговых величин. Для расширения функционала устройства и реализации функций автоматической настройки ДГР операционная система имеет следующие основные потоки:

- главный поток измерения и настройки – реализация функций измерения и настройки ДГР в автоматическом режиме. Реализация функций измерения и настройки ДГР в форме потока операционной системы обусловлена необходимостью накапливать в оперативной памяти анализируемый сигнал в течение продолжительного временного интервала – порядка 10 периодов промышленной частоты. Накопление и последующая обработка этого сигнала в режиме реального времени является затруднительной, поэтому функционал по оценке параметров сети работает в режиме отложенного времени.

- поток обработки ошибок – обработка ошибок, проявляющихся при работе системы (вывод ошибок на экран устройства и в файл событий терминала, сброс и установка ошибок и т.п.);

- потоки файловой системы – операции с файлами осциллограмм, журналов событий и т.д.;

- поток взаимодействия с пользователем – управление устройством и получение информации о состоянии системы с помощью клавиатуры, дисплея и светодиодов;

- потоки связи – реализация связи устройства с верхним уровнем АСУ, а также с другими устройствами для организации работы ДГР в параллельном режиме;

- поток контроля отказа системы – исключение возможного отказа всех или хотя бы одного из программных блоков устройства.

Устройство снабжено встроенным регистратором аварийных событий с настраиваемыми пусковыми органами. По умолчанию пусковой орган устройства настроен на срабатывание при возникновении в сети однофазного замыкания на землю. Это сопровождается превышением напряжения  $3U_0$  свыше 30 В. На записанных при возникновении ОЗЗ осциллограммах, фиксируется состояние аналоговых, внутренних логических и дискретных входных сигналов. Полученные осциллограммы позволяют оценить значения токов ДГР при ОЗЗ, перенапряжений на неповрежденных фазах, характер однофазного замыкания на землю. Пример осциллограммы перемежающегося ОЗЗ, записанной устройством Бреслер-0107.060 во 2-й секции 10 кВ ПС «Правобережная» представлен на рисунке 4.3.

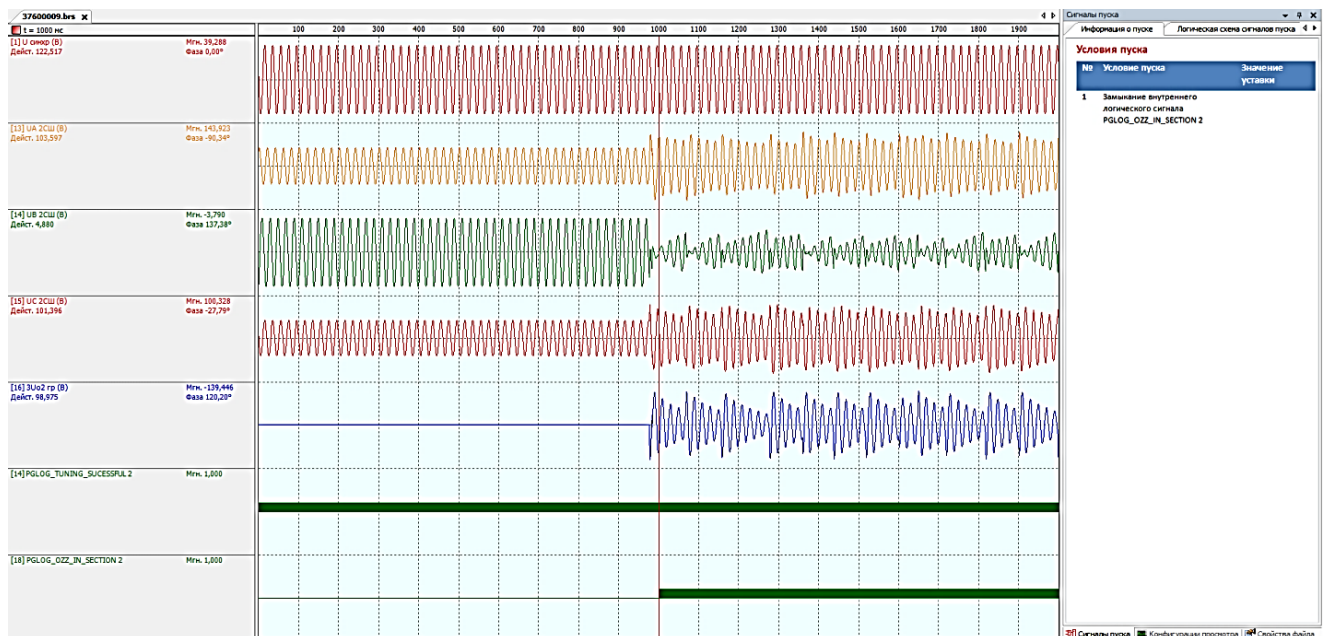


Рисунок 4.3 – Пример осциллограммы, записанной устройством Бреслер-0107.060

Условием пуска записи осциллограммы стало появление внутреннего логического сигнала «PGLOG\_OZZ\_IN\_SECTION\_2». Как видно на осциллограмме (рисунок 4.3), в момент появления данного логического сигнала

другой логический сигнал «PGLOG\_TUNING\_SUCCESSFUL\_2» был равен 1. Это свидетельствует о том, что в момент появления ОЗЗ ДГР был настроен на заданный режим компенсации.

Все процессы регулирования, возникновение аварийных и ошибочных ситуаций в процессе эксплуатации фиксируются в специальном журнале событий. Анализ данного журнала позволяет оценить степень расстройки компенсации в определенный момент времени, выявить причину возникновения ошибки и устранить ее. Фрагмент файла событий разработанного устройства автоматики ДГР приведен на рисунке 4.4.

01.03.2018	01:58:48	Секция шин 2	-1.16	17.81	0.02	126.00	Средняя расстройка -1.170540, Настройка секции в норме
01.03.2018	02:58:48	Секция шин 2	-1.16	17.81	0.03	126.62	Периодическая проверка настройки секции
01.03.2018	02:58:51	Секция шин 2	-1.16	17.64	0.02	121.67	Средняя расстройка -1.159863, Настройка секции в норме
01.03.2018	03:58:51	Секция шин 2	-1.16	17.64	0.03	124.20	Периодическая проверка настройки секции
01.03.2018	03:58:54	Секция шин 2	-1.15	17.84	0.03	119.05	Средняя расстройка -1.155166, Настройка секции в норме
01.03.2018	04:58:54	Секция шин 2	-1.15	17.84	0.02	123.41	Периодическая проверка настройки секции
01.03.2018	04:58:57	Секция шин 2	-1.15	17.52	0.03	118.67	Средняя расстройка -1.151781, Настройка секции в норме
01.03.2018	05:58:57	Секция шин 2	-1.15	17.52	0.02	124.10	Периодическая проверка настройки секции
01.03.2018	05:59:00	Секция шин 2	-1.13	17.82	0.02	122.39	Средняя расстройка -1.135065, Настройка секции в норме
01.03.2018	06:59:00	Секция шин 2	-1.13	17.82	0.02	126.51	Периодическая проверка настройки секции
01.03.2018	06:59:03	Секция шин 2	-1.12	17.74	0.02	124.82	Средняя расстройка -1.115446, Настройка секции в норме
01.03.2018	07:59:03	Секция шин 2	-1.12	17.74	0.02	128.43	Периодическая проверка настройки секции
01.03.2018	07:59:06	Секция шин 2	-1.05	17.78	0.02	127.26	Средняя расстройка -1.037461, Настройка секции в норме
01.03.2018	08:48:21	Секция шин 2	-1.05	17.78	101.37	-0.01	ОЗЗ в секции.
01.03.2018	09:12:32	Секция шин 2	-1.05	17.78	0.02	128.40	Конец ОЗЗ в секции.
01.03.2018	09:12:33	Секция шин 2	-1.03	17.50	0.02	132.03	Средняя расстройка -1.021315, Настройка секции в норме
01.03.2018	09:30:39	Присоединен внешний накопитель.					

Рисунок 4.4 – Фрагмент файла событий устройства Бреслер-0107.060

Устройство с периодичностью один раз в час осуществляет контроль значения расстройки КНП сети, на основе оценки частоты свободных колебаний (рисунок 4.4). Амплитуда и фаза напряжения  $3U_0$  не изменяются, поэтому дополнительный контроль расстройки более чем один раз в час не осуществляется. Видно, что 01.03.2018 в 08:48 произошло ОЗЗ во 2-й секции шин. Расстройка на момент возникновения ОЗЗ была равна -1,05 %, что соответствует требованиям нормативно-технической документации.

В файле событий сохраняются следующие основные параметры: дата возникновения событий, время возникновения событий; и текстовое описание события. Если событие сгенерировано в результате автоматической настройки, то в файле событий дополнительно к обозначенным сохраняются текущие значения расстройки, добротности, амплитуды и фазы напряжения  $3U_0$ . При этом файл

событий имеет текстовый формат, что позволяет просматривать его без специальных программных средств на любом персональном компьютере.

#### 4.2 Результаты опытной эксплуатации

В 2007 г. устройство автоматики ДГР Бреслер-0107.060 было впервые установлено в опытную эксплуатацию на 1-й и 2-й секции 10 кВ ПС «Западная» филиала ПАО «МРСК Волги» – «Чувашэнерго». В рамках опытной эксплуатации была исследована работа алгоритмов, внесены необходимые корректировки в программную и аппаратную части устройства. В ходе опытной эксплуатации были получены осциллограммы реальных измерительных переходных процессов для 1-й и 2-й секций (рисунок 4.5, 4.6). Указанные сигналы содержат три условных временных интервала: слева – интервал до импульсного воздействия на сеть, далее – интервал импульсного воздействия и завершающий интервал переходного процесса. Выделенные из сигналов переходных процессов реальные сигналы свободной составляющей, по форме являющиеся затухающими синусоидальными сигналами для 1-й и 2-й секций соответственно (рисунок 4.7, 4.8). Форма и характер полученных сигналов свободных составляющих подтверждает правомерность принятых при разработке решений, корректность выделения сигналов свободной составляющей из соответствующих сигналов переходного процесса и правильном выборе параметров импульсного воздействия на КНП сети.

Особенностью представленных сигналов свободной составляющей является их существенное различие по величине добротности  $Q$ . Так, в первой секции, в режиме резонансной настройки, добротность сети равна 32, а во второй секции в режиме резонансной настройки, добротность составляет около 9. Эту особенность можно заметить при визуальном сопоставлении скоростей затухания представленных сигналов свободной составляющей.

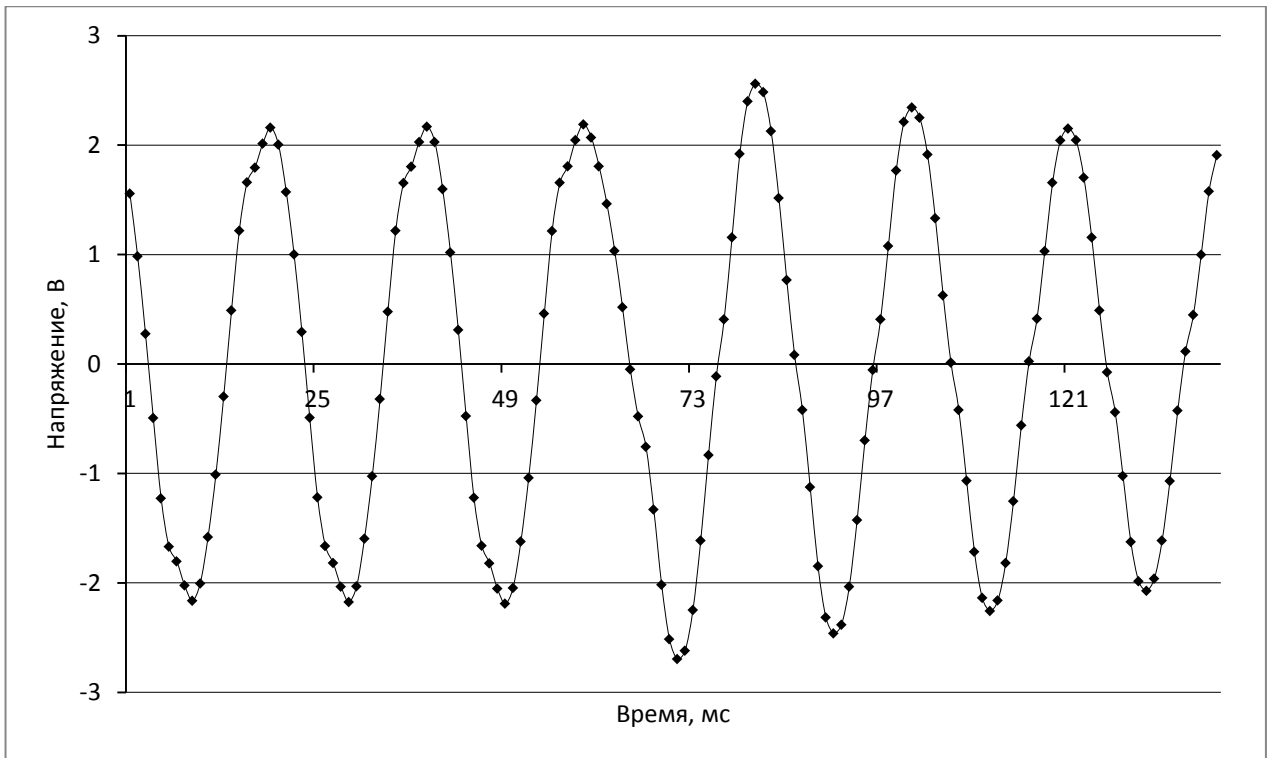


Рисунок 4.5 – Переходный процесс сигнала напряжения  $3U_0$ , в 1-й секции

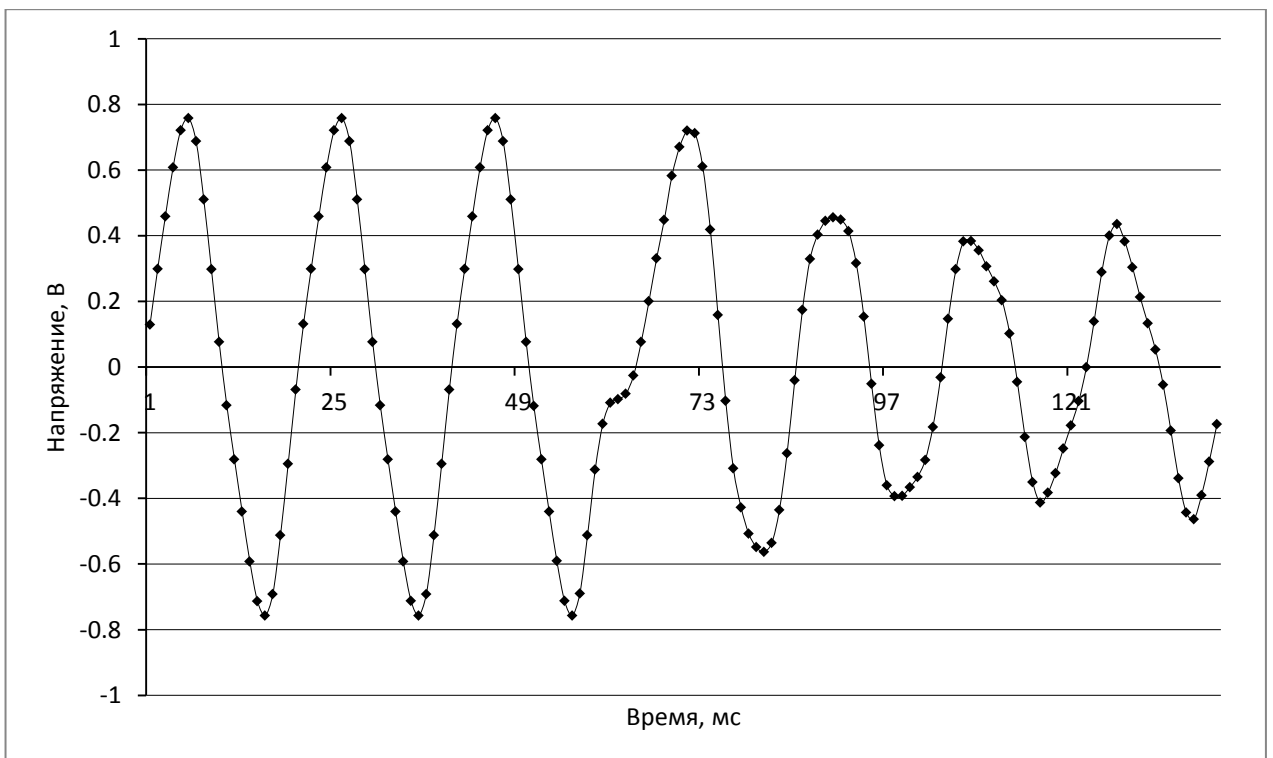


Рисунок 4.6 – Переходный процесс сигнала напряжения  $3U_0$ , во 2-й секции

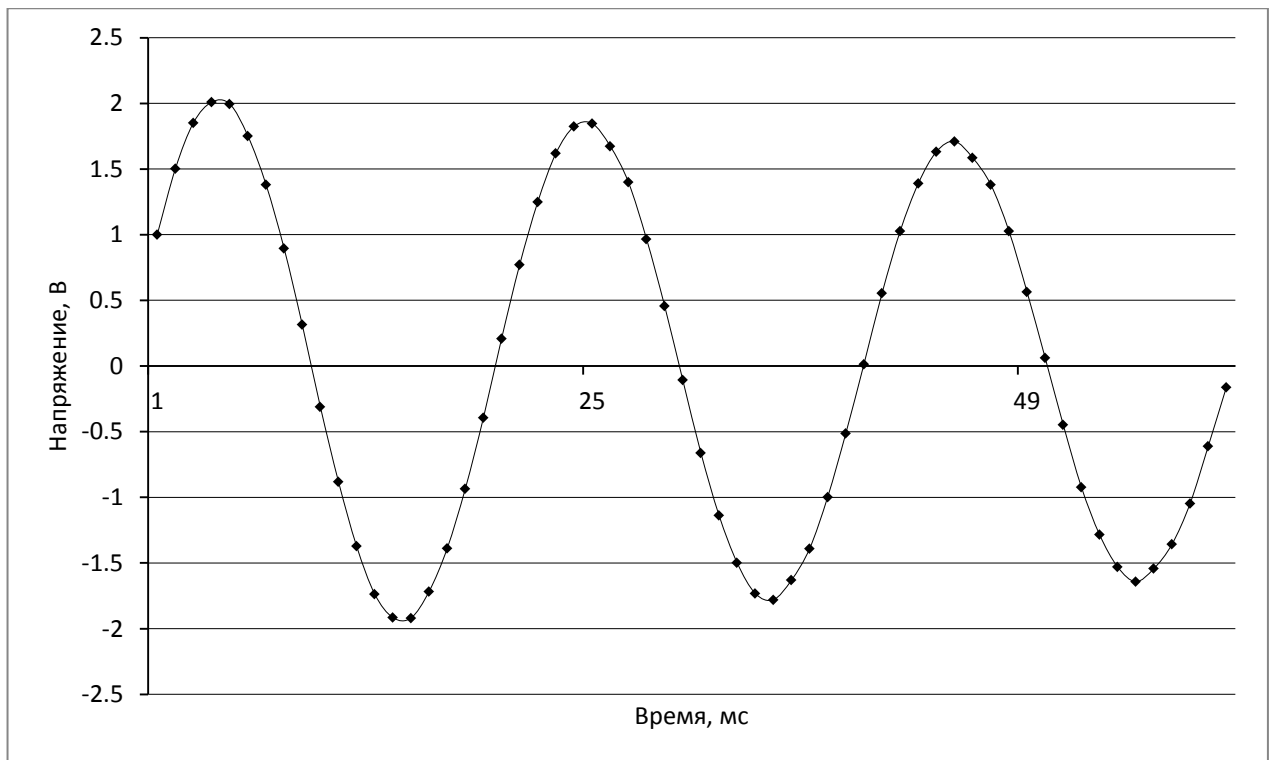


Рисунок 4.7 – Свободная составляющая, выделенная из переходного процесса в 1-й секции

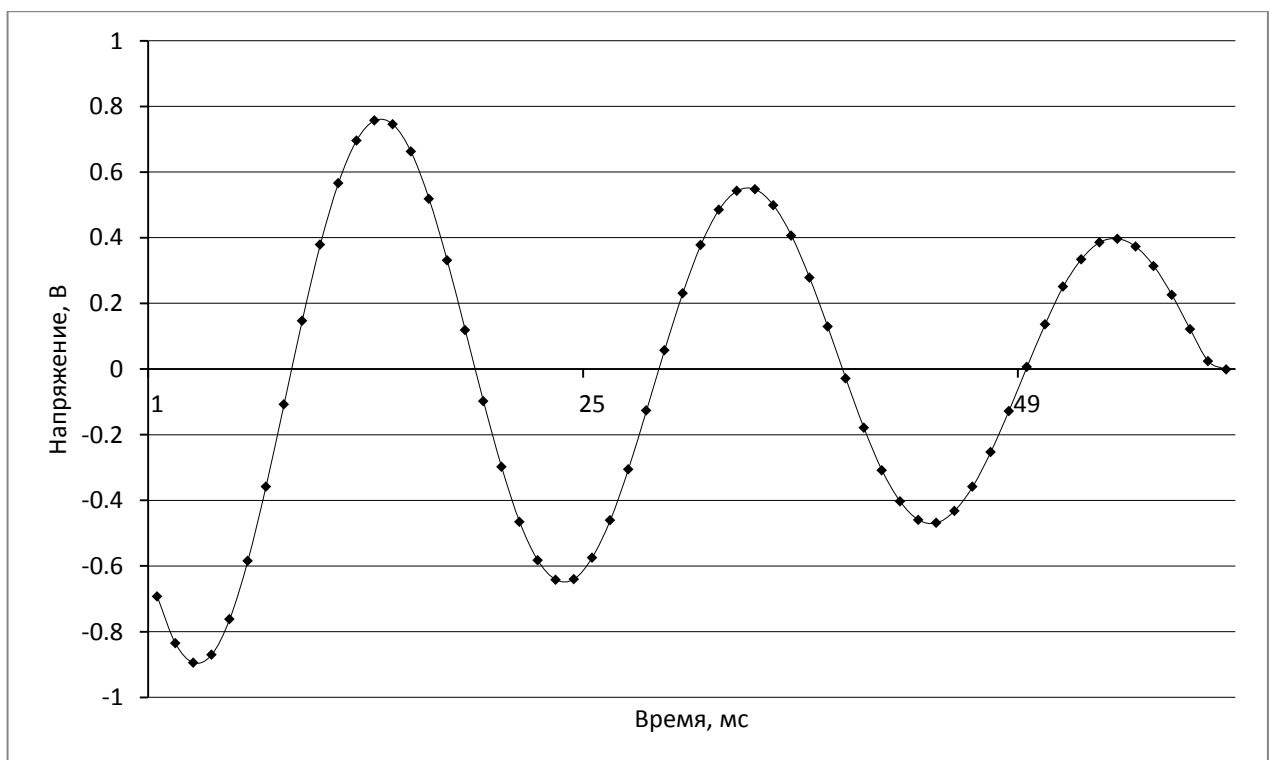


Рисунок 4.8 – Свободная составляющая, выделенная из переходного процесса во 2-й секции

Устройство автоматики ДГР при использовании совместно с управляемыми в автоматическом режиме ДГР позволяет получить регулировочные характеристики – зависимости изменения параметров сети от текущего значения

тока ДГР. Применительно к реакторам плунжерного типа, не оснащенным датчиками текущего положения, можно получить характеристики изменения параметров сети от времени регулирования (изменения зазора). Зависимости изменения расстройки сети от времени регулирования (рисунок 4.9) и напряжения  $3U_0$  от времени регулирования (рисунок 4.10) получены при изменении тока ДГР от максимального к минимальному и обратно.

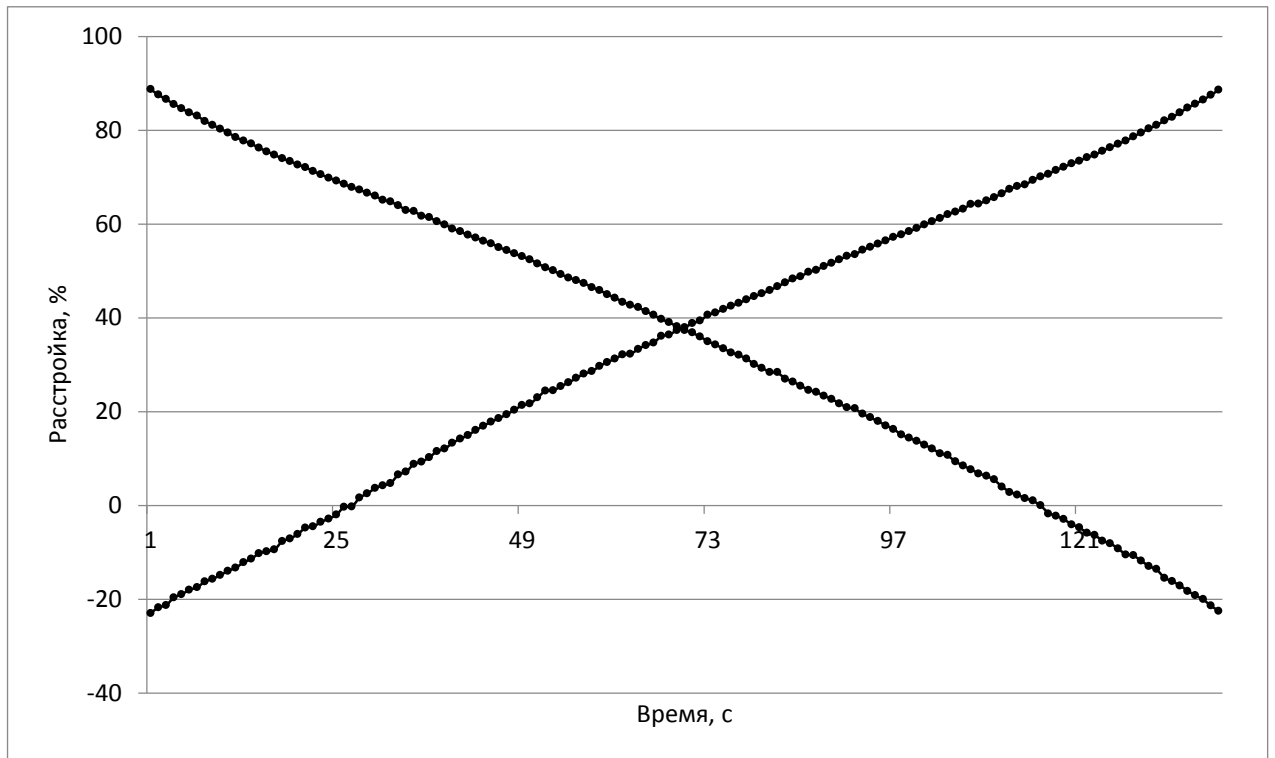


Рисунок 4.9 – Характеристика зависимости расстройки сети, от времени регулирования

Как видно из представленных характеристик, изменение расстройки осуществляется практически линейно, что позволяет с хорошей точностью измерять скорость изменения расстройки и прогнозировать необходимое время регулирования тока.

Моменты пересечения с осью абсцисс характеристик по расстройке (рисунок 4.8) и моменты достижения экстремумов на амплитудных характеристиках (рисунок 4.9) совпадают по времени, что свидетельствует о точности настройки, совпадении регулировочных критериев и правомерности принятых допущений и выводов.



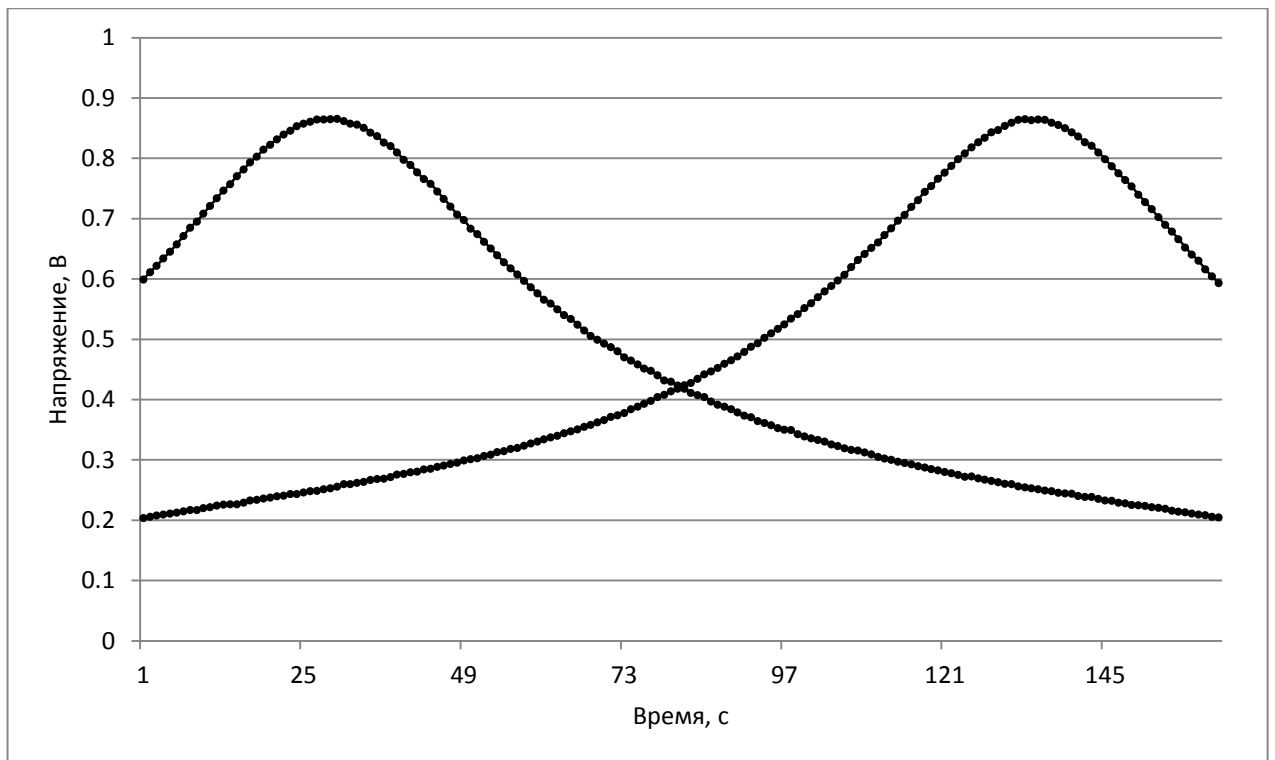


Рисунок 4.10 – Характеристика зависимости напряжения  $3U_0$  от времени регулирования

В ходе промышленной эксплуатации устройств в условиях действующих распределительных сетей были получены сведения, демонстрирующие преимущества предлагаемых способов по сравнению со способами, основанными на анализе амплитудных характеристик КНП сети. Материалы о внедрении результатов диссертационного исследования приведены в Приложении Г. Примеры зависимости изменения расстройки сети от времени регулирования приведены на рисунках 4.11, 4.12 и 4.13. Соответствующие им зависимости изменения напряжения  $3U_0$  от времени приведены на рисунках 4.14, 4.15 и 4.16.

Представленные зависимости, показывают, что при плавном изменении параметра расстройки соответствующее ему изменение напряжения является сильно зашумленным, особенно в областях, далеких от экстремума. Это свидетельствует о неработоспособности в этих сетях устройств, функционирующих на основе анализа амплитудной характеристики КНП сети.

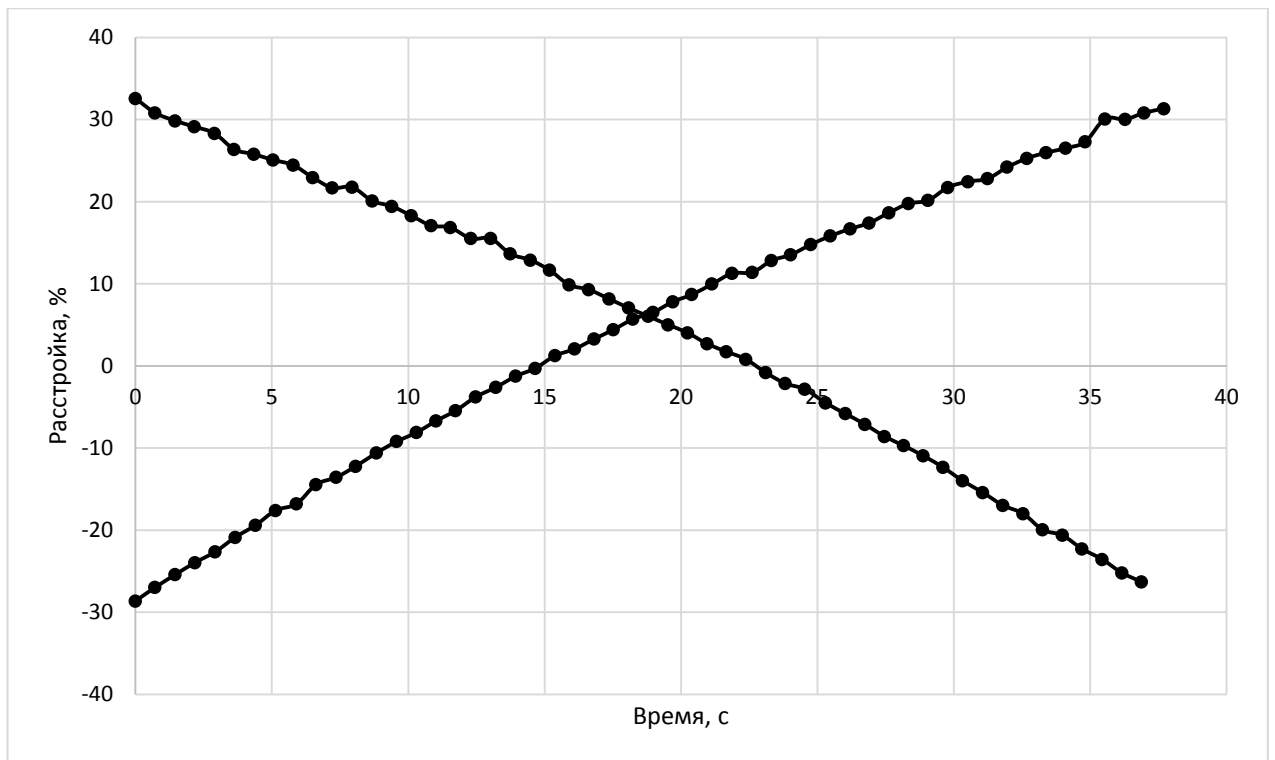


Рисунок 4.11 – Зависимость расстройки КНП от времени регулирования №1

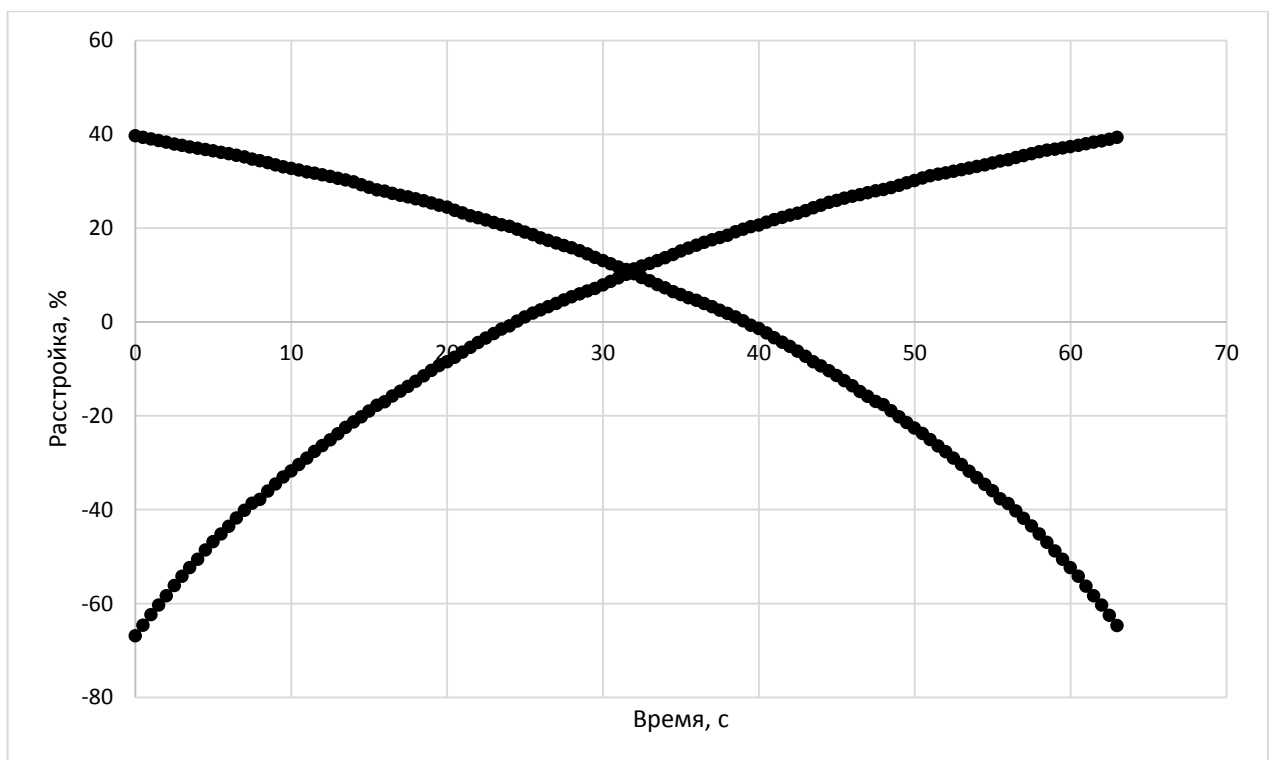


Рисунок 4.12 – Зависимость расстройки КНП от времени регулирования №2

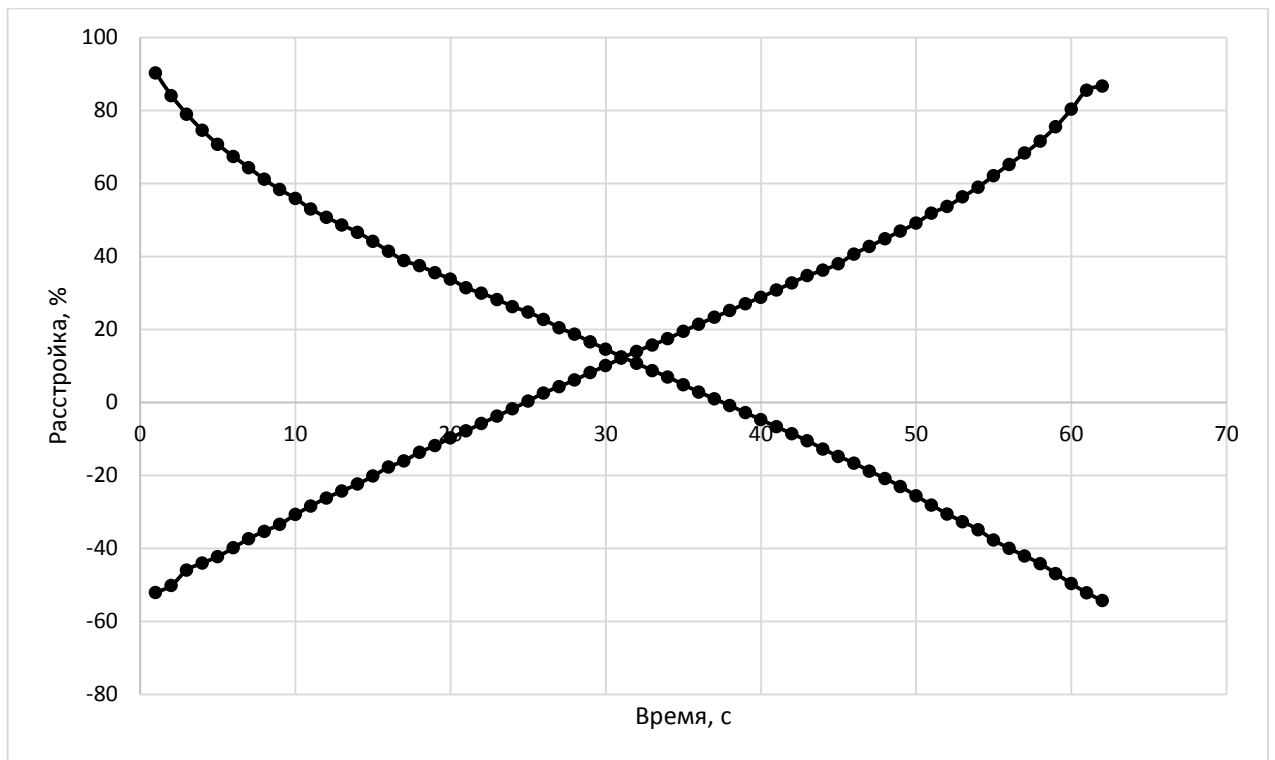
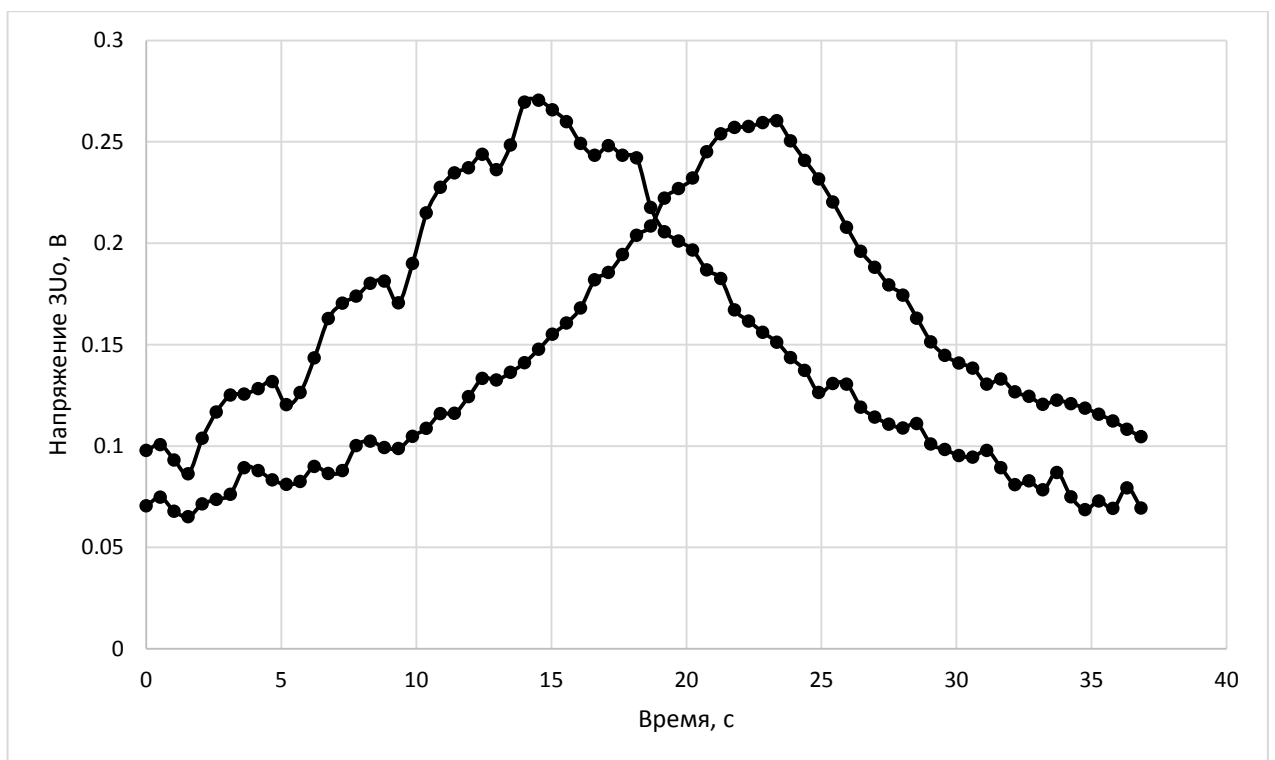
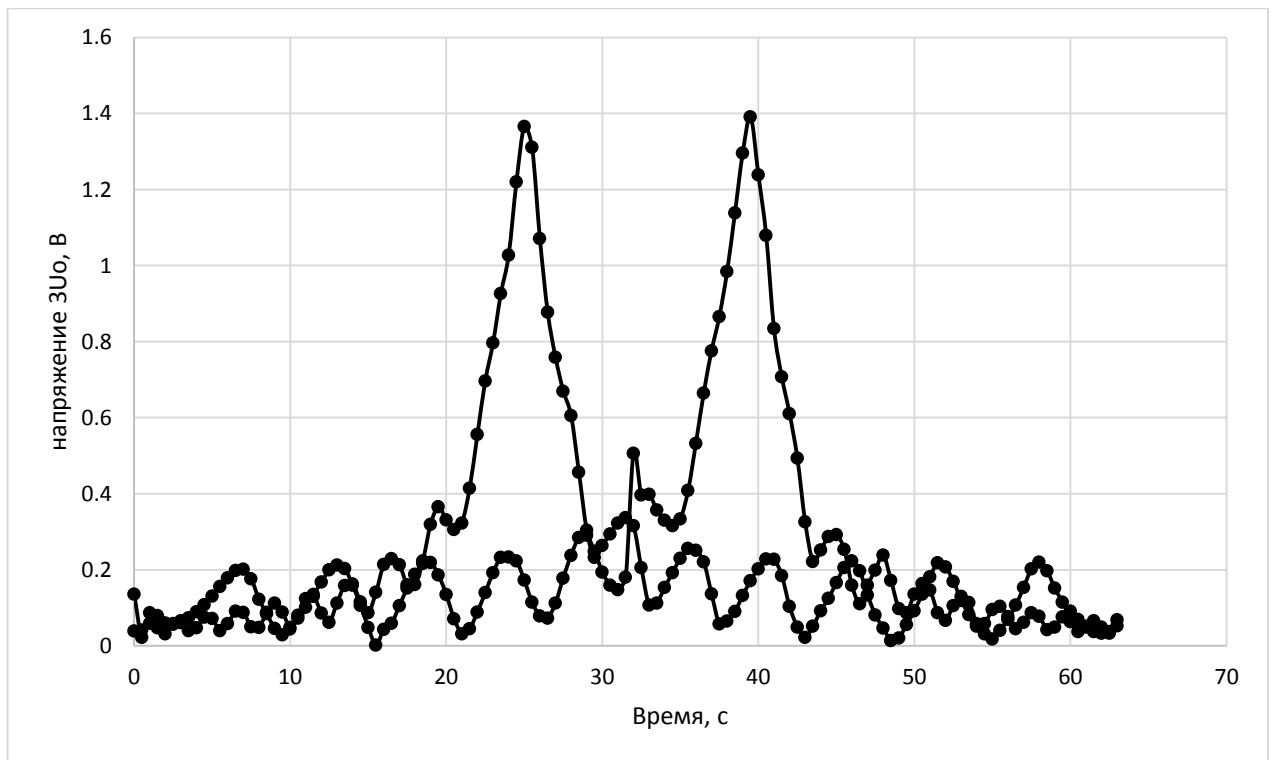
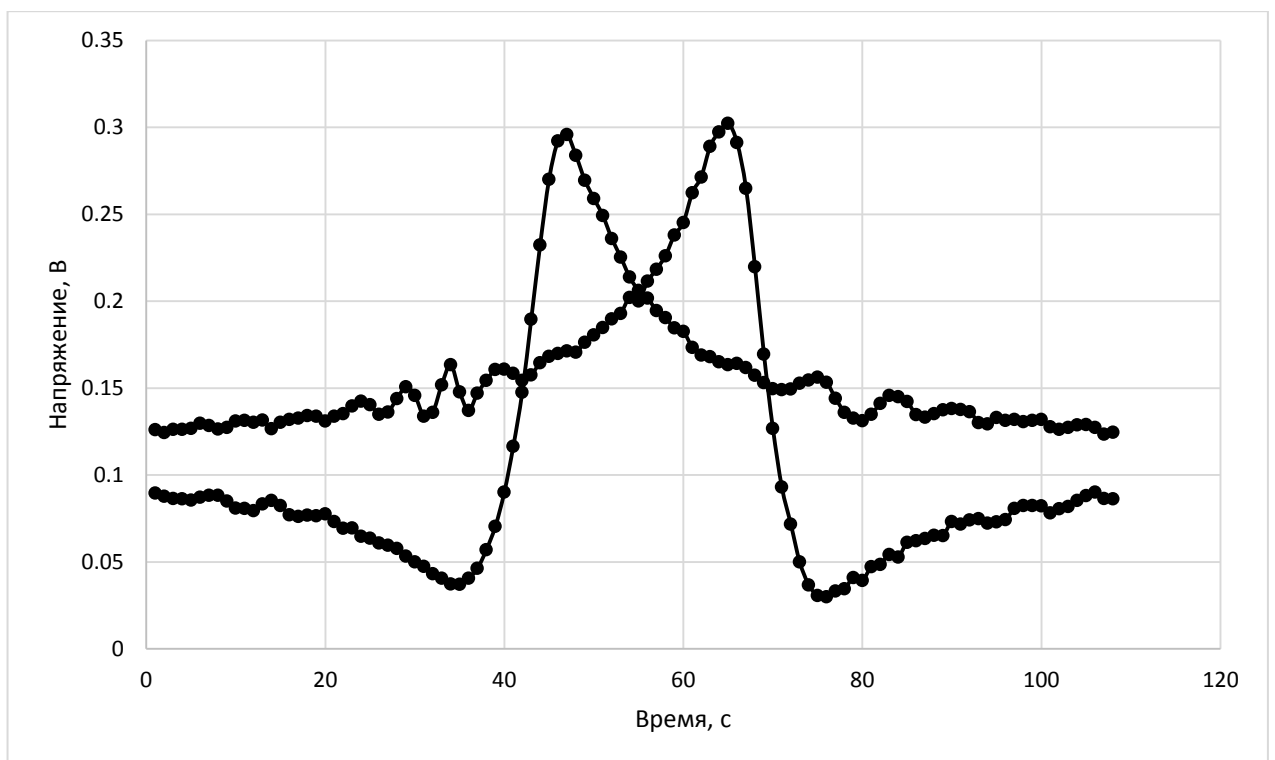


Рисунок 4.13 – Зависимость расстройки КНП от времени регулирования №3

Рисунок 4.14 – Зависимость напряжения  $3U_0$  от времени регулирования №1

Рисунок 4.15 – Зависимость напряжения  $3U_0$  от времени регулирования №2Рисунок 4.16 – Зависимость напряжения  $3U_0$  от времени регулирования №3

### 4.3 Оценка точностных характеристик устройства автоматики

Выполнена оценка точностных характеристик устройства автоматики ДГР в условиях действующей сети экспериментальным путем с последующей обработкой экспериментальных данных и сопоставления результатов. Для оценки точностных характеристик предлагаемых способов и разработанного устройства автоматики был проведен опыт искусственного ОЗЗ в действующей распределительной сети на ПС 110/6/6 «Сидоровка» Набережночелнинских электрических сетей. Данная подстанция имеет 4 секции напряжением 10 кВ, питаемые двумя силовыми трансформаторами с расщепленными обмотками. Нейтраль каждой секции шин заземлена через ДГР типа РДМР-300/6 У1 с током регулирования 15-80А.

Для оценки точности работы устройств автоматики, измерялось действительное значение тока ОЗЗ при отключенном ДГР (сеть с изолированной нейтралью) и значение остаточного тока в месте ОЗЗ после настройки в автоматическом режиме существующих ДГР, подключенных к нейтрали сети.

Для проведения опыта в каждой секции выделялась резервная ячейка. Вывод фазы А после выключателя соединялся через трансформатор тока ТОЛ-10 с классом точности 0,5S к контуру заземления подстанции при помощи переносного заземления сечением 70 мм<sup>2</sup>. Схема проведения опыта металлического замыкания для прямого измерения параметров сети приведена на рисунке 4.17. Дополнительно все сигналы напряжения и тока были записаны на цифровой регистратор. Наличие кулачкового переключателя объясняется необходимостью оценки активной и реактивной составляющих в токе ОЗЗ.

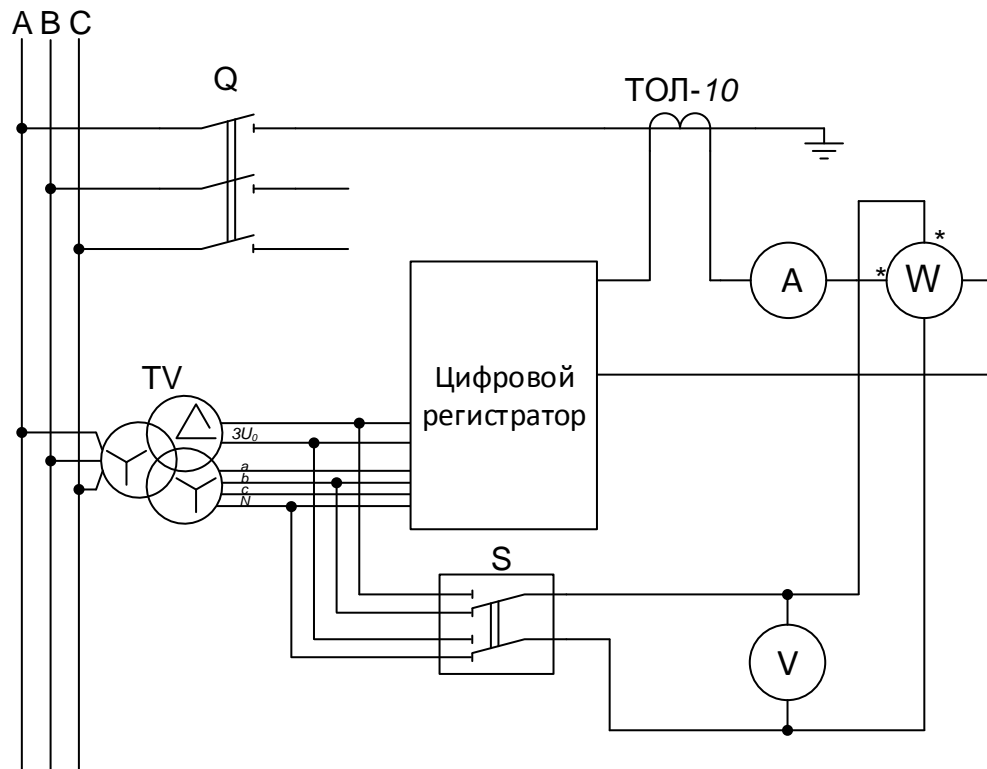


Рисунок 4.17 – Схема измерения тока искусственного ОЗЗ: А, В, С – фазы секции 6 кВ; Q – высоковольтный выключатель; ТОЛ-10 – линейный трансформатор тока; TV – измерительный трансформатор напряжения типа НТМИ; S – кулачковый переключатель; А, V, W – стрелочные измерительные приборы с классом точности не хуже 0,5

Поскольку ДГР способен компенсировать лишь первую гармонику емкостной составляющей в токе ОЗЗ и не компенсирует активную составляющую и токи высших гармонических составляющих, то для оценки относительной погрешности автоматической настройки ДГР при помощи разработанного устройства использовано следующее соотношение:

$$\delta_I = \frac{I_{Q\_комп}}{I_{C\_изол}} \cdot 100\%,$$

где  $I_{Q\_комп}$  – реактивная составляющая тока ОЗЗ в сети с нейтралью, заземленной через ДГР;  $I_{C\_изол}$  – емкостная составляющая тока ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью.

Относительная погрешность компенсации емкостной составляющей не превышает 1% (таблица 4.2), что подтверждает сделанные в работе допущения и выводы. В качестве примера полученных в результате опытов осциллограмм приведем осциллограмму опыта искусственного ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью (рисунок 4.18). Напряжение фазы В в момент замыкания снизилось,

практически, до нулевого значения, напряжения на незаземленных фазах увеличились до значений линейного напряжения, а вектор тока ОЗЗ опережает вектор напряжения  $3U_0$  на  $90^\circ$ , что соответствует емкостному характеру тока в месте замыкания.

Таблица 4.2 – Результаты опытов искусственного ОЗЗ

Показатель		Секция							
		1-я		2-я		3-я		4-я	
Полный ток ОЗЗ без компенсации, А	Емкостная составляющая, А	33,8	33,797	42,6	42,598	37,0	36,997	40,6	40,588
	Активная составляющая, А		0,45		0,4128		0,4712		0,987
Полный ток ОЗЗ с компенсацией, А	Реактивная составляющая, А	1,0	0,0894	1,6	0,1	2,0	0,379	1,8	0,366
	Активная составляющая, А		0,996		1,596		1,963		1,762
Полный ток ДГР, А	Индуктивная составляющая, А	32,6	32,595	42	40,8159	37,8	37,6459	39,6	39,5837
	Активная составляющая, А		0,546		1,1841		3,4098		1,1346
Погрешность компенсации емкостной составляющей, %			0,26		0,23		1,02		0,90

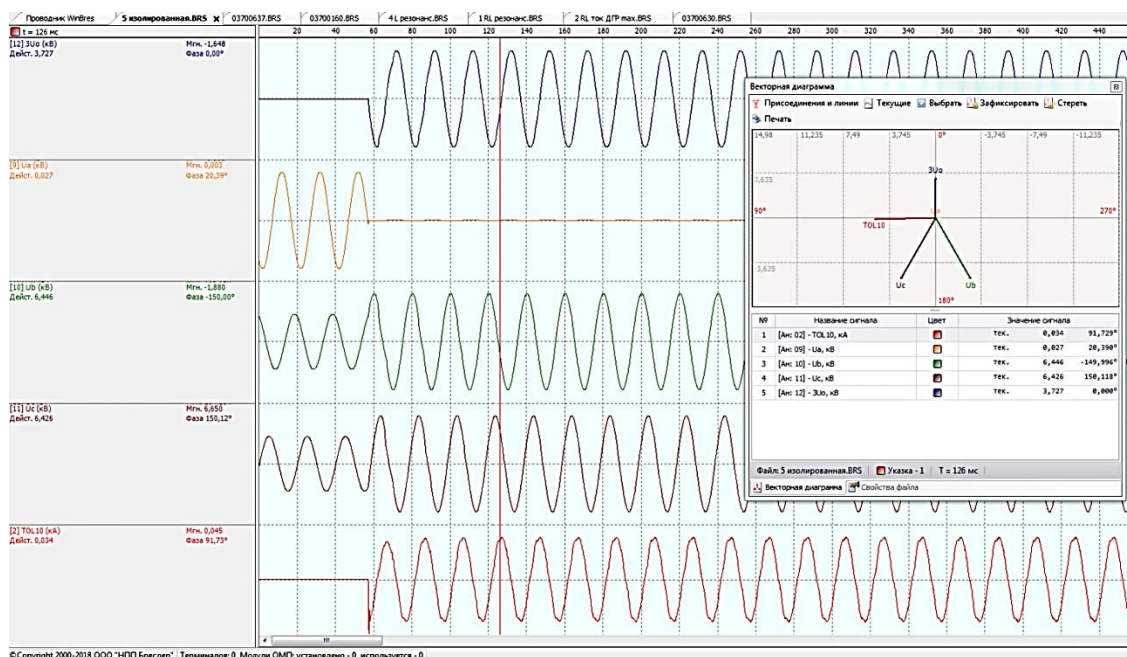


Рисунок 4.18 – Осциллограмма опыта искусственного ОЗЗ в режиме изолированной нейтрали. Сверху вниз: фазные напряжения  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ ; напряжение  $3U_0$ ; полный ток ОЗЗ

В ходе диссертационного исследования была выполнена оценка точностных характеристик предложенного способа оценки текущего емкостного тока сети по сравнению с косвенным методом. Для этого были проведены испытания на ПС «Кочкино» производственного отделения «Центральные электрические сети» филиала ОАО «МРСК Урала» – «Пермьэнерго». При оценке текущего емкостного тока сети использовался способ поочередного подключения высоковольтного конденсатора к фазам сети.

Для проведения измерений с помощью высоковольтного конденсатора его емкость должна составлять не менее 10% суммарной емкости всей сети напряжением 6-10 кВ, в воздушных сетях 35 кВ емкость должна составлять 0,05-2% общей емкости сети. Одновременно с подключением конденсатора к фазам сети производятся измерения фазных и линейных напряжений сети на вторичных обмотках измерительного трансформатора напряжения. После проведения испытаний производится расчет значения емкостного тока сети  $I_C$  для каждой фазы сети по формуле

$$I_C = \frac{(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot U_L \cdot U_K \cdot K_{тр} \cdot C_{доп} \cdot 10^{-6})}{U_L - \sqrt{3} \cdot U_K},$$

где  $K_{тр}$  – коэффициент трансформации трансформатора напряжения;  $C_{доп}$  – емкость добавочного конденсатора;  $U_L$  – среднее линейное напряжение сети;  $U_K$  – напряжение фазы сети, к которой подключается конденсатор.

Емкостный ток сети вычисляется как среднее арифметическое значение трех измерений, полученных для каждой фазы сети. Во время испытаний на ПС «Кочкино» использовался конденсатор емкостью 2,3 мкФ. По результатам испытаний, среднее значение емкостного тока, полученное косвенным методом, составило 54,7 А. Измерение емкостного тока, выполненное при помощи разработанного устройства автоматики ДГР отличаются от косвенного способа оценки на 2 А и составляет 56,7 А. Относительная погрешность измерения составила 3%, что объясняется наличием ряда недочетов применяемой методики оценки емкостного тока и неточными данными по индуктивному току ДГР.



## Выводы

1. Исследования, представленные в диссертационной работе, завершены организацией серийного производства. Разработано устройство автоматической настройки ДГР на заданный режим компенсации. Алгоритмы функционирования устройства реализуют предложенные автором способы оценки параметров КНП сети и автоматической настройки на заданный режим компенсации в условиях нестабильного напряжения естественной несимметрии, исключающим корректное функционирование способов настройки, основанных на анализе амплитудно-фазовых характеристик КНП сети.

2. Результаты опытной эксплуатации устройства подтвердили правомерность принятых допущений, позволили сделать обоснованный вывод об эффективности компенсации емкостного тока при выполнении точной настройки. Внесен ряд конструктивных и программных изменений, произведена отладка всех режимов работы в условиях действующей электрической сети, показана работоспособность и эффективность программно-аппаратной реализации способов.

3. Натурные испытания доказали работоспособность предложенных способов и алгоритмов, высокую точность оценки параметров сети и автоматической настройки ДГР.

## Заключение

1. Разработана микропроцессорная система автоматического управления режимом компенсации емкостной составляющей тока однофазного замыкания на землю, обладающая новыми свойствами, обеспечивающими повышение точности управления, расширение области применения и упрощение конструкции системы в реальных условиях эксплуатации распределительных электрических сетей.

2. В разработанной системе реализован способ формирования воздействий на сеть с целью оценки ее параметров, предусматривающий эффективную отстройку от влияния внешних факторов, что позволяет более точно компенсировать токи в месте повреждения при ОЗЗ, и, следовательно, предотвращать развитие аварийных ситуаций.

3. Предложены цифровые алгоритмы оценки параметров КНП сети и настройки компенсации емкостных токов замыкания на землю, основанные на контроле частоты собственных колебаний контура нулевой последовательности сети путем анализа реакции на воздействие тестового импульса произвольной формы. Преимущество методов в том, что они обеспечивают возможность определения необходимой для компенсации значения расстройки и формирования управляющего воздействия на ДГР в условиях не только индуктивного, но и смешанного активно-индуктивного заземления нейтрали сети при широком диапазоне изменения параметров сети, что расширяет область применения методов.

4. На основе созданной математической модели исследованы метрологические свойства разработанных методов измерения параметров контура нулевой последовательности сети, определены их предельные возможности и динамические свойства. Показано, что предельная относительная погрешность измерений параметров контура нулевой последовательности в реальных условиях составляет не более 1%. Это позволяет осуществлять компенсацию емкостных токов замыкания на землю с повышенной точностью и таким образом снизить негативные последствия от тока в месте повреждения.

5. Разработаны, исследованы и реализованы в устройствах алгоритмы и программы управления режимами компенсации емкостной составляющей тока ОЗЗ. Решена задача согласования работы двух и более устройств управления в параллельных режимах работы секций, что обеспечило универсальность и возможность ее широкого применения при создании новых объектов компенсации емкостных токов и при модернизации с использованием имеющихся ДГР. Предусмотрена возможность подключения к средствам верхних уровней АСУ ТП, что позволяет повысить степень удобства использования вновь созданной системы автоматического управления.

6. Разработанные методы и технические средства управления компенсацией используются в устройствах автоматического управления «Бреслер-0107.060» и выпускаются серийно ООО «НПП Бреслер». Выпущено более 400 изделий, которые внедрены и эксплуатируются во многих филиалах ПАО «Россети», ОАО «Сетевая компания», ОАО «Иркутская электросетевая компания», ООО «Башкирэнерго» и в системах электроснабжения промышленных предприятий (ООО «ЗапСибНефтехим» (ГК Сибур). Результаты проведенных натурных испытаний во всех регламентированных режимах и опытной эксплуатации, а также положительный опыт промышленной эксплуатации, подтвердили основные теоретические положения диссертации, правомерность принятых допущений и ограничений, предложенных рекомендаций и выводов.

7. Материалы теоретических, методических и практических разработок нашли применение в учебно-методических материалах и используются в учебном процессе в Чувашском государственном университете и Институте повышения квалификации специалистов релейной защиты и автоматики (г. Чебоксары).

## Список литературы

1. Лихачёв, Ф.А. Выбор, установка и эксплуатация дугогасящих аппаратов / Ф.А. Лихачёв. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 142 с.
2. Вильгейм, Р. Заземление нейтрали в высоковольтных системах / Р. Вильгейм, М. Уотерс. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 416 с.
3. Трухан, А.П. Принципы автоматической настройки дугогасящих катушек / А.П.Трухан // Вопросы автоматики и релейной защиты энергетических систем. – Киев: Изд-во АН УССР, – 1963. – С. 60-92.
4. Сомов, В.А. Дугогасящая катушка с плавным регулированием / В.А. Сомов, В.В. Шуть, С.А. Бобриков // Электричество. – 1965. – № 5. – С. 44-48.
5. Трухан, А.П. Автоматическая настройка компенсации емкостных токов замыкания на землю в кабельной сети / А.П. Трухан, Л.К. Шкурупий // Автоматизация и релейная защита электрических систем. – Киев: Наук. думка, 1966. – С. 85-99.
6. Степанчук, Д.Н. Автоматическая настройка плунжерных дугогасящих катушек в кабельных сетях 6-10 кВ / Д.Н. Степанчук, В.Ф. Солдатов, В.П. Кухта, Ю.Г. Глухов // Электрические станции. – 1966. – № 10. – С. 68-72.
7. Трухан, А.П. Автоматическая компенсация токов замыкания на землю в электрических сетях / А.П. Трухан // Компенсация емкостных токов замыкания на землю в электрических сетях. – Киев: Наук. думка, 1968. – С. 5-25.
8. Лихачёв, Ф.А. Защита от внутренних перенапряжений установок 3-220 кВ / Ф.А. Лихачёв. – М.: Энергия, 1968. – 103 с.
9. Обабков, В.К. Способ экстремального регулирования в нестационарных инерционных системах с синхронным детектированием / В.К. Обабков, Ю.К. Сергеев // Поиск Экстремума. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1969. – С. 74-77.
10. Дубинчик, Е.А. Дугогасящие реакторы с плавной настройкой тока / Е.А. Дубинчик, А.И. Тарасов // Энергетик. – 1970. – № 2. – С. 27-29.

11. Брызгин, О.Р. Фазовый метод настройки компенсации в электрических сетях при замыкании на землю / О.Р. Брызгин // Проблемы технической электродинамики. – Киев: Наук. думка, 1970. – Вып. 26. – С. 19-23.

12. Лихачев, Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лихачев. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.

13. Лихачёв, Ф.А. Инструкция по выбору, установке и эксплуатации дугогасящих катушек / Ф.А. Лихачев. – М.: Энергия, 1971. – 104 с.

14. Черников, А.А. Компенсация емкостных токов в сетях с незаземленной нейтралью / А.А. Черников. – М.: Энергия, 1974. – 96 с.

15. Степанчук, Д.Н. Повышение точности настройки дугогасящих реакторов экстремальными регуляторами / Д.Н. Степанчук // Электроэнергетика и автоматизация промышленных установок. – Донецк: Изд-во ДПИ, 1974. – С. 23-27.

16. Михайлов, А.М., Трухан А.П. Симметрирование компенсированной сети регулированием добротности контура нулевой последовательности / А.М. Михайлов, А.П. Трухан // Проблемы технической электродинамики. – Киев: Наук. думка, 1974. – Вып. 43. – С. 153-160.

17. Вайнштейн, Р.А. Непрерывный контроль и автоматическая настройка компенсации емкостных токов с использованием наложенного тока частоты 25 Гц / Р.А. Вайнштейн, С.Е. Аньков // Режимы нейтрали в электрических системах. – Киев: Наук. думка. 1974. – С. 115-120.

18. Назаров, В.В. Исследование токов замыкания на землю в сетях 10 кВ с железобетонными опорами / В.В. Назаров // Режимы нейтрали в электрических системах. – Киев: Наук. думка, 1974. – С. 137-144.

19. Петров, О.А., Принципы автоматической настройки дугогасящих катушек с нелинейными вольт-амперными характеристиками / О.А. Петров, В.И. Гиря // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий. – Челябинск: Изд-во Челяб. политех. ин-та, 1975. – Вып. 160. – С. 25-28.

20. Брызгин, О.Р. Автоматическая настройка дугогасящих реакторов в режиме однофазного замыкания на землю / О.Р. Брызгин, А.П. Трухан, А.Ф. Середенко // Энергетика и электрификация. – 1975. – № 6. – С. 34-36.

21. Бурак Н.В. Обзор регулируемых заземляющих дугогасящих реакторов и основные требования к ним / Н.В. Бурак, В.Д. Головчан // Электроснабжение и автоматизация промышленных предприятий. – Чебоксары: Чуваш. ун-т, 1976. – С. 3-11.

22. Валеев, Г.С. Расчет дугогасящего реактора с дискретным регулированием индуктивности по методу подобия / Г.С. Валеев // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий. – Челябинск: Изд-во ЧПИ, – 1977. – Вып. 191. – С. 22-29.

23. Гиря, В.И. Классификация систем автоматического регулирования настройки дугогасящих реакторов / В.И. Гиря, О.А. Петров // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий. – Челябинск: Изд-во Челяб. политех. ин-та, 1977. – Вып. 191. – С. 36-41.

24. Гиря, В.И. Автоматическая настройка компенсации емкостных токов / В.И. Гиря, О.А. Петров // Электрические станции. – 1977. – № 3. – С. 80-83.

25. Обабков, В.К. Анализ поисковых систем резонансной настройки в электрических сетях с компенсацией емкостных токов / В.К. Обабков, О.Н. Меркулов, Ю.Н. Целуевский // Изв. вузов. Энергетика. – 1978. – № 11. – С. 41-47.

26. Дубинчик Е.А. Регулируемый дугогасящий реактор нового типа / Е.А. Дубинчик // Энергетик. – 1978. – № 4. – С. 23-24.

27. Загоскин, Е.И. Устройство для определения знака расстройки компенсации тока замыкания на землю / Е.И. Загоскин // Электрические станции. – 1978. – № 1. – С. 63-66.

28. Мاستрюков Л.А. Заземляющие дугогасящие реакторы с бесконтактным тиристорным управлением / Л.А. Мاستрюков, В.В. Порудоминский, А.Н. Ракитский // Электротехника. – 1978. – № 10. – С. 14-18.

29. Ершов, А.М. Разработка и исследование устройств автоматической компенсации активной составляющей тока однофазного замыкания на землю в электрических сетях напряжением 6-10 кВ: дис. ... канд. техн. наук / А.М. Ершов. – Свердловск, 1978. – 17 с.

30. Степанчук, Д.Н. Всережимный регулятор автоматической настройки дугогасящих катушек в кабельных сетях 6-10 кВ / Д.Н. Степанчук, В.Ф. Солдатов, А.А. Кедров, Ш.А. Муратов // Электрические станции. – 1978. – № 9. – С. 65-69.

31. Целуевский, Ю.Н. Анализ и синтез самонастраивающихся систем управления резонансными объектами с поисковой модуляцией параметров / Ю.Н. Целуевский. – Донецк: Донецкий политехн. ин-т, 1979. – 33 с.: 10 ил. – Деп. в ВИНТИ, ФН 1672.

32. Сапунков, М.Л. Применение реакторов с фазоимпульсным регулированием для систем автоматической компенсации в рудничных сетях 6 кВ / М.Л. Сапунков, В.С. Бондарчук, А.П. Долганов // Автоматизация технологических процессов в промышленных установках: тез. докл. конф. – Пермь: Пермский политехн. ин-т, 1979. – С. 60-61.

33. Обабков В.К. К вопросу о коррекции поисковых систем резонансной настройки в электрических сетях с компенсацией емкостных токов / В.К. Обабков, О.Н. Меркулов, Ю.Н. Целуевский // Изв. вузов. Энергетика. – 1979. – № 5. – С. 25-31.

34. Обабков, В.К. Об экстремальном управлении резонансным объектом / В.К. Обабков, Е.В. Сергин, Ю.Н. Целуевский // Корреляционно-экстремальные системы управления. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1979. – С. 283-287.

35. Обабков, В.К. Способы построения самонастраивающихся систем с компенсированной нейтралью / В.К. Обабков, Ю.Н. Целуевский // Изв. вузов. Энергетика. – 1979. – № 12. – С. 20-27.

36. Головчан, В.Д. Заземляющие реакторы с плавным регулированием индуктивности / В.Д. Головчан, Н.В. Бурак, С.Д. Гильман // Электротехника. – 1980. – № 1. – С. 21-24.

37. Степанчук, Д.Н. Регулятор автоматической настройки плунжерных дугогасящих катушек в сетях 6-35 кВ / Д.Н. Степанчук, В.Ф. Солдатов, В.П. Кобазев // Электрические станции. – 1981. – №3. – С. 63-67.

38. Дорожко, Л.И. Устройство автоматической компенсации емкостных токов в промышленных сетях 35 кВ / Л.И. Дорожко, Л.Л. Федосов, В.М. Божков и др. // Промышленная энергетика. – 1983. – № 4. – С. 54-58.

39. Сапунков, М.Л. Характеристики дугогасящего реактора с фазоимпульсным регулированием / М.Л. Сапунков, В.С. Бондарчук, П.А. Долганов // Изв. вузов. Горный журнал. – 1983. – № 5. – С. 89-92.

40. Петров, О.А. Автоматическая настройка плунжерных дугогасящих реакторов в кабельных сетях / О.А. Петров, А.М. Ершов, А.Н. Хабаров и др. // Электрические станции. – 1983. – № 10. – С. 60-63.

41. Рябошапка, А.Т. Дугогасящий реактор с тиристорным регулятором / А.Т. Рябошапка, В.М. Сичкарь, С.В. Смоляков // Проблемы преобразовательной техники. – Киев: ИЭД АН УССР, 1983. – Ч. 4. – С. 257-259.

42. Обабков, В.К. Построение самонастраивающейся системы компенсации емкостных токов утечки с поиском поврежденной фазы / В.К. Обабков, Е.В. Сергин // Изв. вузов. Горный журнал. – 1983. – № 3. – С. 90-94.

43. Базанов, В.П. Влияние перекомпенсации в сетях, работающих с компенсацией емкостных токов однофазных замыканий / В.П. Базанов, Т.Е. Путова // Энергетик. – 1984. – № 8. – С. 28-29.

44. Мокин, Б.И. Автоматические регуляторы в электрических сетях / Б.И. Мокин, Ю.Н. Выговский. – Киев: Техника, 1985. – 104 с.

45. Сирота, И.М. Режимы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирота, С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов. – Киев: Наук. думка, 1985. – 264 с.

46. Гумин, М.И. Автоматическое регулирование компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ. Обзорная информация / М.И. Гумин. – М.: Информэнерго, 1985. – 28 с.

47. Цапенко, Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ / Е.Ф. Цапенко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.

48. Вайнштейн, Р.А. Прибор для измерения степени расстройки компенсации емкостных токов / Р.А. Вайнштейн, Б.Г. Третьяков // Электрические станции. – 1986. – № 4. – С. 56-59.



49. ТИ 34-70-070-87. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ. – М.: Союзтехэнерго, 1988. – 56 с.

50. Солдатов, В.Ф. Регулятор автоматической настройки дугогасящего реактора в кабельных сетях с компенсацией потенциала поврежденной фазы / В.Ф. Солдатов, В.П. Кобазев, Г.И. Никольский, Н.С. Павленко // Электрические станции. – 1988. – № 6. – С. 65-69.

51. Добротворский, И.Н. Теория электрических цепей: учебник для техникумов / И.Н. Добротворский. – М.: Радио и связь, 1989. – 472 с.

52. Обабков, В.К. Устройство автокомпенсации емкостных и активных составляющих типа УАРК в системах электроснабжения с резонансным заземлением нейтрали / В.К. Обабков, Ю.Н. Целуевский // Промышленная энергетика. – 1989. – № 3. – С. 17-21.

53. Обабков, В.К. Совершенствование фазового способа автоматического поддержания условий компенсации емкостных токов в кабельных сетях 6-35 кВ / В.К. Обабков // Электричество. – 1989. – № 1. – С. 18-25.

54. Обабков, В.К. Принцип построения измерителей расстройки компенсации емкостных токов в сетях 6-35 кВ / В.К. Обаков // Электрические станции. – 1992. – № 10. – С. 76-79.

55. Обабков, В.К. Синтез адаптивных систем управления резонансными объектами / В.К. Обабков. – Киев: Наук. думка, 1993. – 250 с.

56. Трухан, А.П. Эффективность различных способов заземления нейтрали сетей 6-10 кВ. Режимы нейтрали в энергетических системах / А.П. Трухан. – Киев: Наук. думка, – 1993. – 250 с.

57. Вайнштейн, Р.А. Защита от замыканий на землю в компенсированных сетях 6-10 кВ / Р.А. Вайнштейн, С.И. Головкин, В.С. и др. // Электрические станции. – 1998. – № 7. – С. 26-30.

58. Обабков, В.К. Возможности создания быстродействующего линейного дугогасящего реактора для сетей 6-35 кВ с компенсацией емкостных токов / В.К. Обабков, Н.Е. Обабкова // Перспективные направления в развитии энергетики и

электротехнического оборудования в 2000–2010 годах: сб. докл. V Симпозиума – М., 1999. – Т. 1 – С. 108-113.

59. Способ автоматической настройки дугогасящего реактора и устройство для его осуществления / А.М. Брянцев, А.Г. Долгополов. – Пат. 2130677. Оpubл. в БИ, 1999.

60. Головкин, С.И. Селективная сигнализация однофазных замыканий и измерение расстройки компенсации в сетях 30, 35 кВ / С.И. Головкин, Р.А. Ванштейн, С.М. Юдин // Электрические станции. – 2000. – № 7. – С. 33-36.

61. Долгополов, А.Г. О режимах заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ России / А.Г. Долгополов // Энергетик. – 2000. – № 2. – С. 24.

62. Березницкий, С.Л. Усовершенствование средств контроля и автоматической настройки режима заземления нейтрали в электрических сетях 6-10 кВ на основе наложения токов не промышленной частоты: дисс. ... канд. техн. наук / С.Л. Березницкий. – Томск, 2010. – 208 с.

63. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – М.: Энергосервис, 2003. – 151 с.

64. Евдокунин, Г.А. Внутренние перенапряжения в сетях 6-35 кВ / Г.А. Евдокунин, С.С. Титенков. – СПб: Терция, 2004. – 188 с.

65. Миронов, И.А. Режим заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ [Электронный ресурс] / И.А. Миронов // Новости ЭлектроТехники. – 2003. – № 6(24). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/24/05.php>.

66. Кадомская, К.П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: учебник / К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, А. Рейхердт. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 333 с.

67. Князев, В. Техническая политика ФСК. Требования к распределительному электросетевому комплексу [Электронный ресурс] / В. Князев, Г. Боков // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 6(42). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/42/04.php>.

68. Ванштейн, Р.А. Режимы заземления нейтрали в электрических системах: учеб. пособие / Р.А. Ванштейн, Н.В. Коломиец, В.В. Шестакова – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 118 с.

69. Рыжкова, Е.Н. Управление защитным резистором для сетей 6-35 кВ с активно-индуктивным заземлением нейтрали / Е.Н. Рыжкова // Электричество. – 2007. – № 3. – С. 16-20.

70. Ильиных, М. Компенсированная и комбинированно заземленная нейтраль. Опыт эксплуатации сети 6 кВ металлургического комбината [Электронный ресурс] / М. Ильных, Л. Сарин, А. Ширковец, Э. Буянов // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 2(44). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/44/08.php>.

71. Миронов, И. Дугогасящие реакторы в сетях 6-35 кВ. Автоматическая компенсация емкостного тока / И. Миронов // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 3 (45). – С. 62-65.

72. Миронов, И. Дугогасящие реакторы в сетях 6-35 кВ. Автоматическая компенсация емкостного тока / И. Миронов // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 5 (47). – С. 56-59.

73. Druml, G. Дугогасящие реакторы 6-35 кВ. Повышение точности настройки [Электронный ресурс] / G. Druml, A. Kugi, V. Parr // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 1 (43). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/43/08.php>.

74. Druml, G. Дугогасящие реакторы 6-35 кВ. Новый метод определения параметров сети [Электронный ресурс] / G. Druml, A. Kugi, V. Parr // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 2 (44). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/44/07.php>.

75. Челазнов, А.А. Методические указания по выбору режима заземления нейтралей в сетях напряжением 6-10 кВ / А.А. Челазнов // Энергоэксперт. – 2007. – № 1. – С. 60-67.

76. Кучеренко, В. Дугогасящие реакторы в сетях 6-35 кВ. Опыт эксплуатации / В. Кучеренко, В. Сазонов, Д. Багаев // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 3 (45). – С. 66-68.
77. Кричко, В. Особенности применения дугогасящих реакторов [Электронный ресурс] / В. Кричко // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 1 (43). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/43/07.php>.
78. Базуткин, В.В. К проблеме компенсации емкостных токов в сетях 6-10-35 кВ / В.В. Базуткин // Электро. – 2007. – № 1. – С. 13-18.
79. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: НЦ ЭНАС, 2007. – 512 с.
80. Техническое описание и инструкция по эксплуатации шкафа автоматического управления дугогасящим реактором типа РЗДПОМ с микроконтроллерным регулятором МИРК-4.1. – М.: ООО «МИКРО-Инжиниринг», 2009. – 21 с.
81. Фишман, В. Способы заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ. Точка зрения проектировщика / В. Фишман // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – № 2 (50). – С. 86-90.
82. Козлов, В. Дугогасящие реакторы в сетях 6-35 кВ. Реализация метода автоматического управления / В. Козлов, В. Ильин // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – № 2 (50). – С. 92-94.
83. Успенский, М.И. Методы восстановления электроснабжения в распределительных сетях / М.И. Успенский, И.В. Кызродев. – Сыктывкар, 2010. – 124 с.
84. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы. Сб. статей. 2-е дополненное издание. Под ред. д.т.н., проф. А.М. Брянцева. – М.: «Знак», 2010. – 288 с.
85. Успенский, М.И. Восстановление ЭЭС после деления / М.И. Успенский, С.О. Смирнов, И.В. Кызродев // Релейная защита и автоматизация. – 2011. – № 4. – С. 20-25.

86. Дмитриев, М.В. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы / М.В. Дмитриев, А.С. Карпов, Е.Б. Шескин, А.Г. Долгополов, Д.В. Кондратенко; под ред. Г.А. Евдокунина. – СПб.: Родная Ладога, 2013. – 280 с.

87. Евдокунин, Г.А. Электрические системы и сети: учеб. пособие. – 4-е изд., испр. и доп. – СПб.: Родная Ладога, 2016. – 384 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Исследование процесса наложения на КНП сети

Для наглядной демонстрации протекания переходных процессов, вызванных импульсным воздействием на КНП сети, выполнено моделирование в программе Capture CIS пакета OrCAD 10.0.

Для исследования процессов наложения использовалась схема, трехфазной электрической сети (рисунок П1). На схеме силовой питающий трансформатор представлен тремя источниками синусоидального напряжения промышленной частоты V1, V2, V3 напряжением 6,3 кВ, смещенными по фазе друг относительно друга на  $120^\circ$  и включенными по схеме «звезда». Распределительная сеть представлена симметричной трехфазной цепью с сосредоточенными параметрами емкости фаз относительно земли C1, C2, C3 и сопротивлением изоляции фаз относительно земли R1, R2, R3. К сети подключена трехфазная симметричная нагрузка R4, R5 и R6. Общая точка соединения источников напряжения образует нейтраль электрической сети, к которой подключена катушка индуктивности L1 и источник возмущающего сигнала V4.

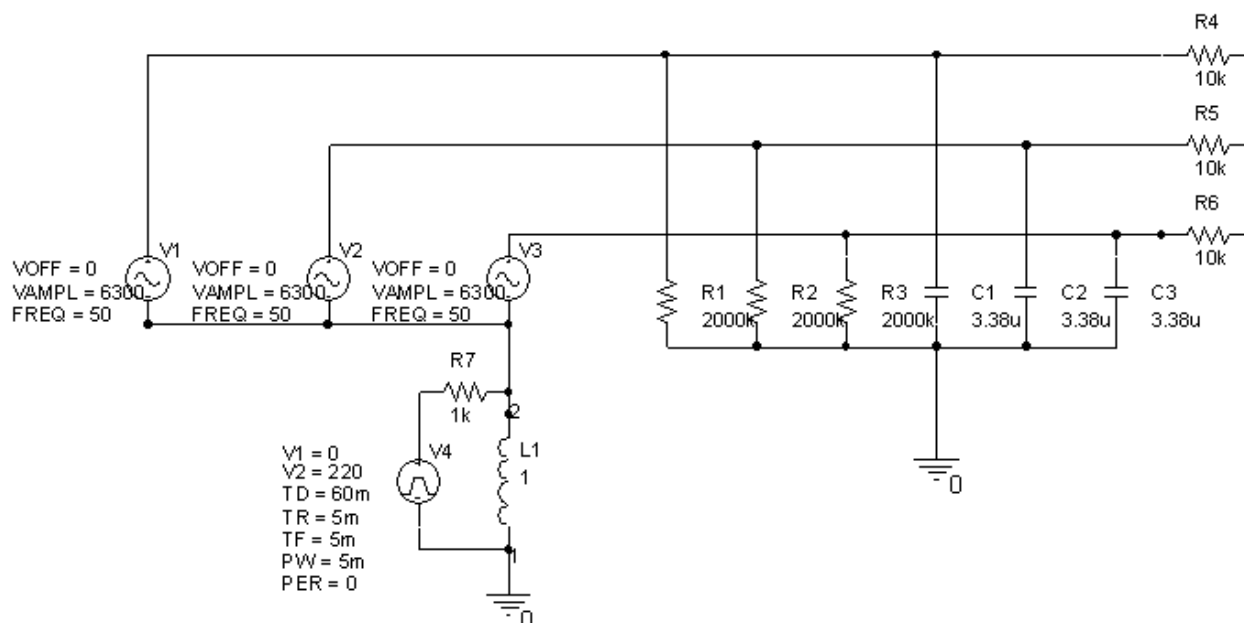


Рисунок П1 – Схема замещения трехфазной сети с компенсированной нейтралью

Осциллограммы напряжения фаз относительно земли при отсутствии возмущающего сигнала приведены на рисунке П2.

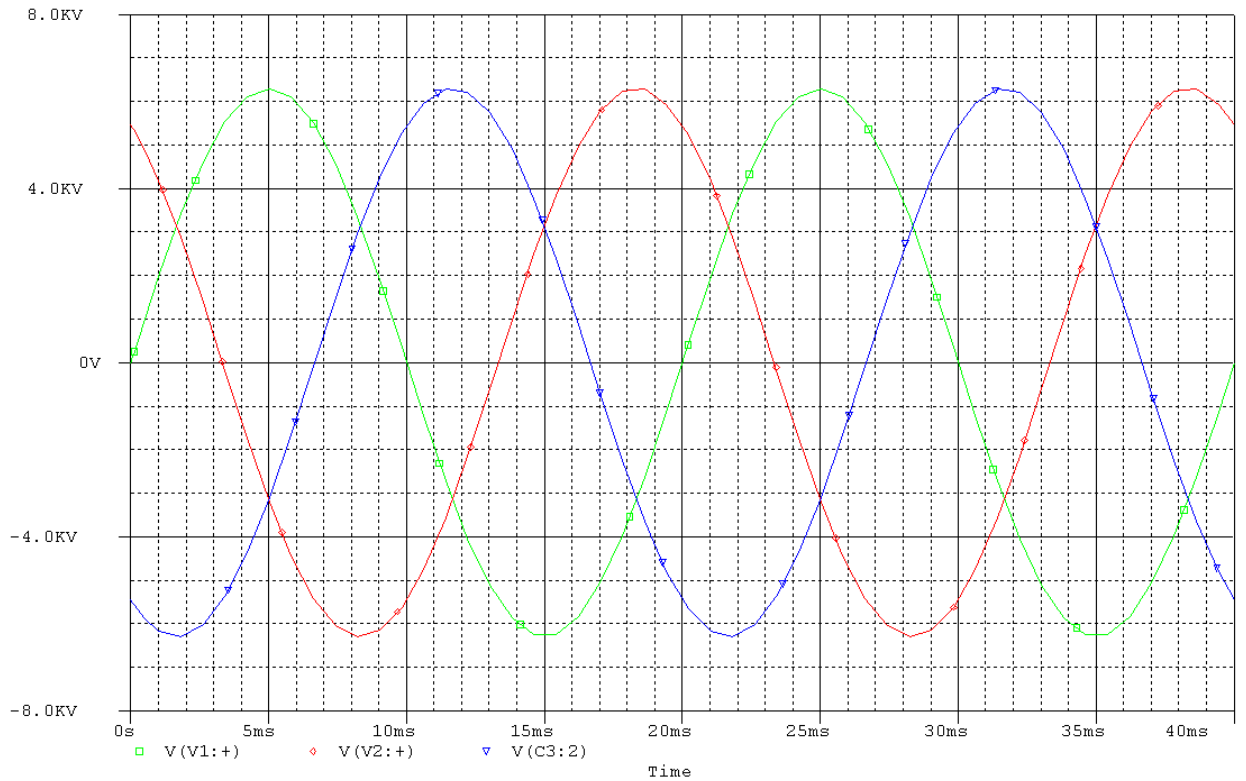


Рисунок П2 – Осциллограммы напряжения фаз относительно земли

Осциллограмма напряжения источника возмущающего воздействия относительно земли приведена на рисунке П3. Форма возмущающего сигнала, в принципе, может быть произвольной.

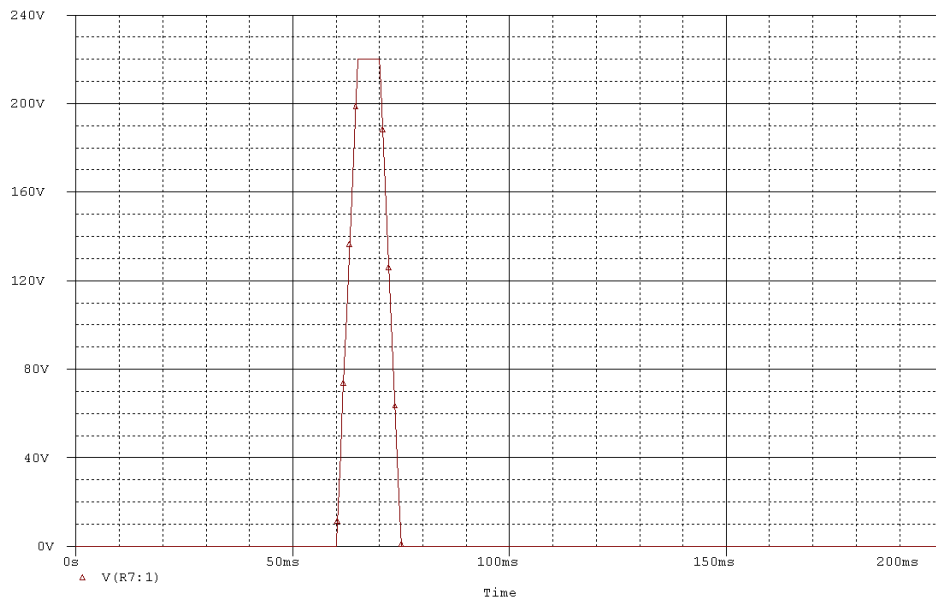


Рисунок П3 – Осциллограмма напряжения источника возмущающего воздействия

Осциллограммы изменения напряжения на нейтрали относительно земли при подаче сигнала возмущения в случае симметричной и в случае

несимметричной трехфазной сети приведены на рисунке П4 и рисунке П5 соответственно. В симметричной трехфазной сети сопротивления и емкости фаз сети на землю и между собой равны а напряжение на нейтрали, при отсутствии возмущающего воздействия, равно нулю. При появлении возмущающего сигнала в нейтрали сети возникает переходный затухающий процесс. Из сигнала представленного на рисунке П4 видно, что частота собственных колебаний при указанных параметрах индуктивности реактора  $L1=1$  Гн и суммарной емкости всех трех фаз  $C=C1+C2+C3=10,06$  мкФ близка к 50 Гц. Параметры контура подбирались так, чтобы частота собственных колебаний соответствовала промышленной и расстройка была близка к нулю.

В случае несимметричной трехфазной сети, созданной искусственно путем изменения емкости одной из фаз относительно земли со значения 3,38 мкФ на значение 3,37 мкФ, осциллограмма переходного процесса напряжения на нейтрали заметно отличается от предыдущей. Это обусловлено появлением напряжения естественной несимметрии. После соответствующей обработки из этой осциллограммы выделяется свободная составляющая переходного процесса, которая имеет форму затухающего гармонического процесса, причем частота свободных колебаний близка к 50 Гц. Как и в предыдущем случае, частота свободных колебаний определяется соотношением индуктивности реактора и суммарной емкости фаз сети относительно земли.

Представленные осциллограммы аналогичны экспериментальным осциллограммам, измеряемым на реальном объекте. Алгоритмы определения параметров контура из подобных осциллограмм были рассмотрены в работе ранее.



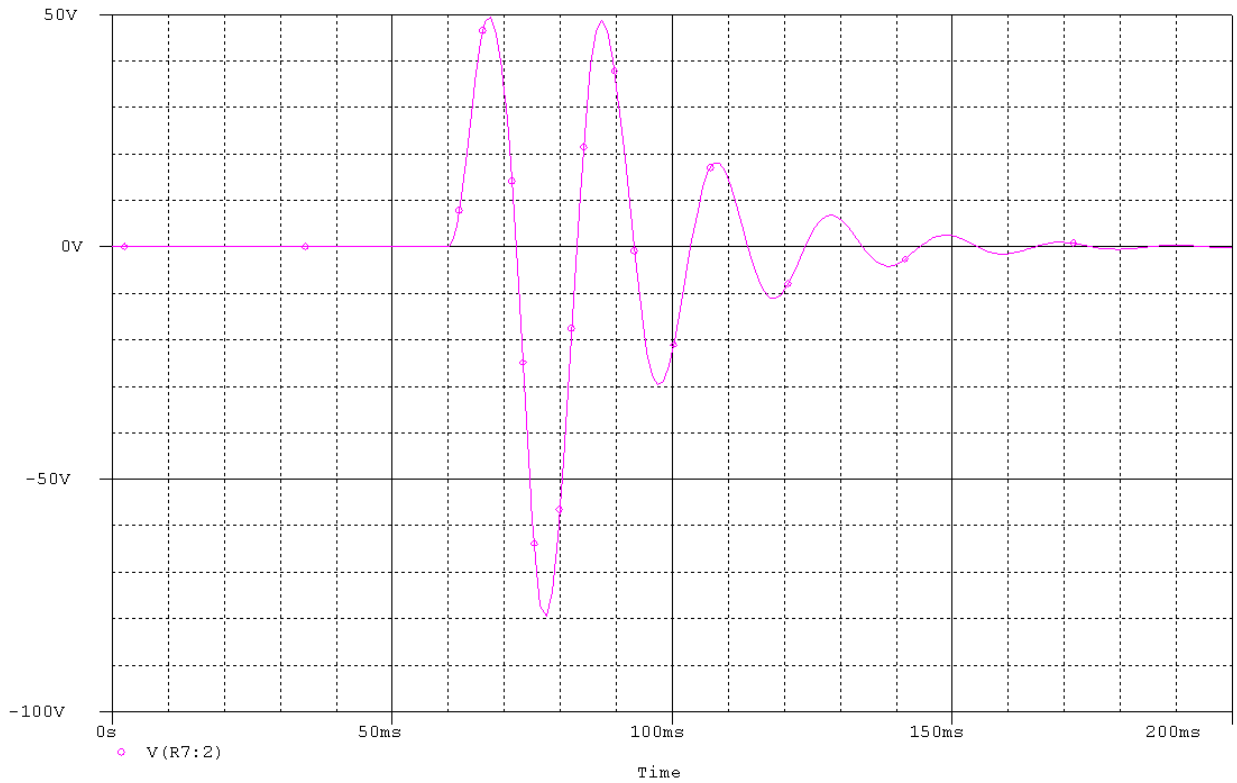


Рисунок П4 – Осциллограмма переходного процесса в нейтрали симметричной сети

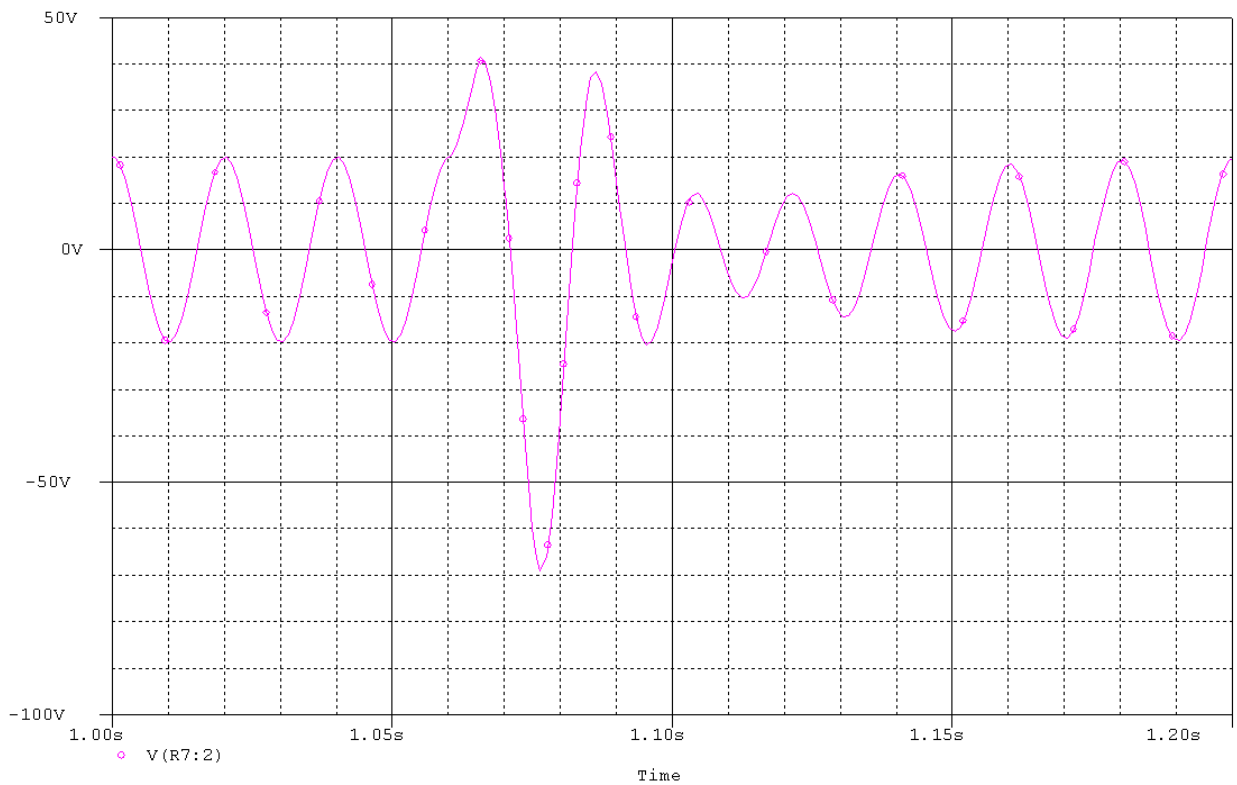


Рисунок П5 – Осциллограмма переходного процесса в нейтрали несимметричной сети

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Анализ способа получения сигнала свободной составляющей

Целью приведенного анализа является раскрытие особенностей способа получения сигнала свободной составляющей из сигнала переходного процесса и демонстрация необходимости точного согласования по начальному фазовому углу сигналов принужденной составляющей, наблюдаемой до импульсного воздействия и далее по тексту именуемого вычитаемым и сигнала переходного процесса, наблюдаемого после импульсного воздействия и далее по тексту именуемого уменьшаемым.

Стационарный сигнал принужденной составляющей обусловлен наличием в сети напряжения несимметрии. С учетом малой длительности измерения сигнал принужденной составляющей можно считать стабильным и не изменяющимся во время измерения.

За участком вычитаемого сигнала принужденной составляющей следует участок наложения импульсного сигнала, длительностью не более 10 мс. Сигнал на участке наложения состоит из суммы двух составляющих: напряжения несимметрии контура и напряжения принужденной составляющей, обусловленной источником возмущения.

После отключения источника возмущения, возникает переходный процесс, содержащий сигнал свободной составляющей. Указанный участок осциллограммы состоит из суммы сигналов свободной составляющей и напряжения несимметрии.

Осциллограмма переходного процесса в КНП сети полученная в действующей электрической сети на 1 секции шин ПС «Россия», г. Оренбург приведена на рисунке Пб. На осциллограмме можно визуальнo различить участок стационарного режима и участок переходного процесса.

Для получения сигнала свободной составляющей, из участка осциллограммы переходного процесса вычитается сигнал стационарного режима. Особенностью вычитания является то, что начальный фазовый угол между основными гармониками вычитаемого и уменьшаемого компонентов должен быть

равен нулю. Результатом корректного вычитания будет разностный сигнал, представленный на рисунке П7.

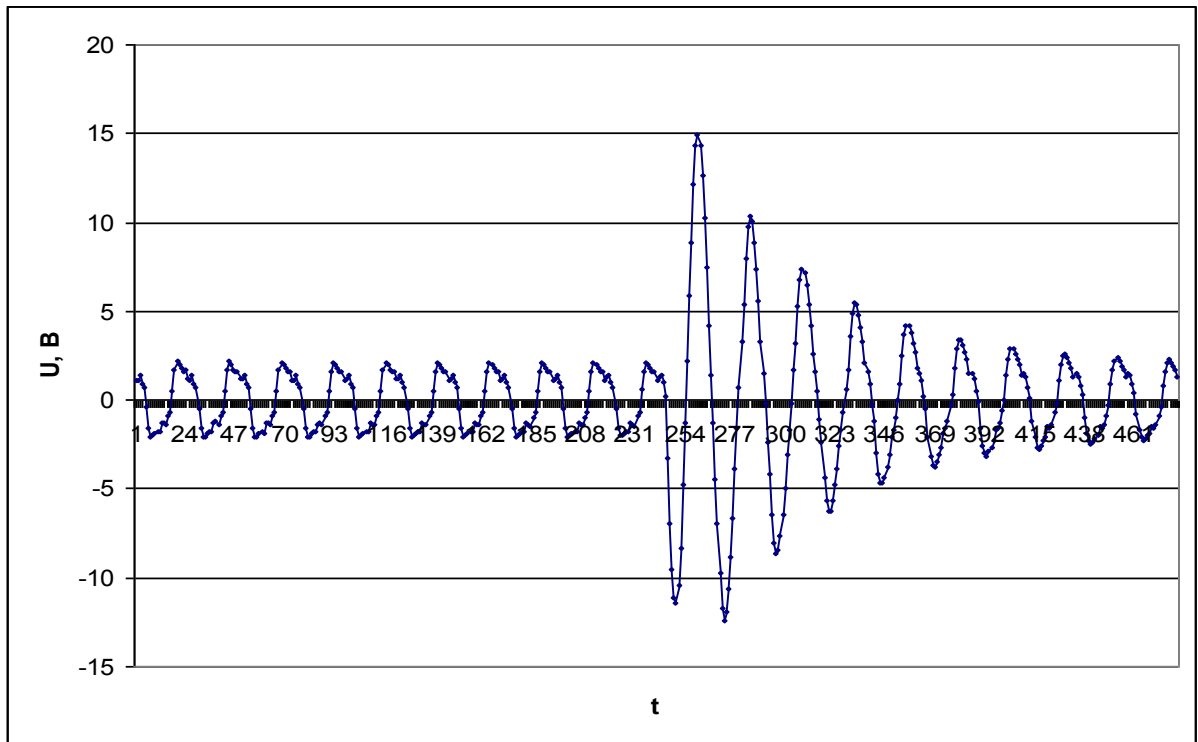


Рисунок П6 – Осциллограмма измерительного процесса в КНП

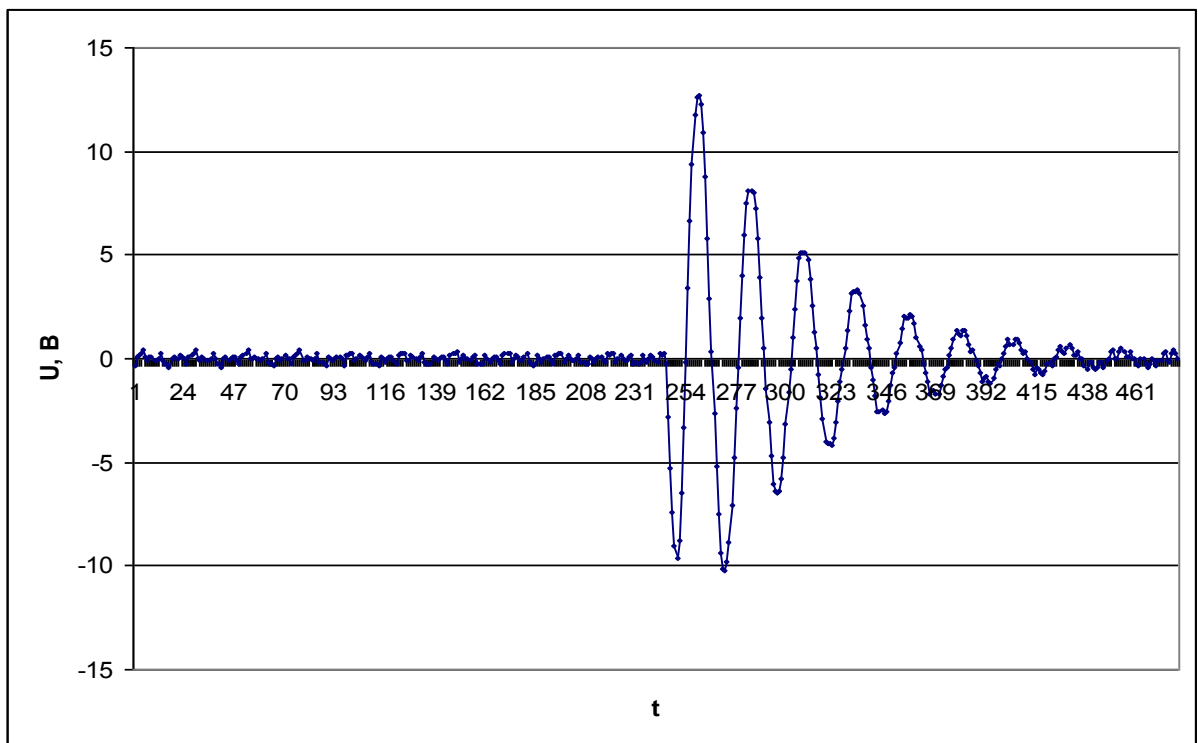


Рисунок П7 – Корректный разностный сигнал свободной составляющей

Как видно из разностного сигнала, представленного на рисунке П7, амплитуда левой половины сигнала стала близкой нулю, что объясняется

вычитанием сигнала принужденной составляющей из самого себя. Затем следует кратковременный участок сигнала принужденной составляющей, обусловленной действующим источником возмущения, а далее следует практически неискаженный сигнал свободной составляющей.

На рисунке П8 представлен вид разностного сигнала полученного при допущении фазового угла между уменьшаемым и вычитаемым в 15 градусов, что соответствует одному отсчету аналого-цифрового преобразователя с частотой 1200 Гц. При визуальном сравнении разностных сигналов, представленных на рисунках П7 и П8, можно отметить что левая часть сигнала, полученного с фазовой ошибкой, является значительно более зашумленной, по сравнению с аналогичным участком корректного разностного сигнала.

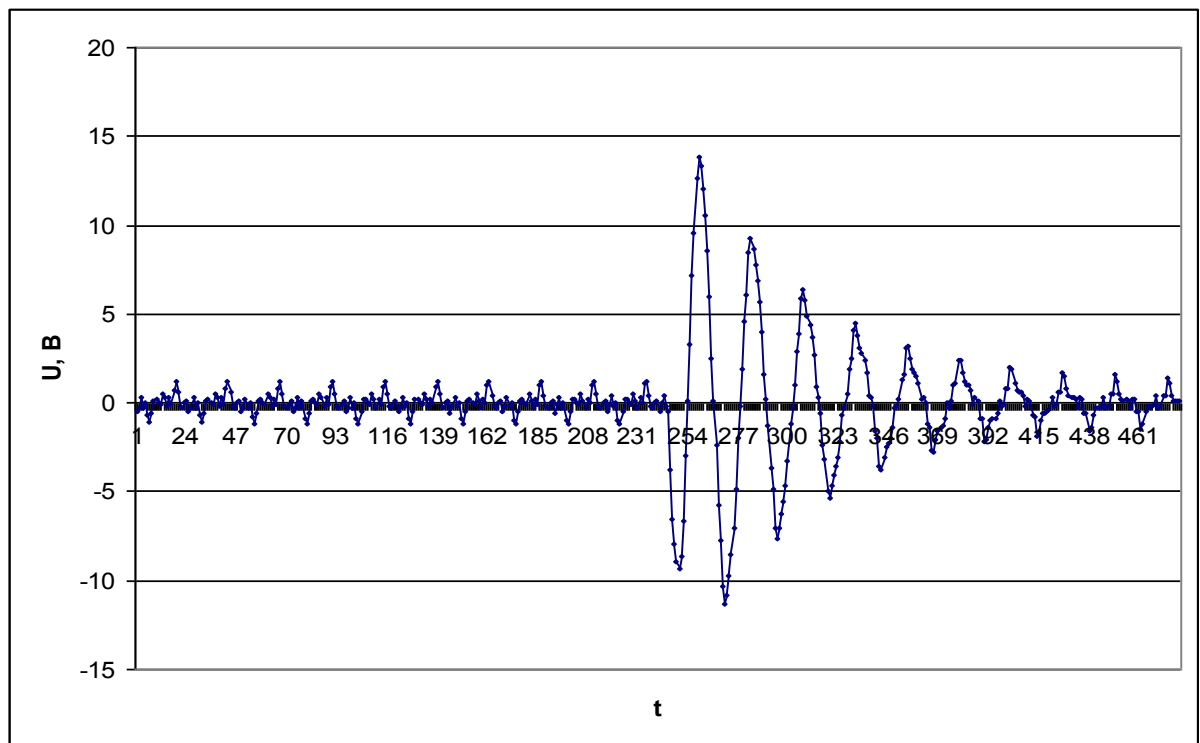


Рисунок П8 – Разностный сигнал с фазовой ошибкой при вычитании

В правой части сигнала так же наблюдается существенное искажение свободной составляющей дополнительными гармоническими составляющими. Картина искажения разностного сигнала будет наблюдаться и для любого другого угла фазового сдвига. Искажения будут тем больше, чем больше разность фаз между уменьшаемым и вычитаемым сигналами.

Таким образом, показана необходимость четкого согласования (совмещения) по фазе вычитаемого и уменьшаемого сигналов для получения разностного сигнала с минимальными искажениями.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Программа оценки величины относительной методической погрешности при  
измерении частоты и коэффициента затухания в среде MatLab

```

% main.m
% Анализ относительной методической погрешности
% определения периода и коэффициента затухания
% свободной составляющей переходного процесса
clear all; clc;
format long g;
global BETA OMEGA PHASE % глобальные переменные:
OMEGA = 2*pi*42; % начальная угловая частота сигнала
PHASE=13*pi/180; % начальная фаза сигнала
BETA=12; % начальный коэффициент
% затухания сигнала
F=20:5:80; % массив частот для анализа
% погрешности определения
% периода
B=5:5:90; % массив коэффициентов
% затухания для анализа
% погрешности определения
% коэффициента затухания
massfreqs=1000:100:6000; % массив частот дискретизации
% для анализа погрешности
% определения периода

periods_find_error = find_period_error(massfreqs, F);
deccoef_find_error = find_deccoef_error(massfreqs, B);

per_fig = figure('Name','Periods Defenition
Errors','NumberTitle','off');
[X,Y] = meshgrid(F,massfreqs);

mesh(X,Y, periods_find_error);

```

```

colormap gray;

per_x = xlabel('Частота сигнала');
per_y = ylabel('Частота дискретизации');
per_z = zlabel('Относительная погрешность');

dec_fig      =      figure('Name','Decay      Coefs      Defenition
Errors','NumberTitle','off');
[X,Y] = meshgrid(B,massfreqs);
%surf1(X,Y, nevyaz_abs);
%axes(dec_ax);
mesh(X,Y, deccoef_find_error);

colormap gray;

dec_x = xlabel('Коэффициент затухания');
dec_y = ylabel('Частота дискретизации');
dec_z = zlabel('Относительная погрешность');
% find_period_error.m
% FIND_PERIOD_ERROR функция оценки величины
%  относительной погрешности определения периода свободной
составляющей
% переходного процесса при изменении
function nevyaz_otn = find_period_error(massfreqs, F)
global BETA OMEGA PHASE
periods_count = 2;
lengdfreqs = length(massfreqs);
lengF = length(F);
nevyaz_abs  = zeros(lengdfreqs,lengF);
nevyaz_otn  = zeros(lengdfreqs,lengF);
periods     = zeros(1,20);
counter     = 0;
zerocross   = zeros(1,2);
for l = 1:lengdfreqs
    for k=1:lengF
        OMEGA = 2*pi*F(k);

```

```

t1=0:1/massfreqs(1):periods_count/F(k);
for j=1:length(t1)-1
    if (sinus(t1(j)) < 0 && sinus(t1(j+1)) > 0) ||
        ((sinus(t1(j)) > 0 && sinus(t1(j+1)) < 0))
        counter=counter+1;
        zerocross(counter)=(sinus(t1(j))*t1(j+1)-
            sinus(t1(j+1))*t1(j))/(sinus(t1(j))-
            sinus(t1(j+1)));
    else
        if (sinus(t1(j)) == 0 && sinus(t1(j+1)) ~= 0)
            counter=counter+1;
            zerocross(counter)=t1(j);
        end
    end
end
if counter == 20
    break;
end
end
for j=2:counter
    periods(j-1)=zerocross(j)-zerocross(j-1);
end
period = sum(periods(1:counter-1))/(counter-1);
nevyaz_abs(1,k) = abs(2*period-1/F(k));
nevyaz_otn(1,k) = nevyaz_abs(1,k)*F(k)*100;
counter=0;
end
end
OMEGA = 2*pi*42;

% find_deccoef_error.m
% FIND_DECCOEF_ERROR функция определения величины погрешности
% определения коэффициента затухания свободной составляющей
% переходного процесса при изменении коэффициента затухания сигнала
% и частоты дискретизации
function nevyaz_otn = find_deccoef_error(massfreqs, B)
global BETA OMEGA PHASE

```



```

periods_count = 3;
lengdfreqs = length(massfreqs);
lengB      = length(B);
nevyaz_abs = zeros(lengdfreqs,lengB);
nevyaz_otn = zeros(lengdfreqs,lengB);
counter     = 0;
leng_max_array = 20;
maxs_array = zeros(1,leng_max_array);
maxs_times_array = zeros(1,leng_max_array);
for i=1:lengdfreqs
    for j=1:lengB
        BETA = B(j);
        t1=0:1/massfreqs(i):periods_count/(OMEGA/2/pi);
        for k=3:length(t1)-2
            if sinus(t1(k-2)) < sinus(t1(k-1)) && sinus(t1(k-1)) <=
                sinus(t1(k)) && sinus(t1(k)) >= sinus(t1(k+1)) &&
                sinus(t1(k+1)) > sinus(t1(k+2))
                if sinus(t1(k)) > 0
                    counter = counter + 1;
                    maxs_array(counter) = sinus(t1(k));
                    maxs_times_array(counter) = t1(k);
                    continue;
                end
            end
            if sinus(t1(k-2)) > sinus(t1(k-1)) && sinus(t1(k-1)) >=
                sinus(t1(k)) && sinus(t1(k)) <= sinus(t1(k+1)) &&
                sinus(t1(k+1)) < sinus(t1(k+2))
                if sinus(t1(k)) < 0
                    counter = counter + 1;
                    maxs_array(counter) = abs(sinus(t1(k)));
                    maxs_times_array(counter) = t1(k);
                    continue;
                end
            end
        end
        if counter == leng_max_array
            break;
        end
    end
end

```

```

        end
    end
    sum_t_ln =
sum(maxs_times_array(1:counter).*log(maxs_array(1:counter)));
    sum_t = sum(maxs_times_array(1:counter));
    sum_ln = sum(log(maxs_array(1:counter)));
    sum_t2 = sum(maxs_times_array(1:counter).^2);

    decay_coef = (1/counter*sum_t_ln-
1/counter*sum_t*1/counter*sum_ln)/(1/counter*sum_t2-
1/counter*sum_t*1/counter*sum_t);
    nevyaz_abs(i,j)=abs(abs(decay_coef)-BETA);
    nevyaz_otn(i,j)=nevyaz_abs(i,j)/BETA*100;
    counter=0;
end
end
BETA = 12;

% sinus.m
% SINUS функция определения значения сигнала в момент времени
% t
function U = sinus(t)
global BETA OMEGA PHASE;
U=100*exp(-BETA*t)*sin(OMEGA*t-PHASE);

```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

## Материалы о внедрении



ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ  
КОМПАНИЯ ЦЕНТРА И ПРИВОЛЖЬЯ»  
Почтовый адрес: 603950, Россия, г. Нижний Новгород,  
ул. Рождественская, 33.  
Тел.: +7 (831) 431-83-11, +7 (831) 431-83-09  
Факс: +7 (831) 433-38-06  
e-mail: info@mrsk-cp.ru, сайт: www.mrsk-cp.ru  
ИНН: 5260200603

03.04.2018  
№ \_\_\_\_\_  
от \_\_\_\_\_

№ 8/Н  
от \_\_\_\_\_

### СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ результатов диссертационной работы

Результаты теоретических исследований, рекомендации и технические решения, отраженные в кандидатской диссертации И.В. Соловьёва внедрены и используются на подстанциях ПАО «МРСК Центра и Приволжья» в составе серийного оборудования – микропроцессорных терминалов автоматики управления дугогасящими реакторами (ДГР) серии «Бреслер-0107.060».

На объектах ПАО «МРСК Центра и Приволжья» в настоящее время 60 дугогасящих реактора управляется устройствами автоматики данной серии.

Автоматика управления дугогасящими реакторами серии «Бреслер-0107.060» обладает улучшенными свойствами: более точную настройку ДГР в сетях с низкой добротностью и с незначительным смещением потенциала нейтрали сети, чем ранее устанавливаемые модели автоматики. Статистика использования приводится в приложении.

Первый заместитель генерального директора –  
главный инженер ПАО «МРСК Центра» –  
управляющей организации  
ПАО «МРСК Центра и Приволжья»

  
А.В. Пилюгин  




Публичное акционерное общество  
«Межрегиональная распределительная  
сетевая компания Волги»  
410031, РФ, г. Саратов, ул. Первомайская, 42/44  
телефон: (8452) 30-26-32 факс: (8452) 28-32-02  
e-mail: office@mrsk-volgi.ru www.mrsk-volgi.ru

14.03.2018 г. № МР6/5/1245

№ \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_  
Председателю диссертационного  
совета Д212.301.02  
Г.А. Белову  
428000, Чувашская Республика  
г. Чебоксары,  
Московский просп., д. 15

Директору  
ООО «НПП Бреслер»  
Н.С. Ефимову  
428000, Чувашская Республика,  
г. Чебоксары,  
ул. Афанасьева, д. 13

### СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ результатов диссертационной работы

Результаты теоретических исследований, рекомендации и технические решения, отраженные в кандидатской диссертации Соловьёва Игоря Валерьевича по теме «Совершенствование управления компенсацией емкостных токов однофазного замыкания на «землю» в распределительных электрических сетях» в виде разработанных микропроцессорных терминалов автоматики управления дугогасящими реакторами (ДГР) серии «Бреслер-0107.060», внедрены в составе оборудования для компенсации ёмкостных токов применяемого в ПАО «МРСК Волги». Автоматика управления дугогасящими реакторами серии «Бреслер-0107.060», серийно изготавливаемая предприятием ООО «НПП Бреслер», успешно эксплуатируется на электросетевых объектах ПАО «МРСК Волги», обеспечивая точную настройку ДГР в сетях 6-10 кВ с низкой добротностью и с незначительным смещением потенциала нейтрали сети.

Заместитель Генерального директора –  
главный инженер

О.Г. Павлов

Багаев Д.В.  
(8452) 30-24-94  
Александров А.С.  
(8452) 30-24-12



Сертифицировано  
Русским Регистром

**ОАО «СЕТЕВАЯ  
КОМПАНИЯ»**

ЗАМЕСТИТЕЛЬ  
ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА –  
ТЕХНИЧЕСКИЙ ДИРЕКТОР

Республика Татарстан, 420094  
Казань, ул. Бондаренко, 3  
Телефон (843) 291-82-49

22.03.2018 № 207-24-1252

На № 03/20452 от 06.03.2018

Об устройствах автоматики  
управления ДГР

Техническому директору  
ООО «НПП Бреслер»

А.В. Булычеву

Председателю  
диссертационного совета  
Д212.301.02  
д.т.н., профессору

Г.А. Белову

**Уважаемый Александр Витальевич!**

Результаты теоретических исследований, рекомендации и технические решения, отраженные в кандидатской диссертации И.В. Соловьёва, внедрены и используются на подстанциях ОАО «Сетевая компания» Республики Татарстан в составе серийного оборудования – микропроцессорных терминалов автоматики управления дугогасящими реакторами (ДГР) серии «Бреслер-0107.060».

В настоящее время на объектах ОАО «Сетевая компания» устройствами автоматики данной серии управляется 34 дугогасящих реактора.

Автоматика управления дугогасящими реакторами серии «Бреслер-0107.060» обладает улучшенными свойствами: обеспечивает существенно более точную настройку ДГР в сетях с низкой добротностью и с незначительным смещением потенциала нейтрали сети.



И.Р. Галимзянов



Сергеев, 8(843)200-00-97  
Николаев, 8(843)291-85-85

**Общество с ограниченной ответственностью  
«НПП Бреслер»**

428018, г.Чебоксары, ул. Афанасьева, д.13; т/ф. (8352) 459191, 459596; 459488  
E-mail: info@bresler.ru; WWW: http://www.bresler.ru; ИНН 2129053901; КПП 213001001; ОКПО 71026440; ОКВЭД  
73.10, 72.20; ОГРН 1042129004906; Р/сч.40702810775020161729 в Отделении №8613 Сбербанка России  
г.Чебоксары;  
К/сч. 30101810300000000609; БИК 049706609

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор

\_\_\_\_\_  
Н.С. Ефимов



«18» декабря 2017 г.

**АКТ**

**об использовании результатов диссертационной работы**

Мы, нижеподписавшиеся, соискатель Соловьёв Игорь Валерьевич, с одной стороны, и представитель предприятия ООО «НПП Бреслер» в лице главного конструктора Козлова Владимира Николаевича, с другой стороны, составили настоящий акт в том, что результаты научных исследований, отраженные в кандидатской диссертации И.В. Соловьёва «СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАЦИЕЙ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ» и опубликованные в открытой печати, использованы при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР):

1. «Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ» по договору №4194 от 10.11.2015 г.
2. «Разработка и изготовление статического дугогасящего агрегата сухого исполнения для компенсации емкостных токов в сетях 6-10 кВ» по договору №1320-001361 от 27.11.2013 г.
3. «Исследование, разработка и внедрение быстродействующей системы автоматического регулирования тока компенсации в сетях 6-35 кВ» по договору №2364 от 23.12.2011 г.
4. «Разработка системы подавления однофазных замыканий на «землю» и определения поврежденных присоединений в распределительных сетях 6-35 кВ» по договору №2310 от 23.12.2011 г.
5. «Разработка силового оборудования сухого исполнения для компенсации емкостных токов в распределительных сетях 6-10 кВ» по договору №2540 от 12.07.2012 г.
6. «Разработка и исследование системы заземления нейтрали распределительной сети с компенсацией полного тока замыкания на «землю» и активным принудительным гашением дуги в месте повреждения» по договору №3566/1630-002252 от 10.05.2016 г.

И.В. Соловьёв

В.Н. Козлов

Общество с ограниченной ответственностью  
«НПП Бреслер»

428018, г.Чебоксары, ул. Афанасьева, д.13; т/ф. (8352) 459191, 459596; 459488  
E-mail: [info@bresler.ru](mailto:info@bresler.ru); WWW: <http://www.bresler.ru>; ИНН 2129053901; КПП 213001001; ОКПО 71026440; ОКВЭД  
73.10, 72.20; ОГРН 1042129004906; Р/сч.40702810775020161729 в Отделении №8613 Сбербанка России  
г.Чебоксары;  
К/сч. 30101810300000000609; БИК 049706609

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор

Н.С. Ефимов



«15» января 2018 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы

Мы, нижеподписавшиеся, соискатель Соловьёв Игорь Валерьевич, с одной стороны, и представитель предприятия ООО «НПП Бреслер» в лице главного конструктора Козлова Владимира Николаевича, с другой стороны, составили настоящий акт в том, что результаты научных исследований, отраженные в кандидатской диссертации И.В. Соловьёва «СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАЦИЕЙ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ» и опубликованные в открытой печати, использованы при разработке серийно выпускаемого микропроцессорного терминала автоматки управления дугогасящими реакторами серии «Бреслер-0107.060».

Под руководством и при непосредственном участии И.В. Соловьёва в период с 2008 г. по 2018 г. выпущено, смонтировано и введено в эксплуатацию в энергосистемах России и ближнего зарубежья более 420 комплектов автоматки управления дугогасящими реакторами.

И.В. Соловьёв

В.Н. Козлов



Негосударственное образовательное учреждение  
дополнительного профессионального образования  
**«Институт повышения квалификации  
специалистов релейной защиты и  
автоматики»  
(НОУ ДПО «ИПК РЗА»)**  
Чувашская Республика,  
428018, г. Чебоксары, ул. Афанасьева, д. 13.  
Тел. тел. (8352) 45-91-91, 45-95-96

**СПРАВКА**  
**об использовании результатов диссертационной работы**

Результаты научных исследований, представленные в кандидатской диссертации И.В. Соловьёва *«Совершенствование управления компенсацией емкостных токов замыкания на землю в распределительных электрических сетях»*, нашедшие отражение в его публикациях научного и научно-методического характера, используются на лекционных, практических и семинарских занятиях в учебном процессе НОУ ДПО «ИПК РЗА» при повышении квалификации специалистов электроэнергетических систем России и ближнего зарубежья.

Директор, д.т.н., профессор

19.02.2018



А.В. Бульчев