

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –  
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»

На правах рукописи

ЦЕДЯКОВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ  
ВРЕМЕНИ ПЕРЕРЫВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ  
ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ 6-10 кВ

Специальность: 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и  
энергоснабжение агропромышленного комплекса

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
Лещинская Тамара Борисовна,  
доктор технических наук,  
профессор

Москва – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
<b>ГЛАВА I</b>	
<b>СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ</b>	
ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1. Оценка надежности схем электроснабжения 6-10 кВ.....	11
1.2. Основные типы микропроцессорных и полупроводниковых защит от однофазных замыканий на землю в сетях 6-10 кВ.....	20
1.3. Оценка возможности применения различных трансформаторов и датчиков тока для питания токовых цепей микропроцессорных и полупроводниковых устройств защиты и сигнализации.....	25
1.4. Существующие методы расчета трансформаторов тока.....	32
1.5. Фильтры токов нулевой последовательности для распределительных устройств с воздушным выводом отходящих линий 6-10 кВ.....	38
Выводы по главе.....	42
<b>ГЛАВА II</b>	
<b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ ДАТЧИКА ТОКА.....</b>	
2.1. Аппроксимация кривой намагничивания датчика тока.....	46
2.2. Метод расчета датчиков тока при кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания сердечника.....	47
2.3. Расчет характеристик датчиков тока при использовании аналитической аппроксимации кривой намагничивания.....	58

2.4. Анализ результатов расчета характеристик датчика тока различными методами.....	65
Выводы по главе.....	66

### ГЛАВА III

РАЗРАБОТКА МАКЕТА ДАТЧИКА ТОКА ДЛЯ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ И СИГНАЛИЗАЦИИ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ СЕЛЬСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ.....	68
3.1. Параметры датчиков тока накладного типа для распределительных устройств 6-10 кВ.....	68
3.2. Характеристики датчиков тока.....	72
3.3. Регулировка вторичных токов и напряжений.....	76
3.4. Параметры датчиков тока для РУ 6-10 кВ.....	82
Выводы по главе.....	83

### ГЛАВА IV

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ ТОКОВ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НА РАЗРАБОТАННЫХ ДАТЧИКАХ ТОКА.....	86
4.1. Теоретические исследования фильтров токов нулевой последовательности на датчиках тока.....	86
4.2. Экспериментальные исследования и выбор оптимальных параметров двухконтурной схемы, фильтра токов нулевой последовательности.....	101
4.3. Экспериментальные исследования и выбор оптимальных параметров двухконтурной схемы, фильтра токов нулевой последовательности.....	114
Выводы по главе.....	125

## ГЛАВА V

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВА СИГНАЛИЗАЦИИ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ НА СЕЛЬСКИХ ПОДСТАНЦИЯХ.....	127
5.1. Реализация селективной сигнализации замыканий на землю в сельских сетях 6-10 кВ на основе двухконтурного фильтра токов нулевой последовательности.....	127
5.2. Оценка показателей надежности электроснабжения потребителей и схемно-аппаратная надежность устройства.....	132
5.3. Сравнительная экономическая оценка вариантов выполнения селективной сигнализации замыканий на землю сельских линий 6-10 кВ.....	134
Выводы по главе.....	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	138
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	140
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Аппроксимация кривой намагничивания датчика тока различными методами.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Защита от перенапряжений во вторичной цепи и датчики тока в трехфазных схемах.....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Сравнительный анализ ФТНП.....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Протокол испытания устройства селективной сигнализации замыканий на землю в воздушных линиях 6-10 кВ.....	167

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность работы**

Широкое внедрение электрической энергии в сельскохозяйственное производство обеспечивает высокий уровень электромеханизации и автоматизации производственных процессов, является основой повышения производительности труда, снижения себестоимости сельскохозяйственной продукции, облегчения труда и улучшения культурно-бытовых условий жизни сельского населения.

Сельское хозяйство по энергопотреблению стремится к современному промышленному производству, поэтому надежность передачи и качество электрической энергии должны соответствовать возрастающим требованиям сельскохозяйственных потребителей. Возникновение перерывов в электроснабжении может привести к значительному народнохозяйственному ущербу при наличии безостановочных производственных процессов и автоматизированных поточных линий.

В связи с этим проблема обеспечения надежности электроснабжения приобретает особое значение и ей посвящены многочисленные исследования [1,2,3,4,5,6,7,8].

Для повышения надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей необходимо применение целого комплекса мероприятий по обеспечению бесперебойной передачи электроэнергии, важное место в котором отводится устройствам релейной защиты и сигнализации от аварийных и ненормальных режимов работы в распределительных сетях напряжением 6-10 кВ [1,2].

Как показывают исследования, наиболее частым видом повреждений в сильно разветвленных сельских сетях 6-10 кВ являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), которые наряду с перерывами электроснабжения вызывают возникновения электропожаров и поражения людей и животных электрическим

током. Поэтому вопросы обнаружения и поиска однофазных замыканий на землю в сельских распределительных сетях приобретают особо актуальное значение.

Для сельских подстанций 35-110/6-10 кВ находящихся в эксплуатации, отходящие линии которых выполнены с воздушными выводами, применение и выполнение селективной сигнализации требует существенных дополнительных затрат. Связанных с установкой кабельных вставок или выводов и реконструкцией схемы первичной коммутации. С другой стороны, отсутствие селективной сигнализации замыканий на землю объясняется недостаточным количеством трансформаторов тока и низкой чувствительностью к малым токам замыкания фильтра токов нулевой последовательности (ФТНП) выполненных на стандартных трансформаторах тока.

В связи с этим, основной задачей диссертационной работы является разработка простых и недорогих первичных преобразователей или датчиков тока (ДТ) [9], которые устанавливаются в РУ без реконструкции схемы первичной коммутации и обеспечивают построение ФТНП для подключения селективной сигнализации замыканий на землю линий 6-10 кВ, имеющих воздушный вывод из распределительного устройства (РУ).

### **Степень разработанности направления исследований**

Вопросам оценки и повышения уровня надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей посвящен ряд работ отечественных ученых И.А Будзко, Н. М. Зуль, М.С. Левин, Т.Б. Лещинская, И.В. Наумов, С.С. и других. Для повышения надежности электроснабжения потребителей необходимо применение комплекса специальных мер и средств, к которым относятся: секционирующие выключатели, линейные разъединители, пункты автоматического включения резерва (АВР), а так же устройства и приборы обнаружения мест повреждения в сетях 6-10 кВ.

Изучением вопросов по разработке и совершенствованию релейных защит от однофазных замыканий на землю занимались ведущие ученые: Шуин В.А, Сирота И.М, Шабад М.А, Шалин А.И, Сапунков М.Л и другие. На сегодняшний день существует большое количество устройств защиты и сигнализации от ОЗЗ

предназначенных для работы с внешними (не входящими в состав прибора или устройства) первичными трансформаторами (датчиками) тока и напряжения. Но большинство сельскохозяйственных подстанций 35-110/6-10 кВ с воздушными выводами отходящих линий не имеют защит от ОЗЗ, в связи с невозможностью подключения, что объясняется отсутствием или не достаточным количеством трансформаторов (датчиков) тока. На таких подстанциях имеется только общесекционная сигнализация, которая не позволяет селективно определять поврежденную линию.

Многочисленные исследования российских и зарубежных ученых посвящены расчету и анализу режимов работы трансформаторов тока в схемах защит, что отражено в трудах Федосеева А.М., Roberts J., Дроздова А.Д., Hanninen S., Казанского В.Е и других. В работах этих ученых подробно рассмотрены существующие методы расчета установившихся и переходных процессов в трансформаторах тока. Рекомендуется производить анализ работы датчиков тока в широком диапазоне первичных токов и сопротивлений нагрузки с помощью компьютерных программ для более точного выражения кривой намагничивания.

### **Цель работы**

Повышение надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей за счет снижения времени перерыва электроснабжения при однофазных замыканиях на землю в воздушных линиях 6-10 кВ.

### **Объект и предмет исследования**

Объект исследования: Сельские воздушные линии электропередач напряжением 6-10 кВ.

Предмет исследования: Показатели надежности электроснабжения сельских воздушных линий напряжением 6-10 кВ.

### **Основные задачи исследований**

1). Оценить надежность электроснабжения сельскохозяйственных потребителей по времени перерыва электроснабжения при однофазных

замыканиях на землю и провести анализ современных устройств защиты и сигнализации однофазных замыканий на землю.

2). Разработать математическую модель трансформаторного датчика тока для расчета характеристик и анализа режимов работы в схемах защит.

3). Разработать макет датчика тока для микропроцессорных и полупроводниковых устройств защиты и сигнализации замыканий на землю.

4). Исследовать фильтр токов нулевой последовательности на разработанных датчиках тока для устройств селективной сигнализации замыканий на землю воздушных линий 6-10 кВ, обеспечивающих снижение времени перерыва электроснабжения.

5). Провести технико-экономические расчеты предложенного варианта и определить время перерыва электроснабжения сельских потребителей.

### **Методы исследования**

При выполнении диссертационной работы производились расчеты с использованием теории электрических цепей, осуществлялись лабораторные и производственные испытания. Моделирование процессов выполнялось в программном комплексе MatLab Simulink, численный анализ с использованием компьютерной программы MathCAD.

### **Достоверность и обоснованность результатов исследования**

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается хорошим совпадением расчетных и экспериментальных данных, результатами проведенных лабораторных и производственных испытаний устройства селективной сигнализации по определению поврежденной линии, устанавливаемого в шкафах комплектных распределительных устройств наружной установки (КРУН) с воздушными выводами отходящих линий.

### **Научная новизна работы**

1). Разработана математическая модель трансформаторного датчика тока и алгоритм расчета характеристик в режиме холостого хода и нагрузки.



2). Разработан алгоритм, определения соотношения витков вторичных обмоток датчиков тока, образующих ФТНП для определения поврежденной линии, сокращающий время перерыва подачи электроэнергии потребителям и повышающий надежность электроснабжения.

### **Практическая значимость работы**

Разработанная модель датчика тока накладного типа может использоваться в схемах фильтров токов нулевой последовательности для подключения селективной сигнализации ОЗЗ и определения поврежденной линии, снижая время перерыва электроснабжения и повышая надежность сельскохозяйственных потребителей.

### **Положения, выносимые на защиту**

1). Разработанная математическая модель трансформаторного датчика тока накладного типа для установки на проходные изоляторы шкафов КРУН отходящих линий 6-10 кВ и результаты исследований, подтвержденные расчетами и лабораторными испытаниями характеризующие основные параметры датчиков тока.

2). Разработанный макет датчика тока накладного типа для установки на проходные изоляторы шкафов КРУН 6-10 кВ с воздушными выводами отходящих линий.

3). Результаты исследований определения чувствительности ФТНП, подтверждающие, что сигнализация ОЗЗ подключенная к ФТНП на разработанных датчиках тока селективно определяла поврежденное присоединение, тем самым способствуя снижению времени перерыва электроснабжения в среднем на 2 часа и уменьшению ущерба от недоотпуска электроэнергии на 2034000 рублей.

### **Апробация работы**

Результаты исследований диссертационной работы были представлены и обсуждались на международных и российских научных конференциях, научных семинарах, круглых столах:

- международная научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава, посвященная 155-летию РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия, 02-04 декабря 2020 г.;

- International conference «The Electrochemical Society: earth and environmental science, Orlando, FL, Oct 10-14, 2021;

- IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Scopus), Feb 17, 2022.

### **Публикации**

По теме опубликовано 5 печатных научных работ, в том числе 1 работа в рецензируемых изданиях из перечня ВАК Российской Федерации, 2 работы включены в научную базу Scopus, 2 работы в прочих изданиях.

### **Объем и структура работы**

Диссертационная работа изложена на 171 странице, состоит из введения, пяти глав основной части, содержащей 58 рисунков, 19 таблиц, заключения, принятых сокращений, списка литературы, включающего 101 наименование, в том числе 6 – на иностранном языке и 4 приложений.

Работа выполнялась на кафедре «Электроснабжение и электротехника имени академика И.А. Будзко» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» в период 2019-2022 год. Экспериментальные исследования однофазных замыканий проводились в 2021-2022 году в сетях 10 кВ ПАО «Россети» Можайский РЭС.

## **Глава I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **1.1. Оценка надежности схем электроснабжения 6-35 кВ**

Надежность электроснабжения – это способность электрической системы в любой момент времени снабжать электрической энергией присоединенных к ней потребителей.

Нарушение надежности, то есть перерывы в электроснабжении, в зависимости от вида потребителей могут приводить к возникновению опасности для жизни людей и значительному ущербу сельскохозяйственному производству, и поэтому повышение надежности электроснабжения всегда было одной из главных задач электроснабжения.

Вопросам оценки и повышения уровня надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей посвящен ряд работ отечественных ученых И.А Будзко, Н. М. Зуль, М.С. Левин, Т.Б. Лещинская, И.В. Наумов, С.С. и других.

Надежность схем электроснабжения можно оценить, если известно время перерыва электроснабжения потребителей в год. Произвести расчет данного времени перерыва можно двумя способами: по традиционной методике и по методике ОАО «РОСЭП», зная удельную продолжительность отключений элементов схемы, полученную путем анализа среднестатистических данных по регионам России специально для сельских сетей.

Показателями уровня надежности электроснабжения потребителей сельских районов, являются: параметры потока отказов элементов системы электроснабжения (силовых трансформаторов, выключателей, разъединителей, сборных шин, линий электропередач разных напряжений и опор, двигателей и т.п.). Эти данные получены в результате статистической обработки информации всех энергосистем России об отказах и плановых отключениях[1].

В результате отказов и плановых отключений потребители недополучают электроэнергию, что приводит к недоотпуску электроэнергии и ущербу от недоотпуска электроэнергии.

Недоотпуск электроэнергии потребителям также является показателем уровня надежности. Однако потребители электроэнергии отличаются друг от друга мощностью, графиком работы, стоимостью производимой продукции и не могут оцениваться единым показателем надежности. Для предприятий различных направлений (птицефабрика, ферма КРС, молокозавод, тепличный комбинат и др.) единым показателем уровня надежности может рассматриваться ущерб от недоотпуска электроэнергии [1]:

$$Y = Y_0 \times W_{нед}, \quad (1.1)$$

где:  $Y_0$  – удельный ущерб от недоотпуска электроэнергии, руб/кВт.ч;  $W_{нед}$  – недоотпуск электроэнергии, из-за вероятных отказов элементов схемы, кВт.час.

$$W_{нед} = P_{\Sigma} \times T_{\Sigma}, \quad (1.2)$$

где:  $P_{\Sigma}$  – активная мощность, кВт;  $T_{\Sigma}$  – время перерыва электроснабжения потребителей, час.

Недоотпуск электроэнергии соответствует показателю уровня надежности для организаций по управлению единой общероссийской электрической сетью, принятом в приказе Минэнерго РФ от 29 ноября 2016 года №1256. Объем недоотпущенной электрической энергии в каждом расчетном периоде [10]:

$$P_{ens} = \sum_{j=1}^J P_j \times T_j, \quad (1.3)$$

где:  $P_j$  – объем фактической потребляемой мощности на присоединениях потребителей, по которым произошло  $j$ -ое прекращение передачи электрической энергии, кВт;  $T_j$  – продолжительность  $j$ -го прекращения передачи электрической энергии в результате технологического нарушения, час;  $J$  – количество прекращений передачи электрической энергии потребителям в расчетном периоде, шт.

Возможен расчет по показателям уровня надежности для территориальных сетевых организаций.

а). Показатель средней продолжительности прекращения передачи электрической энергии на точку поставки в каждом расчетном периоде регулирования в пределах долгосрочного периода регулирования ( $\Pi_{saidi}$ ) [10]:

$$\Pi_{saidi} = \frac{\sum_{j=1}^J N_j \times T_j}{N_t}, \quad (1.4)$$

где:  $N_j$  – количество точек поставки потребителей услуг сетевой организации, в отношении которых произошло  $j$ -ое прекращение передачи электрической энергии в рамках технологического нарушения, шт;  $N_t$  – максимальное за год число точек поставки потребителей услуг сетевой организации за  $t$ -й расчетный период регулирования, шт.

б). Показатель средней частоты прекращения передачи электрической энергии на точку поставки в каждом расчетном периоде регулирования в пределах долгосрочного периода регулирования ( $\Pi_{saifi}$ ) [10]:

$$\Pi_{saifi} = \frac{\sum_{j=1}^J N_j}{N_t}. \quad (1.5)$$

В таблице 1.1 приведены удельные ущербы для различных предприятий

Таблица 1.1- Средние удельные ущербы от перерывов в электроснабжении

№п/п	Предприятия	$Y_0$ , руб/кВт.ч
1	Комплексы молочного направления	1800
2	Фермы КРС	3100
3	Свинофермы	2900
4	Свинотоварные фермы	3900
5	Птицефабрики яичного направления	5700
6	Птицефабрики мясного направления	4400
7	Теплицы весенние	1700
8	Теплицы зимние	2130

Среднее значение удельного ущерба [1]:

$$Y_0 = 1800 \text{ руб/кВт.ч}$$

Надежность систем электроснабжения в зарубежных странах оценивается значениями времени перерыва электроснабжения потребителей за год и составляет [1]:

$$T_{\text{год}} = 7-10 \text{ час/год}$$

Для России [1]:

$$T_{\text{год}} = 70-100 \text{ час/год}$$

Показатель времени перерыва электроснабжения потребителей за год может оценивать уровень надежности системы электроснабжения (СЭС) и принят в данной работе.

Для СЭС сельских районов в ОАО «РОСЭП» разработаны нормы надежности. Введено новое понятие: удельная повреждаемость элементов СЭС  $\alpha$  час/км.год, представленная в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Удельная повреждаемость элементов СЭС по данным ОАО «РОСЭП»

Элемент сети	Удельная продолжительность отключений		
	Условное обозначение	Единица	Значение
Питающая линия: - одноцепная 110 кВ - двухцепная 110 кВ - одноцепная 35 кВ - двухцепная 35 кВ	$\alpha_{\text{ПЛ}}$	ч/(км×год)	0,4 0,16 0,7 0,28
Распределительная линия: - ВЛ 10 кВ - ВЛ 0,38 кВ	$\alpha_{\text{РЛ}}$ $\alpha_{\text{НС}}$	ч/(км×год) ч/(км×год)	0,9 1,3...4,6
РТП 35...110/10 кВ: - однострансформаторная - двухтрансформаторная	$T_{\text{РТП}}$	ч/год	12 0
Потребительская подстанция	$T_{\text{ТП}}$	ч/год	12

В литературном источнике [11] даются следующие рекомендации по обеспечению нормативных уровней надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей.

Потребители I категории надежности не должны отключаться от электроснабжения.

Потребители II категории разделяются на четыре типа и приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Нормы надежности электроснабжения потребителей II категории

Время одного отключения, $\tau$ (час/откл)	Количество отключений в год, $\omega_{II}$	Время отключенного состояния в год, $T_{откл}$ (час/год)	Нагрузка, S (кВА)
$\tau \leq 0,5$ час/откл	2,5	1,25 час/год	любая
$\tau \leq 4$ час/откл	2,3	9,2 час/год	любая
$4 \leq \tau \leq 10$ час/откл	0,1	1 час/год	более 120 кВА
$4 \leq \tau \leq 10$ час/откл	0,2	2 час/год	до 120 кВА

Для потребителей III категории:  $\tau \leq 24$  час/откл;  $\omega_{III} = 3$  откл;  $T_{откл} = 72$  час.

Ниже приведены результаты расчета уровня надежности самых распространенных вариантов схем электроснабжения, применяемых для питания сельскохозяйственных потребителей, приведенных на рисунке 1.1: схема (а) – одна питающая линия 35 или 110 кВ и один трансформатор на районной трансформаторной подстанции (РТП) 35...110/10 кВ; схема (б) – две питающие линии 35 или 110 кВ и два трансформатора на РТП 35...110/10 кВ.

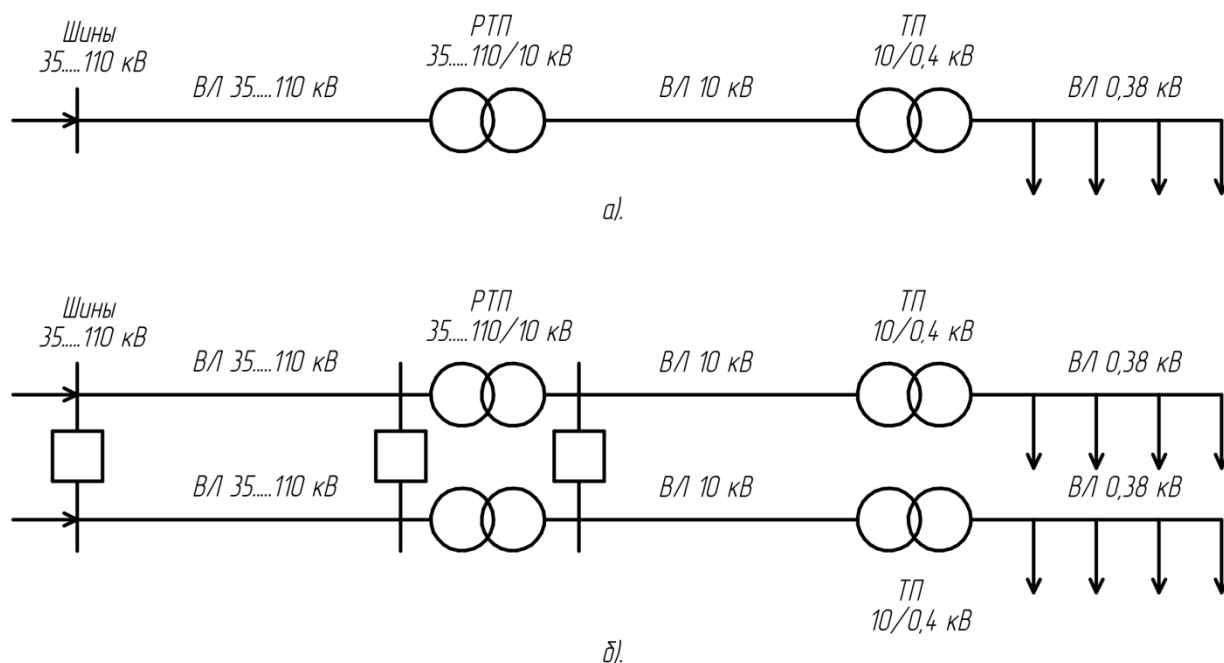


Рисунок 1.1- Схемы электроснабжения: (а) – с одной воздушной линией (ВЛ) 35...110 кВ и одним трансформатором на РТП; (б) – с двумя ВЛ 35...110 кВ и двумя трансформаторами на РТП.

Расчет проведен двумя способами: по методике ОАО «РОСЭП» и по традиционной методике, при следующих данных систем (110/10 и 35/10 кВ,  $L_{ВЛ110}=50$  км,  $L_{ВЛ35}=40$  км,  $L_{ВЛ10}=30$  км,  $L_{ВЛ0,38}=0,5$  км), для схем, рассмотренных выше.

Согласно методике ОАО «РОСЭП», время перерыва электроснабжения потребителей определяется по формуле [1]:

$$T = T_{ПЛ} + T_{РТП} + T_{ВЛ10} + T_{ТП} + T_{ВЛ0,38}, \quad (1.6)$$

где:  $T_{ПЛ}$ ,  $T_{ВЛ10}$ ,  $T_{ВЛ0,38}$  – время перерыва из-за отказов и плановых отключений в питающей и распределительных ВЛ;  $T_{РТП}$ ,  $T_{ТП}$  – время перерыва из-за отключений на районной и потребительских подстанциях.

По данным методики ОАО «РОСЭП», удельная продолжительность отключений для различных элементов схемы электроснабжения, представлена в таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Время перерыва электроснабжения потребителей за год

Система электроснабжения	$T_{ПЛ}$ , ч	$T_{РТП}$ , ч	$T_{РЛ}$ , ч	$T_{ТП}$ , ч	$T_{ВЛ}$ , ч	Итого $T_{ПОТР}$ , ч
110/10/0,38 кВ (одна ВЛ 110 кВ, один трансформатор 110/10 кВ)	19	12	27	2,7	2,15	63
110/10/0,38 кВ (две ВЛ 110 кВ, два трансформатора 110/10 кВ)	9	0	27	2,7	2,15	41
35/10/0,38 кВ (одна ВЛ 35 кВ, один трансформатор 35/10 кВ)	26	12	27	2,7	2,15	70
35/10/0,38 кВ (две ВЛ 35 кВ, два трансформатора 35/10 кВ)	11	0	27	2,7	2,15	43

Согласно традиционной методике, время перерыва электроснабжения потребителей определяется по формуле [1]:



$$T_{г.п} = \sum_{i=1}^n \omega_i \tau_i + \gamma \sum_{i=1}^n \mu_i t_{пл}, \quad (1.7)$$

где:  $\omega_i$  – частота аварийных отключений элементов схемы [для линий (км×год)<sup>-1</sup>, для трансформаторов (год<sup>-1</sup>)];  $\tau_i$  – продолжительность одного отказа, ч;  $\gamma$  – коэффициент учитывающий меньшую тяжесть плановых отключений 0,33[3];  $\mu_{п}$  – время перерыва электроснабжения за год из-за плановых отключений, час.

По данным традиционной методики, удельная продолжительность отключений для различных элементов схемы электроснабжения, представлена в таблице 1.5.

Таблица 1.5 - Время перерыва электроснабжения потребителей за год

Система электроснабжения	$T_{пл}$ , ч	$\mu_{пл}$ , ч	$T_{рп}$ , ч	$\mu_{рп}$ , ч	$T_{рл}$ , ч	$\mu_{рл}$ , ч	$T_{тп}$ , ч	$\mu_{тп}$ , ч	$T_{вл}$ , ч	$\mu_{вл}$ , ч	Итого $T_{потр}$ , ч
110/10/0,38 кВ (одна ВЛ 110 кВ, один трансформатор 110/10 кВ)	8,25	10,02	2,52	14,85	20,25	4,95	1,9	2,0	0,34	6,6	71
110/10/0,38 кВ (две ВЛ 110 кВ, два трансформатора 110/10 кВ)	6,73	9,0	0,97	8,91	20,25	4,95	1,9	2,0	0,34	6,6	62
35/10/0,38 кВ (одна ВЛ 35 кВ, один трансформатор 35/10 кВ)	10,8	5,94	2,9	12,4	20,25	4,95	1,9	2,0	0,34	6,6	68,1
35/10/0,38 кВ (две ВЛ 35 кВ, два трансформатора 35/10 кВ)	6,25	5,34	1,3	7,42	20,25	4,95	1,9	2,0	0,34	6,6	56,4

Полученные данные в таблицах 1.4 и 1.5 показывают, что применяемые для питания сельскохозяйственных потребителей схемы электроснабжения не обеспечивают нормируемого уровня надежности.

Самый ненадежный элемент – воздушные линии 10 кВ, с максимальным временем отключения  $T_{РЛ} = 27$  и  $T_{РЛ} = 20,25$  часа, поэтому необходимо применение специальных мер и средств, для повышения надежности электроснабжения потребителей. К средствам повышения надежности относятся: секционирующие выключатели (реклоузеры) [12], линейные разъединители, пункты автоматического включения резерва (АВР), а так же устройства и приборы обнаружения мест повреждения в сетях 10 кВ. Нормы надежности удаётся обеспечить, применяя все средства и мероприятия в комплексе [4].

Устройства защиты и сигнализации от аварийных и ненормальных режимов в распределительных сетях 10 кВ, позволяют существенно уменьшить время отключения потребителей и тем самым повысить надежность электроснабжения. Время отключения в распределительных линиях 10 кВ включает в себя:

$$T_{РЛ} = t_{информирования} + t_{поиска,обнаружения} + t_{отключения} + t_{ремонта} + t_{включения} \quad (1.8)$$

Время информирования ( $t_{информирования}$ ), отключения ( $t_{отключения}$ ) и включения ( $t_{включения}$ ) мало по продолжительности и составляет от нескольких секунд до нескольких минут. Поэтому модернизация в данном случае не приведет к значительному снижению времени отключения и повышению надежности электроснабжения потребителей.

Самую большую продолжительность имеют, время поиска и обнаружения ( $t_{поиска,обнаружения}$ ) и время ремонта ( $t_{ремонта}$ ). Время ремонта зависит от характера повреждения, квалификации ремонтного персонала, наличия запасных частей и качественного инструмента. Сокращение данного времени полностью зависит от электросетевых компаний, которые должны обеспечивать регулярное и профессиональное обучение ремонтного персонала, наличие качественного и современного инструмента для проведения ремонтных работ и запас необходимых запасных частей.

Время поиска и обнаружения места повреждения зависит от работы устройств релейной защиты и сигнализации, поэтому модернизация и совершенствование данных устройств играет важную роль в комплексе

мероприятий по повышению надежности электроснабжения сельских потребителей.

Однополюсные замыкания на землю – наиболее частый вид повреждения в воздушных распределительных сетях 6-10, 20, 35 кВ – составляют более 80 % от общего количества всех аварийных ситуаций и представляют опасность для жизни людей и животных, особенно в сельских сетях, проходящих по громадным территориям через населенные пункты. Согласно статистическим данным, время поиска поврежденного присоединения составляет 2 и более часа в 60% случаях от общего количества ОЗЗ, в 30% имеют длительность 1-2 часа и в 10% до 1 часа [13].

Большой процент травматизма [14] делает безотлагательным вопрос о применении чувствительных защит и защитной аппаратуры для быстрой ликвидации замыканий и комплекса совершенных устройств сигнализации и поиска при замыканиях на землю в целях максимального ускорения отыскания «земли».

Кроме того, продолжительное существование в сети однофазного замыкания на землю в 30-35% случаях переходит в междуфазные короткие замыкания с последующим нарушением электроснабжения [13,15].

В течении последних лет большое число работ выполнено по рассматриваемой проблеме применительно к условиям сельских схем электроснабжения, которые показали, что вопросы обнаружения и поиска замыканий на землю в сельских разветвленных сетях решаются применением комплекса устройств:

- устройств селективной сигнализации, определяющих поврежденную линию, которые устанавливаются на подстанции [16,17,18,19,20,21];
- устройств телесигнализации, для определения места повреждения, устанавливаются на воздушной линии [22];
- устройств, определяющих расстояние до места повреждения, устанавливаются на подстанции [23];

- переносных приборов, используемых выездной оперативной бригадой для отыскания самого места повреждения [24].

В представленном комплексе важное место занимают устройства селективного обнаружения поврежденной линии, значение которых все в большей степени возрастает, так как способствуют снижению времени поиска места замыкания, уменьшению перерыва электроснабжения потребителей и повышает безопасность людей и животных при возникновении аварийного режима.

## 1.2. Основные типы микропроцессорных и полупроводниковых защит от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ

Изучением вопросов по разработке и совершенствованию релейных защит от однофазных замыканий на землю занимались ведущие ученые: Шуин В.А, Шабад М.А, Сирота И.М, Шалин А.И, Сапунков М.Л и другие, анализ существующих методов обнаружения и поиска замыканий на землю [16,17,21,25,26,27] в сельских распределительных сетях 6-10,20,35 кВ определил основные принципы организации защит.

В таблице 1.6 представлены основные виды применяемых защит от ОЗЗ, которые по сложности и эффективности делятся на индивидуальные и централизованные.

Таблица 1.6 - Защиты от однофазных замыканий на землю

Наименование защиты	Алгоритм действия	Тип реле или микропроцессорного терминала
Индивидуальные		
1. Токовая ненаправленная защита нулевой последовательности	Контроль токов нулевой последовательности в защищаемой линии при ОЗЗ и сравнение с уставками на срабатывание. На	SEPAM S80[28], Сириус 2-Л[29], ТЭМП2501[30], MiCOM P120[31], БМРЗ[32], SIPROTEC 4 [33] и другие.

Продолжение таблицы 1.6.

	поврежденной линии величина рабочего сигнала равна сумме токов нулевой последовательности всех отходящих линий, на не поврежденных линиях - собственным токам нулевой последовательности.	$R_{BX} = 50-1500 \text{ Ом.}$
2. Токовая направленная защита нулевой последовательности	<p>Определение направления протекания токов нулевой последовательности отходящих линий, в режиме однофазного замыкания на землю. На неповрежденных линиях токи условно направлены к секции шин, а на поврежденной линии – от шин к месту однофазного замыкания на землю.</p> <p>Поэтому, рабочие сигналы мощности нулевой последовательности отходящих линий, определяемые по токам и напряжениям нулевой последовательности, также имеют различное направление.</p>	<p>ЗЗП-1[34], ЗЗП-1М[34], ЗЗН, БМРЗ[32], «ЗЕРО»[35], Сириус-МЛ[36], SEPAM S42[37], MiCOM P125[38] и другие.</p> <p><math>R_{BX} = 50-1500 \text{ Ом.}</math></p>
3. Защита нулевой последовательности на токах высших гармоник	<p>Однофазные замыкания на землю нарушают симметрию фаз относительно земли, что приводит к появлению напряжения нулевой последовательности. В результате чего в токах нулевой последовательности появляются высшие гармоники.</p> <p>Наибольший уровень высших гармонических составляющих в поврежденной линии, уровень гармоник в неповрежденных присоединениях</p>	<p>УСЗ-2/2[39], УСЗ-3[39], УСЗ-3М[39], Сириус-Л[29], SPAC 801-113, SPAC 810[40] и другие.</p> <p><math>R_{BX} = 4000-8000 \text{ Ом.}</math></p>

	намного ниже и определяется емкостью фаз относительно земли.	
4. Защита, реагирующая на «наложенный» ток не промышленной частоты	Искусственно создаются условия для протекания через место однофазного замыкания на землю дополнительного тока с частотой, отличной от промышленной. С помощью избирательного модуля защиты выявляется путь протекания тока и определяется поврежденное присоединение. Могут использоваться постоянный и переменный «наложенные» токи, с частотой выше и ниже промышленной (6,25; 25; 100; 300 Гц).	УЗК-6,25; ЗЗС[41]. $R_{ВХ} = 50-1500 \text{ Ом}$ .
5. Защита использующая электрические величины переходного процесса	В результате перезаряда емкости поврежденных и неповрежденных фаз линии при ОЗЗ, возникают переходные процессы вызывающие изменение во времени напряжения и тока нулевой последовательности. В поврежденной линии ток переходного процесса представляет сумму переходных токов всех отходящих линий. В неповрежденных линиях токи нулевой последовательности имеют вид быстро затухающих колебаний вблизи шин подстанции. Одним из признаков ОЗЗ определяемого по характеру переходного процесса является направление (знак) мгновенной мощности линии. На поврежденном	ИЗС[42], ИЗС-М[42], УЗС-01, КЗЗП, ПЗЗМ-1, TRER[41]. $R_{ВХ} = 4000-8000 \text{ Ом}$ .

Продолжение таблицы 1.6.

	присоединении знак мощности волны распространяющейся от места ОЗЗ к шинам – отрицательный, на неповрежденных – положительный.	
Централизованные		
6. Централизованная защита с поочередным опросом каналов	Принцип действия основан на сравнении сигналов фиксируемых цепями защит, к которым относятся средние, действующие и амплитудные значения токов нулевой последовательности: установившихся, высших гармонических составляющих, переходных, «наложенных» с частотой. Последовательное или относительное сравнение позволяет выявить присоединение с максимальным током нулевой последовательности.	«Индикатор-1И»[19], «Индикатор-2И»[19]. $R_{ВХ} = 4000-8000 \text{ Ом.}$
7. Централизованная защита с параллельным опросом каналов	Параллельное сравнение всех присоединений отходящих от секции шин.	СЗВИ[43]. $R_{ВХ} = 4000-8000 \text{ Ом.}$
8. Централизованная защита с параллельным синхронизированным опросом каналов	Импульсное сравнение токов нулевой последовательности во всех присоединениях	Геум[41]. $R_{ВХ} = 6500-8000 \text{ Ом.}$

В сетях среднего класса напряжения 80% подстанций не имеют селективной защиты от ОЗЗ (защита, которая позволяет однозначно (селективно) определить воздушную линию с однофазным замыканием на землю). Данные подстанции снабжены только сигнализацией по напряжению нулевой последовательности [44,45] - неселективной защитой (защита, определяющая

однофазное замыкание на землю, которое произошло на одной из линий, но не указывающая на какой именно).

Эффективность действия защит от ОЗЗ, на оставшихся 20 % подстанций, очень низкая [46] , что объясняется различными режимами однофазных замыканий и разнообразием параметров электрических сетей [15,47].

В качестве защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ России наибольшее распространение получили устройства сигнализации ОЗЗ, выполняющие функцию контроля состояния изоляции отходящих линий, с помощью трансформатора напряжения НТМИ (трансформатор напряжения трехфазный масляный с контролем изоляции) или НАМИ (трансформатор напряжения антирезонансный масляный с контролем изоляции) [48].

Данный метод, определения поврежденной линии в сетях 6-35 кВ связан со значительными эксплуатационными затратами, так как требует многократных оперативных переключений всех отходящих линий и выезда оперативно – выездной бригады (ОВБ), для определения точного места повреждения и устранения аварийной ситуации в кратчайший срок [49].

Операции с выключателями приводят к значительным коммутационным перенапряжениям, возможному пробоем ослабленной изоляции и снижению эксплуатационного ресурса выключателей.

Отсутствие селективной сигнализации для распределительных устройств с воздушными выводами линий 6-10 кВ объясняется в первую очередь тем, что реализация известного решения с установкой кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП) и релейной защиты, не приемлема по технико-экономическим соображениям, так как связана с реконструкцией схемы первичной коммутации и требует значительных финансовых вложений. Другая причина отсутствия селективной сигнализации связана с трудностями реализации фильтра токов нулевой последовательности (ФТНП), так как необходима установка дополнительного трансформатора тока и фильтры на стандартных трансформаторах тока не обеспечивают необходимой чувствительности по следующим причинам:



- из-за повышенных значений небалансов, связанных с различием характеристик применяемых измерительных трансформаторов тока;

- из-за незначительной разницы выходного сигнала схемы фильтра при малых токах замыкания на землю ( $I_z = 0,5-2$  А) от токов небаланса. Что можно объяснить высоким коэффициентом трансформации трансформаторов тока составляющих фильтр и выбираемых по рабочим токам линии, а так же утечкой тока замыкания в трансформаторы неповрежденных фаз.

К тому же, микропроцессорные и полупроводниковые устройства защиты, обладающие, в отличие от электромеханических реле, совершенно иными параметрами (малыми потребляемыми мощностями – милливатты и ватты, вторичными токами – миллиамперы и амперы, высокими входными сопротивлениями – единицы Ом и тысячи Ом) не могут подключаться и работать непосредственно от вторичных цепей измерительных трансформаторов тока, в связи с чем, устройства защиты значительно усложняются.

Таким образом, актуальной задачей является разработка простых и недорогих первичных преобразователей или датчиков тока, которые устанавливаются в РУ без реконструкции схемы первичной коммутации и обеспечивают построение ФТНП для подключения селективной сигнализации замыканий на землю линий 6-10 кВ, имеющих воздушный вывод из распределительного устройства.

### **1.3. Оценка возможности применения различных трансформаторов и датчиков тока для питания токовых цепей микропроцессорных и полупроводниковых устройств защиты и сигнализации**

Анализ параметров сельских распределительных сетей 6-10 кВ [18,24,50] и микропроцессорных и полупроводниковых устройств защиты и автоматики [34, 39, 41] показывает, что в общем случае, датчики тока для устройств защиты и сигнализации должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- рассчитаны для работы в условиях малых первичных токов замыкания на землю сельских сетей (для сетей напряжением 6-10 кВ токи замыкания 0,5-2,0 А);

- соответствовать параметрам подключаемых устройств на микропроцессорных и полупроводниковых элементах (вторичные токи – миллиамперы, отдаваемые мощности – милливатты, входные сопротивления – тысячи Ом);

- иметь возможность изменения характеристик «вход-выход» с целью достижения их идентичности, необходимой при построении качественных ФТНП для РУ 6-10 кВ;

- иметь простую, надежную и экономичную конструкцию, легко устанавливаться в распределительных устройствах 6-10 кВ без снижения надежности работы высоковольтного оборудования и реконструкции схемы первичной коммутации.

В развитие этих требований следует отметить, что выбор и разработка датчиков тока должны быть направлены на достижение унификации по первичным напряжениям (6-35 кВ), токам (10-100 А) и вторичным цепям. Когда одно конструктивное исполнение датчика может использоваться практически для всех диапазонов рабочих токов сельских электроустановок, сочетаться с различными типами реле отличающихся входными параметрами.

Для питания токовых цепей защит с малым потреблением мощности, в частности, микропроцессорных и полупроводниковых, могут применяться следующие измерительные устройства [51]:

- обычный трансформатор тока (ТТ) с промежуточным согласующим трансформатором;

- обычный ТТ с линейным шунтом на его зажимах;

- ТТ с воздушным зазором в сердечнике;

- ТТ без стального сердечника;

- ТТ с малым объемом стали, рассчитанный на параметры микропроцессорных и полупроводниковых устройств;

- дистанционные измерители тока.

В настоящее время схемы микропроцессорных и полупроводниковых устройств защиты и автоматики, как правило, выполняются с промежуточными

согласующими трансформаторами [34,43]. Такое исполнение устройств обладает широкими возможностями в том смысле, что промежуточные трансформаторы могут быть выполнены не только для согласования вторичных цепей измерительных ТТ со входными цепями защит, но и наделены специальными функциями.

Основной недостаток применения микропроцессорных и полупроводниковых защит с промежуточными трансформаторами в том, что значительно усложняются схемы релейных защит (рисунок 1.2). В связи с необходимостью обеспечения требуемого диапазона регулирования уставок срабатывания защит, количество согласующих трансформаторов возрастает, что приводит, при комплектации и монтаже устройств, к появлению специальных блоков согласующих трансформаторов [43]. Все это, в конечном счете, снижает экономичность устройств защиты и надежность их работы.

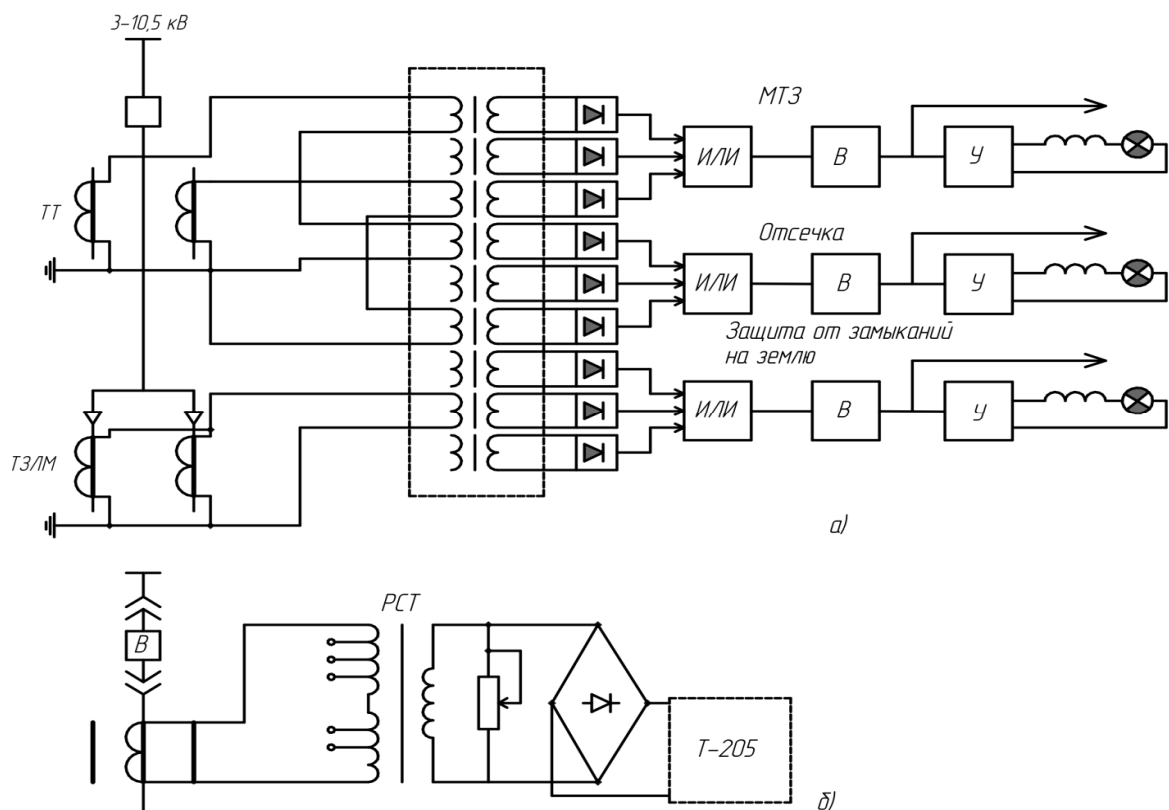


Рисунок 1.2. – а) – схема защиты тупиковой линии электропередачи напряжением 3-10,5 кВ [43]; б) – схема пускового органа токовой защиты [43].

Питание микропроцессорных и полупроводниковых устройств защиты от обычного трансформатора возможно с помощью линейного шунта, подключенного на зажимы трансформатора тока. Впервые шунтирование трансформатора тока в схемах релейной защиты было предложено как средство снижения токовой погрешности ТТ при значительных кратностях первичного тока [52].

Практически, выполнение данного варианта, при согласовании ТТ и устройств релейной защиты незначительной мощности, связана с определенными трудностями. Из-за малости токов, потребляемых защитами, шунты с сопротивлением до 1 Ома следует выполнять на полный вторичный ток ТТ, при этом они должны быть не только термически устойчивы при максимальных кратностях вторичного тока (100 и более ампер), но и обладать в этих условиях стабильными характеристиками. Применение шунтирования, по-видимому, возможно только после разработки специальной серии шунтов, конструктивное исполнение которых и характеристики будут удовлетворять требованиям релейной защиты и условиям эксплуатации.

В примерах рассмотренных ранее, в качестве токовых измерителей используются классические трансформаторы тока. Однако в режиме короткого замыкания при переходных процессах, стандартные ТТ работали нестабильно, к тому же для высоких напряжений имели большую стоимость. Это привело к появлению новых конструкций токовых измерителей, которые качественно отличаются характеристиками и работой в переходных режимах, поэтому лишь условно могут считаться трансформаторами тока.

В настоящее время для питания устройств релейных защит находят применение трансформаторы тока с немагнитным зазором в сердечнике, у которых более линейная характеристика и отсутствует влияние остаточного намагничивания [25, 43, 53].

При питании микропроцессорных и полупроводниковых устройств защиты и автоматики от трансформатора тока с зазором режим работы последнего будет близким к режиму идеального трансреактора. Как указано в [25], работа

трансформатора тока с зазором в режиме трансреактора нецелесообразна, поскольку он сильно подвержен влиянию переходных процессов, внешних магнитных полей (при большом зазоре) и гармонических составляющих первичного тока.

Несмотря на принципиальные недостатки трансреакторы могут найти применение для устройств на микропроцессорных и полупроводниковых элементах. Например, в [54] описан трансформатор тока на рабочее напряжение 10 кВ и токи 20-1500 А, работающий в режиме трансреактора, который предназначен для питания микропроцессорных и полупроводниковых устройств защиты. Трансформатор обладает линейными характеристиками в диапазоне первичных токов до 600 А.

При любых значениях первичных токов и вторичных нагрузок для устройств релейной защиты наиболее подходят трансформаторы тока без стального сердечника, имеющие более линейную характеристику входного и выходного сигналов [55,56].

Трансформаторы тока с воздушным сердечником имеют целый ряд достоинств, это: абсолютная идентичность характеристик, малая постоянная времени вторичной цепи, отсутствие импульсных перенапряжений на вторичной обмотке. К недостаткам можно отнести малую выходную мощность и поэтому их применение целесообразно лишь при весьма больших первичных токах. При малых кратностях токов короткого замыкания в сельских сетях 6-10 кВ, трансформаторы с воздушным сердечником будут иметь неконструктивно большие размеры или потребуются усложнение схем релейной защиты, что также неприемлемо. Следует также отметить, что трансформаторы с воздушным сердечником сильно подвержены влиянию внешних магнитных полей, что вносит определенные трудности при выполнении устройств защиты.

Одним из наиболее перспективных токоинформаторов для питания устройств защиты на микропроцессорных и полупроводниковых элементах являются трансформаторы тока с малым объемом стали накладного типа [57,58,59], называемые в дальнейшем трансформаторными датчиками тока (ДТ),

которые выполняются на параметры подключаемых к ним микропроцессорных и полупроводниковых устройств.

В отличие от трансформаторов тока с воздушным сердечником, трансформаторные датчики имеют сердечник с малым сечением стали ( $0,5-1,0 \text{ см}^2$ ), для создания магнитного поля и ограничения влияния магнитных полей соседних токоведущих частей. Это же позволяет иметь на выходе датчиков мощности, достаточные для надежной и эффективной работы устройств релейной защиты без дополнительных усилительных звеньев.

Малое сечение стального сердечника позволяет упростить конструкцию и монтаж ДТ на проходных изоляторах в РУ-10 кВ и способствует снижению амплитуды вторичной Э.Д.С., при разомкнутой вторичной обмотке, уменьшает межвитковое напряжение и улучшает тепловой режим сердечника. В результате чего трансформаторные датчики тока с малым объемом стали накладного типа допускают работу на холостом ходу, а в трехфазных схемах возможно включение их в открытый треугольник для дифференциальной защиты и т.д.

Как известно, режим работы трансформатора зависит от соотношения сопротивлений намагничивания  $Z_{02}$  и ветви вторичного тока  $Z_2$  равного сумме сопротивлений вторичной обмотки  $Z_{2T}$  и нагрузки  $Z_H$ .

Между идеальным трансформатором тока ( $Z_2/ Z_{02}$  стремится к 0) и идеальным трансреактором ( $Z_2/ Z_{02}$  стремится к бесконечности) существует целый класс трансформаторов с промежуточными значениями отношения  $Z_2/ Z_{02}$ . Выбирая для датчика тока номинальный режим работы с индукцией в сердечнике более высокой, чем в обычных ТТ (порядка  $0,5-0,7 \text{ Тл}$ ) и соизмеримыми сопротивлениями  $Z_2$  и  $Z_{02}$ , можно получить токоинформатор в сильной степени реагирующий на сопротивление вторичной нагрузки. В этом случае изменением  $Z_2$  в ту или иную сторону достигаются различные режимы работы датчика тока (режим тока, напряжения, максимальной выдаваемой мощности, импульсный режим). Таким образом, такой датчик тока обладает возможностью унификации по вторичной цепи, что позволяет подключать к нему различные типы устройств релейной защиты и автоматики. Этим же может быть обеспечено плавное и

глубокое регулирование выходных параметров и достигнута унификация датчика тока по первичной цепи, когда одно исполнение может быть использовано практически для всего диапазона первичных рабочих токов сельских электроустановок.

Как показано [59] увеличение рабочих индукций трансформаторов тока, сердечники которых изготовлены из стали одной марки, приводит по мере роста индукции к большему совпадению их характеристик. Это свойство используют в схемах защит, где необходимо уменьшить небалансы на выходе, обусловленные токами намагничивания (для дифференциальных защит, в фильтрах токов нулевой последовательности) [58, 59].

Конструктивное исполнение трансформаторных датчиков тока для микропроцессорных и полупроводниковых защит не является новым. Накладные трансформаторы тока известны давно и выпускаются промышленностью для напряжений 6-10 кВ (ТДЗЛВ) [60], 35-110 кВ (ТОНД-1) и 220 кВ (ТОНД-2) [61].

По сравнению с первыми трансформаторами тока накладного типа [62], которые для обеспечения 10% погрешности оказывались слишком громоздкими и тяжелыми (около 60 кг), в последующих разработках режим работы ТТ был выбран из условия 50% погрешности, что позволило в несколько раз снизить вес (около 15 кг). В связи с этим трансформаторы тока типа ТДЗЛВ и ТОНД утрачивают понятие классических трансформаторов тока.

Следует отметить, что величина токовой погрешности не должна служить ограничением при выборе трансформатора тока. Для релейной защиты известная стабильная погрешность ТТ может быть учтена при выборе уставки реле [25].

Накладные ТТ в сетях 110-220 кВ нашли применение в силу того, что для таких напряжений выносные трансформаторы тока дороже и в некоторых случаях (тупиковые подстанции), установка их считается нецелесообразной.

В некоторых случаях для целей релейной защиты и автоматики технически и экономически целесообразна установка дистанционных измерителей тока, применяемых на отпайках от магистрали линий электропередач (ЛЭП), в пунктах секционирования и т.д., для сигнализации поврежденных участков сети [63].

Проведенный анализ позволил сделать вывод, что для питания релейных защит на трансформаторных подстанциях наиболее подходят датчики тока с малым объемом стали накладного типа, которые мало подвержены влиянию внешних магнитных полей, просто устанавливаются в РУ 6-10 кВ и имеют достаточные выходные мощности для срабатывания реле с малым потреблением.

Возможность работы таких датчиков при различных режимах, в широком диапазоне изменения сопротивлений нагрузки, плавное и глубокое регулирование выходных параметров, выполнение целого ряда специальных функций согласующих элементов, унификация первичных и вторичных цепей. Все это делает их одними из наиболее перспективных токоинформаторов для сочетания с микропроцессорными и полупроводниковыми устройствами релейной защиты и автоматики сельских электроустановок.

Простота конструкции и установки на проходные изоляторы РУ без реконструкции схемы первичной коммутации, малая стоимость за счет комплексного применения высоковольтной изоляции ввода, позволяет широко рекомендовать датчики тока накладного типа для выполнения защит и устройств сигнализации на сельских подстанциях.

Для анализа работы датчиков тока в широком диапазоне первичных токов и сопротивлений нагрузки применяются различные методы расчета позволяющие анализировать работу датчиков тока в различных режимах.

#### **1.4 Существующие методы расчета трансформаторов тока**

Многочисленные исследования российских и зарубежных ученых посвящены расчету и анализу режимов работы трансформаторов тока в схемах защит, что отражено в трудах Федосеева А.М., Roberts J., Дроздова А.Д., Hanninen S., Казанского В.Е и других.

Существующие методы расчета установившихся и переходных процессов трансформаторов тока (ТТ), как правило, основываются на методе эквивалентных синусоид, позволяющем считать все рассчитываемые токи и напряжения синусоидальными и эквивалентными по действующим значениям истинным



токам и напряжениям [25,63,64,65]. В расчетах обычно используется упрощенная электрическая схема замещения трансформатора тока, показанная на рисунке 1.3 (а), где

$i_{12} = i_1 \frac{W_1}{W_2}$  - первичный ток трансформатора, приведенный к виткам вторичной

обмотки;

$i_{02}, i_2$  – токи намагничивания и нагрузки;

$Z_{2T}$  – сопротивление, определяемое индуктивностью рассеяния и активным сопротивлением вторичной обмотки;

$Z_{02}$  – приведенное ко вторичной обмотке сопротивление ветви намагничивания;

$Z_H$  – сопротивление нагрузки.

На рисунке 1.3.(б), приведена характеристика намагничивания ТТ с замкнутым ферромагнитным сердечником.

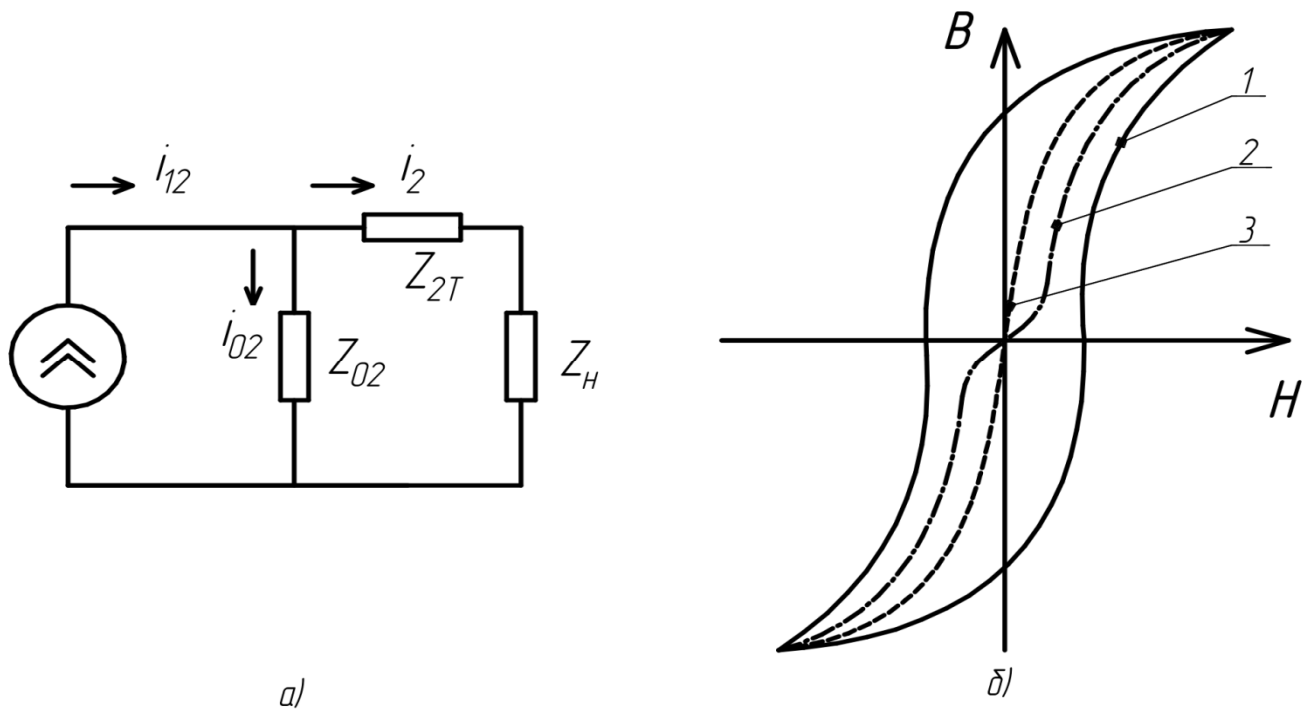


Рисунок 1.3 - Упрощенная схема замещения трансформатора тока (а) и характеристики намагничивания ТТ с замкнутым ферромагнитным сердечником (б), где 1 – динамическая характеристика (петля гистерезиса), 2 – амплитудная динамическая кривая намагничивания, 3 – средняя кривая намагничивания.

Часто потерями в сердечнике ТТ пренебрегают и ветвь намагничивания в схеме замещения представляется только индуктивностью намагничивания  $L_{02}$ .

В случае равномерного распределения вторичной обмотки по сердечнику не учитывают, в виду малости, сопротивление рассеяния этой обмотки  $X_{2T}$ . Индуктивность  $L_{02}$  определяется по эффективной характеристике холостого хода (ЭХХХ), получаемой экспериментально в режиме синусоидальной индукции или с помощью расчета по типовым удельным характеристикам холостого хода  $E_{2уд}$  ( $I_{02уд}$ ) или  $B_{мэ}$  ( $H_{мэ}$ ), приведенными в различных справочниках.

Метод эквивалентных синусоид позволяет определять действующие значения токов и напряжений, токовые и угловые погрешности и дает приемлемые для практики результаты, если искажение вторичного тока ТТ сравнительно невелико, что обеспечивается, когда амплитуда индукции в сердечнике не превышает 80% индукции насыщения [63].

Этот метод неприменим для анализа работы трансформаторов тока при глубоком насыщении сердечника, при исследовании формы и гармонического состава вторичного тока и определении его действующего значения в силу того, что в расчетах используется условная кривая намагничивания  $B_{мэ}$  ( $H_{мэ}$ ). Последняя не является характеристикой для мгновенных значений  $B$  и  $H$ .

Следует отметить, что используемые в расчетах магнитные характеристики должны учитывать режим работы ферромагнитного сердечника, его конструкцию и, в общем случае, должны соответствовать рассчитываемому процессу. В трансформаторах тока, например, намагничивающая сила, равная

$$i_0 W_1 = i_1 W_1 - i_2 W_1$$

рассматривается приложенной со стороны первичной обмотки, поэтому характеристика намагничивания должна сниматься при возбуждении первичной обмотки и измерении амплитудного значения тока, и среднего выпрямленного значения Э.Д.С вторичной обмотки. Полученная таким образом основная кривая намагничивания данного ТТ, строго говоря, является характеристикой конструкции, так как учитывает конструкцию сердечника, обмоток и их взаимное расположение. Если значения напряженностей поля, при которых работает ТТ

составляют на более 100 А/см [66], то данная характеристика с достаточной точностью будет характеристикой сердечника, и, если сердечник ТТ представляет собой замкнутый тороид с отношением наружного и внутреннего диаметров  $\frac{D_H}{D_{BH}} < 1,4$  то полученная характеристика может считаться характеристикой материала [54].

Основная кривая намагничивания, снятая на переменном токе, может использоваться при расчетах ТТ в широком диапазоне изменения индукции для определения средних значений Э.Д.С, напряжений и токов.

Для приближенных расчетов кривых токов и напряжений необходимо применять среднюю кривую намагничивания [65], получаемую путем замены предельной петли гистерезиса средней линией (рисунок 1.8 б).

При анализе работы релейной защиты нередко приходится рассматривать режимы работы трансформатора тока при глубоком насыщении сердечника. В настоящее время в инженерной практике решение задач, связанных с работой ТТ при насыщении, возможно с помощью метода прямоугольной безгистерезисной характеристики намагничивания (ПХН) [63,65]. Согласно этому методу реальная характеристика намагничивания сердечника ТТ, работающего при глубоком насыщении, заменяется прямоугольной безгистерезисной характеристикой (ПХН). В схеме замещения ТТ ветвь намагничивания представляется в виде ключа К, который находится в разомкнутом состоянии, когда сердечник ненасыщен, и замкнут, если он насыщен (рисунок 1.4 а,б).

В трансформаторе тока с ПХН осуществляется идеальная трансформация в пределах изменения индукции насыщения  $\pm B_s$ , а с наступлением насыщения вторичный ток затухает по экспоненциальному закону с постоянной времени вторичной цепи (рисунок 1.4 в). Этот метод подробно представлен в [63,66], где приведены универсальные характеристики для определения погрешностей ТТ с ПХН по действующим, средним и амплитудным значениям токов, а также для определения токовых и угловых погрешностей по первым гармоникам вторичного

и намагничивающего токов, характеристики коэффициентов формы кривой вторичного тока и коэффициента гармоник.

Прямоугольная характеристика намагничивания трансформатора тока, а также схема замещения трансформатора тока с прямоугольной характеристикой намагничивания и графики работы трансформатора тока с прямоугольной характеристикой намагничивания при синусоидальном первичном токе представлены на рисунке 1.4 (а, б, в).

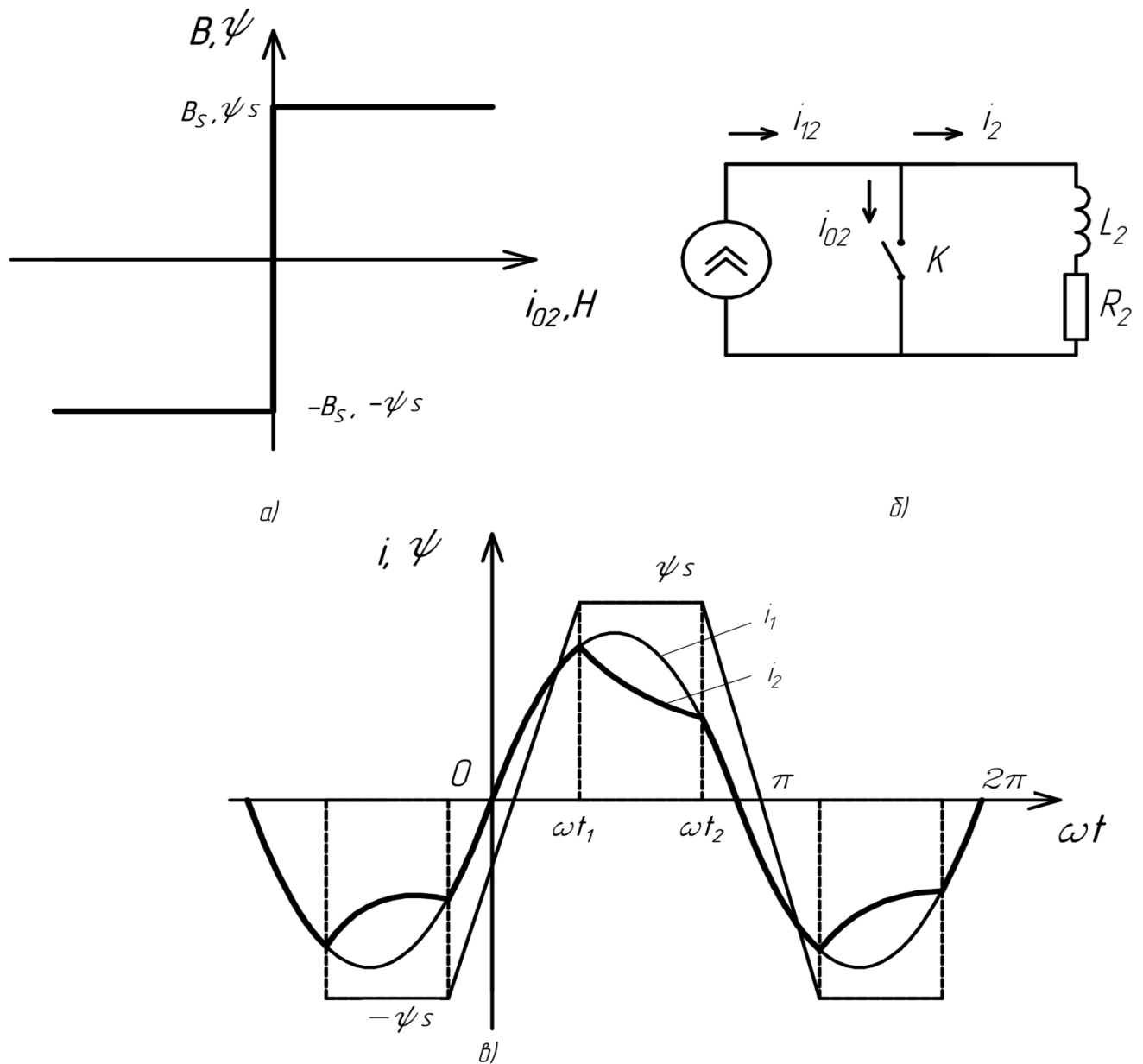


Рисунок 1.4 - Трансформатор тока с ПХН. а) прямоугольная характеристика намагничивания (ПХН); б) схема замещения трансформатора тока с ПХН; в) графики работы ТТ с ПХН при синусоидальном первичном токе.

Расчеты по методу ПХН отличаются простотой, но в ряде случаев дают погрешность, так как реальная характеристика намагничивания сердечника ТТ существенно отличается от прямоугольной. Так в [66] показано, что при высоких напряженностях магнитного поля, порядка 100-300 А/см, метод ПХН дает значительные погрешности до 30% и выше. Это объясняется тем, что при таких значениях напряженности амплитудная динамическая характеристика намагничивания отличается от прямоугольной за счет связи обмоток по воздуху. Для расчетов в этом случае предлагается спрямленная характеристика намагничивания (СХН), которая отличается от ПХН наличием наклона кривой  $B(H)$  к оси  $H$  в зоне насыщения. В трансформаторах тока в соответствии с СХН так же осуществляется идеальная трансформация в диапазоне изменения индукции  $\pm B_s$  после чего ТТ работает как воздушный трансформатор. Поправка, вносимая в расчеты, выполненные по методу ПХН, снижает погрешности расчетов до 10% [66].

В настоящее время для исследования переходных процессов в трансформаторах тока широко применяются компьютеры, которые позволяют исследовать в комплексе поведение защит во время переходных процессов с проверкой чувствительности и селективности в различных режимах работы [67,68].

Для анализа работы датчиков тока в широком диапазоне первичных токов и сопротивлений нагрузки, которые в сильной степени изменяют режимы работы датчиков, требуются методы, использующие более точное выражение кривой намагничивания и позволяющие анализировать работу датчиков в областях наибольших проницаемостей, а также в режиме насыщения.

Основная кривая намагничивания отражает изменение магнитной индукции ( $B$ ) от напряженности магнитного поля ( $H$ ), которое создается в материале при намагничивании и может использоваться в расчетах датчиков тока для определения средних значений вторичных токов и напряжений.

Существуют различные способы аппроксимации таблично заданной или графической функции кривой намагничивания аналитической функцией, которая

с определенной степенью точности повторяет исходную функцию в заданных точках [69,70,71,72,73].

В настоящее время применяются следующие способы аппроксимации кривой намагничивания:

- 1). Кусочно-линейная аппроксимация;
- 2). Аппроксимация степенным полиномом 7 степени;
- 3). Аппроксимация нечетным степенным полиномом;
- 4). Аппроксимация четным степенным полиномом;
- 5). Аппроксимация функцией гиперболического синуса;
- 6). Аппроксимация функцией гиперболического тангенса;
- 7). Аппроксимация функцией арктангенса;
- 8). Аппроксимация с помощью сплайн-функций.

Любая аппроксимирующая функция содержит постоянные коэффициенты аппроксимации, которые определяются по методу наименьших квадратов [74]. Все математические вычисления производятся с помощью программных пакетов MathCAD и Matlab.

При использовании датчиков тока в трехфазных схемах для построения фильтра токов нулевой последовательности (ФТНП) с улучшенными показателями, наиболее целесообразно проводить исследования в общем виде с помощью компьютера, одним из ранее приведенных методов.

### **1.5. Фильтры токов нулевой последовательности для распределительных устройств с воздушным выводом отходящих линий 6-10 кВ**

В настоящее время разработки фильтров токов нулевой последовательности для распределительных устройств с воздушным выводом отходящих линий 6-10 кВ ведутся в двух направлениях;

1. Построение фильтра по известной классической схеме при установке в шкафах отходящих линий дополнительного стандартного или упрощенного трансформатора тока и устройств компенсации небалансов во вторичной цепи.

2. Разработка фильтров на основе специальных трансформаторов тока, обладающих улучшенными показателями.

При выполнении фильтров токов нулевой последовательности на стандартных трансформаторах тока с компенсацией небалансов во вторичной цепи, по приведенным на рисунке 1.10 схемам [75] кроме общих недостатков исполнения ФТНП на стандартных трансформаторах тока, необходимо отметить следующее.

Прежде всего, увеличение вторичной нагрузки на трансформаторы тока, питающих одновременно и реле защиты от коротких замыканий, что приводит к повышению их погрешностей. Различные типы используемых трансформаторов тока, разная нагрузка по фазам, требует индивидуальной настройки сопротивлений компенсации.

Компенсация небалансов принципиально возможна лишь для определенного режима работы первичной цепи вследствие нелинейной зависимости напряжения небаланса от первичных токов линии и вторичной нагрузки.

Дополнительные затраты, связанные с установкой в шкафах отходящих линий третьего трансформатора тока 1 или ФТНП 2, а также устройств компенсации делает эти варианты менее экономичными (параграф 4.4 и рисунок 1.5).

К тому же, применение дополнительных промежуточных трансформаторов 3 (рисунок 1.5), а так же устройств компенсации для уменьшения небалансов фильтра токов нулевой последовательности по фазе, при помощи фазоповоротного моста 4 и по амплитуде, при помощи переменного резистора 5 (рисунок 1.5 а), существенно снижают надежность устройств релейной защиты и автоматики.

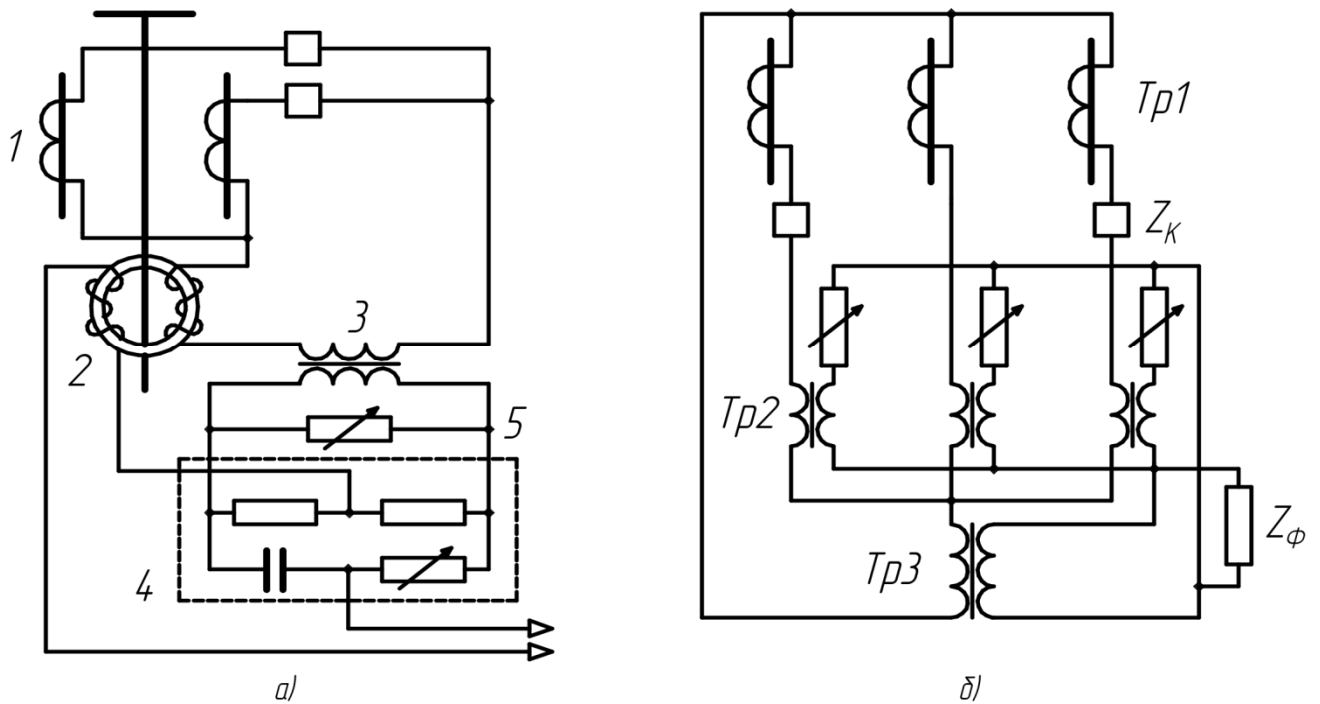


Рисунок 1.5 - Варианты ФТНП с компенсацией небалансов во вторичной цепи (а, б).

Для устройств селективной сигнализации замыканий на землю лучшие результаты дают фильтры токов нулевой последовательности специального исполнения. Однако при разработке специальных ФТНП, наряду с достижением требуемых показателей, характеризующих качество фильтра, следует исходить из простоты технического решения, исключения реконструкции схемы первичной коммутации в КРУН и экономической эффективности.

На рисунке 1.6 представлены ФТНП выполненные на основе:

а). Датчик тока ТДЗЛК [76], ТЗЛК [77] или ТЗЛМ [78] (трансформаторный датчик тока для подключения защиты от замыканий на землю, с литой изоляцией для кабельных линий), для установки которого необходима реконструкция схем первичной коммутации КРУН с воздушными выводами отходящих линий и значительные экономические затраты.

б). Датчик тока ТДЗЛВ [60] (трансформаторный датчик тока для подключения защиты от замыканий на землю, с литой изоляцией для воздушных линий), который имеет значительные габаритные размеры и вес (около 15 кг), высокую стоимость и подходит не для всех ячеек КРУН. По сравнению с



кабельным датчиком тока ТДЗЛК, датчик тока для воздушных линий ТДЗЛВ имеет меньшую помехозащищенность, меньшую величину полезной мощности и большую угловую погрешность [79].

в). Спиральный ТНП [80], который характеризуется высоким отношением напряжений сигнала и помехи. Предлагается использовать, данный ТНП в шинном исполнении для сигнализации замыканий на землю в высоковольтных сетях. Следует отметить, что спиральный ТНП является воздушным трансформатором и поэтому подвержен влиянию посторонних магнитных полей, имеет низкий уровень выходного сигнала (микровольты), что требует усложнения полупроводниковой схемы устройства сигнализации. Кроме того, применение спиральных ТНП связано с решением вопросов установки их в КРУН.

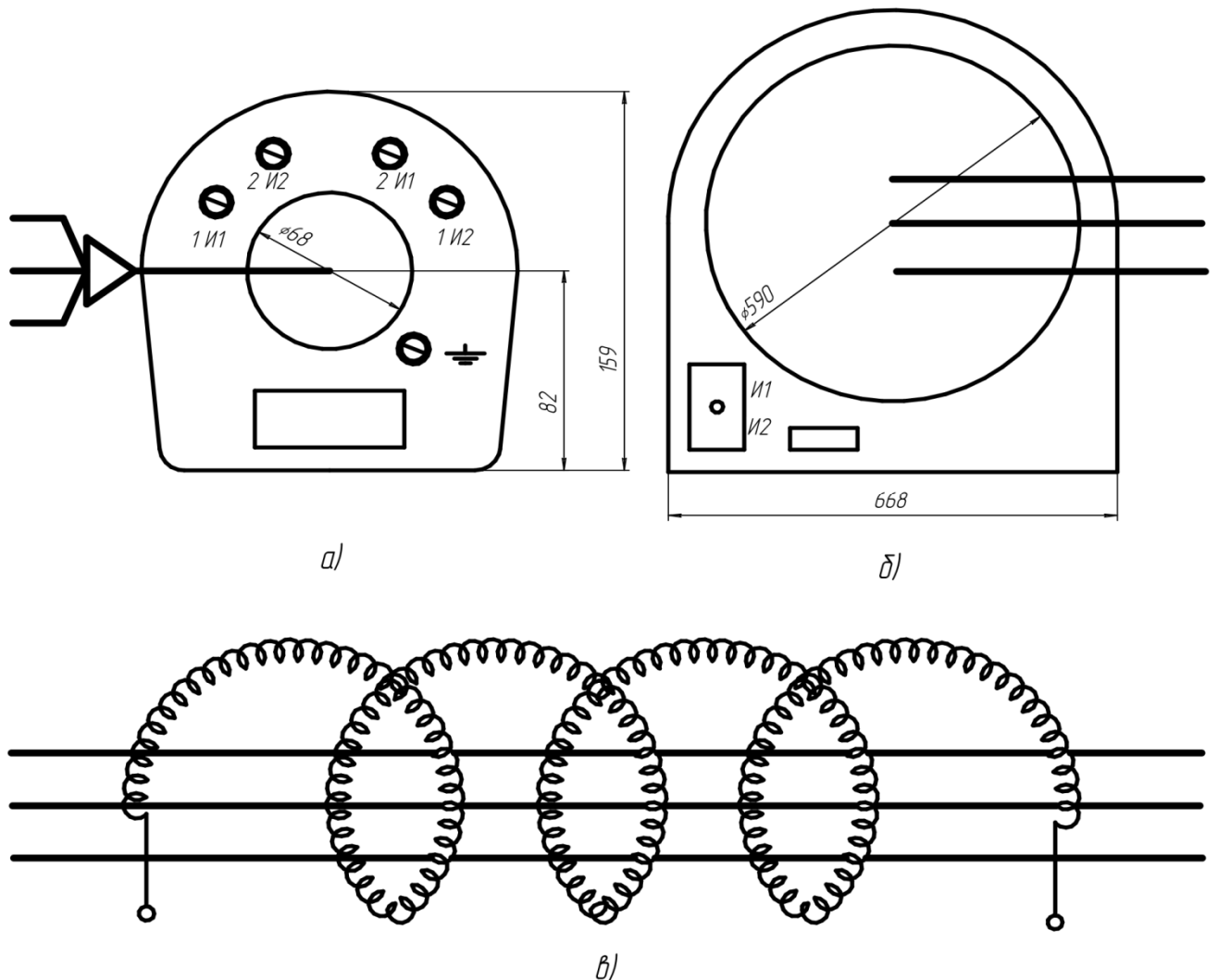


Рисунок 1.6 - Специальные ФТНП: а). Датчик тока ТДЗЛК, ТЗЛК, ТЗЛМ; б). Датчик тока ТДЗЛВ; в). Спиральный ТНП.

Применяя трансформаторные датчики тока накладного типа для создания фильтра токов нулевой последовательности, можно простыми и недорогими средствами выполнить селективную сигнализацию замыканий на землю в сельских распределительных сетях 6 - 35 кВ, на трансформаторных подстанциях 35-110/6-10 кВ с воздушными выводами отходящих линий, без изменения конструктивной части КРУН.

Трансформаторные датчики тока с малым объемом стали более чувствительны к токам замыкания  $I_3 = 0,5-2$  А поэтому подходят для выполнения фильтров в отличие от стандартных трансформаторов тока. Отличительные особенности конструкции и режимов работы датчиков позволяют достичь идентичности их характеристик, необходимой для выполнения чувствительных фильтров. Что также способствует реализации специальных схем для избирательного экранирования высших гармоник, составляющих основную долю небалансов, и повышения сигнала на выходе при замыканиях на землю.

Таким образом, актуальной задачей является разработка простых и недорогих первичных преобразователей или датчиков тока, которые устанавливаются в РУ без реконструкции схемы первичной коммутации и обеспечивают построение ФТНП для подключения селективной сигнализации замыканий на землю линий 6-10 кВ, имеющих воздушный вывод из распределительного устройства.

Разработке и изучению данного вопроса посвящены главы II, III и IV настоящей диссертации.

### **Выводы по главе**

1). Оценка надежности распространенных вариантов схем электроснабжения, которые применяются для питания сельскохозяйственных потребителей, позволила определить, что самый ненадежный элемент это воздушные линии 6-10 кВ, с максимальным временем отключения  $T_{рл} = 20 - 27$  часов. Наибольшую часть из этого времени составляет время поиска и обнаружения места повреждения, которое зависит от работы устройств релейной

защиты и сигнализации. При этом самым распространенным видом повреждения в воздушных распределительных сетях 6-35 кВ являются однополюсные замыкания на землю, что составляет более 80 % от общего количества всех аварийных ситуаций. Согласно статистическим данным, время поиска поврежденного присоединения составляет 2 и более часа в 60% случаях от общего количества ОЗЗ. Поэтому сокращение данного времени, с помощью совершенствования устройств селективного обнаружения поврежденной линии, существенно повысит показатели надежности электроснабжения сельских потребителей.

2). Аналитический обзор основных видов микропроцессорных и полупроводниковых защит от однофазных замыканий на землю в электрических сетях среднего напряжения показывает их многообразие в зависимости от параметров сети и режимов однофазных замыканий. Однако в сетях среднего класса напряжения 80% подстанций не имеют селективной защиты от ОЗЗ, а снабжены только сигнализацией по напряжению нулевой последовательности. Отсутствие селективной сигнализации для распределительных устройств с воздушными выводами линий 6-10 кВ объясняется трудностями в реализации фильтра токов нулевой последовательности (ФТНП), из-за необходимости монтажа дополнительного стандартного трансформатора тока и низкой чувствительности фильтров на стандартных трансформаторах тока. Установка кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП) и релейной защиты связана с реконструкцией схемы первичной коммутации и требует существенных дополнительных затрат. Таким образом, при выполнении селективной сигнализации замыканий на землю сельскохозяйственных воздушных линий 6-10 кВ, имеющих воздушный вывод из КРУН, важной задачей является разработка простых, надежных и недорогих преобразователей или датчиков тока.

3). Анализ параметров сельских распределительных сетей 6-10 кВ и микропроцессорных и полупроводниковых устройств защиты позволил определить, основные требования к датчикам тока и применяемые измерительные

устройства питания токовых цепей защиты и сигнализации. Для селективных защит применяемых на подстанции наиболее подходят трансформаторные датчики тока с малым объемом стали накладного типа, которые мало подвержены влиянию внешних магнитных полей, просто устанавливаются в РУ 6-10 кВ и имеют выходные мощности достаточные для срабатывания реле с малым потреблением.

4). Упрощенные методы расчетов, рассматривающих трансформаторы тока как линейный элемент или как элемент с идеальной характеристикой намагничивания, дают значительные погрешности при анализе режимов работы ДТ в частных случаях (имеющих воздушный зазор). Для анализа работы датчиков тока в широком диапазоне первичных токов и сопротивлений нагрузки, необходимы методы, использующие более точное выражение кривой намагничивания. В настоящее время для исследования переходных процессов в трансформаторах тока широко применяются компьютеры, которые позволяют исследовать в комплексе поведение защит во время переходных процессов с проверкой чувствительности и селективности в различных режимах работы. Как будет показано в главе III, наилучшие показатели имеют степенные функции, с минимальной погрешностью отклонения, а так же арктангенсные и гиперболические функции, имеющие небольшое количество коэффициентов аппроксимации.

5). Трансформаторные датчики тока накладного типа с малым объемом стали, позволяют простыми и недорогими средствами осуществить селективную сигнализацию замыканий на землю в распределительных сельскохозяйственных сетях 6-10 кВ, без каких-либо реконструкций в КРУН, и в отличие от стандартных трансформаторов тока и специальных ФТНП, более подходят для выполнения фильтров токов нулевой последовательности.

6). Актуальность вопросов повышения надежности сельскохозяйственных потребителей за счет снижения времени перерыва электроснабжения ставит задачи, которые в главах II, III, IV и V сводились к следующему:

- разработка математической модели трансформаторного датчика тока для расчета характеристик и анализа режимов работы в схемах защит.
- разработка макета датчика тока для микропроцессорных и полупроводниковых устройств защиты и сигнализации замыканий на землю.
- исследование фильтра токов нулевой последовательности на разработанных датчиках тока для устройств селективной сигнализации замыканий на землю воздушных линий 6-10 кВ, обеспечивающих снижение времени перерыва электроснабжения.
- проведение технико-экономических расчетов предложенного варианта и определение времени перерыва электроснабжения сельских потребителей.

## Глава II. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ ДАТЧИКА ТОКА

### 2.1. Аппроксимация кривой намагничивания датчика тока

Настоящая глава посвящена применению методов аппроксимации кривой намагничивания сердечника, датчика тока накладного типа для РУ 6-10 кВ.

В излагаемых ниже методах исходными данными для расчета являются конструктивные параметры ДТ (первичные и вторичные витки  $W_1$ ,  $W_2$ ; сечение сердечника  $Q$ ; длина средней магнитной линии  $\ell$ , сопротивление рассеяния  $X_{2T}$ ), величина и характер сопротивления нагрузки  $Z_H$ ,  $\varphi_H$  и основная кривая намагничивания материала сердечника  $B_m(H_m)$ , снимаемая при синусоидальном токе.

Если сердечник выполнен с немагнитным зазором, то в качестве расчетной характеристики следует иметь характеристику намагничивания для сердечника, так как переход от магнитных характеристик материала к характеристикам магнитной цепи с зазором затруднителен и для переменных полей не дает положительных результатов [81]. Для расчетов в этом случае целесообразно использовать кривые намагничивания полученные экспериментально на модели конкретного образца, выполненного из того же материала при прочих равных или близких условиях.

Основная кривая намагничивания была получена для датчика тока накладного типа, сердечник которого выполнен из электротехнической стали Э-310 с незначительным воздушным зазором 0,5 мм (глава III, рисунок 3.6).

Численный анализ производился с помощью программного пакета MathCAD, постоянные коэффициенты аппроксимации определялись по методу наименьших квадратов [74], расчеты представлены в приложении В.

Проведенное исследование показало, что для кривой намагничивания сердечника датчика тока накладного типа, выполненного из электротехнической стали Э-310 с воздушным зазором, наилучшие показатели имеют степенные функции, с минимальной погрешностью отклонения. К недостаткам

аппроксимации степенным полиномом можно отнести большое количество коэффициентов и высокий порядок полинома для получения приемлемой точности. Хорошие показатели имеют арктангенсные и гиперболические функции, имеющие небольшое количество коэффициентов аппроксимации. Самый простой и распространенный способ кусочно-линейной аппроксимации, так же подходит для кривой намагничивания датчика тока.

Далее мы применим различные способы аппроксимации для разработки методов расчета трансформаторных датчиков тока для режимов холостого хода и нагрузки в однофазных и трехфазных схемах включения.

## **2.2. Метод расчета трансформаторных датчиков тока в однофазных схемах включения при кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания сердечника**

В излагаемых ниже методах исходными данными для расчета являются конструктивные параметры ДТ (первичные и вторичные витки  $W_1$ ,  $W_2$ ; сечение сердечника  $Q$ ; длина средней магнитной линии  $\ell$ , сопротивление рассеяния  $X_{2T}$ ), величина и характер сопротивления нагрузки  $Z_H$ ,  $\varphi_H$  и основная кривая намагничивания материала сердечника  $B_m(H_m)$ , снимаемая при синусоидальном токе.

При аппроксимации характеристик нелинейных элементов ломаной кривой, особенно при работе их в цепях переменного тока, большое количество аппроксимирующих участков приводят к усложнению решения и трудностям, связанным с определением постоянных интегрирования при согласовании решений в точках излома.

В связи с этим, аппроксимация кривой намагничивания сердечника датчика тока производится тремя отрезками (рисунок 2.1 а), первый проходит через начало координат и наклонен к оси абсцисс под углом, пропорциональным максимальному значению динамической магнитной проницаемости  $\mu_{d\max}$ . Второй и третий соответствуют участкам кривой намагничивания в зонах насыщения со средним наклоном к оси абсцисс ( $H$ ).

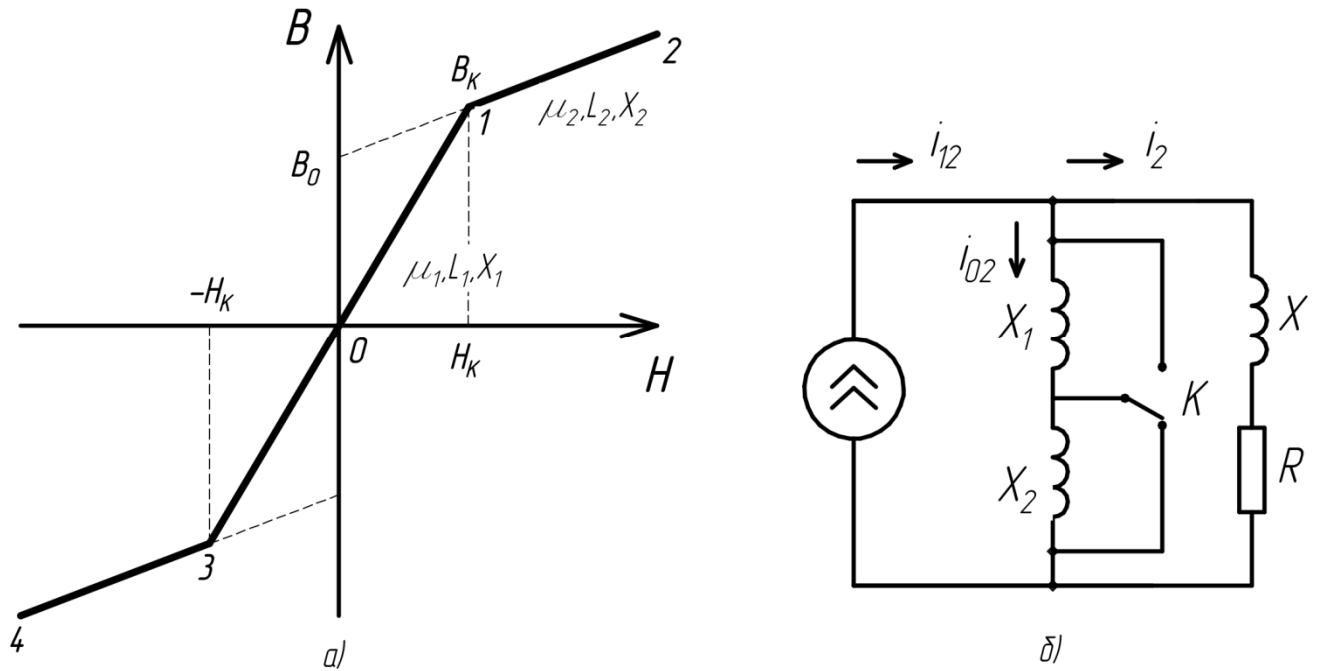


Рисунок 2.1 - Расчетная кривая намагничивания (а) и схема замещения датчика тока (б).

Применение кусочно-линейной аппроксимации такого вида позволяет определять средние и действующие значения вторичных токов и напряжений, так как полученная расчетная характеристика  $V_m(H_m)$  с достаточной точностью эквивалентна средней кривой намагничивания [66].

Кривая намагничивания (рисунок 2.1 а) построена по выражениям

$$B = \mu_1 H \text{ при } -H_K < H < H_K;$$

$$B = B_0 + \mu_2 H \text{ при } H > (H_K), \quad (2.1)$$

где:  $\mu_1 = \frac{B_K}{H_K}$  - магнитная проницаемость сердечника в ненасыщенном состоянии;

$\mu_2 = \frac{B_K - B_0}{H_K}$  - то же в насыщенном состоянии;  $B_K$  и  $H_K$  – индукция и напряженность магнитного поля, соответствующие моменту коммутации.

В любой момент времени магнитное состояние сердечника датчика тока при перематывании под воздействием переменного поля определено положением изображающей (рабочей) точки на его кривой намагничивания [82]. В течении



каждого периода происходит перемагничивание сердечника и изображающая точка перемещается, например, по траектории  $0 (\omega t=0) - 1 (\omega t_1) - 2 (\pi/2) - 1 (\pi - \omega t_1) - 0 (\pi)$  и т.д. Переход изображающей точки через точки излома (1, 3) связан с мгновенным изменением магнитных состояний ДТ. Расчет ведется в соответствии со схемой замещения (рисунок 2.1 б), в которой ключ К периодически (четырежды за период) переключается в моменты времени, соответствующие переходу сердечника из одного состояния в другое. На схеме замещения обозначено:

$R, X$  – суммарно активное и индуктивное сопротивление нагрузочной ветви;

$X_1, X_2$  – сопротивление ветви намагничивания соответственно в ненасыщенном и насыщенном режимах работы, определяемые из выражений

$$X_1 = \omega \mu_1 \frac{W_2^2 Q}{\ell}; \quad X_2 = \omega \mu_2 \frac{W_2^2 Q}{\ell}. \quad (2.2)$$

**Холостой ход.** Первичный ток датчика, приведенный к виткам вторичной обмотки при питании от источника синусоидального тока равен:

$$i_{12} = I_1 \frac{W_1}{W_2} \sin \omega t. \quad (2.3)$$

При работе ДТ в пределах изменения индукции  $B = \pm(B_K)$  напряжение на зажимах вторичной обмотки определяется выражением:

$$U_2^1 = I_{1m} \frac{W_1}{W_2} X_1 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (2.4)$$

Такой режим (без насыщения) сердечника возможен только в случае, когда величина намагничивающего тока не превышает коммутационного значения:

$$I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \leq I_{02m_K}. \quad (2.5)$$

Где:

$$I_{02m_K} = I_{1m_K} \frac{W_1}{W_2} = \frac{H_K \times \ell}{W_2}. \quad (2.6)$$

В этом случае значения среднего и действующего напряжения будут:

$$U_{2cp} = \frac{2}{\pi} I_{1m} \frac{W_1}{W_2} X_1 ; \quad (2.7)$$

$$U_2 = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}} \times \frac{W_1}{W_2} X_1 . \quad (2.7^1)$$

Если величина намагничивающего тока больше тока коммутации

$$I_{1m} \frac{W_1}{W_2} > I_{02mк} . \quad (2.8)$$

то датчик работает в ненасыщенном режиме только какую-то часть полупериода изменения первичного тока.

Угол коммутации  $\omega t$ , характеризующий переход изображающей точки с участка 0-1 аппроксимирующей кривой на участок 1-2, находится из выражения:

$$\omega t_1 = \arcsin \frac{I_{1mк}}{I_{1m}} . \quad (2.9)$$

Напряжение на выходе датчика в режиме насыщения:

$$U_2^{11} = I_{1m} \frac{W_1}{W_2} X_2 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) . \quad (2.10)$$

При  $\omega t = \pi/2$  (отсчет времени ведется относительно изменения первичного тока) изображающая точка занимает положение 2 (рисунок 2.1 а). В этот момент времени вторичное напряжение равняется нулю и в дальнейшем меняет знак.

При  $\omega t = \pi - \omega t_1$  изображающая точка подходит к точке 1 кривой намагничивания со стороны участка насыщения и здесь происходит вторая за полупериод коммутация ключа, вследствие чего напряжение на выходе датчика вновь определяется выражением (2.4). Расчетная форма кривой вторичного напряжения показана на рисунке 2.2 (б).

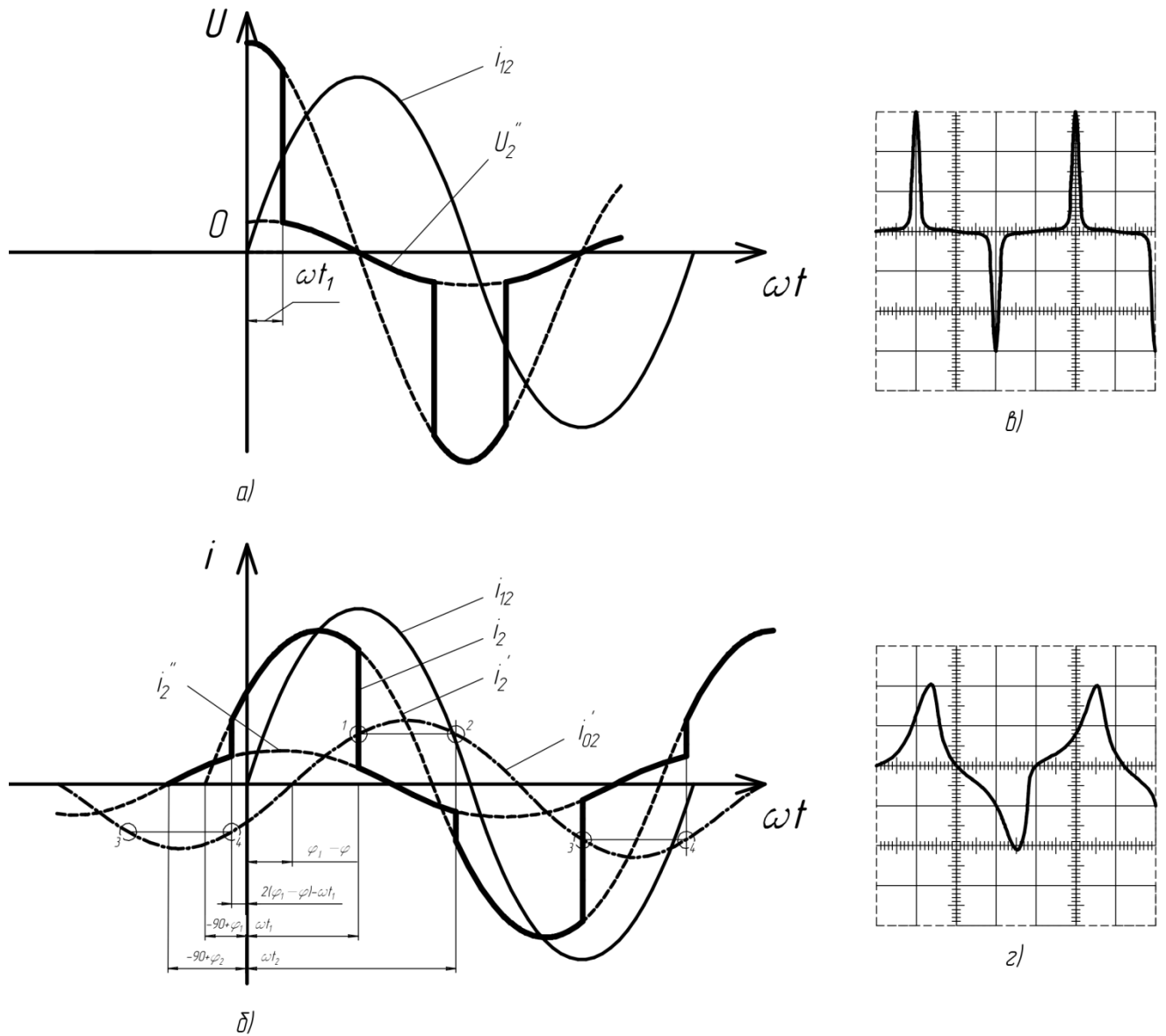


Рисунок 2.2 - Расчетные формы кривой вторичного напряжения и тока для режимов холостого хода (а), нагрузки (б) и осциллограммы (в.г).

В общем случае, когда  $I_{1m} > I_{1mk}$  среднее и действующее значение напряжения определяются по выражениям:

$$U_{2cp} = \frac{2}{\pi} I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \times \sum_1^n \int_0^{\pi/2} X_n \cos \omega t d\omega t ; \quad (2.11)$$

$$U_2 = I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \sqrt{\frac{2}{\pi} \times \sum_1^n \int_0^{\pi/2} X_n^2 \cos^2 \omega t d\omega t} , \quad (2.12)$$

где:  $n$  – количество участков (отрезков) при кусочно-линейной аппроксимации.

После интегрирования, при аппроксимации двумя отрезками получим:

$$U_{2cp} = \frac{2}{\pi} I_{1m} \frac{W_1}{W_2} [X_2 + (X_1 - X_2) \sin \omega t_1]; \quad (2.13)$$

$$U_2 = I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \sqrt{\frac{1}{\pi} (X_1^2 - X_2^2) (\omega t_1 + \frac{1}{2} \sin 2\omega t_1) + \frac{1}{2} X_2^2}. \quad (2.14)$$

Приведенные в таблице 2.1 и на рисунке 2.3 расчетные и экспериментальные данные имеют хорошее совпадение. Погрешность составляет не более 10%.

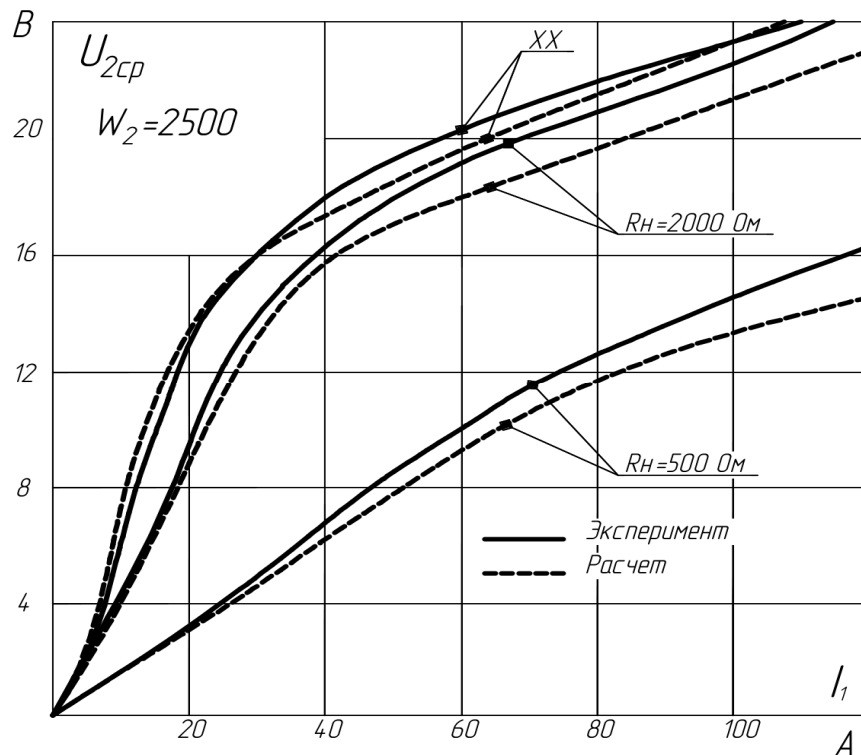


Рисунок 2.3 - Расчетные и экспериментальные значения напряжения ДТ.

Таблица 2.1 - Расчетные и экспериментальные данные значений вторичного напряжения.

I <sub>1</sub> , А	Эксперимент		Расчет	
	U <sub>2cp</sub> , В	U <sub>2</sub> , В	U <sub>2cp</sub> , В	U <sub>2</sub> , В
10	5,8	6,9	6,54	7,2
20	13,25	16,5	13,1	14,6
30	15,9	21,2	16,9	21,3
50	19,3	28,7	19,1	29,0
70	21,4	34,0	21,0	34,8
90	22,7	38,2	22,9	39,2
100	23,2	40,1	23,9	40,8

Расчетные значения вторичного напряжения, приведенные в таблице 2.2, соответствуют датчику тока с параметрами:  $W_1=1$ ;  $W_2=2500$ ;  $Q=0,525 \times 10^{-4} \text{ м}^2$ ;  $\ell=0,485 \text{ м}$ , сердечник выполнен из стали Э-310. Точки кривой  $B(H)$ , характеризующие аппроксимацию:  $B_k=0,685 \text{ Тл}$ ,  $B_0=0,585 \text{ Тл}$ ,  $H_k=0,78 \times 10^2 \text{ А/м}$ .

**Режим нагрузки.** В режиме нагрузки при переходе сердечника от одного магнитного состояния к другому, во вторичном контуре имеет место переходной процесс. Дифференциальные уравнения, описывающие процессы в датчике тока при переходе от ненасыщенного режима к насыщенному, следующие:

$$L_2 \frac{di_{02}}{dt} = i_2 R + L \frac{di_2}{dt}; \quad (2.15)$$

$$i_{02} = i_{12} - i_2.$$

Исключая из первого уравнения  $i_{02}$ , получим:

$$\frac{di_2}{dt} + \frac{1}{T} i_2 = \frac{T_0}{T} \times \frac{di_{12}}{dt}, \quad (2.16)$$

где:  $T = \frac{L_2 + L}{R}$  - постоянная времени вторичного контура, состоящего из

$T_0 = \frac{L_2}{R}$  ветвей намагничивания и нагрузки;

Решение уравнения (2.16) для случая синусоидального первичного тока имеет вид:

$$i_2 = \frac{I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \times \omega T_0}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \varphi) + C \cdot \exp\left(-\frac{\omega t - \omega t_1}{\omega T}\right), \quad (2.17)$$

где:  $\varphi = \arctg(\omega T)$

Соответствующим уравнением можно определить вторичный ток и при переходе от насыщенного режима к ненасыщенному:

$$i_2 = \frac{I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \times \omega T_0^1}{\sqrt{1 + (\omega T^1)^2}} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \varphi^1) + C^1 \cdot \exp(-\frac{\omega t - \omega t_2}{\omega T}), \quad (2.18)$$

где:  $T^1 = \frac{L_1 + L}{R}$ ;  $T_0^1 = \frac{L_1}{R}$ ;  $\varphi^1 = \arctg(\omega T^1)$

$\omega t_1, \omega t_2$  – моменты времени (углы коммутации), соответствующие переходам ДТ из ненасыщенного режима в насыщенный и наоборот.

Свободные составляющие токов, сопровождающие коммутации, затухают во вторичном контуре с постоянными времени  $T$  и  $T^1$ .

Определение моментов коммутации  $\omega t_1, \omega t_2$  постоянных  $C$  и  $C^1$ , являющихся функцией  $I_{1m}, X, X_1, X_2, R, \omega t_1, \omega t_2$ , сводится к решению системы четырех трансцендентных уравнений, составляемой для вторичных токов  $i_2$  и  $i_02$  для моментов изменения магнитных состояний датчика. В общем случае это сложная задача, однако для конкретных условий она может быть значительно упрощена.

Так как нагрузкой датчика тока являются микропроцессорные и полупроводниковые устройства со входными сопротивлениями 500-2000 Ом, представляется возможным определять вторичные токи и напряжения, пренебрегая свободными составляющими токов в переходных режимах.

В таблице 2.2 приведены значения постоянных времени, определяемых параметрами датчика тока, предназначенного для устройств защиты и противоаварийной автоматики сельских электроустановок (глава III).

Таблица 2.2 - Значения постоянных времени затухания

$R_H, \text{ Ом}$	Датчик тока: $\ell=48,5 \text{ см}; Q=0,525 \text{ см}^2$ ; сталь Э-310; $\delta=0,5 \text{ мм}$ .			
	$W_2=1000$		$W_2=2500$	
	$T, \text{ сек}$	$T^1, \text{ сек}$	$T, \text{ сек}$	$T^1, \text{ сек}$
500	0,0004	0,0018	0,0013	0,009
2000	0,00011	0,0005	0,0004	0,0029

Анализируя приведенные данные, можно сделать вывод, что предлагаемое допущение не внесет больших ошибок в расчеты. С учетом этого допущения, расчет токов и напряжений в различных режимах работы ДТ выполняется в следующем порядке.

При работе ДТ в пределах изменения напряженности  $H < (H_k)$ , ток в нагрузочной ветви определяется по выражению:

$$i_2 = I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \times \frac{X_1}{Z_1} \sin(\omega t + 90 - \varphi_1), \quad (2.19)$$

где:  $Z_1 = \sqrt{R^2 + (X + X_1)^2}$ ;  $\varphi_1 = \arctg \frac{X + X_1}{R}$

В этом режиме ток намагничивания равен:

$$i_{02} = I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \times \frac{Z}{Z_1} \sin(\omega t + \varphi - \varphi_1), \quad (2.20)$$

где:  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ ;  $\varphi = \arctg \frac{X}{R}$ , и не превышает коммутационного значения.

Среднее и действующее значение вторичного тока определяется соответственно как:

$$I_{2cp} = \frac{2}{\pi} I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \times \frac{X_1}{Z_1}; \quad (2.21)$$

$$I_2 = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}} \times \frac{W_1}{W_2} \times \frac{X_1}{Z_1}. \quad (2.22)$$

Момент времени  $t_1$ , когда происходит первая коммутация ключа К в схеме замещения датчика тока и наступает режим насыщения сердечника, определяется из уравнения (2.20) с учетом того, что при  $\omega t = \omega t_1$  ток намагничивания равен  $i_{02} = I_{02mk}$

$$\omega t_1 = \arcsin \frac{I_{1mk}}{I_{1m}} - (\varphi - \varphi_1), \quad (2.23)$$

где:  $I_{1mk} = \frac{I_{02mk}}{\frac{W_1}{W_2} \times \frac{Z}{Z_1}}. \quad (2.24)$

Для этого режима вторичные токи находятся из выражений:

$$i_2 = I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \times \frac{X_2}{Z_2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \varphi_2); \quad (2.25)$$

$$i_{02} = I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \times \frac{Z}{Z_2} \sin(\omega t + \varphi - \varphi_2), \quad (2.26)$$

где:  $Z_2 = \sqrt{R^2 + (X + X_2)^2}$ ;  $\varphi_2 = \arctg \frac{X + X_2}{R}$ .

Вторая коммутация ключа происходит при угле  $\omega t_2$ , величина которого может быть определена из рисунка 2.2 (б):

$$\omega t_2 = \pi - \omega t_1 + 2(\varphi_1 - \varphi).$$

Расчетная форма кривой вторичного тока, приведенная на рисунке 2.2 (б), складывается из двух синусоид  $i_2^1$  и  $i_2^{11}$  вторичного тока, в цепи нагрузки ДТ, соответственно, для ненасыщенного и насыщенного режимов работы. Переход от  $i_2^1$  к  $i_2^{11}$  в соответствии с принятыми допущениями происходит скачком в моменты коммутации  $\omega t_1$  и  $\omega t_2$  ключа К. Указанные на рисунке углы имеют положительные значения вправо по оси  $\omega t_1$ .

С учетом сказанного выше среднее и действующее значение вторичного тока, в общем случае, когда  $I_{1m} > I_{1mk}$  определяются из выражений (2.27) и (2.28):

$$I_{2cp} = \frac{2}{\pi} I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \left[ \frac{X_1}{Z_1} \int_{2(\varphi_1 - \varphi) - \omega t_1}^{\omega t_1} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \varphi_1\right) d\omega t + \frac{X_2}{Z_2} \left( \int_{\omega t_1}^{\frac{\pi}{2} + \varphi_2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \varphi_2\right) d\omega t + \int_{-\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_2\right)}^{2(\varphi_1 - \varphi) - \omega t_1} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \varphi_2\right) d\omega t \right) \right];$$

$$I_2 = I_{1m} \cdot \frac{W_1}{W_2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left\{ \left( \frac{X_1}{Z_1} \right)^2 \int_{2(\varphi_1 - \varphi) - \omega t_1}^{\omega t_1} \sin^2\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \varphi_1\right) d\omega t + \left( \frac{X_2}{Z_2} \right)^2 \left( \int_{\omega t_1}^{\frac{\pi}{2}} \sin^2\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \varphi_2\right) d\omega t + \int_{-\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_2\right)}^{2(\varphi_1 - \varphi) - \omega t_1} \sin^2\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \varphi_2\right) d\omega t \right) \right\}}$$

После интегрирования получим формулы (2.29) и (2.30):

$$I_{2cp} = \frac{2}{\pi} I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \left[ \frac{X_1}{Z_1} \sin(\omega t_1 - \varphi_1 + \varphi_2) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) - \frac{X_2}{Z_2} \sin(\omega t_1 - \varphi_1 + \varphi) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi + \varphi_1 - \varphi_2\right) \right]; \quad (2.29)$$

$$I_2 = I_{1m} \cdot \frac{W_1}{W_2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left\{ \left( \frac{X_1}{Z_1} \right)^2 \left[ (\omega t_1 - \varphi_1 + \varphi) + \frac{1}{2} \cos 2\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \sin 2(\varphi_1 - \varphi - \omega t_1) \right] + \left( \frac{X_2}{Z_2} \right)^2 \left[ (\pi + \varphi_1 - \varphi - \omega t_1) + \frac{1}{2} \cos 2\left(\frac{\pi}{2} - \varphi + \varphi_1 - \varphi_2\right) \sin 2(\varphi - \varphi_1 + \omega t_1) \right] \right\}}$$

Рассчитанные значения среднего выпрямленного напряжения, на активной нагрузке датчика тока приведенные в таблице 2.3 и на рисунке 2.3, имеют хорошее совпадение с экспериментом – расхождение не более 10%.



Таблица 2.3 Экспериментальные и расчетные данные значений среднего выпрямленного напряжения

I <sub>1</sub> , А	Эксперимент				Расчет			
	W <sub>2</sub> =1000		W <sub>2</sub> =2500		W <sub>2</sub> =1000		W <sub>2</sub> =2500	
	R <sub>н</sub> =500	R <sub>н</sub> =2000	R <sub>н</sub> =500	R <sub>н</sub> =2000	R <sub>н</sub> =500	R <sub>н</sub> =2000	R <sub>н</sub> =500	R <sub>н</sub> =2000
10	2,33	3,38	1,8	5,0	1,95	2,52	1,54	4,42
20	4,2	5,6	3,2	9,2	3,9	5,04	3,08	8,84
30	5,8	6,9	4,9	13,2	5,85	6,55	4,62	13,26
40	6,8	7,7	6,5	16,3	6,45	7,3	6,16	16,04
50	7,4	8,3	8,2	18,3	6,8	7,9	7,7	16,9
60	7,8	8,7	9,8	19,5	7,1	8,4	9,24	17,8
80	8,5	9,3	12,3	21,0	7,75	8,9	11,9	19,55
100	8,8	9,7	14,5	22,8	9,0	9,3	13,1	21,2

Расчетные формы кривых Э.Д.С и вторичного тока нагрузки датчика сходны с осциллограммами (рисунок 2.2), снятыми для тех же условий. Следовательно, предлагаемый метод расчета дает возможность представить форму кривых вторичных токов и напряжений.

При кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания расчет однофазной схемы датчика тока выполняется в следующем образом:

1. Значение первичного коммутационного тока для заданных параметров датчика и нагрузки определяется по выражениям:

$$\text{для холостого хода: } I_{1mk} = \frac{H_K \times \ell}{W_1}; \quad (2.31)$$

$$\text{для режима нагрузки: } I_{1mk} = \frac{H_K \times \ell}{W_1 \times \frac{Z}{Z_1}}. \quad (2.32)$$

Следует еще раз отметить, что сопротивление  $Z_1$  представляет собой полное сопротивление вторичной цепи датчика, слагаемое из сопротивления ветви намагничивания при значениях  $H < H_K$  и сопротивления цепи вторичного тока.

2. Если первичный ток датчика  $I_{1m} < I_{1mk}$ , то подсчет среднего и действующего значений вторичного тока выполняется по формулам (2.21) и (2.22). В случае  $I_{1m} > I_{1mk}$ , используются формулы (2.29) и (2.30).

Приведенный метод расчета используется для определения вторичных токов схемы токов нулевой последовательности в режиме замыкания на землю первичной цепи.

### **2.3. Расчет характеристик датчиков тока при использовании аналитической аппроксимации кривой намагничивания**

Методы расчета электрических цепей со сталью при аналитическом выражении зависимости между мгновенными значениями  $B$  и  $H$  позволяют анализировать работу отдельных устройств и схем в общем виде, что весьма существенно, так как становится возможным исследовать решение при изменении любого из параметров цепи.

В применяющихся на практике методах расчета часто рассматриваются предельные режимы работы, когда намагничивающая сила или потокосцепление нелинейной индуктивности изменяются по синусоидальному закону. Такие режимы являются частными случаями и, как правило, устройства, рассчитанные по этим методам, после изготовления требуют дополнительной переделки и наладки, так как действительные соотношения токов и напряжений в электрической цепи при несинусоидальных формах кривых оказываются иными.

В большинстве случаев для решения нелинейных дифференциальных уравнений применяют приближенные методы [72, 82].

Приближенное решение по известным методам связано с необходимостью перехода к нелинейным алгебраическим или трансцендентным уравнениям, что при учете высших гармоник представляет трудоемкий процесс. Трудоемкость составления системы алгебраических или трансцендентных уравнений определяется выбранным выражением кривой намагничивания и числом учитываемых гармоник.

Вопросы аппроксимации кривых намагничивания подробно освещены в работах [71, 83].

В связи с этим для исследования и анализа нелинейных электрических цепей наиболее целесообразным является применение компьютерных программ.

В данной главе даны расчетные уравнения для анализа и исследования режимов работы датчиков тока в однофазных и трехфазных схемах рассчитанные с помощью компьютерной программы MathCAD. Приведены результаты расчета однофазной схемы включения ДТ на смешанную R, L нагрузку.

**Холостой ход.** Режим холостого хода является одним из предельных режимов работы датчиков тока, характеризующийся тем, что намагничивающая сила его меняется по синусоидальному закону, а индукция не синусоидальна. В следствии этого Э.Д.С вторичной обмотки имеет вид биссимметричной кривой, в разложении которой присутствуют только косинусные члены нечетных порядков.

Аппроксимируя характеристику намагничивания сердечника датчика тока гиперболическим синусом:

$$H = \alpha \sin h\beta B, \quad (2.33)$$

где:  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты аппроксимации, оптимальное значение которых может быть определено по методу, изложенному в [74].

При синусоидальном первичном токе получим:

$$B = \frac{1}{\beta} \arcsin h\left(\frac{I_{1m} \times W_1}{\alpha \ell} \sin \omega t\right). \quad (2.34)$$

Тогда выражение для мгновенного значения напряжения на вторичной обмотке датчика имеет вид:

$$U_2 = W_2 Q \frac{dB}{dt} = \frac{I_1 \omega W_1 W_2 Q}{\alpha \beta \ell} \times \frac{\cos \omega t}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_1 W_1}{\alpha \ell} \sin \omega t\right)^2}}. \quad (2.35)$$

Среднее и действующее значения вторичного напряжения находятся из выражений:

$$U_{2cp} = \frac{2\omega W_2 Q}{\pi \beta} \ln \left[ \frac{I_{1m} W_1}{\alpha \ell} + \sqrt{1 + \left(\frac{I_{1m} W_1}{\alpha \ell}\right)^2} \right]; \quad (2.36)$$

$$U_2 = \frac{\omega W_2 Q}{\beta} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{I_m W_1}{\alpha \ell}\right)^2} - 1}. \quad (2.37)$$

Результаты расчетов характеристик  $U_2$  и  $U_{2cp}=f(I_1)$  дали хорошее совпадение с экспериментальными данными (таблица 2.4).

Таблица 2.4 - Результаты расчетов среднего и действующего значений вторичного напряжения

$I_1$	Датчик тока: $\ell=48,5$ см; $Q=0,525$ см <sup>2</sup> ; $W_2=2500$ ; $W_1=1$ ; $\alpha=0,152$ а/см; $\beta=3,875$ 1/тл.			
	Расчет		Эксперимент	
30	15,75	22,4	15,9	21,2
50	19,0	29,8	19,8	28,7
70	21,1	35,6	21,4	34,0
90	22,7	41,0	22,7	38,2
100	23,3	43,2	23,2	40,1

Выражения (2.36) и (2.37) могут использоваться также для приближенных вычислений значений напряжения  $U_{2cp}$  и  $U_2$  в режиме нагрузки ДТ для соотношений сопротивлений вторичной цепи и ветви намагничивания  $[Z_{2T}+Z_H] \gg [Z_{02}]$

Как показали экспериментальные исследования приемлемое совпадение с расчетными данными получается при:  $[Z_{2T}+Z_H] > (2 \div 3)[Z_{02}]$

**Режим нагрузки.** Наличие нагрузки во вторичной цепи датчика тока при насыщении сердечника приводит к тому, что формы кривых вторичного тока намагничивания и нагрузки существенно отличаются от синусоидальной. Степень искажения вторичных токов зависит от степени насыщения и от характера нагрузки. Исследование в подобном случае даже простейших однофазных схем с датчиками тока связано со значительными трудностями, на которые указывалось выше.

В связи с этим расчет характеристик и исследование работы ДТ в режиме нагрузки выполнялся методами приближенного и численного анализа нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих процессы в ДТ, на компьютерах.

В качестве аппроксимирующей функции кривой намагничивания сердечника выбран нечетный степенной полином вида:

$$H = \alpha B + \beta B^3. \quad (2.38)$$

являющийся наиболее удобной формулой при расчетах на компьютере [73].

Коэффициенты аппроксимации  $\alpha$  и  $\beta$  определены по методу наименьших квадратов.

Расчет выполнялся по схеме замещения (глава I, рисунок 1.3 а), во вторичную цепь которой включена нагрузка разного характера.

Полное сопротивление нагрузочной ветви состоит из:

$$Z = Z_{2T} + Z_H = R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right). \quad (2.39)$$

Схема замещения питается от источника первичного тока, равного:

$$i_{12} = I_1 \frac{W_1}{W_2} \sin \omega t. \quad (2.40)$$

В соответствии со схемой замещения и принятыми ранее обозначениями, дифференциальные уравнения, связывающие мгновенные значения токов и напряжений датчика тока, запишутся следующим образом:

$$W_2 Q \frac{dB}{dt} = i_2 R + L \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C} \int i_2 dt; \quad (2.41)$$

$$i_2 = i_{12} - i_{02}. \quad (2.42)$$

Выражение для вторичного тока намагничивания согласно (2.38) имеет вид:

$$i_{02} = \frac{\ell}{W_2} (\alpha B + \beta B^3). \quad (2.43)$$

Подставив (2.40) и (2.43) в (2.42), получим выражение мгновенного значения вторичного тока в цепи нагрузки датчика тока:

$$i_2 = I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \sin \omega t - \frac{\ell}{W_2} (\alpha B + \beta B^3). \quad (2.44)$$

После дифференцирования выражения (2.41) и подстановки в него (2.44) имеем:

$$\left( W_2 Q + \frac{\alpha \ell}{W_2} L + \frac{6\beta \ell}{W_2} B \right) \frac{d^2 B}{dt^2} + \left( \frac{\alpha \ell}{W_2} R + \frac{3\beta \ell}{W_2} R B^2 \right) \frac{dB}{dt} + \frac{\alpha \ell}{W_2} \frac{1}{C} B + \frac{\beta \ell}{W_2} \frac{1}{C} B^3 = I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \left( \omega R \cos \omega t - \omega^2 L \sin \omega t + \frac{1}{C} \sin \omega t \right). \quad (2.45)$$

Дифференциальное уравнение (2.45) является исходным для расчета на компьютере различных режимов работы датчика тока при изменении первичного тока и параметров схемы. Используя его, можно определить амплитудные, действующие и средние значения вторичных токов  $i_2$  и  $i_{02}$ , их гармонические составляющие, проанализировать влияние отдельных параметров схемы на значения токов, напряжений, выходной мощности, исследовать резонансные явления на отдельных гармониках, и т.д.

Принципиальная схема порядка определения с помощью компьютера вторичного тока датчика в цепи нагрузки следующая:

- пользуясь методами вычислительной математики решается уравнение (2.45), из которого находится  $B(t)$ ;
- путем подстановки решения (2.45) в (2.43) вычисляется  $i_{02}(t)$  и затем  $i_2(t)$  по формуле (2.44);
- имея зависимость  $i_2(t)$ , по известным формулам определяются его действующее и среднее значения:

$$I_{2cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i_2 dt; \quad (2.46)$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_2^2 dt}. \quad (2.46^1)$$

а также амплитуды синусной и косинусной составляющих  $K$  – гармоники:

$$I_{2mk}^I = \frac{2}{T} \int_0^T i_2 \sin k\omega t dt \quad \text{и} \quad I_{2mk}^{II} = \frac{2}{T} \int_0^T i_2 \cos k\omega t dt. \quad (2.47)$$

Для частного случая, когда нагрузочная ветвь ДТ состоит из последовательно включенных сопротивлений  $R$  и  $X$ , расчетное уравнение запишется иначе:

$$W_2 Q \frac{d^2 B}{dt^2} + \left( \frac{\alpha \ell}{W_2} L + \frac{3\beta \ell}{W_2} L B^2 \right) \frac{dB}{dt} + \frac{\alpha \ell}{W_2} R B + \frac{\beta \ell}{W_2} R B^3 = I_{1m} \frac{W_1}{W_2} (R \sin \omega t + \omega L \cos \omega t). \quad (2.48)$$

Тоже, для активно-емкостной нагрузки:

$$W_2 Q \frac{d^2 B}{dt^2} + \left( \frac{\alpha \ell}{W_2} R + \frac{3\beta \ell}{W_2} R B^2 \right) \frac{dB}{dt} + \frac{\alpha \ell}{W_2} \frac{1}{C} B + \frac{\beta \ell}{W_2} \frac{1}{C} B^3 = I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \left( \omega R \cos \omega t + \frac{1}{C} \sin \omega t \right). \quad (2.48^1)$$

Дифференциальное уравнение (2.48) с приведенными выше исходными данными датчика тока (страница 52), решались с помощью компьютерной программы MathCAD, в которой был реализован численный метод Рунге-Кутты [84].

В процессе решения выбирались фиксированные приращения независимого переменного равные  $\Delta t=0,001$ ;  $\Delta t=0,0005$ ;  $\Delta t=0,0001$  сек. Уменьшение  $\Delta t$  приводит к повышению точности решения, однако требует большей затраты времени.

С целью проверки сходимости процесса к единственному решению, при выборе любого начального приближения из области  $t=0$  до  $T/2$  проведены расчеты для начальных условий  $B=0, t=0$ ;  $B=0, t=0,005$ ;  $B=0, t=0,01$  сек. Во всех вариантах наблюдалась устойчивая сходимость и решение устанавливалось примерно к десятому периоду изменения первичного тока (рисунок 2.4 и рисунок 2.5).

Расчетные осциллограммы изменения  $B=f(\omega t)$ , при начальных условиях ( $B=0, t=0$ ), показаны на рисунке 2.4.

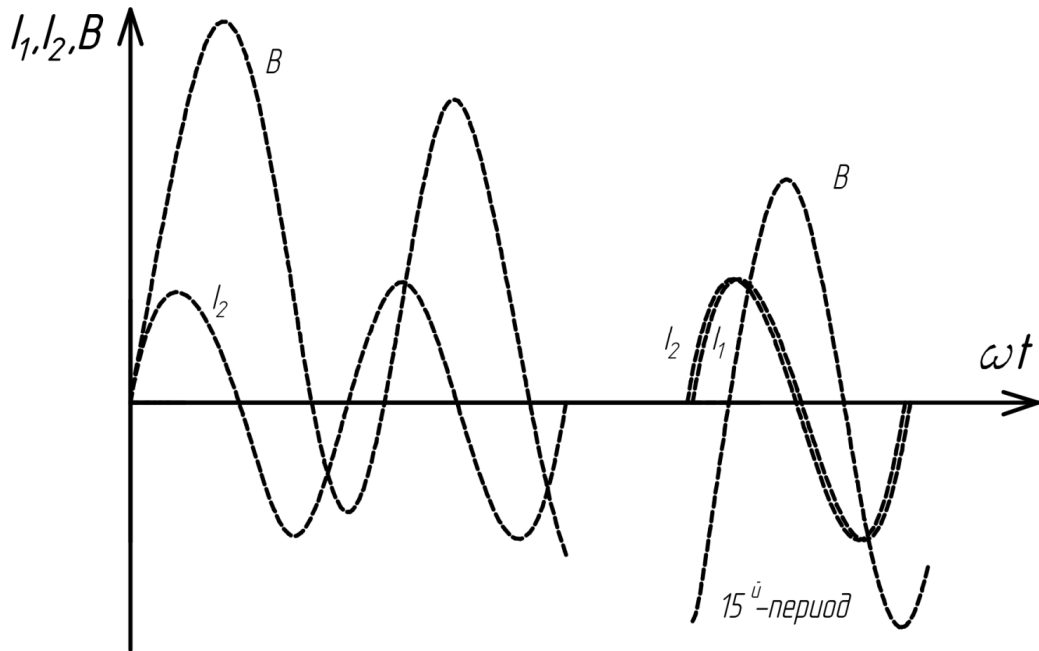


Рисунок 2.4 - Расчетные осциллограммы изменения  $V=f(\omega t)$ . Начальные условия  $V=0$ ,  $t=0$ . ( $I_1=10\text{A}$ ;  $W_2=2500$ ;  $R=686\ \text{Ом}$ ;  $L=0,59\ \text{Гн}$ ). Расчет  $I_{2\text{cp}}=3,4\ \text{мА}$ . Эксперимент  $I_{2\text{cp}}=3,6\ \text{мА}$ .

Расчетные осциллограммы изменения  $V=f(\omega t)$ , при начальных условиях ( $V=0$ ,  $t=0,005\ \text{сек}$ ), показаны на рисунке 2.5.

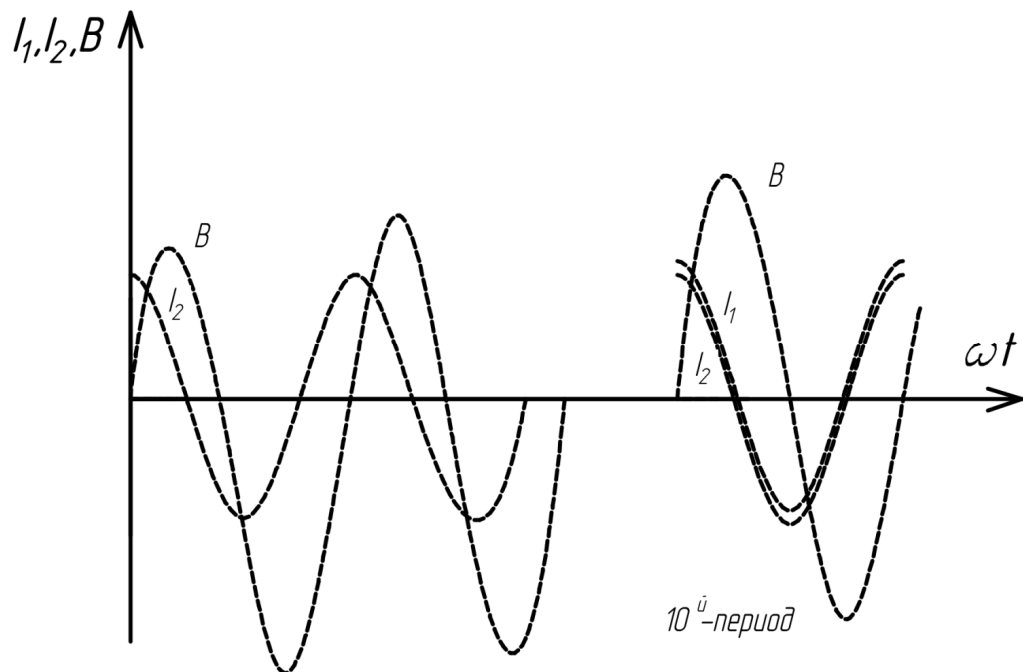


Рисунок 2.5 - Расчетные осциллограммы изменения  $V=f(\omega t)$ . Начальные условия  $V=0$ ,  $t=0,005\ \text{сек}$ . ( $I_1=10\text{A}$ ;  $W_2=2500$ ;  $R=686\ \text{Ом}$ ;  $L=0,59\ \text{Гн}$ ). Расчет  $I_{2\text{cp}}=3,4\ \text{мА}$ . Эксперимент  $I_{2\text{cp}}=3,6\ \text{мА}$ .



Расчетные данные исследуемой схемы (таблица 2.5) имеют хорошее совпадение с экспериментом.

Таблица 2.5. Расчетные и экспериментальные данные среднего вторичного тока

I <sub>1</sub> , А	Нагрузка R, L			
	W <sub>2</sub> =2500			
	Расчет		Эксперимент	
	R=686 Ом; L=0,59 Гн	R=2186 Ом; L=0,59 Гн	R=686 Ом; L=0,59 Гн	R=2186 Ом; L=0,59 Гн
10	3,4	2,35	3,6	2,5
50	16,16	8,8	16,4	9,15
100	27,16	11,04	29,0	11,4

#### 2.4. Сравнительный анализ результатов расчета характеристик датчика тока различными методами

В режиме холостого хода расчет характеристик датчика тока производился методом кусочно-линейной аппроксимации и гиперболической функцией синуса. Данные для сравнительного анализа взяты из таблицы 2.1 и таблицы 2.4. В качестве примера рассмотрены показатели при минимальном, среднем и максимальном значении первичного тока, представлено процентное соотношение совпадения и погрешности расчета с экспериментом, таблица 2.6.

Таблица 2.6 - Режим холостого хода

I <sub>1</sub> , А	Эксперимент		Расчет			
			Кусочно-линейная		Гиперболический синус	
	U <sub>2cp</sub> , В	U <sub>2</sub> , В	U <sub>2cp</sub> , В	U <sub>2</sub> , В	U <sub>2cp</sub> , В	U <sub>2</sub> , В
30	15,9	21,2	16,9	21,3	15,75	22,4
70	21,4	34,0	21,0	34,8	21,1	35,6
100	23,2	40,1	23,9	40,8	23,3	43,2
Совпадение %	100	100	96,5	98,5	99	94,5
Погрешность %	0	0	3,5	1,5	1	5,5

Из проведенного сравнительного анализа видно, что расчет среднего значения вторичного напряжения с минимальной погрешностью произведен методом гиперболического синуса, а действующее значение вторичного

напряжения с минимальной погрешностью определяется методом кусочно-линейной аппроксимации. Это подтверждает выводы (приложение А) о примерно одинаковой погрешности отклонения у метода кусочно-линейной аппроксимации и гиперболической функцией синуса.

В режиме нагрузки расчет характеристик датчика тока производился методом кусочно-линейной аппроксимации и степенным полиномом. Данные для сравнительного анализа взяты из таблицы 2.3 и таблицы 2.5. В качестве примера рассмотрены показатели при минимальном, среднем и максимальном значении первичного тока, представлено процентное соотношение совпадения и погрешности расчета с экспериментом, таблица 2.7.

Таблица 2.7 - Режим нагрузки

$I_1, A$	Эксперимент		Расчет			
			Кусочно-линейная		Степенной полином	
	$R_H=500$	$R_H=2000$	$R_H=500$	$R_H=2000$	$R_H=500$	$R_H=2000$
	$I_{2cp}, A$	$I_{2cp}, A$	$I_{2cp}, A$	$I_{2cp}, A$	$I_{2cp}, A$	$I_{2cp}, A$
10	3,6	2,5	3,08	2,21	3,4	2,35
50	16,4	9,15	15,4	8,45	16,16	8,8
100	29,0	11,4	26,2	10,6	27,3	11,04
Совпадение %	100	100	90,5	91	96	96
Погрешность %	0	0	9,5	9	4	4

Из проведенного сравнительного анализа видно, что расчет среднего значения вторичного тока с минимальной погрешностью произведен методом степенного полинома. Это подтверждает выводы (приложение А) о меньшей погрешности отклонения у метода аппроксимации степенным полиномом, чем у метода кусочно-линейной аппроксимации.

Был предложен алгоритм расчета характеристик датчиков тока в режимах холостого хода и нагрузки:

1). В режиме холостого хода расчет среднего значения вторичного напряжения следует производить методом гиперболического синуса по формуле

(2.36), расчет действующего значения вторичного напряжения производится методом кусочно-линейной аппроксимации по формулам (2.7<sup>1</sup>) и (2.14).

2). В режиме нагрузки расчет среднего значения вторичного тока следует производить методом степенного полинома по формуле (2.45).

### **Выводы по главе**

1. Для анализа работы датчиков тока в широком диапазоне первичных токов и сопротивлений нагрузки целесообразно применение компьютерных программ, которые облегчают выполнение численного анализа и используют более точное выражение кривой намагничивания. В отличие от методов, рассматривающих трансформаторы тока как линейный элемент или как элемент с идеальной характеристикой намагничивания.

2. Проведенное исследование различных методов аппроксимации показало, что для кривой намагничивания сердечника датчика тока накладного типа, выполненного из электротехнической стали Э-310 с воздушным зазором, наилучшие показатели имеют степенные функции, с минимальной погрешностью отклонения. Хорошие показатели у арктангенсных и гиперболических функций, имеющих небольшое количество коэффициентов аппроксимации. Самый простой и распространенный способ кусочно-линейной аппроксимации, так же имеет небольшую погрешность отклонения и подходит для выражения кривой намагничивания датчика тока.

3. Анализ режимов работы датчиков тока в однофазных и трехфазных схемах можно проводить с достаточной для практических целей точностью на основе степенных полиномов, гиперболического синуса и кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания. Данные методы позволяют определить основные характеристики датчиков в режиме «вход-выход».

## **Глава III. РАЗРАБОТКА МАКЕТА ДАТЧИКА ТОКА ДЛЯ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ И СИГНАЛИЗАЦИИ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ СЕЛЬСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ**

### **3.1. Параметры трансформаторных датчиков тока накладного типа для распределительных устройств 6-10 кВ**

Приведем результаты исследований по выбору оптимальных параметров трансформаторных датчиков тока, предназначенных для питания устройств защиты и сигнализации замыканий на землю в сельских сетях 6-10 кВ.

Разработка и исследование трансформаторных датчиков тока для микропроцессорных и полупроводниковых устройств защиты и сигнализации замыканий на землю в сельских сетях 6-10 кВ включали изучение следующих вопросов:

- определение основных конструктивных параметров: исполнение сердечника и вторичной обмотки, выбор магнитного материала, определение сечения  $Q$  и длины средней магнитной линии  $L$  сердечника, определение числа витков  $W_2$  вторичной обмотки;
- установка датчиков в шкафах КРУН-10 кВ;
- исследование характеристик и режимов работы;
- оценка возможности применения датчиков в схемах защит от коротких замыканий.

#### **Датчики тока для РУ 6-10 кВ**

Конструктивно датчик тока представляет собой вторичную систему (магнитопровод с обмоткой), устанавливаемую на проходных изоляторах типа ИП, ИПУ [79] и др. в шкафах КРУН-10 кВ (рисунок 3.1). Роль первичной обмотки выполняет токоведущий стержень проходного изолятора. В связи с тем, что первичная обмотка как конструктивный элемент в датчиках отсутствует, стоимость их незначительна. Принципиальная схема датчика и варианты установки его на проходном изоляторе показаны на рисунке 3.1.

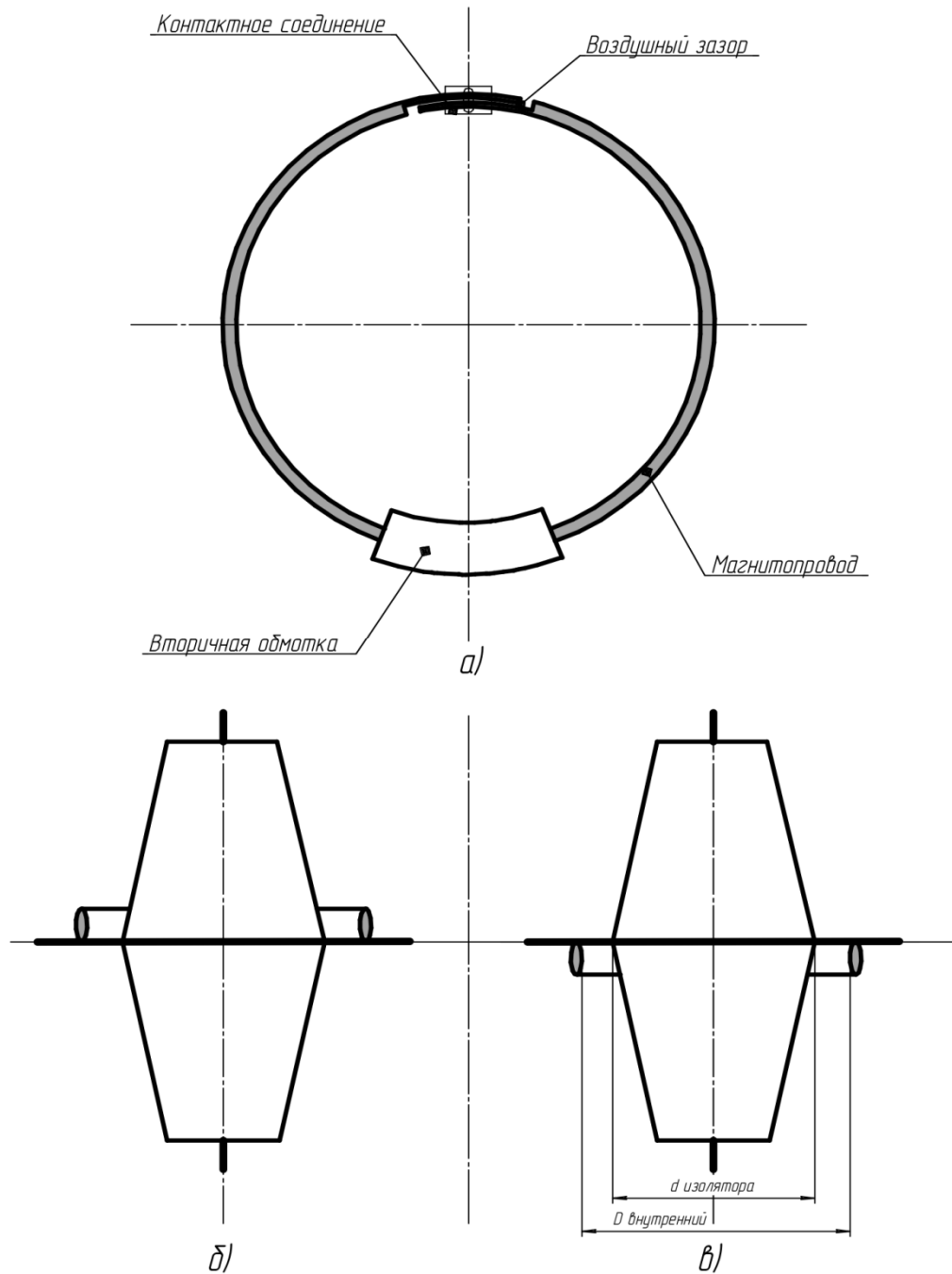


Рисунок 3.1 - Общий вид трансформаторного датчика тока накладного типа, устанавливаемого в КРУН 6-10 кВ (а) и варианты установки его на проходном изоляторе (б,в).

Как показывают расчеты, установка датчика при  $D_{ВН} = d_{из} + (6-8)$  см вполне приемлема, с точки зрения обеспечения электрической прочности конструкции, и практически наиболее удобна. Таким образом, внутренний диаметр датчика определяется размером проходного изолятора и с учетом обеспечения электроизоляционных расстояний составляет  $D_{ВН} = 150-180$  мм, длина пластин с

учетом диаметра 450-600 мм. Сечение магнитопровода для датчиков с малым объемом стали 0,5-1,0 см<sup>2</sup>.

Магнитопровод датчика кольцевой из сплошной ленты или пластин собираемых внахлестку. Как будет показано в главе IV, для исполнения фильтров токов нулевой последовательности наиболее целесообразна разъемная конструкция магнитопровода, которая выполняется из пакета пластин, сворачиваемого в кольцо с закреплением концов внахлестку зажимом (рисунок 3.1). Для обеспечения электроизоляционных расстояний, при установке датчика на проходном изоляторе, высота пластин 10-15 мм, а в целом сердечник с обмоткой не более 30 мм. В качестве ферромагнитного материала сердечника используются наиболее распространенные стали марок Э-41(42) и Э-310(320) [81], толщиной  $\Delta = 0,35$  мм. В рассматриваемых вариантах, в качестве изоляции, применялась заливка компаундом.

Сечение магнитопровода, число витков и исполнение вторичной обмотки датчика определялись из условий требования линейности и идентичности характеристик, величин вторичных токов, напряжений, мощности и компактности конструкции.

Экспериментальные исследования режимов работы и характеристик датчиков проводились в лабораторных условиях на установках изображенных на рисунке 3.2.

В установках (рисунок 3.2 а,б) в качестве источника тока использовались ферромагнитное нагрузочное токовое устройство (НТУ) до 600 А и измерительный ТТ с максимальным коэффициентом трансформации 1500/5, питаемый со вторичной стороны. В качестве комплексной нагрузки  $Z_H$ , для определения характеристик датчиков применялись:  $R_H = 50-5000$  Ом,  $X_C = 1000$  Ом ( $C_H = 3,2$  мкФ),  $X_L = 1000$  Ом ( $L_H = 2,75$  Гн). Это позволило выполнить большой объем исследований однофазных схем ДТ при первичных токах до 1500 А. Рабочие токи в трехфазной установке (рисунок 3.2 в) до 100 А.

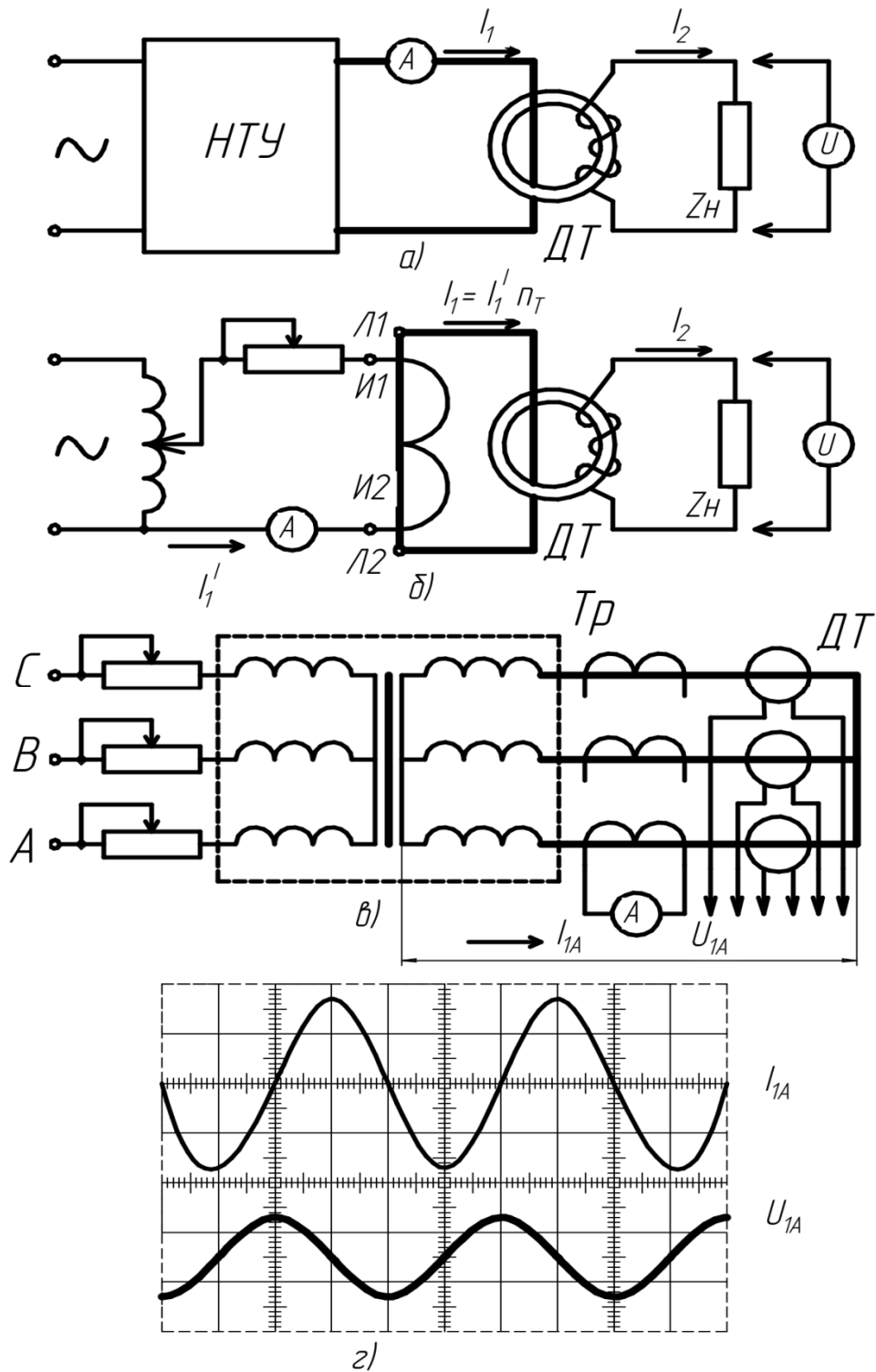


Рисунок 3.2 - Схемы экспериментальных установок (а,б,в) для исследований датчиков тока; (г) – форма кривых напряжения и тока в трехфазной установке.

В связи с тем, что датчик тока является источником незначительной мощности, эксперименты проводились с использованием следующих измерительных приборов:

- вольтметр электростатической системы (С-95, класс точности 1,5) для измерения действующих значений Э.Д.С и напряжений [86];
- электронный вольтметр средних значений (Ф-517, класс точности 1,5) для измерений напряжений и токов [87];
- электронный осциллограф С1-16 для измерения максимальных значений Э.Д.С, напряжений и фотографирования кривых [88].

Учитывая, что разрабатываемые датчики тока предназначены для защиты и сигнализации замыканий на землю, выполняемых с выдержкой времени, к датчикам не предъявляются требования точной передачи информации о переходном процессе в начальный момент времени и в дальнейшем исследования проводятся для установившегося режима.

### 3.2. Характеристики датчиков тока

Результаты исследований представлены в виде графиков и осциллограмм (рисунки 3.3-3.14) и в последующих главах при конкретном использовании ДТ в различных схемах защит.

На рисунке 3.3 представлено амплитудное, действующее и среднее значения Э.Д.С на выходе ДТ.

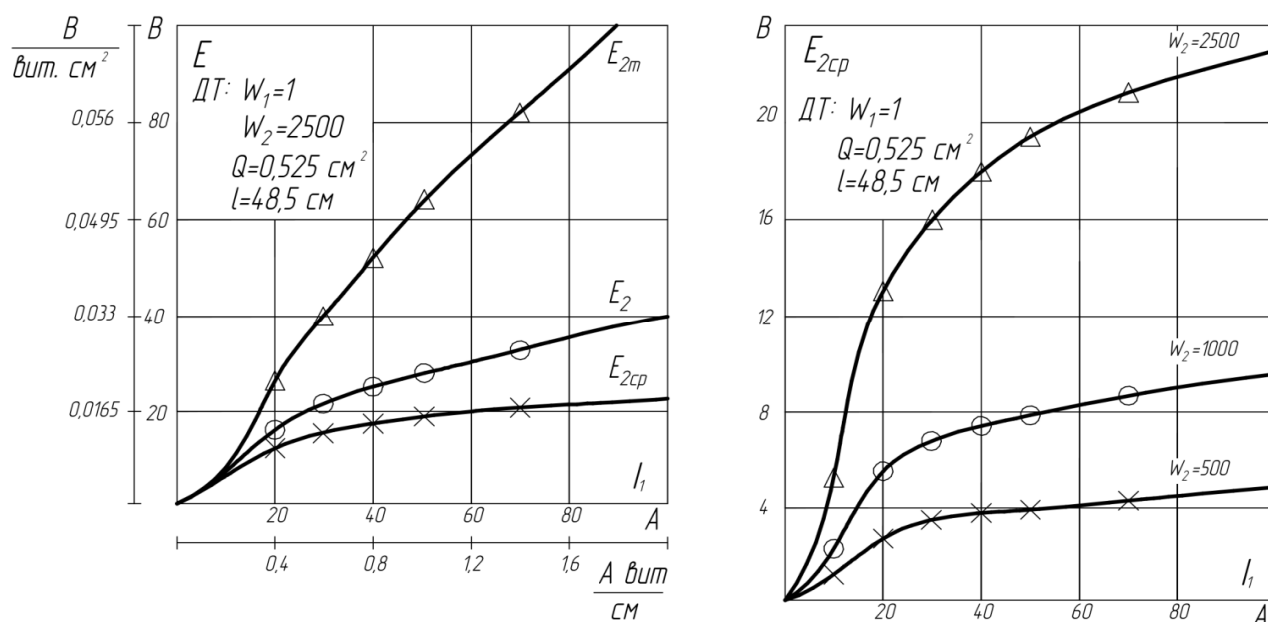


Рисунок 3.3 - Амплитудное, действующее и среднее значения Э.Д.С на выходе ДТ в зависимости от первичных токов и витков вторичной обмотки.



Форма кривой ЭДС на вторичной обмотке датчика приведена на рисунке 3.4.

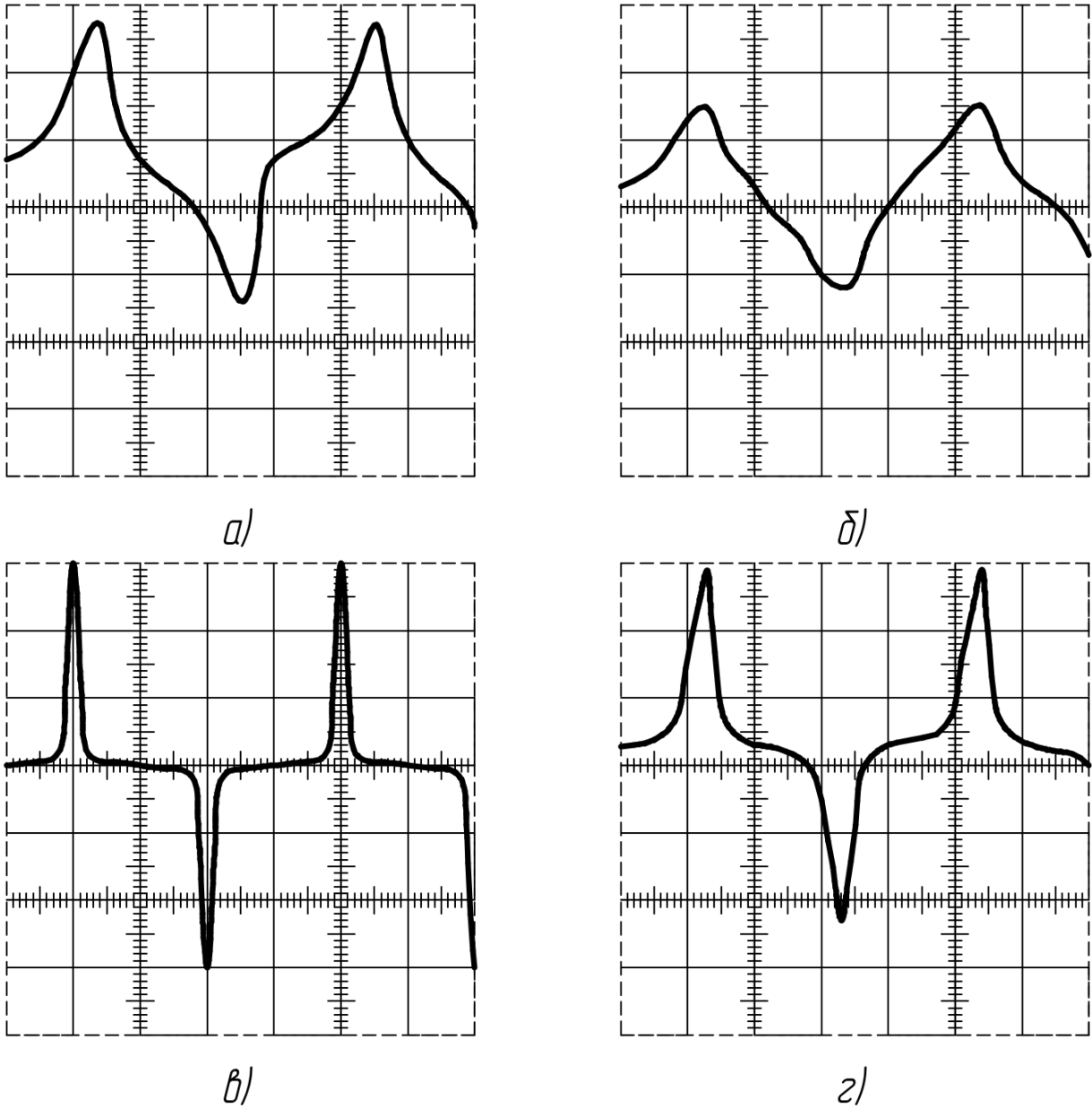


Рисунок 3.4 - Форма кривой Э.Д.С на вторичной обмотке датчика:

а)  $I_1=20\text{A}$ ;  $W_2=2500$ ;  $Q=0,5\text{ см}^2$ ;  $U_{2\text{cp}}=13,3\text{ В}$ ;  $U_{2\text{m}}=32\text{ В}$

б)  $I_1=20\text{A}$ ;  $W_2=2500$ ;  $Q=1,0\text{ см}^2$ ;  $U_{2\text{cp}}=21,2\text{ В}$ ;  $U_{2\text{m}}=39\text{ В}$

в)  $I_1=100\text{A}$ ;  $W_2=2500$ ;  $Q=0,5\text{ см}^2$ ;  $U_{2\text{cp}}=24\text{ В}$ ;  $U_{2\text{m}}=153\text{В}$

г)  $I_1=100\text{A}$ ;  $W_2=2500$ ;  $Q=1,0\text{ см}^2$ ;  $U_{2\text{cp}}=47\text{ В}$ ;  $U_{2\text{m}}=200\text{ В}$

На рисунке 3.5 представлены зависимости влияния на величину ЭДС зазора в сердечнике и исполнения вторичной обмотки.

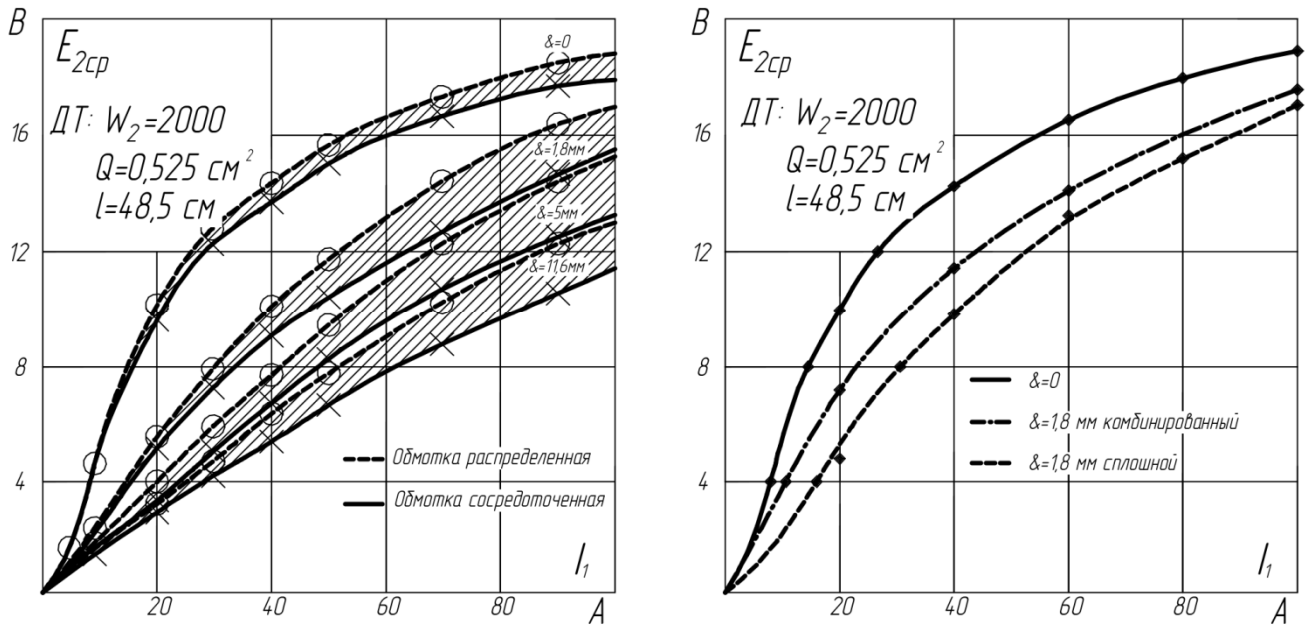


Рисунок 3.5 - Влияние на величину Э.Д.С зазора в сердечнике и исполнения вторичной обмотки.

При наличии зазора в магнитопроводе отсутствует влияние остаточного намагничивания, что делает характеристику более линейной, тем самым способствуя снижению величины Э.Д.С. при больших первичных токах.

Удельные характеристики амплитудных, действующих и средних значений Э.Д.С вторичной обмотки датчика в функции удельных ампервитков которые приведены на рисунке 3.3, могут быть использованы для определения Э.Д.С. при других конструктивных параметрах датчиков.

$$E_{2yd} = \frac{E_2}{W_2 Q}; \quad (3.1)$$

$$aW_{yd} = \frac{I_1 W_1}{l}. \quad (3.1^1)$$

По удельным характеристикам построена основная кривая намагничивания ( $B_m(H_m)$ ) датчика (рисунок 3.6) применяемая в последующих аналитических расчетах.

$$B_m = \frac{E_{yd.ср.} \times 10^4}{4f}; Tл \quad (3.2)$$

$$H_m = \sqrt{2} a W_{yd} \cdot A / см \quad (3.3)$$

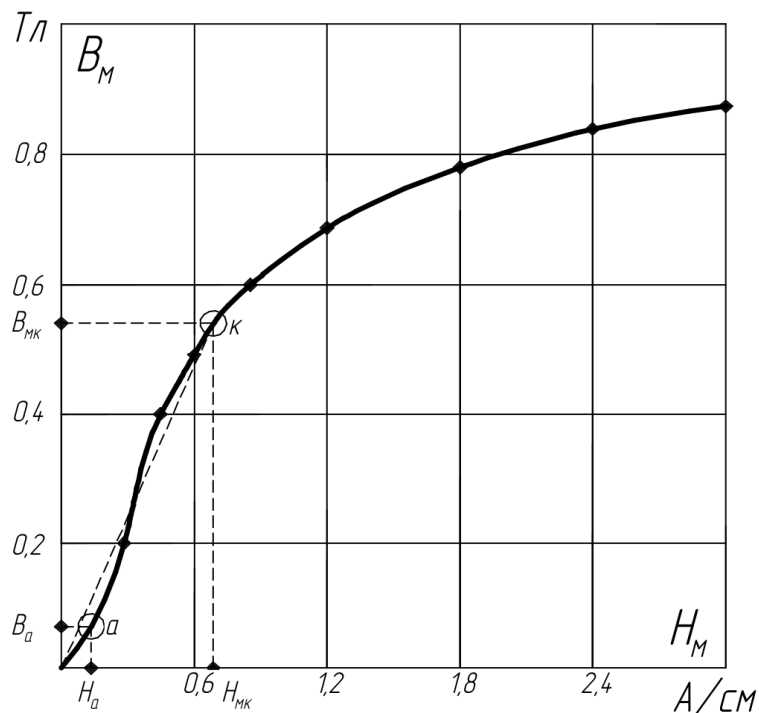


Рисунок 3.6 - Основная кривая намагничивания датчика в режиме синусоидального тока.

Как видно из рисунка 3.6, для принятого конструктивного исполнения сердечника с незначительным воздушным зазором ( $\delta=0,5$  мм) кривая намагничивания располагается намного ниже диапазонных кривых для сталей Э-310 и Э-42. Это обстоятельство благоприятно как для снижения величин максимальных Э.Д.С или напряжений при больших первичных токах, так и для достижения линейности и идентичности характеристик датчиков. Рассматривались и другие варианты исполнения сердечника датчика тока (рисунок 3.5), с более значительным зазором и частично перекрытыми стальными пластинами, комбинированным зазором.

На рисунке 3.11 показаны характеристики и форма кривой вторичного напряжения датчика при больших токах. Характеристика близка к линейной, что подтверждает возможность широкого использования трансформаторных датчиков в устройствах релейной защиты от коротких замыканий сельских распределительных сетей 6-10 кВ.

### 3.3. Регулировка вторичных токов и напряжений

При исследовании режима нагрузки показано влияние сечения сердечника, числа витков и сопротивления нагрузки на величину вторичных токов и напряжений (рисунки 3.7-3.12).

На рисунке 3.7 приведена зависимость напряжения на выходе датчика тока от первичных токов, при различном сечении сердечника и количества витков вторичной обмотки.

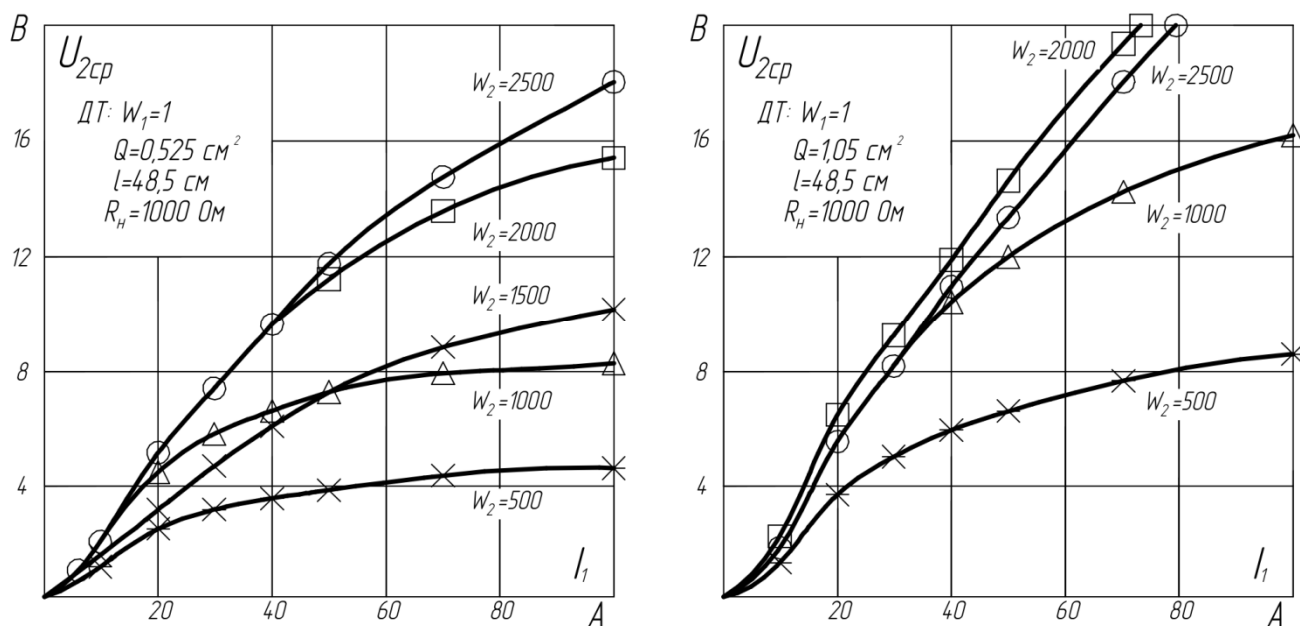


Рисунок 3.7 - Зависимости напряжения на выходе датчика от первичных токов, витков вторичной обмотки и сечения сердечника.

Форма кривой напряжения на нагрузке датчика тока, при различном сечении сердечника и сопротивлении нагрузки, показана на рисунке 3.8:

а)  $R_H = 1000 \text{ Ohm}$ ,  $U_{2cp} = 19 \text{ В}$  и б)  $R_H = 1500 \text{ Ohm}$ ,  $U_{2cp} = 20,8 \text{ В}$  для датчика тока с  $W_2 = 2500$  и  $Q = 0,5 \text{ cm}^2$ .

в)  $R_H = 1000 \text{ Ohm}$ ,  $U_{2cp} = 30 \text{ В}$  и г)  $R_H = 1500 \text{ Ohm}$ ,  $U_{2cp} = 37 \text{ В}$  для датчика тока с  $W_2 = 2500$  и  $Q = 1,0 \text{ cm}^2$ .

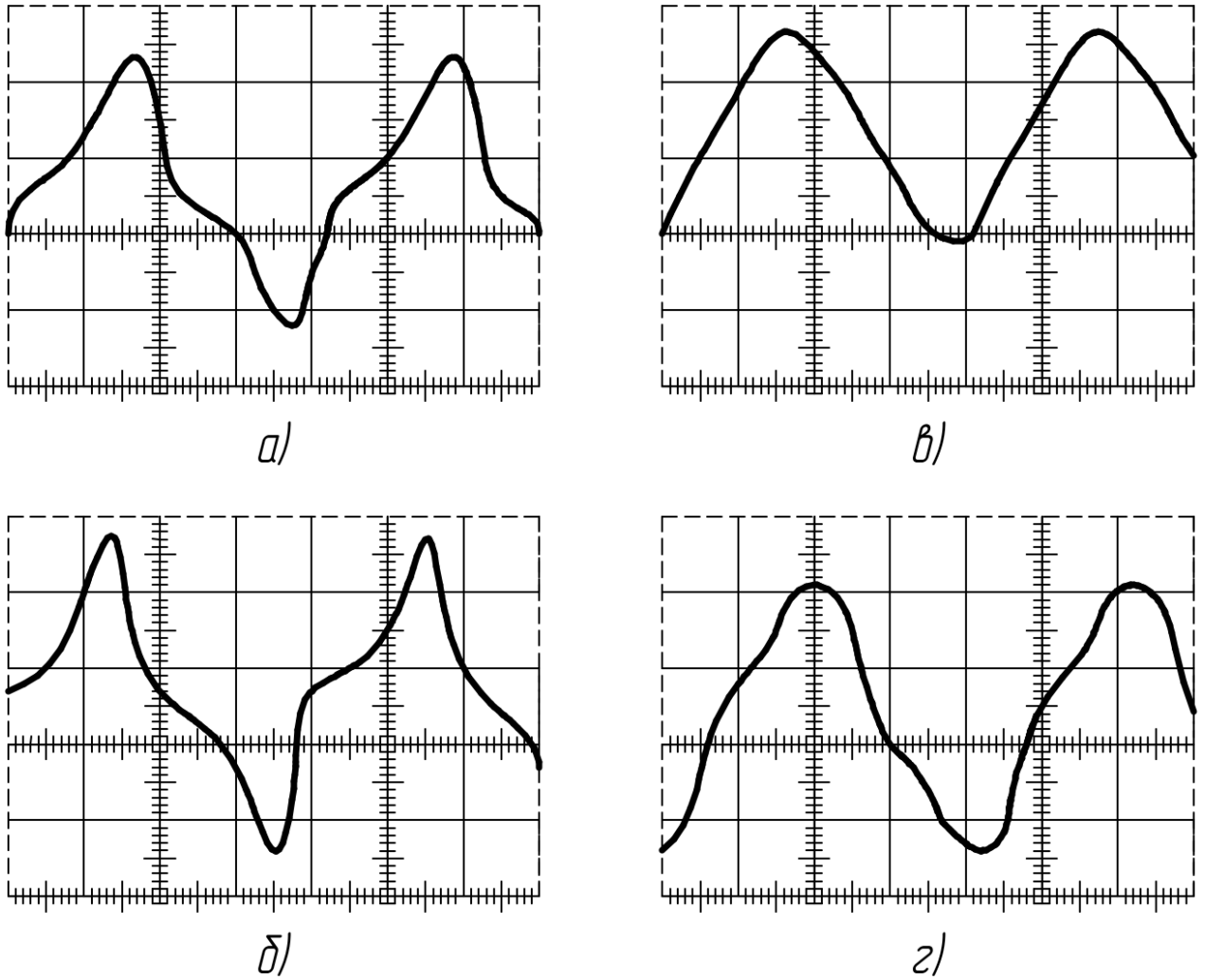


Рисунок 3.8 - Форма кривой напряжения на нагрузке датчика тока.

Для датчика тока с  $W_2 = 2500$  и  $Q = 0,5 \text{ см}^2$ .

а)  $R_H = 1000 \text{ Ом}$ ,  $U_{2cp} = 19 \text{ В}$

б)  $R_H = 1500 \text{ Ом}$ ,  $U_{2cp} = 20,8 \text{ В}$

Для датчика тока с  $W_2 = 2500$  и  $Q = 1,0 \text{ см}^2$ .

в)  $R_H = 1000 \text{ Ом}$ ,  $U_{2cp} = 30 \text{ В}$

г)  $R_H = 1500 \text{ Ом}$ ,  $U_{2cp} = 37 \text{ В}$

Влияние величины нагрузочного сопротивления на выходные характеристики датчика, изображено на рисунке 3.9.

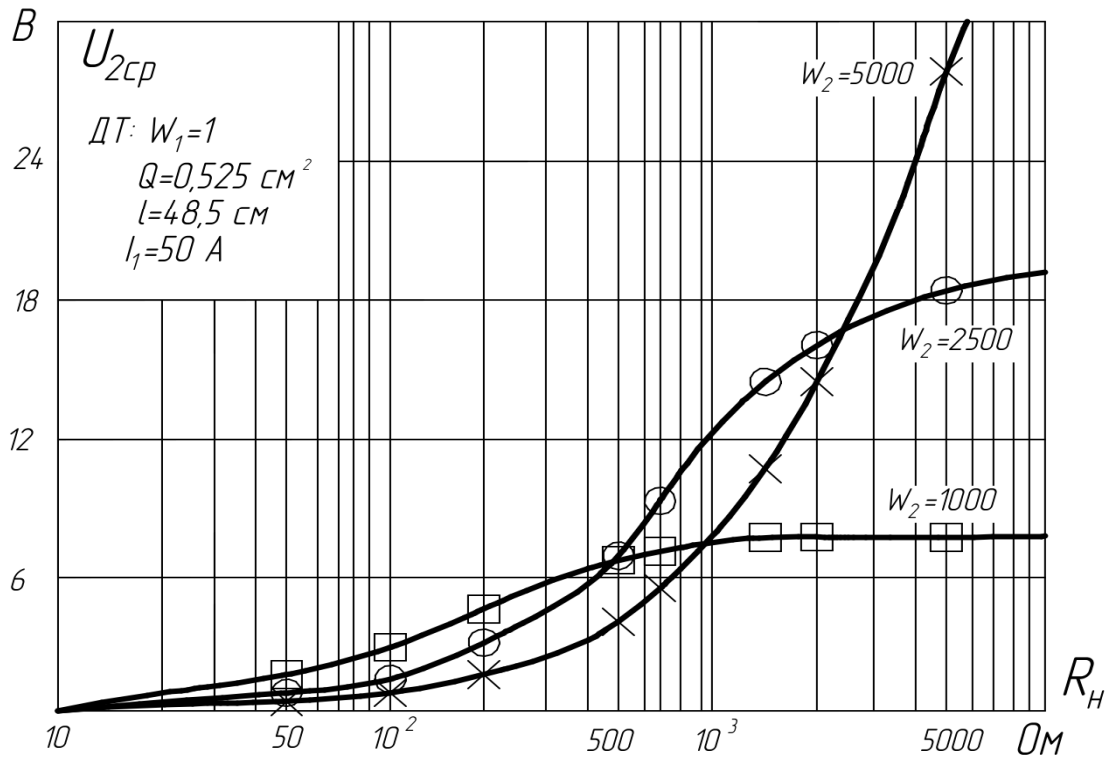
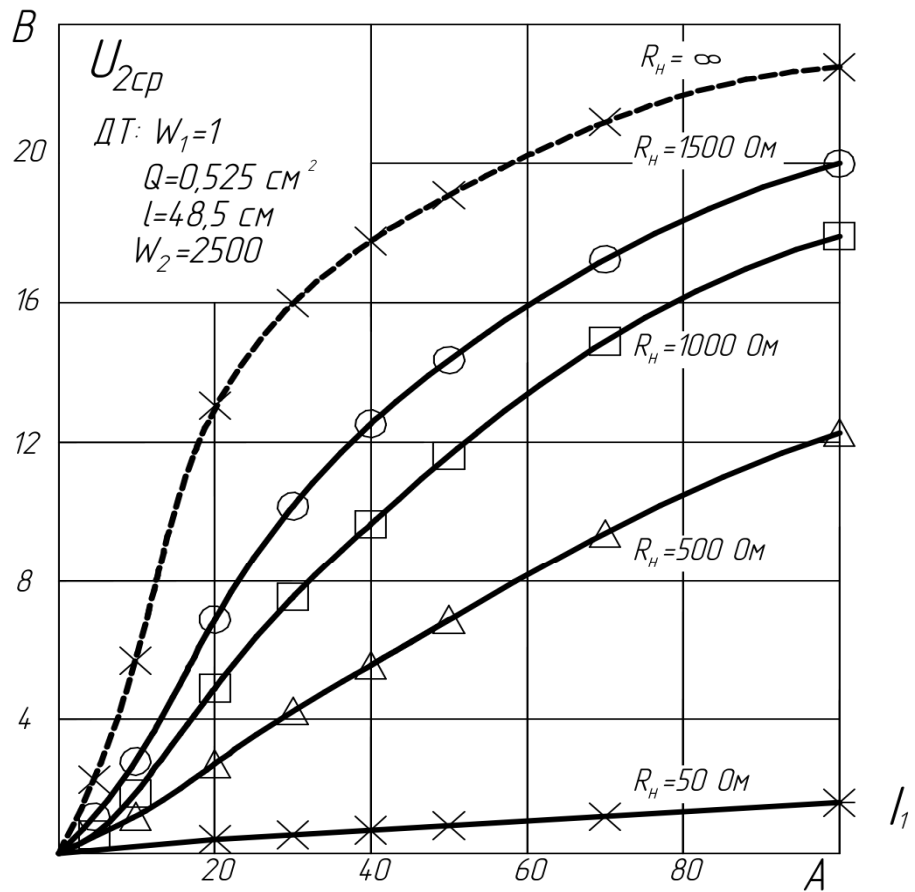


Рисунок 3.9 - Влияние величины нагрузочного сопротивления на выходные характеристики датчика.

На рисунке 3.10 показано регулирование вторичного тока датчика подключением сопротивления на дополнительную обмотку.

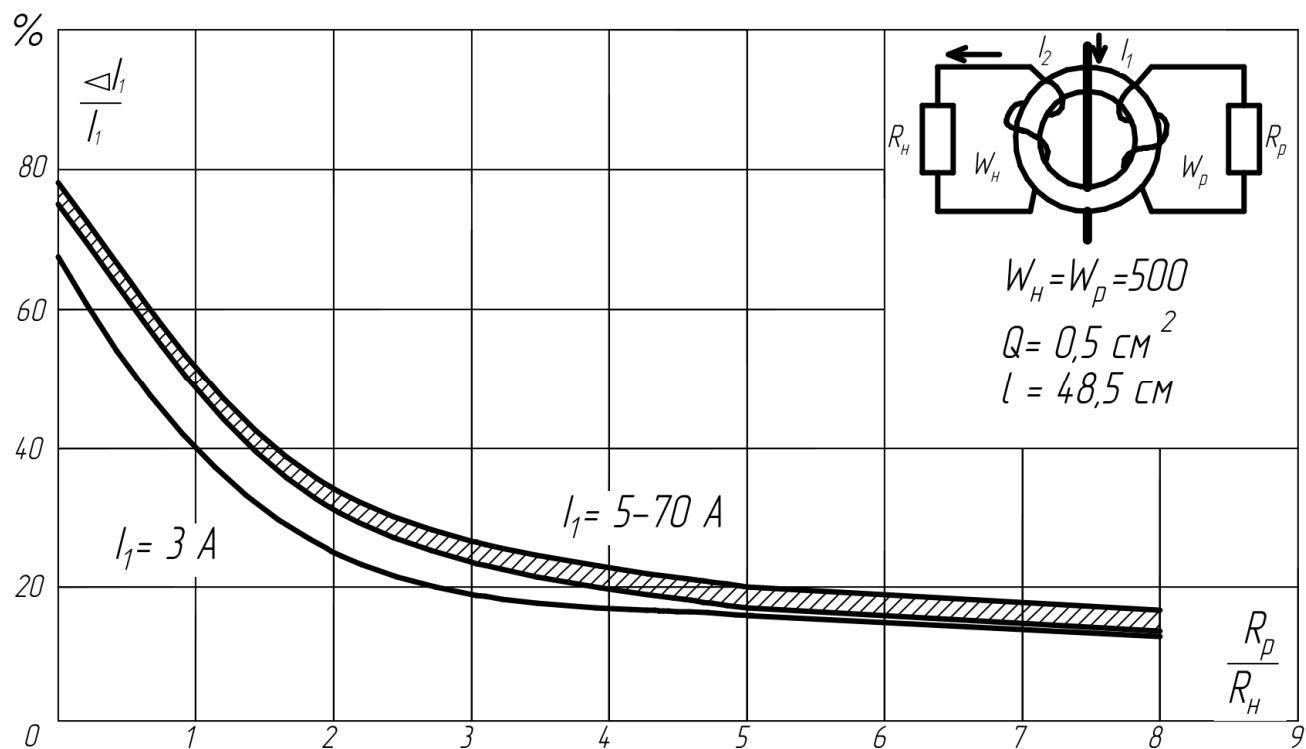


Рисунок 3.10 - Регулирование вторичного тока датчика подключением сопротивления на дополнительную обмотку.

Зависимость напряжения на выходе датчика при больших первичных токах, при следующих параметрах датчика тока:

$$W_1 = 1;$$

$$W_2 = 2500;$$

$$Q = 1,05 \text{ cm}^2;$$

$$l = 48,5 \text{ cm};$$

$$R_H = 1000 \text{ Ом}.$$

и форма кривой напряжения при токе 1500 Ампер, представлены на рисунке 3.11.

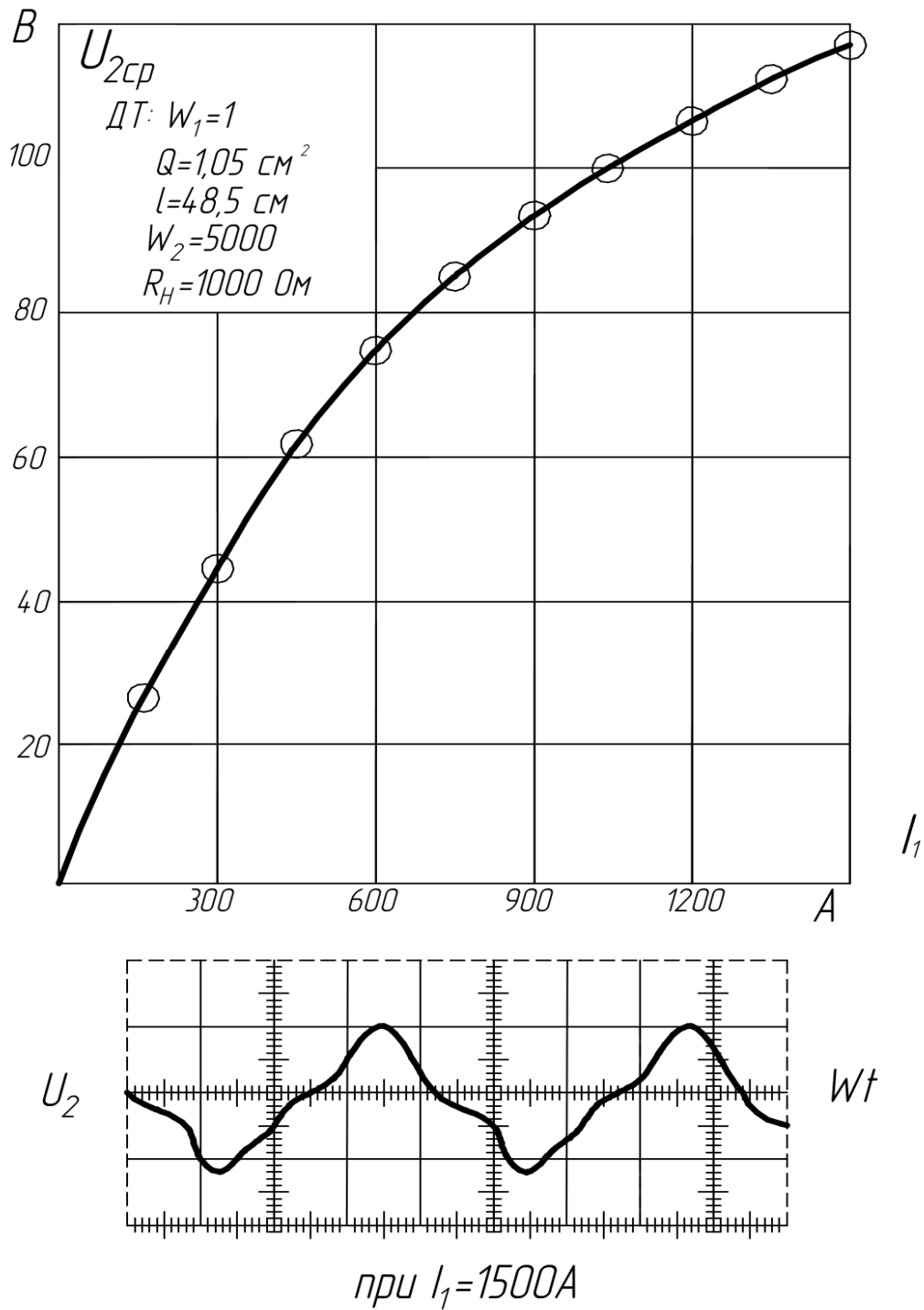


Рисунок 3.11 - Характеристика датчика и форма кривой напряжения при больших токах.

Зависимости выходной нагрузки датчика от первичных токов, числа витков вторичной обмотки и величины сопротивления нагрузки изображены на рисунке 3.12.



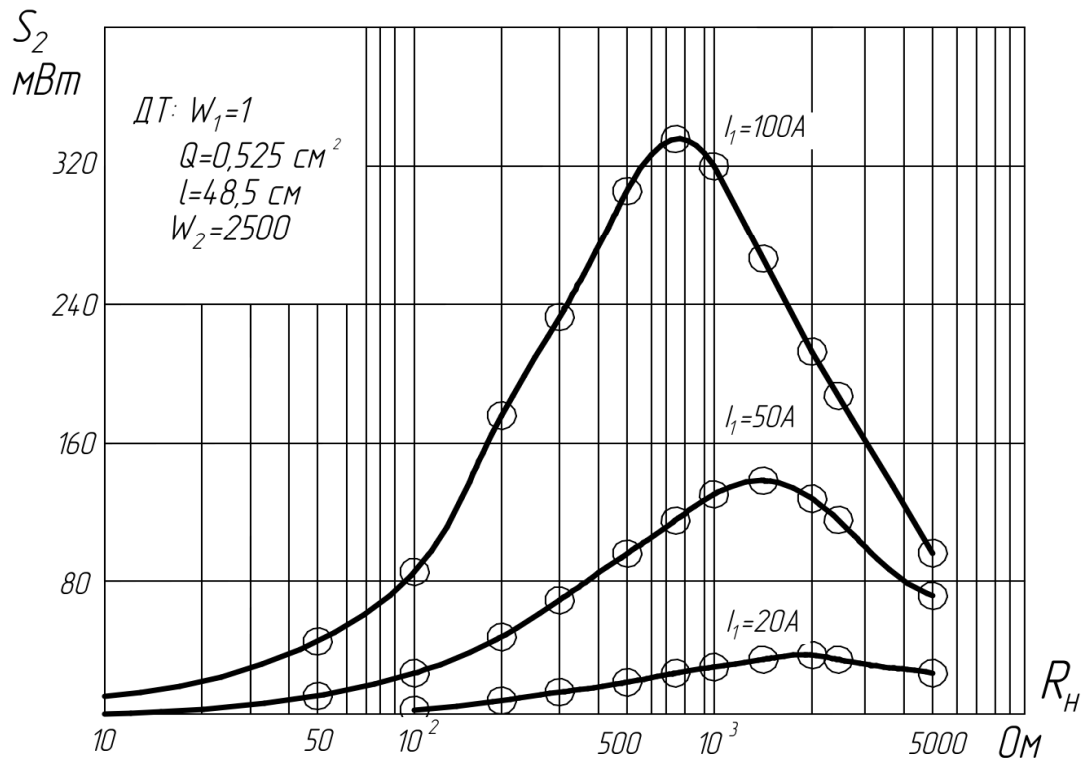
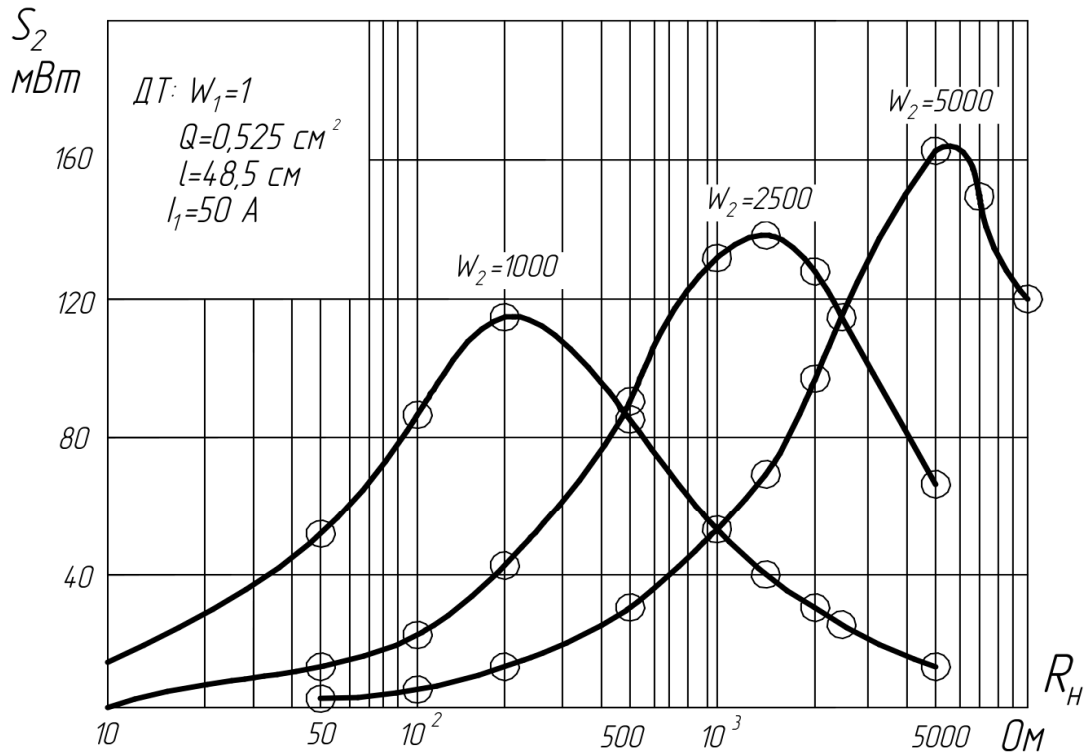


Рисунок 3.12 - Зависимости выходной нагрузки датчика от первичных токов, числа витков вторичной обмотки и величины сопротивления нагрузки.

Вследствие соизмеримости сопротивлений намагничивания и цепи вторичной обмотки датчика тока, режим работы последнего в сильной степени

зависит от сопротивления нагрузки (рисунок 3.9), что позволяет путем изменения регулируемого сопротивления, подключаемого параллельно входу устройства, получать требуемую характеристику, практически с любым коэффициентом преобразования.

$$K = \frac{dU_2}{dI_1}. \quad (3.4)$$

Наиболее перспективен, в этом смысле, способ регулирования характеристик, основанный на эффекте экранирования, когда регулируемое сопротивление подключается на дополнительную обмотку. В этом случае отсутствие электрической связи между рабочими и регулировочными цепями облегчает построение схем, согласование выходных и входных параметров датчика и устройства, осуществляет развязку цепей по постоянному току и т.п. Независимость выбора числа витков дополнительной обмотки  $W_p$  обеспечивает, с одной стороны, глубокое и плавное регулирование, так как эффект экранирования зависит не только от величины регулируемого сопротивления, но и от квадрата витков  $W_p^2$ . С другой стороны, это позволяет иметь на дополнительной обмотке значения тока и напряжения, отличные от этих величин на рабочей обмотке, что в свою очередь, открывает широкие возможности для использования нелинейных элементов, подключаемых к обмотке регулирования с целью получения датчиков с определенными выходными характеристиками и свойствами.

Защита от перенапряжений во вторичной цепи и датчики тока в трехфазных схемах, представлены в приложении Б.

### **3.4. Параметры трансформаторных датчиков тока для РУ 6-10 кВ**

Проведенные экспериментальные исследования с целью выбора параметров определили исполнение датчика, удовлетворяющее требованиям микропроцессорных и полупроводниковых устройств защиты к параметрам сельских сетей.

Магнитопровод , кольцевой, из 15 пластин электротехнической стали собираемых в нахлестку. Длина пластин 450-600 мм, ширина 10 мм, толщина 0,35 мм. Активное сечение магнитопровода  $0,525 \text{ см}^2$ . Зазор  $\delta=0,5 \text{ мм}$ .

Вторичная обмотка, сосредоточенная в виде двух катушек длиной 7-10 см. Число витков основной  $W_2=2500$  с тремя отпайками 500,1500,2500 витков и дополнительной  $W_3=2000$ . Провод ПЭВ-2 диаметром  $d_{\text{пр}}=0,19 \text{ мм}$ .

Выходные параметры (для наиболее вероятных значений рабочих токов  $I_1=40-50 \text{ А}$ ):

- напряжение  $U_2=1,5-12 \text{ В}$
- мощность  $S=50-140 \text{ мВА}$
- входные сопротивления подключаемых устройств  $R_H=50-2000 \text{ Ом}$ .

Приведенные характеристики трансформаторных датчиков тока позволяют выбрать необходимое число вторичных витков, для заданного диапазона первичных токов и вторичных параметров, иллюстрируют возможность работы датчиков в различных режимах (линейный, импульсный, максимальный отдаваемой мощности) при широком изменении вторичной нагрузки, параметров датчика и первичных токах. Отбираемые от датчиков мощности составляют от единиц до десятков милливольт, что вполне достаточно для микропроцессорных и полупроводниковых устройств или чувствительных реле постоянного тока.

Таким образом, достигается унификация по первичным токам 10-100 А и вторичным нагрузкам 50-2000 Ом, что для практического использования наиболее подходит для питания следующих защит от однофазных замыканий на землю: токовой ненаправленной защиты нулевой последовательности, токовой направленной защиты нулевой последовательности и защиты реагирующей на наложенный ток не промышленной частоты. Данные защиты наиболее применяемые в сельских распределительных сетях 6-10 кВ.

### **Выводы по главе**

1). Разработанный макет датчика тока накладного типа устанавливаемый в КРУН 6-10 кВ подходит для диапазона первичных токов 10-100 А, позволяет без

реконструкции распределительного устройства и существенных дополнительных затрат выполнить защиты на сельских подстанциях от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ.

Для сельских распределительных сетей 6-10 кВ наиболее подходят трансформаторные датчики тока с малым объемом стали, имеющие в сердечнике плавно регулируемый воздушный зазор, с несколькими вторичными обмотками, которые обеспечивают подключение селективной сигнализации по определению поврежденной линии.

2). Преимущества разработанного макета датчика тока при изменении параметров первичной и вторичной цепи, заключаются в следующем:

а). Возможность изменения конструктивных параметров под различный диапазон первичных токов и нагрузку вторичных цепей;

б). Изменение выходных величин с помощью плавного и глубокого регулирования;

в). Улучшение параметров устройств с помощью нелинейных свойств датчиков;

г). Совмещение функций трансформаторов и согласующих элементов;

д). Соответствие выходных параметров датчиков входным параметрам питаемых от них устройств.

3). Принятый для использования вариант исполнения накладного датчика тока является унифицированной конструкцией пригодной для первичных напряжений 6-10-20 кВ, первичных токов 10-100 А, вторичных нагрузок 50-2000 Ом с выходной мощностью достаточной для управления микропроцессорными и полупроводниковыми элементами в схемах защиты и автоматики без промежуточных согласующих элементов.

4). Наличие нескольких вторичных обмоток с ответвлениями позволяет осуществить глубокое и плавное регулирование выходных параметров датчика путем изменения числа витков вторичной обмотки или величины регулируемого сопротивления, подключаемого на вход устройства или на дополнительную обмотку датчика.

5). Использование нелинейных свойств трансформаторных датчиков с малым объемом стали в диапазоне относительно небольших первичных токов позволяет получить дополнительные эффекты, обеспечивающие улучшение характеристик защиты и осуществление специальных органов с заданными функциональными свойствами.

Как многоконтурные ферромагнитные элементы с нелинейными свойствами датчики используются в данной работе для создания фильтров токов нулевой последовательности улучшенных качеств.

## **Глава IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ ТОКОВ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НА РАЗРАБОТАННЫХ ДАТЧИКАХ ТОКА**

Данная глава диссертационной работы посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям фильтров токов нулевой последовательности на разработанных макетах трансформаторных датчиков тока и результаты выбора варианта фильтра для сельских подстанций с воздушными выводами отходящих высоковольтных линий.

### **4.1. Теоретические исследования фильтров токов нулевой последовательности на трансформаторных датчиках тока**

Качество фильтров токов нулевой последовательности (ФТНП) определяется двумя показателями:

а) наименьшим утроенным первичным током нулевой последовательности, при котором срабатывает устройство сигнализации;

б) напряжением или током небаланса на выходе схемы фильтра при  $I_3=0$ .

Из возможных схем фильтров токов нулевой последовательности на предложенных датчиках для исследований представляет интерес следующие варианты (рисунок 4.1) [89]:

1. Фильтр токов нулевой последовательности, с параллельным включением вторичных обмоток датчиков.

2. Схема фильтра токов нулевой последовательности при соединении вторичных обмоток датчиков в открытый треугольник.

3. Схема фильтра токов нулевой последовательности, имеющая два вторичных контура, выделяющих токи нулевой последовательности. (Один из контуров является рабочим, к нему подключается реагирующий орган устройства сигнализации, а второй дополнительный).

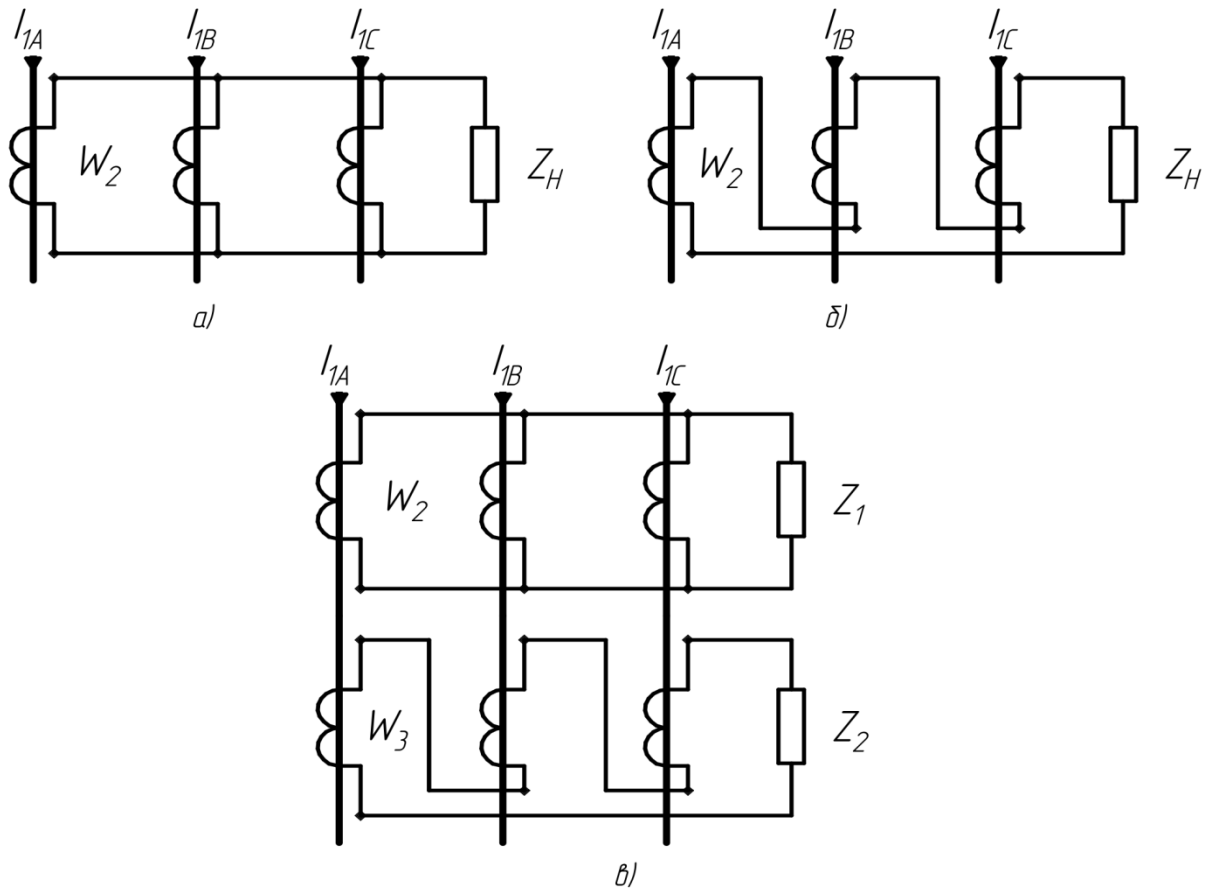


Рисунок 4.1 - Варианты фильтров токов нулевой последовательности на основе трансформаторных датчиков тока. а). – трехтрансформаторный ФТНП; б). – соединение в разомкнутый треугольник; в) – двухконтурный фильтр.

Анализируя рассматриваемые варианты фильтров, отметим следующее:

1. В схеме ФТНП при соединении вторичных обмоток датчиков параллельно, в нормальном и аварийном (при замыканиях) режимах обмотки датчиков обтекаются вторичным током, создавая размагничивающий эффект. В связи с этим индукция в сердечниках датчиков данной схемы, при прочих равных условиях, будет меньше, чем в схеме ФТНП при включении вторичных обмоток датчиков в открытый треугольник, где датчики работают в режиме холостого хода. Отличие режимов работы датчиков обуславливает повышенные небалансы на выходе ФТНП по схеме открытого треугольника. Учитывая это обстоятельство, схеме ФТНП образованной параллельным включением вторичных обмоток датчиков следует отдать предпочтение.

2. С точки зрения величины полезного сигнала на выходе схемы фильтра оба варианта не имеют заметных преимуществ. В схеме фильтра с параллельным соединением обмоток вторичный ток замыкания в нагрузке уменьшается за счет утечки в датчики неповрежденных фаз, а в ФТНП по схеме треугольника имеется потеря сигнала в сопротивлениях рассеяния и намагничивания датчиков.

3. Схема ФТНП с двумя вторичными магнитосвязанными контурами наиболее перспективна, так как имеется возможность воздействовать на рабочий контур через сердечники датчиков с целью достижения требуемых показателей фильтра.

В связи с отмеченным выше, последующие исследования посвящены одноконтурной схеме ФТНП при параллельном соединении вторичных обмоток датчиков и двухконтурной схеме, в которой в качестве рабочего принят параллельный контур.

Для исследований практический интерес представляют два режима работы первичной цепи:

I режим – симметричный режим расчетных первичных токов линии для оценки максимальных небалансов на выходе схемы фильтра.

II режим – холостой ход линии, определяющий чувствительность фильтра при замыканиях на землю.

В задачу исследований входило:

1. Разработка методики расчета схем фильтров токов нулевой последовательности, для режимов нагрузки и холостого хода первичной цепи.

2. Анализ схем ФТНП с точки зрения показателей и выбор приемлемого варианта.

Выполняемые исследования проводились для сельских распределительных сетей при значениях первичных рабочих токов  $I_{раб} = 40-100$  Ампер и токов замыкания  $I_3 = 1-5$  Ампер.



## Исследования небалансов фильтров токов нулевой последовательности на трансформаторных датчиках тока

Рассмотрим первый вариант схемы ФТНП, выполненный на трансформаторных датчиках тока при параллельном соединении их вторичных обмоток (рисунок 4.1).

Исходными данными для расчета являются конструктивные параметры ДТ (первичные и вторичные витки  $W_1$ ,  $W_2$ ; сечение сердечника  $Q$ ; длина средней магнитной линии  $\ell$ , сопротивление рассеяния  $X_{2T}$ ), величина и характер сопротивления нагрузки  $Z_H$ ,  $\phi_H$  и основная кривая намагничивания материала сердечника  $B_m(H_m)$ , снимаемая при синусоидальном токе.

Система уравнений мгновенных значений токов, индукций и напряжений, для схемы фильтра (рисунок 4.1 а), имеет вид:

$$W_2 Q \frac{dB_A}{dt} = i_{2A} R_{2T} + L_{2T} \frac{di_{2A}}{dt} + (i_{2A} + i_{2B} + i_{2C}) R_H; \quad (4.1)$$

$$W_2 Q \frac{dB_B}{dt} = i_{2B} R_{2T} + L_{2T} \frac{di_{2B}}{dt} + (i_{2A} + i_{2B} + i_{2C}) R_H; \quad (4.2)$$

$$W_2 Q \frac{dB_C}{dt} = i_{2C} R_{2T} + L_{2T} \frac{di_{2C}}{dt} + (i_{2A} + i_{2B} + i_{2C}) R_H. \quad (4.3)$$

Если принять следующие допущения:

1. Первичные токи подведенные к ФТНП симметричны:

$$\begin{aligned} i_{2A} &= I_{1m} \sin(\omega t + \alpha); \\ i_{2B} &= I_{1m} \sin(\omega t + \alpha - 120^\circ); \\ i_{2C} &= I_{1m} \sin(\omega t + \alpha + 120^\circ). \end{aligned} \quad (4.4)$$

2. Датчики идентичны в магнитном и конструктивном исполнении и, следовательно, в цепи нагрузки и дополнительном контуре протекают только третьи гармоники вторичных токов:

$$\begin{aligned} i_H &= i_{2A} + i_{2B} + i_{2C} = 3 \sum_K i_K; \\ i_0 &= \sum_K i_K, \end{aligned} \quad (4.5)$$

где  $K$  – номер гармоники.

3. Кривая намагничивания сердечников аппроксимируется нечетным степенным полиномом вида:

$$H = \alpha B + \beta B^3. \quad (4.6)$$

4. Решать системы будем с помощью метода гармонического баланса в следующем виде:

$$\begin{aligned} B_A &= B_1 \sin \omega t + B_3 \sin(3\omega t - \psi); \\ B_B &= B_1 \sin(\omega t - 120^\circ) + B_3 \sin(3\omega t - \psi); \\ B_C &= B_1 \sin(\omega t + 120^\circ) + B_3 \sin(3\omega t - \psi). \end{aligned} \quad (4.7)$$

Для определения амплитуд и начальных фаз каждой гармоники подставим (4.7) в (4.6), для примера рассмотрим фазу А:

$$\begin{aligned} H &= \alpha B_1 \sin \omega t + \alpha B_3 \sin(3\omega t - \psi) + \beta B_1^3 \sin^3 \omega t + 3\beta B_1^2 B_3 \sin^2 \omega t \sin(3\omega t - \psi) + \\ &+ 3\beta B_1 B_3^2 \sin \omega t \sin^2(3\omega t - \psi) + \beta B_3^3 \sin^3(3\omega t - \psi). \end{aligned} \quad (4.8)$$

Раскроем выражение (4.8), учитывая только члены с  $\omega t$  и  $3\omega t$ :

$$\begin{aligned} H &= \alpha B_1 \sin \omega t + \alpha B_3 \sin 3\omega t \cos \psi - \alpha B_3 \cos 3\omega t \sin \psi + \frac{3}{4} \beta B_1^3 \sin \omega t - \frac{1}{4} \beta B_1^3 \sin 3\omega t - \\ &- \frac{3}{4} \beta B_1^2 B_3 \sin \omega t \cos \psi + \frac{3}{4} \beta B_1^2 B_3 \cos \omega t \sin \psi + \frac{3}{2} \beta B_1^2 B_3 \sin 3\omega t \cos \psi - \\ &- \frac{3}{2} \beta B_1^2 B_3 \cos 3\omega t \sin \psi + \frac{3}{2} \beta B_3^2 B_1 \sin \omega t + \frac{3}{4} \beta B_3^3 \sin 3\omega t \cos \psi - \frac{3}{4} \beta B_3^3 \cos 3\omega t \sin \psi. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Выделим из (4.9) составляющие основной и тройной частоты.

Составляющие основной частоты:

$$\begin{aligned} H &= \alpha B_1 \sin \omega t + \frac{3}{4} \beta B_1^3 \sin \omega t - \frac{3}{4} \beta B_1^2 B_3 \sin \omega t \cos \psi + \frac{3}{4} \beta B_1^2 B_3 \cos \omega t \sin \psi + \\ &+ \frac{3}{2} \beta B_3^2 B_1 \sin \omega t. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Составляющие тройной частоты:

$$\begin{aligned} H &= \alpha B_3 \sin 3\omega t \cos \psi - \alpha B_3 \cos 3\omega t \sin \psi - \frac{1}{4} \beta B_1^3 \sin 3\omega t + \frac{3}{2} \beta B_1^2 B_3 \sin 3\omega t \cos \psi - \\ &- \frac{3}{2} \beta B_1^2 B_3 \cos 3\omega t \sin \psi + \frac{3}{4} \beta B_3^3 \sin 3\omega t \cos \psi - \frac{3}{4} \beta B_3^3 \cos 3\omega t \sin \psi. \end{aligned} \quad (4.11)$$

В связи с тем, что схема фильтра симметрична, исследование данного режима работы фильтра будем проводить по двум однофазным схемам замещения, составленным для первой и третьей гармоники (рисунок 4.2 б, в).

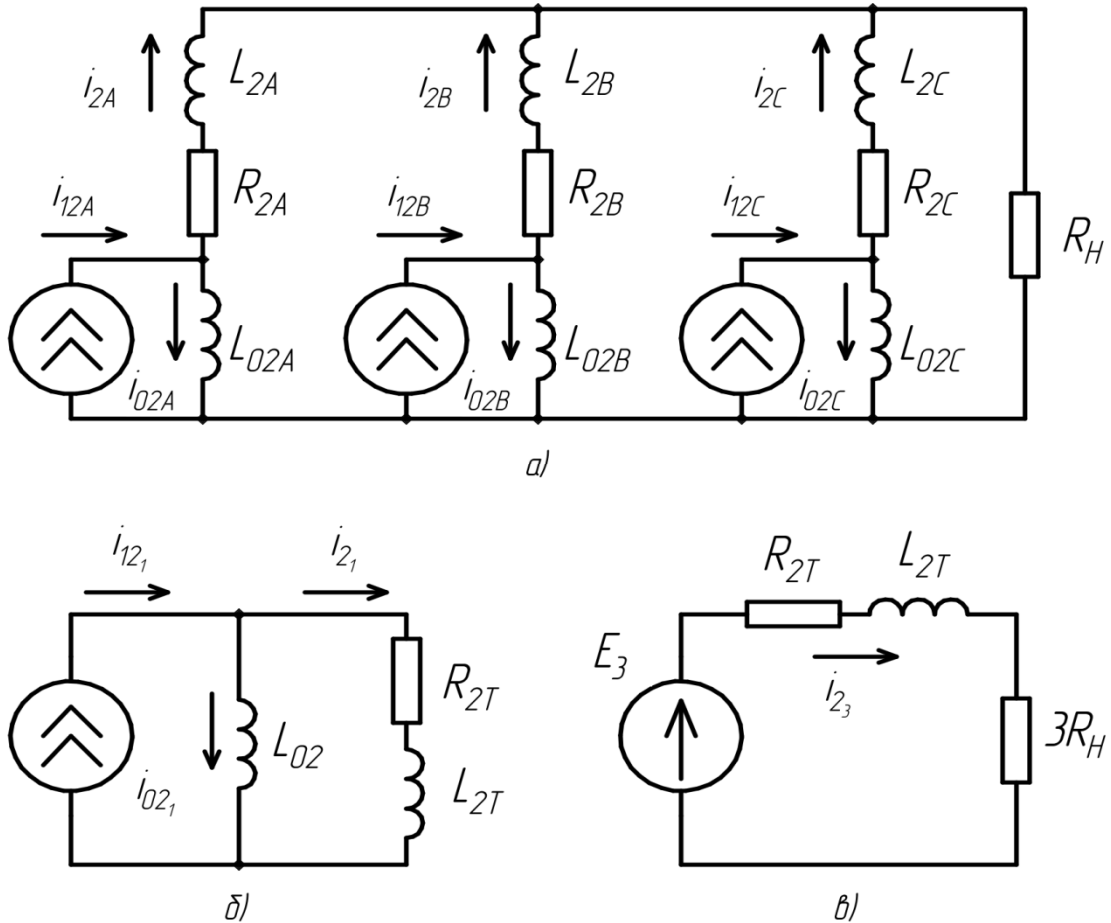


Рисунок 4.2 - Схемы замещения фильтров токов нулевой последовательности для симметричного режима нагрузки первичной цепи: а – трехфазная; б – однофазная для первой гармоники; в – однофазная для третьей гармоники.

В общем случае, выражение для третьей гармоники вторичного тока запишется следующим образом:

$$i_3 = \frac{H_3 \ell}{W_2}. \quad (4.12)$$

Подставив (4.11) в (4.12):

$$i_3 = \frac{\ell}{W_2} \left[ \begin{aligned} & \left( \alpha B_3 \cos \psi + \frac{3}{2} \beta B_1^2 B_3 \cos \psi + \frac{3}{4} \beta B_3^3 \cos \psi - \frac{1}{4} \beta B_1^3 \right) \sin 3\omega t - \\ & - \left( \alpha B_3 \sin \psi + \frac{3}{2} \beta B_1^2 B_3 \sin \psi + \frac{3}{4} \beta B_3^3 \sin \psi \right) \cos 3\omega t \end{aligned} \right]. \quad (4.13)$$

И обозначив коэффициент при  $\sin 3\omega t$  через  $n_3$ , а при  $\cos 3\omega t$  через  $m_3$ , получим:

$$i_3 = \frac{\ell}{W_2} n_3 \sin 3\omega t - \frac{\ell}{W_2} m_3 \cos 3\omega t. \quad (4.14)$$

Уравнение для контура третьей гармоники вторичного тока, связывающее мгновенные значения токов, индукций и напряжений в соответствии со схемой замещения (рисунок 4.2. в) и принятыми ранее обозначениями, запишется следующим образом:

$$\frac{d}{dt} W_2 Q B_3 \sin(3\omega t - \psi) + i_3 r_2 + L_{2T} \frac{di_3}{dt} = 0, \quad (4.15)$$

где:  $r_2 = R_{2T} + 3R_H$

после подстановки в него (4.14) получим:

$$\begin{aligned} & 3\omega W_2 Q B_3 \cos(3\omega t - \psi) + \frac{\ell}{W_2} r_2 n_3 \sin 3\omega t - \frac{\ell}{W_2} r_2 m_3 \cos 3\omega t + \\ & + \frac{\ell}{W_2} 3\omega L_{2T} n_3 \cos 3\omega t + \frac{\ell}{W_2} 3\omega L_{2T} m_3 \sin 3\omega t = 0. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Амплитуды искоемых гармоник находятся из совместного решения уравнений для синусной и косинусной составляющих, получаемых из уравнения (4.16), путем приравнивания к нулю коэффициентов, при  $\sin 3\omega t$  и  $\cos 3\omega t$ :

$$3\omega W_2 Q B_3 \cos \psi - r_2 \frac{\ell}{W_2} m_3 + 3\omega L_{2T} \frac{\ell}{W_2} n_3 = 0; \quad (4.17)$$

$$3\omega W_2 Q B_3 \sin \psi - r_2 \frac{\ell}{W_2} n_3 + 3\omega L_{2T} \frac{\ell}{W_2} m_3 = 0.$$

Запишем (4.17) иначе:

$$\left( 3\omega W_2 Q B_3 + 3\omega L_{2T} \frac{\ell}{W_2} n_3^1 \right) \cos \psi - r_2 \frac{\ell}{W_2} m_3^1 \sin \psi = \frac{1}{4} \beta B_1^3 \frac{\ell}{W_2} 3\omega L_{2T}; \quad (4.18)$$

$$\left( 3\omega W_2 Q B_3 + 3\omega L_{2T} \frac{\ell}{W_2} m_3^1 \right) \sin \psi + r_2 \frac{\ell}{W_2} n_3^1 \cos \psi = \frac{1}{4} \beta B_1^3 \frac{\ell}{W_2} r_2,$$

где: 
$$n_3^1 = m_3^1 = \alpha B_3 + \frac{3}{2} \beta B_1^2 B_3 + \frac{3}{4} \beta B_3^3. \quad (4.19)$$

Обозначим:

$$K_1 = 3\omega W_2 Q B_3 + 3\omega L_{2T} \frac{\ell}{W_2} n_3^1; \quad (4.20)$$

$$K_2 = r_2 \frac{\ell}{W_2} n_3^1.$$

Тогда уравнение (4.18) будет иметь вид:

$$K_1 \cos \psi - K_2 \sin \psi = \frac{3}{4} \beta \frac{\ell}{W_2} \omega L_{2T} B_1^3; \quad (4.21)$$

$$K_1 \sin \psi + K_2 \cos \psi = \frac{1}{4} \beta \frac{\ell}{W_2} r_2 B_1^3. \quad (4.22)$$

Возведем (4.21) и (4.22) в квадрат и сложим:

$$K_1^2 + K_2^2 = \left( \frac{1}{4} \beta \frac{\ell}{W_2} B_1^3 \right)^2 \left[ (3\omega L_{2T})^2 + r_2^2 \right]. \quad (4.23)$$

Уравнение (4.23) выражает взаимосвязь амплитуд первой и третьей гармоник индукции в сердечнике с конструктивными и магнитными параметрами датчиков тока и параметров нагрузочной ветви. Решение данного уравнения дает возможность качественно и количественно проанализировать схему фильтра: выявить влияние отдельных параметров на величину третьих гармоник в цепи нагрузки, оценить способы уменьшения небалансов и др.

Представим уравнение (4.23) в виде:

$$K_2^2 = \left( \frac{1}{4} \beta \frac{\ell}{W_2} B_1^3 \right)^2 \left[ (3\omega L_{2T})^2 + r_2^2 \right] - K_1^2; \quad (4.24)$$

или 
$$K_2^2 = K_0 B_1^6 - K_1^2, \quad (4.25)$$

где: 
$$K_0 = \left( \frac{1}{4} \beta \frac{\ell}{W_2} \right)^2 \left[ (3\omega L_{2T})^2 + r_2^2 \right]. \quad (4.26)$$

Произвольно задаваясь несколькими значениями  $B_3$ , приняв  $B_1$  в качестве параметра, построим семейство кривых, выражающих зависимости левой и правой частей уравнения (4.25) в функции  $B_3$ , рисунок 4.3. Абсциссы точек пересечения указанных кривых при одинаковых значениях параметра  $B_1$  определяют значения  $B_3$  удовлетворяющие уравнению (4.24). Получив несколько таких точек строится зависимость  $B_3 = f(B_1)$ , которая может служить характеристикой качества фильтра – чем выше от оси  $B_3$  располагается кривая  $K_2^2$ , тем хуже фильтр, так как следует ожидать больших небалансов.

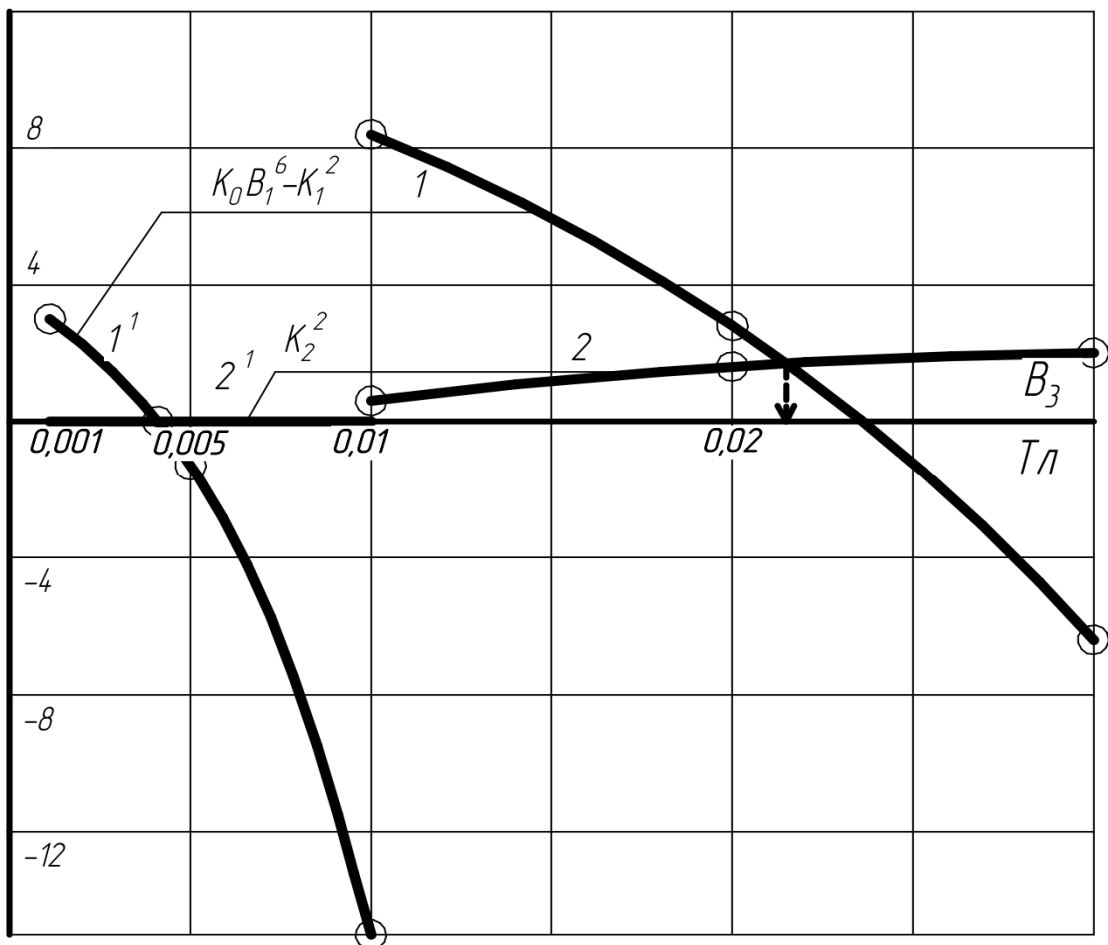


Рисунок 4.3 - Характеристики, определяющие уровень небалансов, вызванных третьей гармонической составляющей.

1,2 – ФТНП с вторичными сосредоточенными обмотками ( $B_1=0,4$  Тл);

1<sup>1</sup>,2<sup>1</sup> – то же с дополнительным контуром и емкостью  $C=1$  мкф.

Из уравнений (4.21) и (4.22) тангенс угла  $\psi$ , необходимый для последующих расчетов, определится как:

$$(K_1 \cos \psi - K_2 \sin \psi) r_2 = \frac{3}{4} \beta \frac{\ell}{W_2} \omega L_{2T} r_2 B_1^3; \quad (4.27)$$

$$(K_1 \sin \psi + K_2 \cos \psi) 3\omega L_{2T} = \frac{3}{4} \beta \frac{\ell}{W_2} \omega L_{2T} r_2 B_1^3. \quad (4.28)$$

Так как правые части уравнений равны:

$$(K_1 \cos \psi - K_2 \sin \psi) r_2 = (K_1 \sin \psi + K_2 \cos \psi) 3\omega L_{2T}. \quad (4.29)$$

Вынесем  $\cos \psi$  за скобки и сократим:

$$\left( K_1 - K_2 \frac{\sin \psi}{\cos \psi} \right) r_2 = \left( K_1 \frac{\sin \psi}{\cos \psi} + K_2 \right) 3\omega L_{2T}; \quad (4.30)$$

$$(K_1 - K_2 \operatorname{tg} \psi) r_2 = (K_1 \operatorname{tg} \psi + K_2) 3\omega L_{2T}. \quad (4.31)$$

Раскроем скобки и перенесем значения с  $\operatorname{tg} \psi$  в одну сторону:

$$K_1 r_2 - K_2 3\omega L_{2T} = K_1 \operatorname{tg} \psi 3\omega L_{2T} + K_2 \operatorname{tg} \psi r_2. \quad (4.32)$$

Вынесем  $\operatorname{tg} \psi$  за скобки:

$$K_1 r_2 - K_2 3\omega L_{2T} = (K_1 3\omega L_{2T} + K_2 r_2) \operatorname{tg} \psi. \quad (4.33)$$

В результате получим:

$$\frac{K_1 r_2 - K_2 3\omega L_{2T}}{K_1 3\omega L_{2T} + K_2 r_2} = \operatorname{tg} \psi. \quad (4.34)$$

Тангенс угла  $\psi$  будет равен:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{K_1 \delta - K_2}{K_1 + K_2 \delta}, \quad (4.35)$$

где:

$$\delta = \frac{r_2}{3\omega L_{2T}}. \quad (4.36)$$

Для нахождения первичных токов, создаваемых режимов с известными соответствующими друг другу значениями  $B_1$  и  $B_3$  из уравнения (4.10) имеем:

$$H_1 = \frac{i_{021} W_2}{\ell}, \quad (4.37)$$

где:  $i_{02}$  – первая гармоника намагничивающего тока, равная

$$i_{02_1} = i_{12} - i_{21} , \quad (4.38)$$

где:  $i_{12}$  – первичный ток датчика, приведенный к виткам вторичной обмотки;

$i_{21}$  – первая гармоника вторичного тока.

Выражение для тока  $i_{02}$ , с учетом (4.10) запишется следующим образом:

$$i_{02_1} = \frac{\ell}{W_2} \left( \alpha B_1 + \frac{3}{4} \beta B_1^3 + \frac{3}{2} \beta B_1 B_3^2 - \frac{3}{4} \beta B_1^2 B_3 \cos \psi \right) \sin \omega t + \frac{\ell}{W_2} \frac{3}{4} \beta B_1^2 B_3 \sin \psi \cos \omega t . \quad (4.39)$$

Обозначив коэффициенты при  $\sin \omega t$  и  $\cos \omega t$  соответственно через  $a$  и  $b$ , получим:

$$i_{02_1} = a \sin \omega t + b \cos \omega t . \quad (4.40)$$

Уравнение для вторичной цепи датчика по основной частоте имеет вид:

$$\frac{d}{dt} W_2 Q B_1 \sin \omega t + i_{21} R_{2T} + L_{2T} \frac{di_{21}}{dt} = 0 . \quad (4.41)$$

Подставив в (4.41) выражение тока  $i_{21}$ , с учетом (4.4) и (4.40), имеем:

$$\begin{aligned} \omega B_1 W_2 Q \cos \omega t + I_1 \frac{W_1}{W_2} R_{2T} \sin(\omega t + \alpha) - a R_{2T} \sin \omega t - b R_{2T} \cos \omega t + \\ + I_1 \frac{W_1}{W_2} \omega L_{2T} \cos(\omega t + \alpha) - a \omega L_{2T} \cos \omega t + b \omega L_{2T} \sin \omega t = 0. \end{aligned} \quad (4.42)$$

и далее, согласно методу гармонического баланса, получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} \omega B_1 W_2 Q - b R_{2T} - a \omega L_{2T} &= -I_1 \frac{W_1}{W_2} R_{2T} \sin \alpha - I_1 \frac{W_1}{W_2} \omega L_{2T} \cos \alpha \\ b \omega L_{2T} - a R_{2T} &= -I_1 \frac{W_1}{W_2} R_{2T} \cos \alpha + I_1 \frac{W_1}{W_2} \omega L_{2T} \sin \alpha. \end{aligned} \quad (4.43)$$

С целью исключения угла  $\alpha$  из уравнений (4.43) произведем дополнительные преобразования: возведем в квадрат левые и правые части уравнений и сложим. При этом получим:



$$a_1^2 + b_1^2 = \left( I_1 \frac{W_1}{W_2} \right)^2 (R_{2T}^2 + \omega^2 L_{2T}^2), \quad (4.44)$$

где:

$$\begin{aligned} a_1 &= \omega B_1 W_2 Q - b R_{2T} - a \omega L_{2T} \\ b_1 &= b \omega L_{2T} - a R_{2T} \end{aligned} \quad (4.45)$$

Откуда значения первичных токов:

$$I_1 = \sqrt{\frac{a_1^2 + b_1^2}{\left( \frac{W_1}{W_2} \right)^2 (R_{2T}^2 + \omega^2 L_{2T}^2)}}. \quad (4.46)$$

Таким образом, имея зависимость  $B_3=f(B_1)$  и соответствующие значения  $B_1$  и  $B_3$ , определяя из (4.35) угол  $\psi$  по уравнению (4.46) находятся первичные токи датчиков.

Приведенный метод анализа дает возможность определять небалансы различных схем фильтров тока нулевой последовательности.

Результаты расчетов рассматриваемой схемы фильтра, собранного на трансформаторных датчиках с параметрами:  $W_1=1$ ;  $W_2=2500$ ;  $Q=0,525 \text{ см}^2$ ;  $\ell=48,5 \text{ см}$ ;  $\alpha=0,263$ ;  $\beta=3,141$ ;  $\omega L_{2T}=186 \text{ Ом}$ ;  $r_2=R_{2T}+3R_n=3186 \text{ Ом}$ , даны в таблице 4.1 и приведены на рисунке 4.4.

Таблица 4.1 - Результаты расчетов рассматриваемой схемы фильтра

	$B_1, \text{ Тл}$				
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
$B_3, \text{ Тл}$	0,0003	0,003	0,0215	0,055	0,097
$\Psi^0$	$73^0 20$	$67^0 50$	$53^0 20$	$39^0 50$	$29^0$
$I_1, \text{ А}$	39	75,8	147,5	213	269
$U_{\text{нб.ср}}, \text{ В}$	0,024	0,236	1,69	4,32	7,6
$U_{\text{нб.ср}}, \text{ В(эксп)}$	0,04	0,32	1,79	-	-

Среднее значение напряжения небаланса на выходе фильтра определяется:

$$U_{\text{нб.ср}} = 1,19 \omega W_2 Q B_3 \times 10^{-3}. \quad (4.47)$$

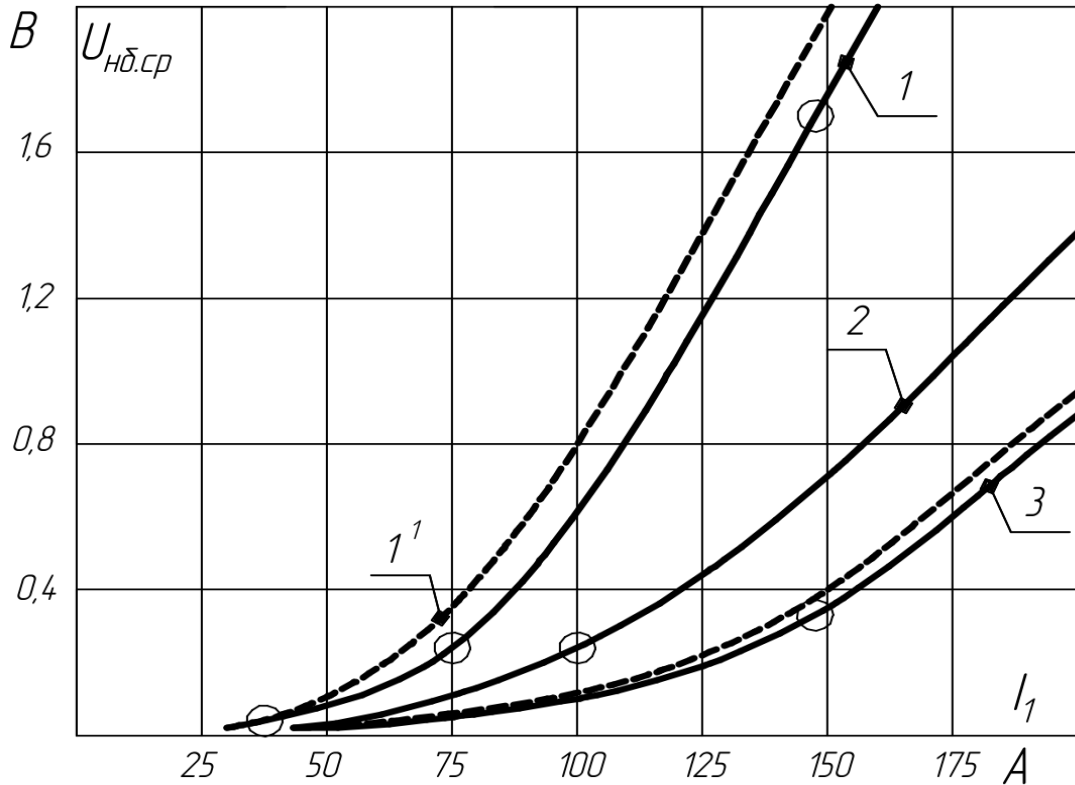


Рисунок 4.4 - Расчетные зависимости напряжения небалансов от первичных токов.

1 – для ФТНП с вторичными сосредоточенными обмотками (1<sup>1</sup>-эксперимент);

2 – то же с распределенными обмотками;

3 – для ФТНП с дополнительным контуром и емкостью равной 1 мкФ.

Расчетные данные приведены для оценки небалансов и влияния отдельных параметров схемы фильтра на их величину. Из таблицы 4.1 видно, что индукция в сердечниках датчиков фильтра и сопротивление холостого хода  $Z_{02}$  определяется в основном токами прямой последовательности (первой гармоникой) и практически не зависят от токов нулевой последовательности. Для сельскохозяйственных электрических сетей 6-10 кВ, согласно параграфу 1.3, рабочие токи составляют 10-100 А, по таблице 4.1, при величине токов порядка 75,8 А первая гармоника магнитной индукции в датчиках с вторичными сосредоточенными обмотками составляет  $B_1=0,2$  Тл. По кривой намагничивания

рисунок 3.6, такому режиму соответствует напряженность магнитного поля  $H=0,3$  А/см и, следовательно  $\mu=0,0067$  Гн/м.

Тогда первичный намагничивающий ток будет равен:

$$I_{01} = \frac{H\ell}{W_1} = \frac{0,3 \times 48,5}{1} = 14,5(A),$$

где:  $H$ -напряженность магнитного поля, А/см;  $\ell$ -длина магнитопровода, см;  $W_1$ - количество витков первичной обмотки.

при сопротивлении намагничивания:

$$Z_{02} = \mu\omega \frac{W_2^2 Q}{\ell} = 0,0067 \times 314 \times \frac{2500^2 \times 0,525}{10^2 \times 48,5} = 1420(Ом),$$

где:  $\mu$ -магнитная проницаемость, Гн/м;  $\omega$ -угловая частота, рад/с;  $W_2$ - количество витков вторичной обмотки;  $Q$ -сечение магнитопровода см<sup>2</sup>.

Из схемы замещения (рисунок 4.2,б) полный первичный ток датчика:

$$I_1 = I_{01} \frac{Z_{2T} + Z_{02}}{Z_{2T}} = 14,5 \times \frac{266 + 1420}{266} = 89,5(A),$$

где:  $Z_{2T}$ -полное сопротивление вторичной обмотки датчика, Ом определяемое  $Z_{2T} = \sqrt{R_{2T}^2 + X_{2T}^2}$ ;  $R_{2T} = 186$  Ом и  $X_{2T} = 190$  Ом - активное сопротивление и сопротивление рассеяния вторичной обмотки датчика.

Погрешность с расчетными данными таблицы 4.1 составит:

$$\Delta\gamma = \frac{89,5 - 75,8}{89,5} \times 100 = 15,3\%.$$

Как отмечалось выше, приведенный метод анализа схем фильтров токов нулевой последовательности, дает возможность количественно оценить влияние отдельных параметров датчиков на величину небалансов. С качественной стороны это можно оценивать по тому, как тот или иной параметр влияет на соотношение сопротивлений вторичной обмотки и намагничивания датчиков  $Z_{2T}/Z_{02}$ . Если это соотношение уменьшается, то для идеального случая, когда

характеристики датчиков идентичны, небалансы так же уменьшаются и небалансы увеличиваются, если это соотношение растет. В связи с этим, уменьшения небалансов можно достичь увеличением сечения сердечников датчиков, уменьшением длины средней магнитной линии (уменьшение диаметра датчиков), применение магнитных материалов с высокой магнитной проницаемостью.

Ниже рассмотрим случай, когда вторичные обмотки датчиков фильтра выполнены распределенными, для которых сопротивление рассеяния практически равно нулю  $L_{2T}=0$ . Вследствие уменьшения отношения  $Z_{2T}/Z_{02}$ , режим работы датчиков изменяется (уменьшается намагничивающий ток) и это ведет к снижению небалансов от высших гармоник (рисунок 4.4). В этом случае расчетные уравнения (4.24) и (4.46) приобретают вид:

$$K_2^2 = \left( \frac{1}{4} \beta \frac{\ell}{W_2} \right)^2 B_1^6 r_2^2 - 3\omega W_2 Q B_3; \quad (4.48)$$

$$(a_1^1)^2 + (b_1^1)^2 = \left( I_1 \frac{W_1}{W_2} r_2 \right)^2, \quad (4.49)$$

где:

$$\begin{aligned} a_1^1 &= \omega B_1 W_2 Q - b R_{2T} \\ b_1^1 &= a R_{2T} \end{aligned} \quad (4.50)$$

Расчетные кривые  $K_2^2$  и  $K_0 B_1^6 - K_1^2$  (рисунок 4.3) смещаются влево, при этом  $K_2^2=0$ .

Несмотря на очевидные преимущества с точки зрения величины небалансов, фильтр на основе датчиков с вторичными распределенными обмотками нежелателен, так как имеет повышенный коэффициент утечки тока при замыкании на землю в режиме холостого хода.

Кроме перечисленных классических мер уменьшения небалансов и в целом улучшения качества фильтра, повышение чувствительности устройств защиты от замыканий на землю может быть достигнуто подключением конденсатора, компенсирующего индуктивность нагрузки (реле) и трансформаторов тока [63,89]. Принципиально возможны следующие варианты подключения

конденсатора: последовательно с нагрузкой, параллельно нагрузке, на отдельную обмотку реле или ТНП.

Как показано в [89] наиболее эффективно последовательное подключение конденсатора с нагрузкой.

Расчетное уравнение для определения напряжения небаланса в этом случае (при активной нагрузке фильтра):

$$K_1^2 + K_2^2 = \left( \frac{1}{4} \beta \frac{\ell}{W_2} B_1^3 \right)^2 \left[ r_2^2 + \left( 3\omega L_{2T} - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right], \quad (4.51)$$

где:

$$K_1 = 3\omega W_2 Q B_3 - \left( 3\omega L_{2T} - \frac{1}{\omega C} \right) \frac{\ell}{W_2} n_3^1. \quad (4.52)$$

Если  $3\omega L_{2T} = \frac{1}{\omega C}$ , (4.53)

то напряжение небаланса по величине будет таким же, как для фильтра со вторичными распределенными обмотками.

## 4.2. Теоретическое исследование двухконтурной схемы ФТНП

В отличие от известных схем фильтров токов нулевой последовательности и способов повышения их чувствительности, в данной работе для устройств селективной сигнализации предлагается схема двухконтурного фильтра с улучшенными показателями на трансформаторных датчиках тока.

Ниже показано, что более лучшие параметры у ФТНП с дополнительным контуром, образованным из трех обмоток, соединенных по схеме разомкнутого треугольника с конденсатором в его цепи (изображено на рисунке 4.5(а)).

Расчетные схемы замещения для первой и третьей гармоник в режиме симметричных первичных токов приведены на рисунке 4.5 (б, в).

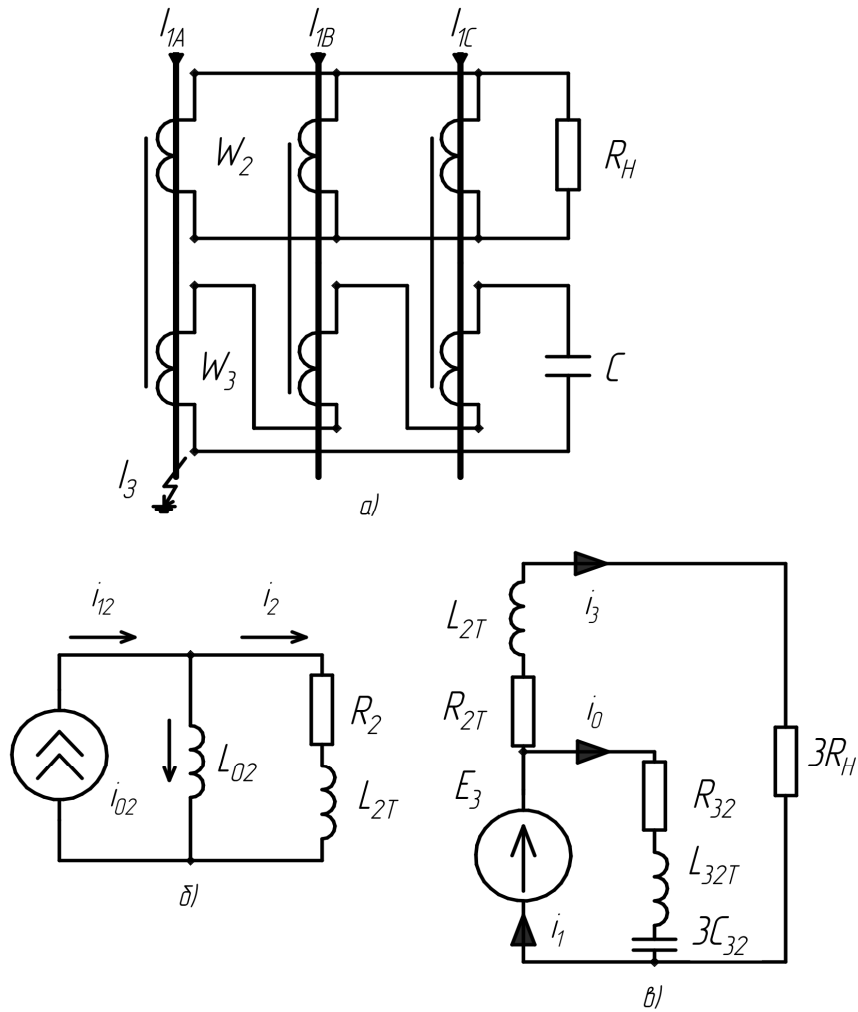


Рисунок 4.5 - Принципиальная схема ФТНП с дополнительным контуром (а), расчетные схемы замещения для первой (б) и третьей (в) гармоник в режиме симметричных первичных токов.

Система уравнений для двухконтурной схемы фильтра:

$$W_2 Q \frac{dB_A}{dt} = i_{2A} R_{2T} + L_{2T} \frac{di_{2A}}{dt} + (i_{2A} + i_{2B} + i_{2C}) R_H; \quad (4.54)$$

$$W_2 Q \frac{dB_B}{dt} = i_{2B} R_{2T} + L_{2T} \frac{di_{2B}}{dt} + (i_{2A} + i_{2B} + i_{2C}) R_H; \quad (4.55)$$

$$W_2 Q \frac{dB_C}{dt} = i_{2C} R_{2T} + L_{2T} \frac{di_{2C}}{dt} + (i_{2A} + i_{2B} + i_{2C}) R_H; \quad (4.56)$$

$$W_3 Q \frac{d}{dt} (B_A + B_B + B_C) = 3i_0 R_{3T} + 3L_{3T} \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{C} \int i_0 dt. \quad (4.57)$$

Так как сумма мгновенных потоков основной частоты, пронизывающих обмотки дополнительного контура, равны нулю, то

$$W_3 Q \frac{d}{dt} (B_A + B_B + B_C) = 3W_3 Q \frac{dB_3}{dt}. \quad (4.58)$$

и система уравнений по третьей гармонике для одной фазы рабочего и дополнительного контуров запишется следующим образом:

$$W_2 Q \frac{dB_3}{dt} = i_3 R_{2T} + L_{2T} \frac{di_3}{dt} + 3i_3 R_H; \quad (4.59)$$

$$W_2 Q \frac{dB_3}{dt} = i_0^1 R_{32T} + L_{32T} \frac{di_0^1}{dt} + \frac{1}{3C_{32}} \int i_0^1 dt, \quad (4.59^1)$$

где:  $R_{32T}$ ,  $L_{32T}$ ,  $C_{32}$  - сопротивления в цепи дополнительного контура, приведенные к виткам рабочих обмоток датчиков.

Уравнениям (4.59) соответствует однофазная схема замещения ФТНП с дополнительным контуром по третьей гармонике (рисунок 4.5, в). Однофазная схема ФТНП по первой гармонике аналогична рассмотренной выше для одноконтурной схемы фильтра (рисунок 4.5, б).

Полное сопротивление по третьей гармонике в соответствии со схемой замещения фильтра с дополнительным контуром для режима симметричных первичных токов (рисунок 4.5, в) равно:

$$Z_3 = \frac{(R_{2T} + 3R_H + j3X_{2T}) \left[ R_{32T} + j \left( 3X_{32T} - \frac{X_{C32}}{9} \right) \right]}{(R_{2T} + 3R_H + j3X_{2T}) + \left[ R_{32T} + j \left( 3X_{32T} - \frac{X_{C32}}{9} \right) \right]}. \quad (4.60)$$

Так как  $R_{32T} \ll |R_{2T} + 3R_H + j3X_{2T}|$ ; (4.61)

и если емкость дополнительного контура выбрана из условия:

$$3X_{32T} = \frac{X_{C32}}{9}; \quad (4.62)$$

то нагрузка фильтра по третьей гармонике будет соответствовать:

$$Z_K = R_{32T} . \quad (4.63)$$

При этом, нагрузка фильтра без контура по третьей гармонике будет определяться:

$$Z_0 = R_{2T} + 3R_H + j3X_{2T} . \quad (4.64)$$

Таким образом, режим работы ФТНП с дополнительным контуром по третьей гармонике, совершенно отличен от режима рассмотренной выше одноконтурной схемы фильтра. Несмотря на то, что небалансы определяются по тем же формулам (4.24), (4.46) и (4.47), уровень их будет значительно ниже, так как  $Z_K \ll Z_0$ .

Результаты расчетов напряжения небаланса  $U_{нб.ср}$  фильтра, для указанных выше параметров, датчиков приведены на рисунке 4.4 и имеют хорошее совпадение с данными эксперимента.

Величина емкости, обеспечивающая последовательный резонанс в дополнительном контуре по третьей гармонике, определяется в соответствии с (4.62) выражением:

$$C = \frac{10^6}{27\omega X_{3T}}, \text{ мкФ} \quad (4.65)$$

где:  $X_{3T}$  – индуктивное сопротивление рассеяния дополнительной обмотки датчика.

Тот факт, что дополнительный контур фильтра не оказывает влияния на режим работы датчиков по первой гармонике, является благоприятным, так как сохраняются повышенные значения сопротивления ветви намагничивания  $Z_{02}$  утечки тока замыкания.

Для токов замыкания основной частоты дополнительный контур будет представлять нагрузочную ветвь с сопротивлением емкостного характера, которая может находиться в резонансных условиях и по основной частоте, при этом в режиме замыкания на землю полезный сигнал на выходе фильтра должен увеличиться.



### Исследование работы ФТНП с дополнительным контуром в режиме замыкания на землю первичной цепи

Для анализа работы ФТНП с дополнительным контуром в режиме замыкания составим его схему замещения. На рисунке 4.6 показано распределение вторичного тока замыкания в схеме фильтра для случая, когда первичные токи нагрузки отсутствуют. Следует отметить, что последние будут изменять магнитное состояние датчиков, то есть  $Z_{02}$ , оказывая влияние только на соотношение токов в отдельных ветвях. Схема замещения при этом не изменяется.

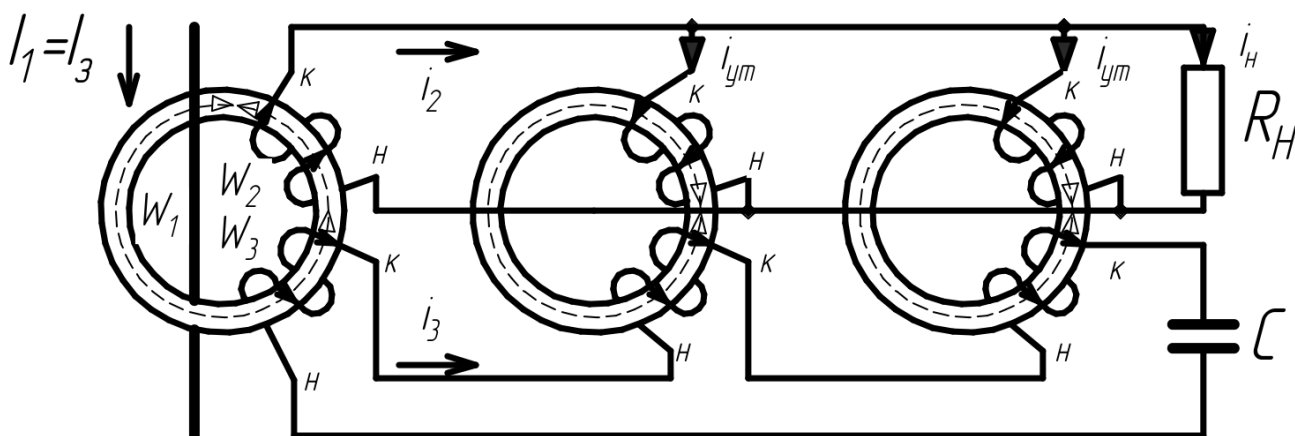


Рисунок 4.6 - Распределение вторичного тока замыкания в схеме ФТНП с дополнительным контуром в режиме замыкания первичной цепи.

Для схемы фильтра на рисунке 4.6 справедливы следующие дифференциальные уравнения, составленные для контуров:

- рабочая обмотка датчика поврежденной фазы – нагрузка

$$M_{12} \frac{di_1}{dt} - M_{23} \frac{di_3}{dt} = i_2 R_{2T} + L_2 \frac{di_2}{dt} + (i_2 - 2i_{ym}) R_H; \quad (4.66)$$

аналогично для контура:

- суммарная ветвь утечки – нагрузка

$$(i_2 - 2i_{ym}) R_H = 2i_{ym} \frac{R_{2T}}{2} + \frac{L_2}{2} \frac{d2i_{ym}}{dt} - M_{23} \frac{di_3}{dt}; \quad (4.67)$$

и для открытого треугольника

$$M_{13} \frac{di_1}{dt} - M_{23} \frac{di_2}{dt} = 3i_3 R_{3T} + 3L_3 \frac{di_3}{dt} - M_{23} \frac{d2i_{ym}}{dt} + \frac{1}{C} \int i_3 dt, \quad (4.68)$$

где:  $R_{2T}$ ,  $R_{3T}$  – активные сопротивления вторичных обмоток;  $L_2$ ,  $L_3$  – индуктивности обмоток  $W_2$  и  $W_3$ ;  $M_{12}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{23}$  – взаимные индуктивности между обмотками  $W_1$ -  $W_2$ ,  $W_1$ -  $W_3$ ,  $W_2$ -  $W_3$ .

$$M_{12} \frac{W_2}{W_1} = L_{02}; \quad M_{13} \frac{W_2^2}{W_1 W_3} = L_{02}; \quad M_{23} \frac{W_2}{W_3} = L_{02}; \quad (4.69)$$

$$L_{02} = L_2 - L_{2T}.$$

Приведем уравнения к цепи вторичной обмотки  $W_2$  и примем:

$$i_{12} = i_{02} + i_2 + i_{32}, \quad (4.70)$$

где: 
$$i_{12} = i_1 \frac{W_1}{W_2}; \quad i_{32} = i_3 \frac{W_3}{W_2}.$$

С учетом (4.69) и (4.70) уравнение (4.66) запишется следующим образом:

$$M_{12} \frac{W_2}{W_1} \frac{di_{12}}{dt} - M_{23} \frac{W_2}{W_3} \frac{di_{32}}{dt} = i_2 R_{2T} + L_{02} \frac{di_2}{dt} + L_{2T} \frac{di_2}{dt} + (i_2 - 2i_{ym}) R_H; \quad (4.71)$$

или

$$L_{02} \frac{di_{02}}{dt} = -L_{02} \frac{di_2}{dt} - L_{02} \frac{di_{32}}{dt} + M_{23} \frac{W_2}{W_3} \frac{di_{32}}{dt} + i_2 R_{2T} + L_{02} \frac{di_2}{dt} + L_{2T} \frac{di_2}{dt} + (i_2 - 2i_{ym}) R_H. \quad (4.72)$$

После упрощений будем иметь:

$$L_{02} \frac{di_{02}}{dt} = i_2 R_{2T} + L_{2T} \frac{di_2}{dt} + (i_2 - 2i_{ym}) R_H. \quad (4.73)$$

Подставляя (4.69) и (4.70) в уравнение (4.67) после преобразований получим:

$$(i_2 - 2i_{ym}) R_H = 2i_{ym} \frac{R_{2T}}{2} + \frac{L_{2T}}{2} \frac{d2i_{ym}}{dt} + \frac{L_{02}}{2} \frac{d2i_{ym}}{dt} - L_{02} \frac{di_{32}}{dt}. \quad (4.74)$$

Аналогично уравнение (4.68) запишется так:

$$L_{02} \frac{di_{12}}{dt} \frac{W_3}{W_2} - M_{23} \frac{di_2}{dt} = 3i_{32} \frac{W_2}{W_3} R_3 + 3L_3 \frac{di_{32}}{dt} \frac{W_2}{W_3} - M_{23} \frac{d2i_{ym}}{dt} + \frac{1}{C} \frac{W_2}{W_3} \int i_{32} dt . \quad (4.75)$$

Здесь:

$$L_{02} \frac{di_{12}}{dt} \frac{W_3}{W_2} = M_{13} \frac{di_{12}}{dt} \frac{W_2^2}{W_1 \times W_3} \times \frac{W_3}{W_2} .$$

Раскроем уравнение (4.75):

$$L_{02} \frac{di_{02}}{dt} = -L_{02} \frac{di_2}{dt} - L_{02} \frac{di_{32}}{dt} + M_{23} \frac{W_2}{W_3} \frac{di_2}{dt} + 3i_{32} R_{32} + 3L_{32} \frac{di_{32}}{dt} - M_{23} \frac{W_2}{W_3} \frac{d2i_{ym}}{dt} + \frac{1}{C_{32}} \int i_{32} dt , \quad (4.76)$$

где: 
$$R_{32} = R_3 \left( \frac{W_2}{W_3} \right)^2 ; \quad L_{32} = L_3 \left( \frac{W_2}{W_3} \right)^2 ; \quad \frac{1}{C_{32}} = \frac{1}{C} \left( \frac{W_2}{W_3} \right)^2 . \quad (4.77)$$

Так как:  $L_{32} = L_2 = L_{02} + L_{2T}$  ;

то окончательный вид исходного уравнения (4.68) будет следующим:

$$L_{02} \frac{di_{02}}{dt} = 3i_{32} R_{32} + 3L_{32} \frac{di_{32}}{dt} + \frac{1}{C_{32}} \int i_{32} dt + 2L_{02} \frac{di_{32}}{dt} - L_{02} \frac{d2i_{ym}}{dt} . \quad (4.78)$$

Таким образом, схема фильтра описывается системой уравнений (4.73), (4.74) и (4.78), приведенных к виткам вторичной обмотки  $W_2$ . Запишем уравнения (4.74) и (4.78) следующим образом:

$$(i_2 - 2i_{ym}) R_H = 2i_{ym} \frac{R_{2T}}{2} + \frac{L_{2T}}{2} \frac{d2i_{ym}}{dt} + \frac{L_{02}}{2} \frac{d2i_{ym}}{dt} - L_{02} \frac{di_{32}}{dt} + L_{02} \frac{d2i_{ym}}{dt} - L_{02} \frac{d2i_{ym}}{dt} ; \quad (4.79)$$

$$L_{02} \frac{di_{02}}{dt} = 3i_{32} R_{32} + 3L_{32} \frac{di_{32}}{dt} + \frac{1}{C_{32}} \int i_{32} dt + 2L_{02} \frac{di_{32}}{dt} - L_{02} \frac{d2i_{ym}}{dt} - L_{02} \frac{di_{32}}{dt} - L_{02} \frac{di_{32}}{dt} . \quad (4.80)$$

После преобразований уравнений (4.79) и (4.80) система уравнений для фильтра примет вид:

$$L_{02} \frac{di_{02}}{dt} = i_2 R_{2T} + L_{2T} \frac{di_2}{dt} + (i_2 - 2i_{ym}) R_H ;$$

$$2i_{ym} \frac{R_{2T}}{2} + \frac{L_{2T}}{2} \frac{d2i_{ym}}{dt} + \frac{3}{2} L_{02} \frac{d2i_{ym}}{dt} - L_{02} \frac{d}{dt} (i_{32} + 2i_{ym}) - (i_2 - 2i_{ym}) R_H = 0 ; \quad (4.81)$$

$$L_{02} \frac{di_{02}}{dt} = 3i_{32}R_{32} + 3L_{32} \frac{di_{32}}{dt} + 3L_{02} \frac{di_{32}}{dt} - L_{02} \frac{d}{dt}(i_{32} + 2i_{ym}) + \frac{1}{C_{32}} \int i_{32} dt .$$

Такой системе уравнений соответствует схема замещения представленная на рисунке 4.7 (а, б), по которой, возможно анализировать работы фильтра в режиме замыкания на землю как при холостом ходе линии, так и при наличии первичных рабочих токов.

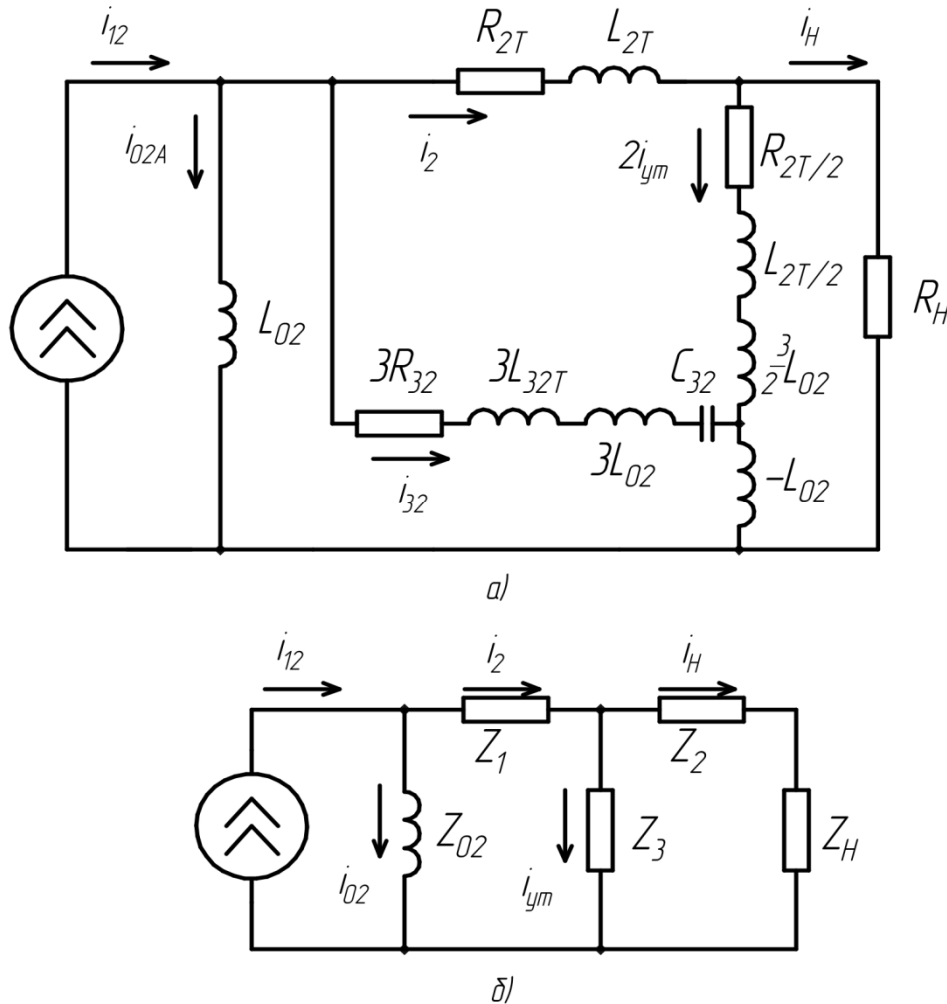


Рисунок 4.7 - Схемы замещения ФТНП с дополнительным контуром в режиме замыкания первичной цепи:

- а – принципиальная;
- б – расчетная.

Представленная схема замещения является универсальной и пригодна для анализа всех трех схем фильтров токов нулевой последовательности, изображенных на рисунке 4.1. Для схемы одноконтурного фильтра, составленного

из параллельных обмоток по схеме на рисунке 4.1(а) при анализе в схеме замещения размыкается цепь вторичной обмотки дополнительного контура ( $R_{32T}$ ,  $X_{32T}$ ). Для схемы включения по рисунку 4.1 (б) в открытый треугольник, в полной эквивалентной схеме исключаются цепи вторичных обмоток первого контура ( $R_{2T}$ ,  $X_{2T}$ ).

### Расчетные соотношения

С целью получения расчетных соотношений и величин вторичных токов нагрузки и утечки, преобразуем полученную схему замещения в вид, представленный на рисунке 4.7 (б). Здесь:

$$Z_1 = \frac{(R_{2T} + jX_{2T})[3R_{2T} + j(3X_{2T} + 3X_{02} - X_C)]}{\frac{9}{2}R_{2T} + j\left[\frac{9}{2}(X_{2T} + X_{02}) - X_C\right]}; \quad (4.82)$$

$$Z_2 = \frac{\frac{1}{2}(R_{2T} + jX_{2T})[R_{2T} + j(X_{2T} + 3X_{02})]}{\frac{9}{2}R_{2T} + j\left[\frac{9}{2}(X_{2T} + X_{02}) - X_C\right]}; \quad (4.83)$$

$$Z_3 = \frac{\frac{1}{2}[3R_{2T} + j(3X_{2T} - X_C)][R_{2T} + j(X_{2T} + X_{02})]}{\frac{9}{2}R_{2T} + j\left[\frac{9}{2}(X_{2T} + X_{02}) - X_C\right]}. \quad (4.84)$$

Тогда вторичный ток датчика определится как:

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{12} \frac{Z_{02}}{Z_{02} + Z_3}; \quad (4.85)$$

где:

$$Z_3 = Z_1 + \frac{(Z_2 + R_H)Z_3}{Z_2 + Z_3 + R_H}. \quad (4.86)$$

Токи в ветвях нагрузки и утечки:

$$\dot{I}_H = \dot{I}_2 \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3 + R_H}; \quad (4.87)$$

$$\dot{I}_{0,ym} = \dot{I}_2 \frac{Z_2 + R_H}{Z_2 + Z_3 + R_H}. \quad (4.88)$$

Можно принять  $Z_{02} = jX_{02}$ , тогда сопротивление холостого хода датчика определяется по выражению:

$$Z_{02} = \mu\omega \frac{W_2^2 Q}{\ell}. \quad (4.88^1)$$

Учитывая, что кривая намагничивания сердечника датчика в рабочей части с достаточной точностью может быть заменена двумя прямыми, принимаем кусочно-линейную аппроксимацию  $B(H)$  с точкой перегиба  $H_a$ ,  $H_a$  (рисунок 3.6). Если напряженность магнитного поля менее значения  $H_a$ , в выражении для определения сопротивления  $Z_{02}$  используется начальная магнитная проницаемость  $\mu_a$ , если больше – максимальная магнитная проницаемость  $\mu_{\max}$ . Практически режим работы устанавливается аналогично тому, как это показано в главе II, по значению первичного коммутационного тока, который определяется для данного случая следующим образом:

$$I_{1mk} = \frac{H_a \ell}{W_1 \frac{Z_{02a}}{Z_{\text{э}}}}, \quad (4.89)$$

где:

$$Z_{02a} = \mu_a \omega \frac{W_2^2 Q}{\ell}. \quad (4.90)$$

Полученные выражения (4.82) – (4.90) позволяют определять полезный сигнал на выходе двухконтурного фильтра при замыкании на землю, как в режиме холостого тока линии, так и в режиме нагрузки.

При этом следует отметить, что в режиме холостого хода линии и малых токов замыкания на землю (1-2 А), то есть на пороге чувствительности защиты, магнитное состояние сердечников датчиков характеризуется начальной магнитной проницаемостью  $\mu_a$ . Этот режим и является расчетным по условию чувствительности.

Из схемы замещения (рисунок 4.7, а) может быть получено условие максимума выходного сигнала в рассматриваемом режиме, которому соответствует:

$$3X_{32} + 3X_{02} = X_{C32} \quad (4.91)$$

Таким образом, эффект от включения дополнительного контура с емкостью состоит не только в снижении напряжения небаланса на выходе фильтра, но и в повышении полезного сигнала в режиме замыкания на землю.

Анализ режимов и соотношений в схеме двухконтурного фильтра по приведенной универсальной схеме замещения позволяет оценить физическую картину явлений и требования к конструктивным параметрам датчиков, которые можно сформулировать в следующем виде:

1). Значительное снижение небалансов на выходе фильтра соответствует режиму вынужденного намагничивания по третьей гармонике (4.62). Для реализации этого эффекта, сопротивления рассеяния обмоток дополнительного контура фильтра должны быть  $X_{3T} > 0$ , то есть конструктивно обмотки должны выполняться сосредоточенными.

2). В режиме замыкания на землю, максимальное увеличение полезного сигнала при работе фильтра в первичной цепи определяется условием резонанса по первой гармонике (4.91).

3). Кроме указанного, в схеме двухконтурного фильтра с емкостью, улучшается форма кривой выходного сигнала и стабилизируется угловая погрешность за счет ограничения зоны работы в линейной части кривой намагничивания (режим вынужденного намагничивания по третьей гармонике и возрастающее экранирование к гармоникам более высоких частот), что иллюстрируется экспериментальными кривыми для определения конструктивных параметров датчиков при заданном диапазоне первичных токов.

4). Оптимизация параметров фильтра целесообразна из условия совмещения требования максимального повышения полезного сигнала при замыкании на землю в режиме холостого хода линии (4.91) и снижение небалансов на выходе фильтра в режиме рабочих токов линии (4.62).

Совмещение этих требований достижимо при использовании двухконтурного фильтра с независимым выбором сопротивлений  $X_{2T}$  и  $X_{3T}$ .

Решаем совместно уравнения резонансов по третьей (4.62) и первой (4.91) гармоникам:

$$\begin{aligned} X_{C32} &= 27X_{32}; \\ X_{C32} &= 3X_{32} + 3X_{02}. \end{aligned} \quad (4.92)$$

Получаем связь между сопротивлением ветви намагничивания датчиков в режиме холостого хода первичной цепи и замыкании на землю, и сопротивлением рассеяния обмотки дополнительного контура, приведенным к виткам рабочей обмотки датчика:

$$X_{02} = 8X_{32T}. \quad (4.93)$$

Из выражения (4.93) определяется оптимальное соотношение между витками рабочей и дополнительной обмотки датчика:

$$X_{02} = 8X_{32T} \left( \frac{W_2}{W_3} \right)^2; \quad (4.94)$$

$$\frac{W_2}{W_3} = \sqrt{\frac{X_{02}}{8X_{3T}}}. \quad (4.95)$$

5) Из указанных в пункте (4) соображений оптимальными параметрами фильтра следует считать такие, которые соответствуют наибольшей величине показателя фильтра «сигнал – помеха». Параметр представляет собой отношение полезного сигнала  $U_2$  к напряжению небаланса (помехи)  $U_{нб}$ , приведенных к единице входного сигнала – рабочему току  $I_1$  и току замыкания:

$$\lambda = \frac{U_2}{U_{нб}} \times \frac{I_1}{I_{зам}}. \quad (4.96)$$

Используя результаты аналитических расчетов по предложенной методике напряжения небаланса, представленные на рисунке 4.4 и полезного сигнала на рисунке 4.8, можем оценить техническое совершенство предлагаемого



двухконтурного фильтра для условий рабочих токов и токов замыкания на землю, характерных для сельских сетей 6-10 кВ.

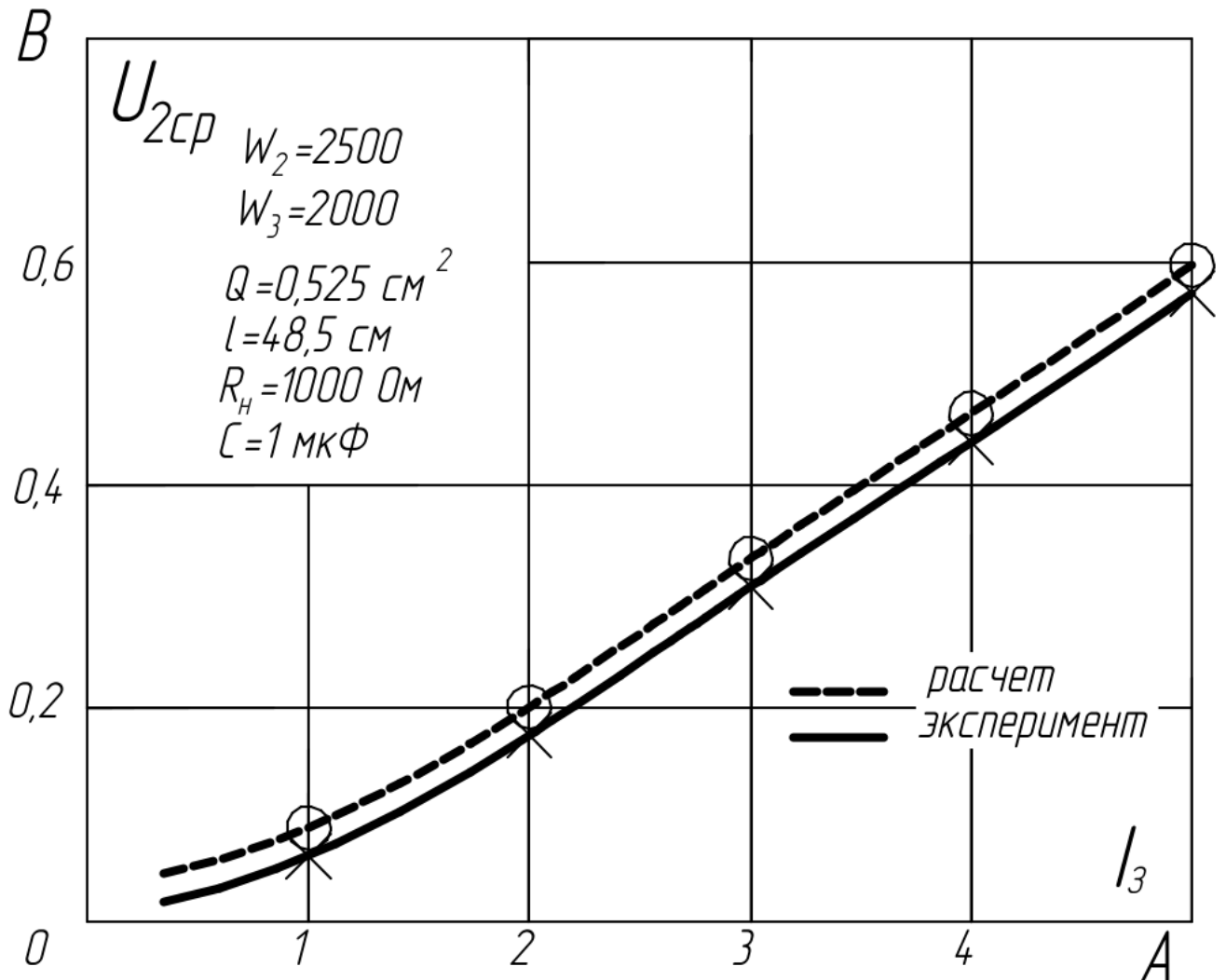


Рисунок 4.8 - Расчетные и экспериментальные характеристики ФТНП с дополнительным контуром в режиме холостого хода линии и замыкания на землю.

Количественные значения показателя «сигнал – помеха» фильтра с параметрами  $W_2 = 2500$ ,  $W_3 = 2000$ ,  $R_H = 1000 \text{ Ом}$ ,  $C = 1 \text{ мкФ}$ , приведенные на рисунке 4.8, составляют  $\lambda=150-200$  в диапазоне первичных токов  $I_1 \geq 100 \text{ А}$ .

Необходимо отметить, что перечисленные выше эффекты достижимы именно при использовании трансформаторных датчиков тока с малым объемом стали, ввиду особенностей режимов их работы при малых первичных токах.

### 4.3. Экспериментальные исследования и выбор оптимальных параметров двухконтурной схемы фильтра токов нулевой последовательности

Для подтверждения выводов теоретических исследований ожидаемого эффекта повышения качества фильтра токов нулевой последовательности и выбора оптимальных параметров в задачи исследований входило:

- 1) Анализ влияния параметров датчика на показатели фильтра;
- 2) Определение максимальных параметров из условия наибольших значений показателя: числа витков рабочей  $W_2$  и дополнительной  $W_3$  обмоток, сечения магнитопровода датчиков  $Q$ , емкости в цепи дополнительного контура  $C_{\text{опт}}$ ;
- 3) Определение значений выходных величин: вторичного тока, напряжения и мощности;
- 4) Оценка значений первичных токов срабатывания устройств сигнализации и возможности использования фильтра для сельских высоковольтных сетей.

Учитывая объем поставленных выше задач, исследования проводились с фильтрами на трансформаторных датчиках нескольких модификаций, отличающихся параметрами и конструктивным исполнением.

**Вариант I.** Датчик тока на кольцевом сердечнике, набранном из 15 пластин (сталь Э-310, ширина ленты 10 мм, толщина 0,35 мм), соединенных внахлестку зажимом. Длина средней магнитной линии  $\ell=48,5$  см, сечение сердечника  $Q=0,525$  см<sup>2</sup>. Вторичные рабочие  $W_2$  и дополнительные  $W_3$  обмотки выполнены в виде катушек, число витков  $W_2=2500$  с отпайками через 500, 1500 и 2500 витков,  $W_3=2000$ . Активное сопротивление и сопротивление рассеяния рабочей обмотки  $R_{2T}=186$  Ом,  $X_{2T}=190$  Ом, дополнительной  $R_{3T}=123$  Ом,  $X_{3T}=119$  Ом.

**Вариант II.** Датчик тока на кольцевом сердечнике, набранном из 30 пластин (сталь Э-310, ширина ленты 10 мм, толщина 0,35 мм), соединенных внахлестку зажимом. Длина средней магнитной линии  $\ell=48,5$  см, сечение

сердечника  $1,05 \text{ см}^2$ . Вторичные рабочие  $W_2$  и дополнительные  $W_3$  обмотки выполнены в виде катушек, число витков  $W_2=2500$  с отпайками через 500, 1500 и 2500 витков,  $W_3=2000$ . Активное сопротивление и сопротивление рассеяния рабочей обмотки  $R_{2T}=186 \text{ Ом}$ ,  $X_{2T}=190 \text{ Ом}$ , дополнительной  $R_{3T}=123 \text{ Ом}$ ,  $X_{3T}=119 \text{ Ом}$ .

При проводимом исследовании применялись различные варианты вторичных обмоток, по числу витков и расположению на сердечнике (распределенная, сосредоточенная).

Использование указанных выше модификаций датчиков тока для исследуемой схемы фильтра позволило проанализировать влияние конструктивного исполнения вторичных обмоток и сердечников датчиков на показания фильтра.

Лабораторные исследования схемы фильтра проводились на экспериментальной установке, описанной в главе III (рисунок 3.2). Для моделирования режима замыкания через окно сердечника одного из датчиков фильтра пропускался дополнительный провод питаемый током от другого источника.

Поскольку в реальной высоковольтной сети замыкания на землю обычно происходят через переходное сопротивление, это учитывалось в экспериментальной установке путем изменения сдвига фазового угла между током замыкания  $I_3$  и рабочим током  $I_1$ .

Как известно, при замыкании в сетях с изолированной нейтралью токораспределение в фазах поврежденной линии характеризуется тем, что в поврежденной фазе протекает суммарный ток замыкания на землю, а в неповрежденных собственных емкостные токи данной линии [90].

Учитывая возможность влияния на магнитный режим датчиков малых емкостных токов неповрежденных фаз при замыканиях на землю, в лабораторных условиях имитировалась указанная выше картина токораспределения с протекающими токами по здоровым фазам до 0,5-1,0 А. Для режима холостого

хода линии полезный сигнал на выходе фильтра, в этих условиях, возрастал на 15-20%, что благоприятно для повышения чувствительности.

Однако все характеристики сняты без учета этого эффекта, поскольку последний в режиме нагрузки линии на проявляется.

### Влияние обмоточных данных двухконтурного фильтра на выходные параметры

Зависимости полезного сигнала при замыкании на землю и небалансов на выходе фильтра в функции витков рабочего и дополнительного контуров показаны на рисунках 4.9 и 4.10 при оптимальных значениях емкостей  $C_{\text{опт}}$  для каждого сочетания и заданных режимов первичной и вторичной цепей ( $I_1=10-50$  А;  $I_3 \leq 2$  А;  $R_n = 1000$  Ом). При этом за  $C_{\text{опт}}$  принималась величина, обуславливающая максимальный полезный сигнал (рисунок 4.10) и минимум небалансов (рисунок 4.9).

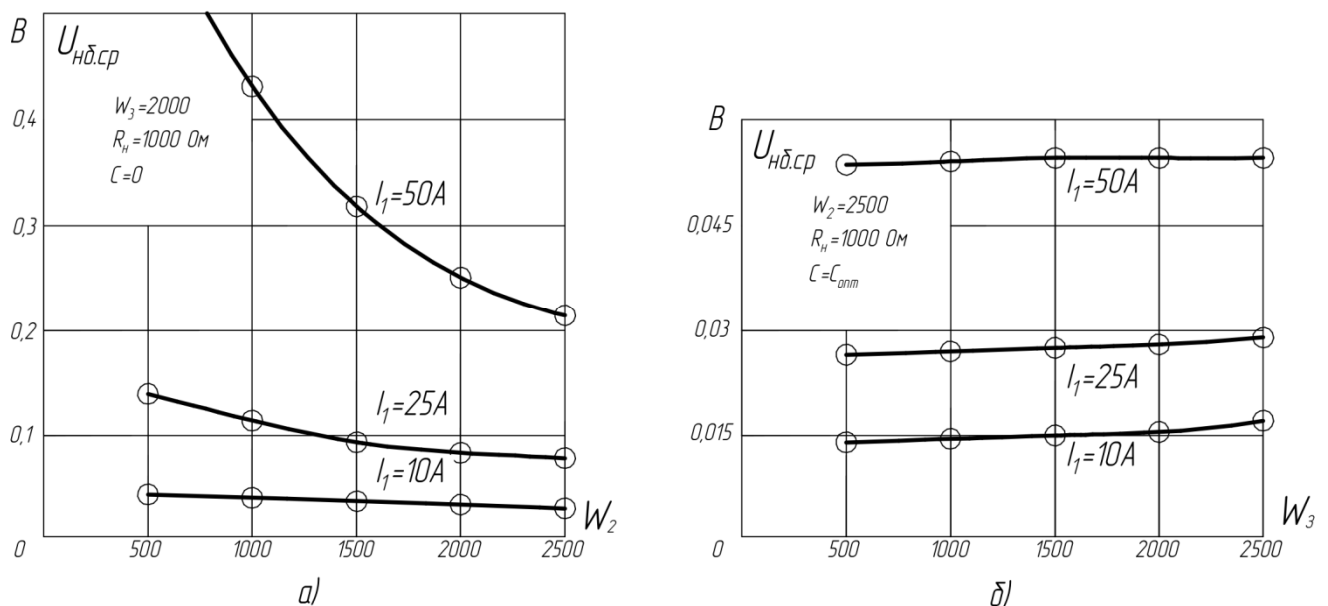


Рисунок 4.9 - Зависимости напряжения небаланса ФТНП от числа витков рабочей (а) и дополнительной обмоток (б).

Зависимости выходного сигнала ФТНП от числа витков рабочей (а) и дополнительной обмоток (б), представлены на рисунке 4.10.

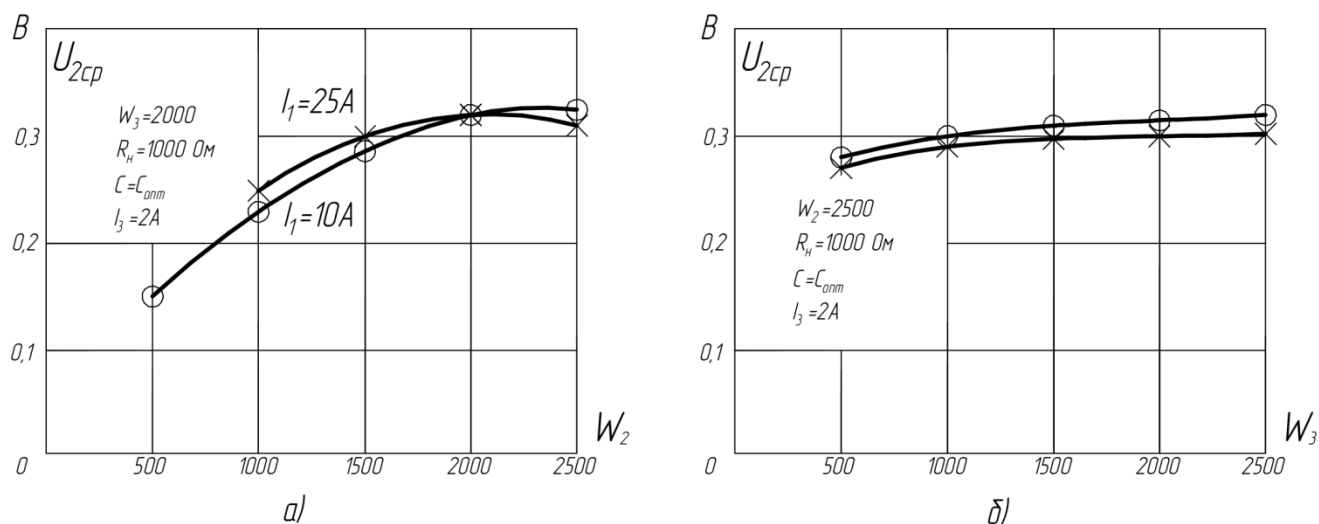


Рисунок 4.10 - Зависимости выходного сигнала ФТНП от числа витков рабочей (а) и дополнительной обмоток (б).

Из анализа графиков (рисунок 4.9 и 4.10) видно, что число витков дополнительных обмоток датчиков незначительно влияет как на величину небалансов, так и на полезный сигнал. С увеличением же числа витков рабочих обмоток небалансы падают, а напряжение на выходе фильтра в режиме замыкания на землю возрастает. Как и было показано теоретически, имеется оптимальное соотношение числа витков рабочей и дополнительной обмоток датчика, при котором коэффициент запаса  $K_{зап} = U_2/U_{нб}$  имеет максимальное значение.

Для фильтра с датчиками первой модификации это соотношение составляет  $W_2/W_3 = 1-1,25$  при числе витков дополнительной обмотки  $W_3 = 2000$  (рисунок 4.12 а). Для сравнения с теоретическим значением по выражению (4.95) и параметров датчиков  $X_{3T}$  и  $X_{02}$  (при  $\mu_{\max}$ ) имеем:

$$\frac{W_2}{W_3} = \sqrt{\frac{X_{02}}{8X_{3T}}} = \sqrt{\frac{1420}{8 \times 119}} = 1,22,$$

где:  $X_{02}$  – сопротивление намагничивания вторичной рабочей обмотки;  $X_{3T}$  – сопротивление рассеяния вторичной дополнительной.

то есть полное совпадение.

## Емкость двухконтурного фильтра

Согласно теоретическим исследованиям, оптимальная величина емкости в цепи дополнительного контура должна удовлетворять условиям (4.62) и (4.91):

$$\begin{aligned} X_{C32} &= 27 X_{32}; \\ X_{C32} &= 3 X_{32} + 3 X_{02}. \end{aligned}$$

После приведения к виткам дополнительных обмоток и учетом (4.88<sup>1</sup>) имеем:

$$\begin{aligned} X_{C3} &= 27 X_3; \\ X_{C3} &= 3 \mu \omega \frac{W_2^2 Q}{\ell} \left( \frac{W_3}{W_2} \right)^2 + 3 X_3. \end{aligned} \quad (4.97)$$

Из выражения (4.97) видно, что оптимальная величина емкости, при прочих равных условиях, зависит только от числа витков дополнительных обмоток и магнитного состояния сердечников.

Экспериментальные исследования полностью подтверждают эти выводы (рисунок 4.11).

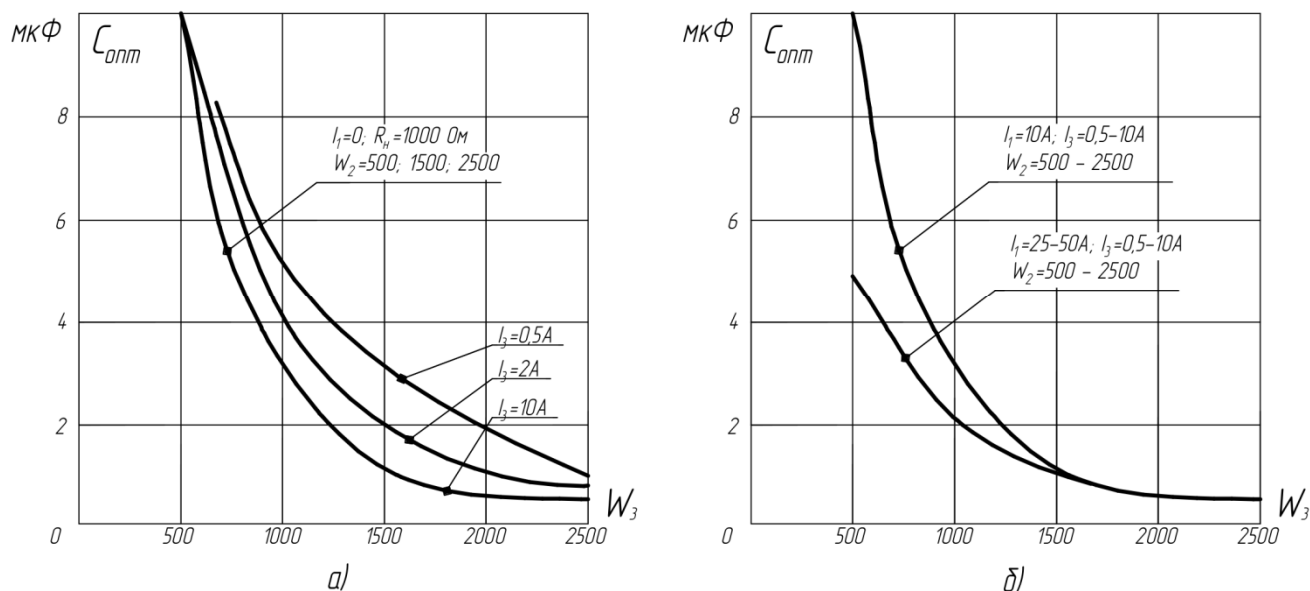


Рисунок 4.11 - Оптимальная величина емкости в зависимости от числа витков рабочей и дополнительной обмоток и первичных токов.

Как видно из рисунка 4.11, для режима замыкания на землю с токами  $I_3 = 0,5-10$  А в условиях холостого хода линии величина оптимальной емкости при

одном и том же значении  $W_3$  в сильной степени зависит от величины тока замыкания, который и обуславливает в данном случае магнитный режим сердечников. При замыкании на землю в условиях наличия первичных токов нагрузки  $I_1 \geq 10$  А (рисунок 4.11,б) оптимальная величина емкости зависит только от числа витков дополнительных обмоток фильтра, начиная с  $W_3 \geq 1500$ .

Получение наиболее полного эффекта от включения емкости в схемы двухконтурного фильтра в режимах холостого хода и нагрузки первичной цепи принципиально может быть достигнуто при использовании в дополнительном контуре переменной емкости (вариконда) [91]. Практическое осуществление возможно только при наличии вариконда меняющего величину своей емкости в пределах 1-3 мкФ при малых значениях приложенного напряжения. Однако, учитывая редкие случаи наличия в сети линий на холостом ходу, вполне допустимо в схеме фильтра применять постоянную емкость, оптимальная величина которой выбрана из условия получения максимального значения показателя «сигнал-помеха» при максимальных расчетных первичных токах (рисунок 4.12, б).

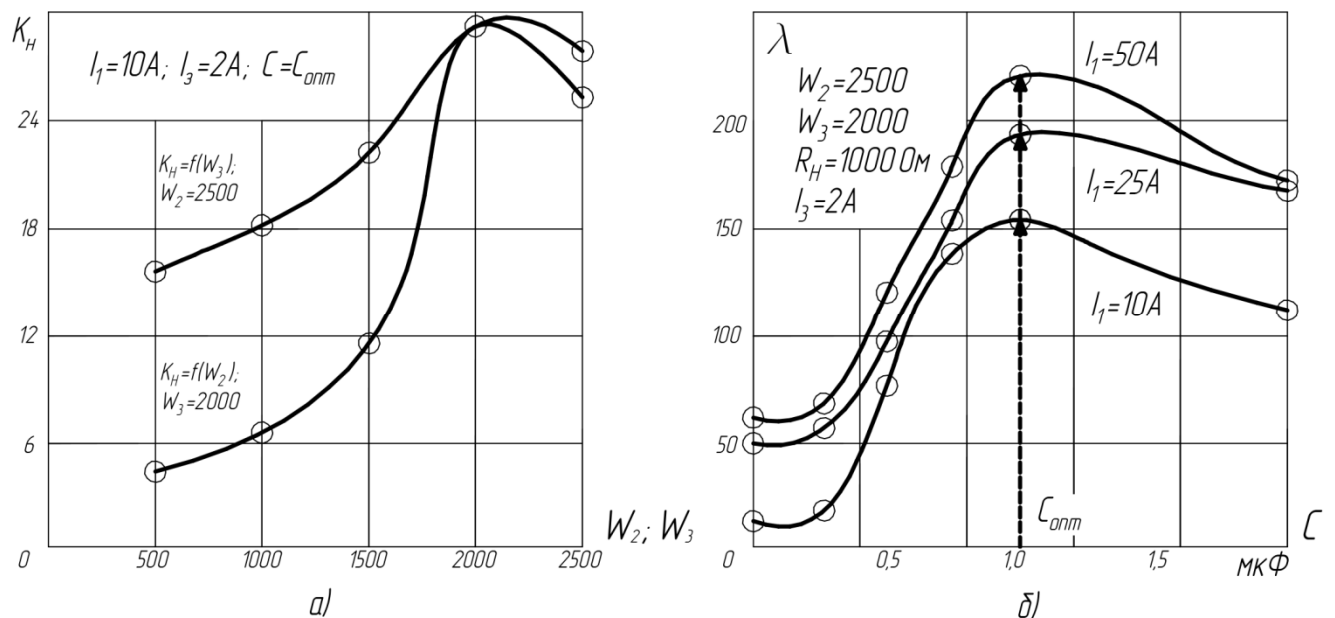


Рисунок 4.12 - К выбору оптимальных параметров схемы ФТНП: а) - число витков рабочей и дополнительной обмоток датчика; б) – емкости в цепи дополнительного контура.

Для конструктивного исполнения датчика тока по варианту I величина оптимальной емкости из выражения (4.65) равна:

$$C = \frac{10^6}{27\omega X_{3T}} = \frac{10^6}{27 \times 314 \times 119} = 0,99 \text{ мкФ},$$

то есть практически совпадает с экспериментальными данными ( $C_{\text{опт}} = 1 \text{ мкФ}$ ).

### **Влияние исполнения обмоток датчиков фильтра**

Исследования показали, что наилучшие показатели имеют место у фильтров с вторичными сосредоточенными рабочими и дополнительными обмотками.

При выполнении рабочих обмоток датчиков фильтра равномерно распределенными на сердечнике (сопротивление рассеяния  $X_{2T} \approx 0$ ), уменьшение соотношения полного сопротивления рабочей обмотки и сопротивления ветви холостого хода  $Z_{2T}/Z_{02}$  ведет к изменению магнитного состояния датчиков. Последние работают в этом случае в начальной части характеристик  $B(H)$ , где наиболее сильно проявляются отличия друг от друга. В связи с этим в напряжении небаланса на выходе схемы фильтра большая доля будет приходиться на небаланс основной частоты.

Схема двухконтурного фильтра с распределенными рабочими обмотками неэффективна, так как небаланс основной частоты усиливается как полезный сигнал. При оптимальном значении емкости наблюдается максимальное увеличение, как небалансов, так и сигнала, вызываемого током замыкания на землю в первичной цепи, поэтому показатели фильтра уменьшаются.

Что касается обмоток дополнительного контура, то как показано в теоретических исследованиях, выполнение их сосредоточенными также необходимо для получения режима вынужденного намагничивания для снижения небалансов.

### **Влияние объема стали сердечников**

Чем меньше объем стали, тем ближе датчики по своим свойствам приближаются к воздушным трансформаторам тока. В связи с этим при меньших сечениях сердечника следует ожидать меньших небалансов основной частоты,



обуславливаемых не идентичностью магнитных характеристик. Выполнение фильтра с дополнительным контуром приводит к уменьшению значения напряжения небаланса, рисунок 4.13 (а), но при увеличении сечения сердечника это менее эффективно.

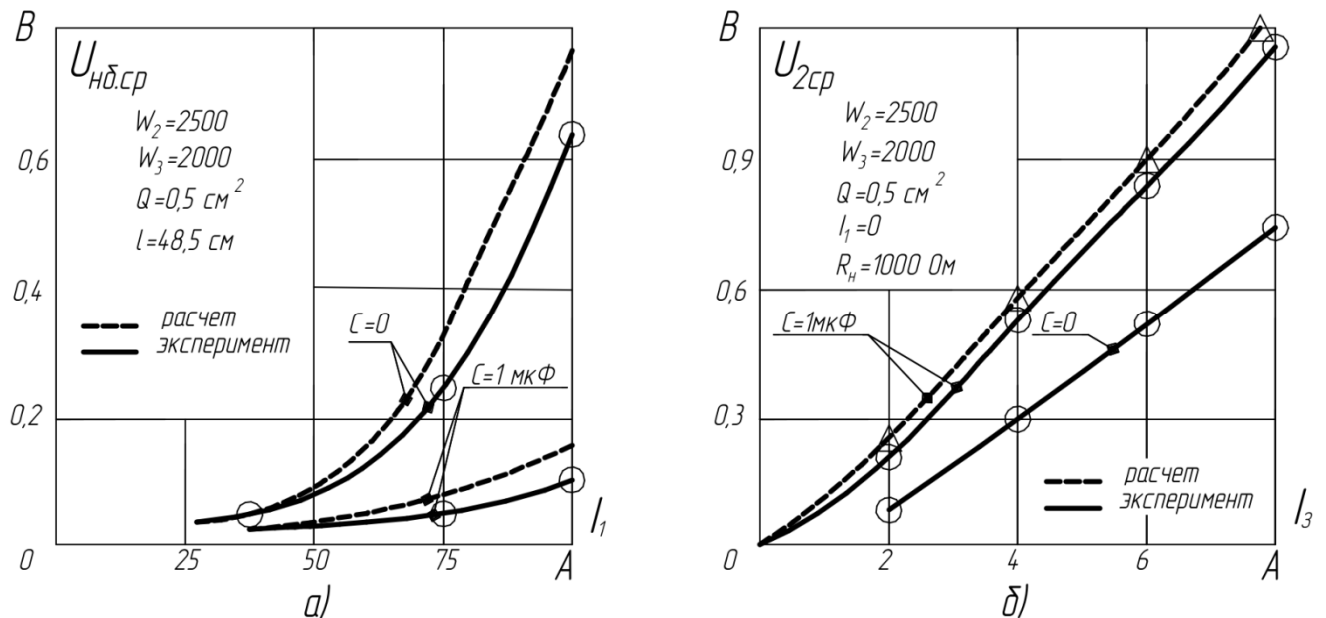


Рисунок 4.13 - Экспериментальные исследования двухконтурной схемы фильтра с емкостью. Напряжение небаланса на выходе схемы фильтра (а) и вольтамперная характеристика фильтра в режиме замыкания на землю (б).

В полной мере это относится к шихтованным и тороидальным ленточным сердечникам [92].

С точки зрения наилучшего использования эффекта дополнительного контура с емкостью в схеме фильтра токов нулевой последовательности предпочтительней сердечники сечением  $0,5 \text{ см}^2$  из пакета пластин, соединяемых внахлест зажимом. Получаемый таким образом, плавно регулируемый немагнитный зазор позволяет наряду с достижением линейности характеристик в требуемых пределах первичных токов, добиться идентичных характеристик для группы датчиков, используемых в схеме фильтра.

С другой стороны, увеличение сечения стали благоприятно сказывается при работе фильтра в режиме замыкания на холостом ходу линии, так как вольтамперные характеристики такого фильтра располагаются круче, к тому же

применение дополнительного контура с емкостью способствует увеличению полезного сигнала, рисунок 4.13 (б).

Учитывая необходимость выполнения этих двух противоречивых условий – снижение небалансов и повышение полезного сигнала, а также то, что датчики тока устанавливаются на проходных изоляторах в шкафах отходящих линий КРУН – 10 кВ и поэтому размеры их ограничены, было принято оптимальное сечение 0,5-1,0 см<sup>2</sup>.

### Оценка режима магнитопровода и результирующего эффекта

Анализируя экспериментальные данные, представленные на рисунках 4.12-4.15 можно отметить, что последние полностью подтверждают проведенные теоретические исследования.

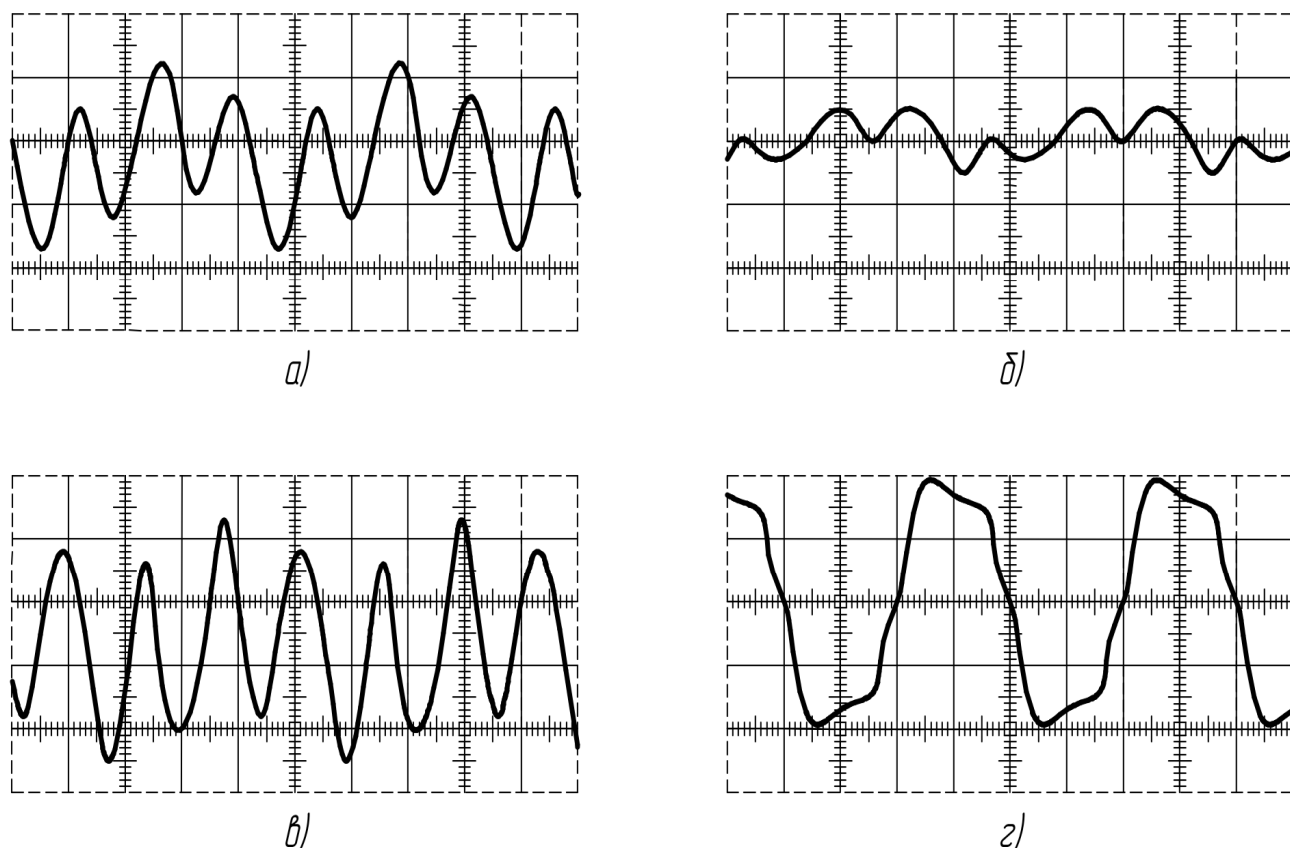


Рисунок 4.14 - Форма кривой выходного напряжения ФТНП с дополнительным контуром ( $I_1 = 50$  А,  $I_3 = 2$  А): а –  $U_{нб}$  ( $C = 0$ ); б -  $U_{нб}$  ( $C = 1$  мкФ); в –  $U_2$  ( $C = 0$ ); г –  $U_2$  ( $C = 1$  мкФ).

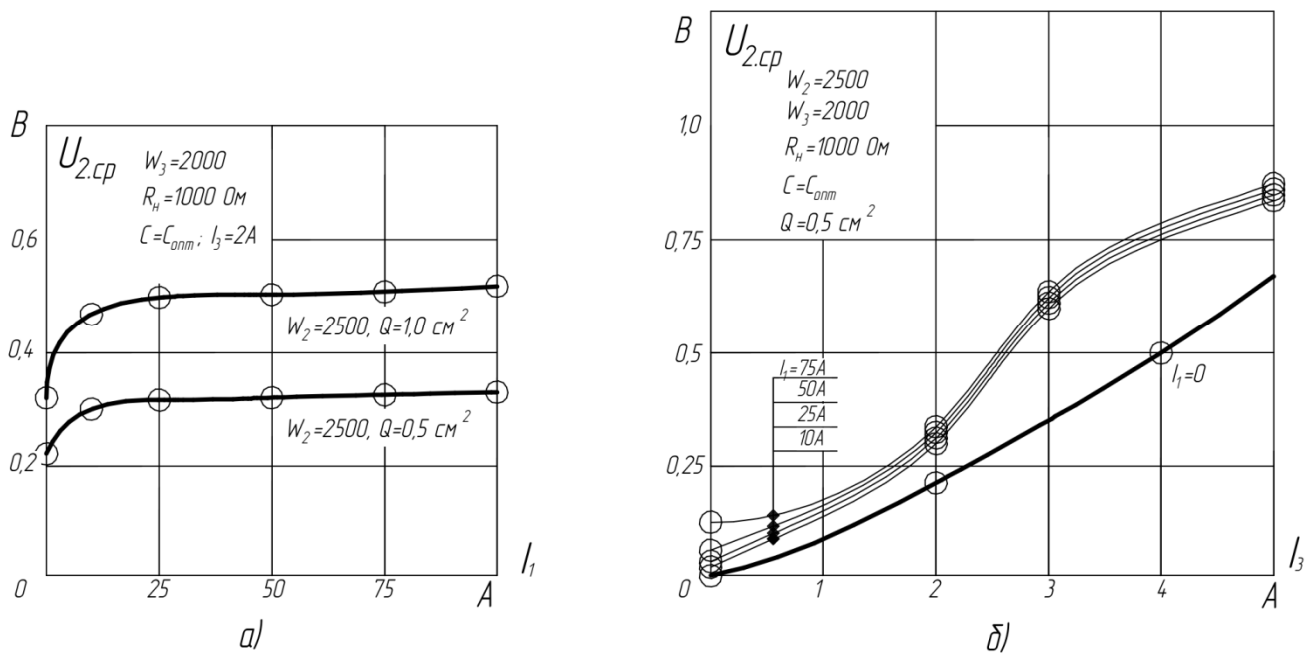


Рисунок 4.15 - Величина сигнала на выходе фильтра в зависимости от первичных токов и тока замыкания на землю.

В схеме фильтра с дополнительным контуром наблюдается эффект снижения небалансов от третьих гармонических в 3-4 раза и повышение сигнала основной частоты при замыканиях в первичной цепи в 1,5-2 раза. При оптимальной настройке показателя «сигнал-помеха»  $\lambda=150-200$  для первичных токов  $I_1 = 10-75 \text{ A}$  (рисунок 4.15, б).

Настройка дополнительного контура в схеме фильтра, которая обеспечивает режим работы датчиков на линейном участке кривой намагничивания (с максимальными значениями магнитной проницаемости) при значениях первичных токов 5-7 А для сердечников сечением  $Q = 0,525 \text{ cm}^2$  и 12-15 А для  $Q = 1,05 \text{ cm}^2$  (рисунок 4.15, а).

Стабильность режимов магнитопроводов датчиков в зоне линейной части характеристики намагничивания достаточно хорошо иллюстрируются характеристиками на рисунке 4.11, (б). Постоянством значения магнитной проницаемости сердечника объясняется независимость требуемой величины емкости в схеме фильтра от первичных токов, начиная с  $I_1 \geq 10 \text{ A}$ .

Исследования показали, что данный режим в обычной схеме фильтра на трансформаторных датчиках достигается при рабочих токах 75-100 А.

Такой режим обеспечивает улучшение формы кривой выходного сигнала (рисунок 4.14), уменьшает небалансы от рабочих токов линии и повышает полезный сигнал от токов замыкания, а также способствует стабилизации угловых характеристик, что важно для направленных защит.

На рисунке 4.16 показаны зависимости вторичного тока и мощности на выходе схемы двухконтурного фильтра от сопротивления нагрузки при токе замыкания на землю 2 А для двух расчетных режимов линии (холостой ход и режим нагрузки).

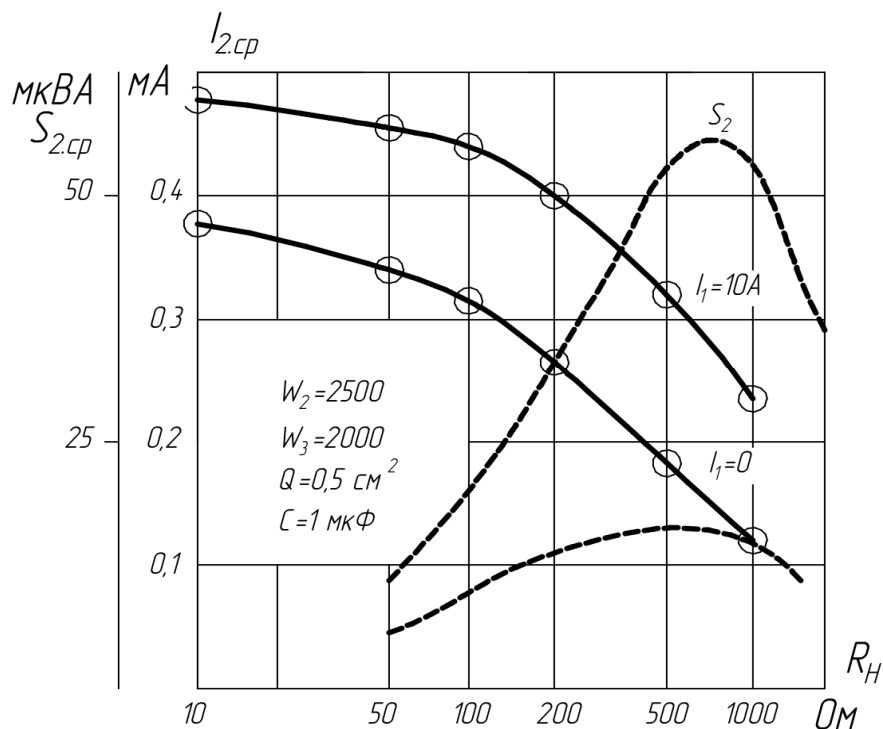


Рисунок 4.16 - Зависимости вторичного тока на выходе схемы фильтра от сопротивления нагрузки.

Для сочетания с устройствами защиты и сигнализации зона оптимальных нагрузок, с точки зрения максимума отдаваемой мощности, составляет 300-1200 Ом. Этот диапазон нагрузок удобен для сочетания фильтра с микропроцессорными и полупроводниковыми устройствами без дополнительных согласующих элементов.

Таким образом, проведенный анализ влияния параметров датчиков на показатели схемы и определение оптимальных величин с точки зрения максимальных значений показателя «сигнал-помеха» позволил определить оптимальный вариант фильтра с параметрами:

- сечение магнитопроводов датчиков  $Q = 0,525 \text{ см}^2$ ;
- число витков рабочей обмотки  $W_2 = 2500$ ;
- число витков дополнительной обмотки  $W_3 = 2000$ ;
- исполнение обмоток (сосредоточенная катушка);
- величина емкости в цепи дополнительной обмотки  $C_{\text{опт}} = 1 \text{ мкФ}$ ;
- входное сопротивление нагрузки  $R_H = 300 - 1200 \text{ Ом}$ .

В соответствии со статистическими данными параметров сельских распределительных сетей 10 кВ, с вероятностью до 90-95% рабочие токи составляют 40-50 А. Отношение рабочего тока к емкостному на поврежденной линии не превышает 47 [24].

Разработанный вариант фильтра токов нулевой последовательности характеризуется показателем «сигнал-помеха» равным 150-200 и обеспечивает, таким образом, выполнение условий чувствительности для большинства сельских линий 6-10 кВ.

Сравнительный анализ фильтров токов нулевой последовательности приведен в приложении В.

### **Выводы по главе**

1. Предложенная в данной диссертационной работе схема ФТНП на разработанных датчиках тока с дополнительным контуром, состоящая из трех вторичных обмоток, соединенных в разомкнутый треугольник с конденсатором на выходе, обеспечивает улучшение качеств фильтра:

- а) повышение выходного сигнала в режиме замыкания первичной цепи;
- б) снижение напряжения небалансов от рабочих токов линии;
- в) улучшение формы кривой выходного сигнала;
- г) стабилизация угловых характеристик.

2. Для теоретических исследований предложенного ФТНП, представляющего собой ферромагнитное устройство с тремя трехфазными магнитосвязанными контурами, имеющих различное соединение обмоток, целесообразны предложенные в работе однофазные эквивалентные схемы замещения по основной и третьей гармоникам, позволяющие анализировать работу схемы фильтра в режимах симметричных первичных токов и замыканий на землю.

3. Теоретические исследования режимов работы двухконтурного ФТНП проведенные с целью оптимизации параметров и характеристик фильтра выявили следующее:

а) в режиме вынужденного намагничивания по третьей гармонике соответствуют минимальные значения напряжения небаланса на выходе фильтра;

б) максимальное увеличение полезного сигнала при замыкании на землю определяется условием резонанса по основной гармонике;

в) стабилизация режимов магнитопровода в линейной части кривой намагничивания достигается за счет избирательного экранирования третьих гармонических дополнительным контуром (открытый треугольник с емкостью на выходе). Это дает результирующий эффект повышения показателя «сигнал-помеха» на выходе фильтра и стабилизацию угловых погрешностей;

г) наличие двух контуров в схеме фильтра позволяет совместить условия минимума небаланса и максимума выходного сигнала за счет разных схем соединения обмоток и независимости выбора параметров последних.

4. На основе теоретических и экспериментальных исследований выявлены оптимальные параметры фильтра с точки зрения достижения наибольших значений показателя «сигнал-помеха» и выполнен фильтр, отвечающий требованиям условий сельских распределительных сетей 6-10 кВ.

## **ГЛАВА V. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВА СИГНАЛИЗАЦИИ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ НА СЕЛЬСКИХ ПОДСТАНЦИЯХ**

### **5.1. Реализация селективной сигнализации замыканий на землю в сельских сетях 6-10 кВ на основе двухконтурного фильтра токов нулевой последовательности**

Предложенная схема ФТНП с улучшенными показателями позволяет выполнить чувствительную селективную сигнализацию замыканий на землю в сельских сетях 6-10 кВ с воздушными выводами отходящих линий из распределительных устройств 6-10 кВ.

#### **Варианты исполнения устройств сигнализации замыканий на землю**

Учитывая высокую разрешающую способность фильтра, а также увеличение числа отходящих от сельских подстанций линий 10 кВ до 5-7 с ограничением длины каждой (вместе с отпайками) до 25 км, селективная сигнализация замыканий на землю выполняется в виде устройства, реагирующего на направление мощности нулевой последовательности, в установившемся режиме замыкания на землю. Так как для существующих в настоящее время подстанций с воздушными выводами отходящих линий различных длин это наиболее распространенная сигнализация.

При разработке селективной сигнализации на землю для линий 6-10 кВ, учитывая условия её эксплуатации и обслуживания, необходимо стремиться к достижению предельной простоты исполнения устройства, наладки и регулировки, высокой надежности работы в условиях изменения температуры окружающего воздуха от  $-40^{\circ}$  до  $+40^{\circ}$  С.

#### **Направленная сигнализация**

С учетом опыта выполнения (земляной) защиты с кабельными трансформаторами тока, технические требования к разрабатываемым направленным устройствам сигнализации сводятся к следующим [93].

1. Минимальное напряжение срабатывания:  $3U_0 = 20-40 \text{ В}$ ;
2. Минимальный первичный ток срабатывания  $3I_0 = 0,5 \text{ А}$ ;
3. Угол максимальной чувствительности  $\varphi_p = 90^\circ \pm 30^\circ$ ;
4. Потребление по цепям напряжения, минимальное (2-3 ВА);
5. Сигнализация с задержкой по времени  $t_{\text{сигн}} > t_{\text{МТЗ}}$ ;
6. Исполнение в одном блоке на 5-7 контролируемых присоединений;
7. Отсутствие дополнительных источников питания.

Схема присоединения устройства направленной сигнализации и блок-схема отдельной ячейки сигнализации показаны на рисунке 5.1.

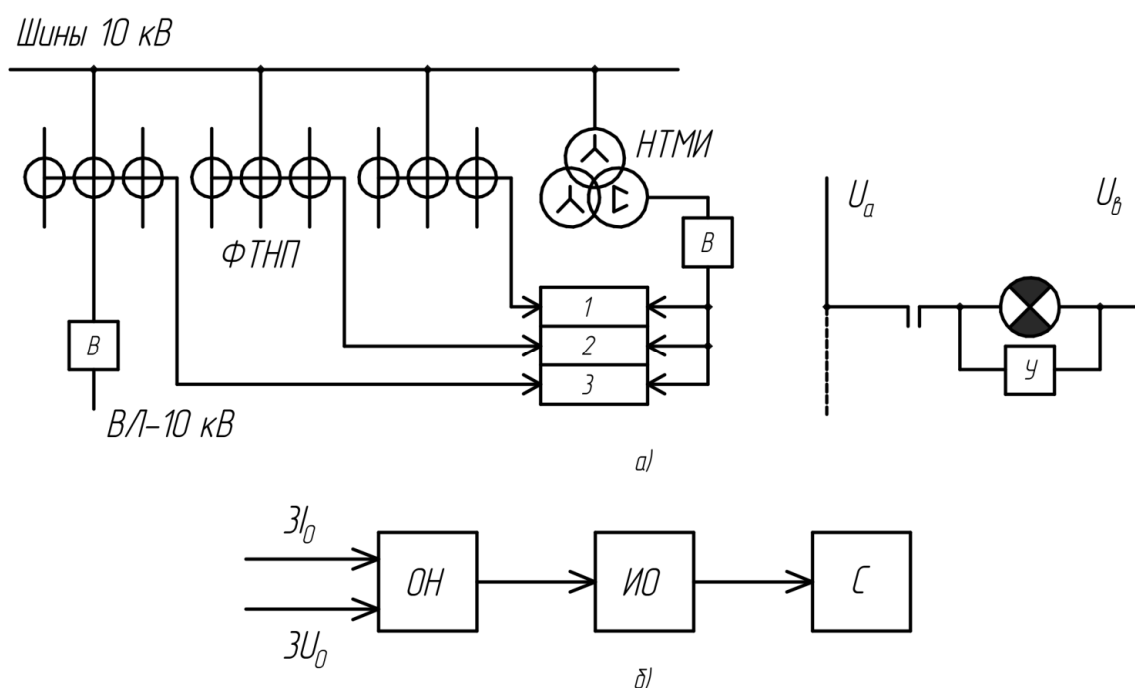


Рисунок 5.1 - Схема присоединения устройства сигнализации на три контролируемые линии (а) и блок-схема отдельной ячейки сигнализации (б).

Ниже представлена защита разработанная в МИИСП им. В.П.Горячкина [20]. Реагирующий орган ячейки сигнализации представляет собой фазочувствительный усилитель (рисунок 5.2 а,б). При совпадении напряжения  $3U_0$  и тока  $3I_0$  по фазе через транзистор в цепи исполнительного реле РП протекает ток и оно срабатывает. Так как реальный угол сдвига фаз между напряжением и током нулевой последовательности составляет  $90^\circ$ , причем на поврежденной линии ток отстает, а на неповрежденной опережает напряжение, на



вход  $3U_0$  реагирующего органа устройства включена фазосдвигающая цепь  $R_1, R_2, C_1, C_2$ . Использование такой фазоповоротной схемы наиболее целесообразно, так как в этом случае напряжение, подаваемое на схему сравнения, не снижается по сравнению с входным напряжением  $3U_0$ . Одновременно сопротивления выполняют роль токоограничивающих для цепи стабилизации  $D_1, D_2$  ( $D_1, D_3$  для рисунка 5.2 а).

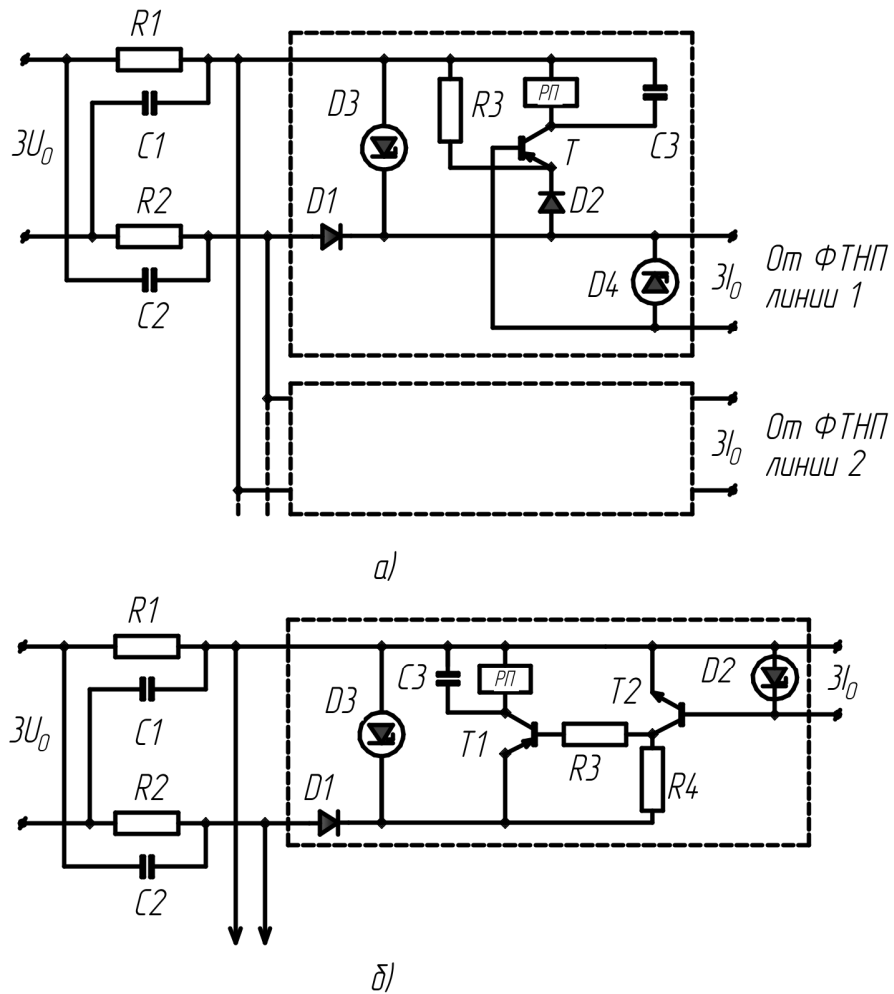


Рисунок 5.2 - Принципиальные схемы устройства сигнализации замыканий на землю: а – простейшая на одном транзисторе; б – повышенной чувствительности и термостабильности.

Диод  $D_3$  ( $D_4$ ) ограничивает управляющий сигнал в цепи база-эмиттер входного транзистора.

Для четкого срабатывания исполнительного реле РП, при однополупериодной работе, параллельно ему подключена емкость.

Элементы схемы (рисунок 5.2, а): сопротивления  $R_1 = R_2 = 780$  Ом типа ПЭВ-25,  $R_3 = 2$  кОм типа МЛТ, конденсаторы  $C_1 = C_2 = 4$  мкФ, 160 в типе КМБГ,  $C_3 = 30$  мкФ, 25 в типе ЭТО, диоды  $D_1, D_2$  типа Д-226, стабилитрон  $D_3$  типа Д816Б,  $D_4$  типа Д816А, транзистор типа МП42А, реле РП типа РЭС-10.

В схеме (рисунок 5.2, б) транзистор  $T_1$  типа МП105,  $T_2$  типа МП101, сопротивления  $R_3 = 2,0$  кОм,  $R_4 = 2,0$  кОм типа МЛТ.

Остальные элементы те же, что в схеме на рисунке 5.2 (а).

Задержка срабатывания устройства сигнализации осуществляется с помощью реле времени, которое запускается от напряжения  $3U_0$  измерительного трансформатора.

Устройства селективной сигнализации замыканий на базе разработанных ФТНП и реагирующих органов были выполнены в макетах и проверены методом имитационного моделирования в системе MatLab Simulink [94,95] и производственных условиях, полученные вольтамперные и угловые характеристики приведены на рисунке 5.3.

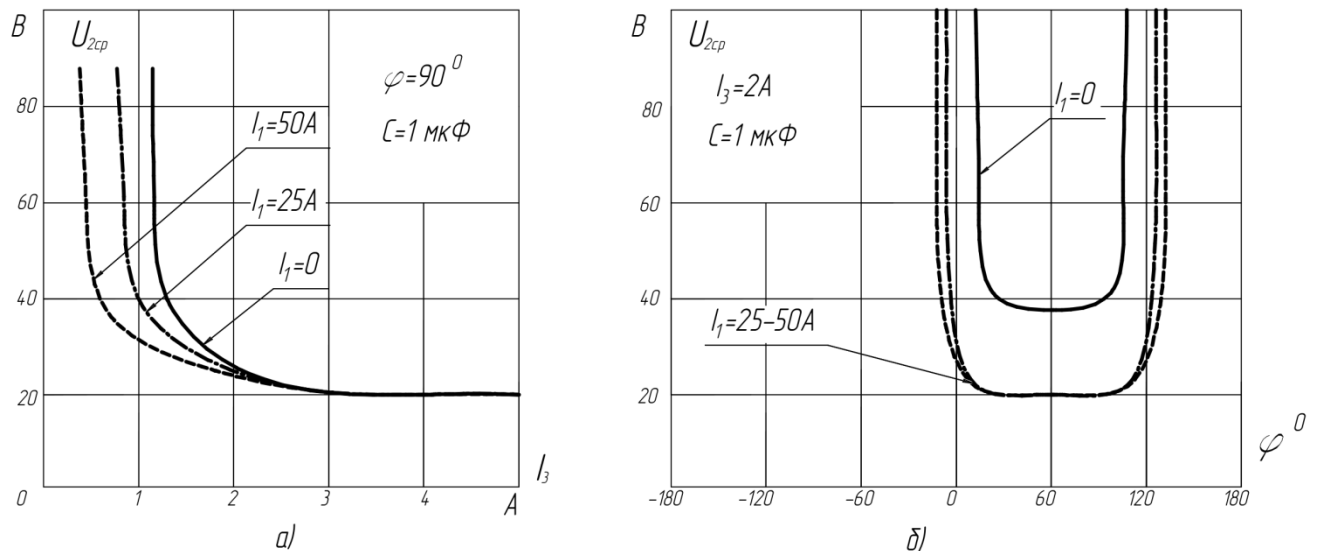
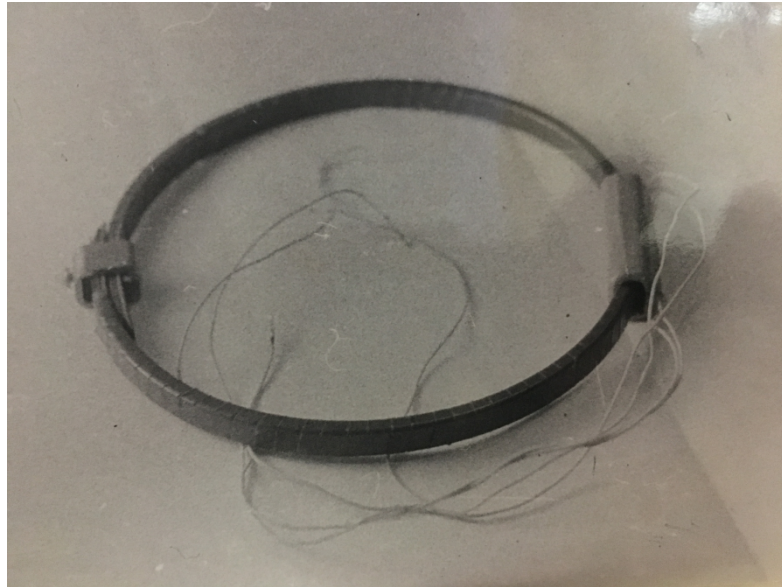


Рисунок 5.3 - Характеристики устройства сигнализации: а- вольтамперные, б – угловые.

Из анализа вольтамперных и угловых характеристик (рисунок 5.3) следует, что устройства обладают высокой чувствительностью по току  $I_{cp} = 0,5-1,2$  А и напряжению  $U_{cp} = 20-40$  В, углы максимальной чувствительности лежат в диапазоне  $30^\circ - 90^\circ$ .

Датчики тока, составляющие фильтр, устанавливаются в шкафах отходящих линий на проходных изоляторах (рисунок 5.4 а,б), а орган направления в шкафу трансформатора напряжения.



а).



б).

Рисунок 5.4 – а). Макет датчика тока. б). Установка ФТНП в ячейке отходящей линии 10 кВ на сельской подстанции 35/10 кВ

Производственные испытания устройств были проведены в электрических сетях ПАО «Россети» Можайского РЭС и показали надежную и правильную работу устройств, при замыканиях на линии 10 кВ. Протокол испытания и акт внедрения приведены в приложении Г.

## 5.2. Оценка показателей надежности электроснабжения потребителей и схемно-аппаратная надежность устройства

Как показали проведенные исследования, ФТНП на разработанных датчиках тока и подключенная к ним селективная сигнализация замыканий на землю, обеспечивает надежную и правильную работу устройств по определению поврежденной линии, при замыканиях в сети 10 кВ.

В результате время поиска поврежденного присоединения, согласно разделу 1.1, глава I, сокращается в среднем на 2 часа. Показатель времени перерыва электроснабжения потребителей за год, оценивающий уровень надежности системы электроснабжения (СЭС) рассчитанный по методике ОАО «РОСЭП» и традиционной методике, также уменьшается на два часа, что ведет к уменьшению ущерба от недоотпуска электроэнергии, являющегося единым показателем уровня надежности электроснабжения. Ниже приведена таблица 5.1, уменьшения ущерба от недоотпуска электроэнергии за счет снижения времени перерыва, где в качестве примера рассмотрена среднестатистическая линия 10 кВ из раздела 1.1 ( ВЛ 10 кВ мощностью 565 кВт, питается от двухтрансформаторной подстанции 35/10 кВ) и данные о времени перерыва из таблиц 1.4 и 1.5.

Таблица 5.1 - Уменьшения ущерба от недоотпуска электроэнергии.

Система электроснабжения	$P_{\Sigma}$ , кВт	$T_{\text{ПОТР}}$ , ч	$W_{\text{недоотп}}$ , кВт×ч	$Y_0$ , руб/кВт×ч	$Y$ , т.руб	Уменьшение ущерба, т.руб
ОАО «РОСЭП» ( два трансформатора 35/10 кВ) до установки ДТ	565	43	24295	1800	43731	2034
ОАО «РОСЭП» ( два трансформатора 35/10 кВ) после установки ДТ	565	41	23165	1800	41697	
Традиционная методика ( два трансформатора 35/10 кВ) до установки ДТ	565	56,4	31866	1800	57358,8	2034
Традиционная методика ( два трансформатора 35/10 кВ) после установки ДТ	565	54,4	30736	1800	55324,8	

Ущерб от недоотпуска электроэнергии определялся по формуле 1.1, среднее значение удельного ущерба принято из пункта 1.1 и равно  $Y_0 = 1800$  руб/кВт.ч. Оценка ущерба от недоотпуска электроэнергии возможна также с использованием программного комплекса MATLAB [96].

Согласно данным таблицы 5.1, можно сделать вывод: установка разработанных датчиков тока, составляющих фильтр токов нулевой последовательности и подключение к ним селективной сигнализации, позволяет уменьшить ущерб от недоотпуска электроэнергии на 2034000 рублей и тем самым, повысить надежность электроснабжения сельскохозяйственных потребителей за счет снижения времени перерыва электроснабжения.

### Оценка надежности устройства

Для оценки надежности разрабатываемых устройств релейной защиты определяется схемно-аппаратная надежность по данным интенсивности отказов отдельных элементов, входящих в устройство [97].

Схемно-аппаратная надежность характеризуется средним временем безотказной работы  $T_0$ , средним временем восстановления  $T_B$  и коэффициентом готовности  $K_r$ .

Согласно требованиям [98] эти параметры должны составлять:  $T_0 = 1000 - 2000$  часов,  $T_B = 0,2 - 2$  суток.

$$K_r = \frac{T_0 + T_B}{T_0} = 0,95 \div 0,997. \quad (5.98)$$

Среднее время безотказной работы определяется по выражению:

$$T_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n N_i \cdot \lambda_i}, \text{ час} \quad (5.99)$$

где:  $n$  – число однотипных элементов  $i$ -й группы;  $\lambda$  – интенсивность отказов  $i$ -го элемента.

Вспомогательные расчеты приближенной оценки параметров надежности, устройства селективной сигнализации замыканий на землю, сведены в таблицу

5.2. Интенсивность отказов элементов принята согласно рекомендациям их применения, приведенным в [99].

Среднее время безотказной работы устройства составляет:

$$T_0 = \frac{1}{5,31 \cdot 10^{-5}} = 18832 \text{ часа.}$$

Что составляет 2,1 года.

Таким образом, надежность разработанного устройства находится на уровне, соответствующем современным требованиям.

Таблица 5.2 - Приближенная оценка параметров надежности

Группа элементов	Кол-во элементов в группе (шт)	Интенсивность отказов $10^{-5}$ 1/час	Суммарная интенсивность отказов $10^{-5}$ 1/час
1. Датчики тока	3	0,2*	0,6
2. Транзисторы	2	0,5	1,0
3. Диоды	4	0,3	1,2
4. Сопротивления МЛТ	2	0,15	0,3
5. Сопротивления ПЭВ	2	0,2	0,4
6. Сопротивления СПО, ППЗ	1	0,2	0,2
7. Конденсаторы типа КМБЧ	2	0,16	0,32
8. Конденсаторы (электролитические)	1	0,39	0,39
9. Реле	1	0,9	0,9
ВСЕГО	18		$5,31 \times 10^{-5}$
*-для трансформатора [100]			

### 5.3. Сравнительная экономическая оценка вариантов выполнения сигнализации замыканий на землю линий 6-10 кВ

Сравнительная экономическая оценка четырех вариантов выполнения сигнализации замыканий на землю линий 6-10 кВ (таблица 5.3) показывает

достоинства рассматриваемого решения ввиду минимальной стоимости в сравнении с предложенными вариантами, простоты исполнения и монтажа в распределительных устройствах без реконструкции схемы первичной коммутации.

Были рассмотрены варианты фильтров токов нулевой последовательности с датчиками тока ТДЗЛВ, ТДЗЛК, ТЗЛМ и разработанными датчиками, в качестве сигнализации замыканий на землю рассматривалась защита ЗЗП-1 и предложенная МИИСП.

Таблица 5.3 - Экономическое сравнение вариантов выполнения селективной сигнализации замыканий на землю для линий 6-10 кВ.

Показатели	Варианты				
	Датчик тока ТДЗЛВ с защитой ЗЗП-1	Кабельная вставка с ТЗЛМ и защитой ЗЗП-1	Кабельная вставка с ТДЗЛК и защитой ЗЗП-1	Разработанные ДТ с защитой ЗЗП-1	Разработанные ДТ с защитой МИИСП
Примерная стоимость ФТНП с датчиками тока, (руб)	10000	8500	12000	6300	6300
Примерная стоимость защиты от замыканий на землю, (руб)	20000	20000	20000	20000	3262
Примерная стоимость выполнения селективной защиты линий 6-10 кВ, (руб)	30000	49800	53300	26300	9562
Примерная сметная стоимость выполнения селективной сигнализации для защиты линий 6-10 кВ, (руб)	120000	199200	213200	105200	38248

Проведенное технико-экономическое сравнение четырех вариантов выполнения селективной сигнализации замыканий на землю сельских линий с воздушными выводами подтвердили обоснованность предложенного варианта в

виду меньшей стоимости устройств, простоты исполнения и монтажа в КРУН, без реконструкции схемы первичной коммутации. Стоимость выполнения селективной сигнализации на линиях 6-10 кВ с использованием разработанных датчиков тока, вдвое меньше по сравнению с вариантом, требующим установку кабельной вставки с защитой ЗЗП-1.

Приняв во внимание полученное в таблице 5.1 уменьшение ущерба от поисковых отключений и результаты расчетной сметы по выполнению селективной сигнализации однофазных замыканий на землю для одной линии 6-10 кВ (таблица 5.4), приходим к выводу, что разработанное устройство при количестве отходящих линий 5-7 окупиться в течении полугода.

Таблица 5.4 - Смета на материалы, монтаж и наладку устройства селективной сигнализации однофазных замыканий на землю для линий 6-10 кВ.

Номер прейскуранта	Наименование	Ед. измер ения	Количе ство	Стоимость, руб	
				единицы	общая
Справочник	Корпус	шт.	1	700	700
Справочник	Датчик тока	шт.	3	2100	6300
Пр. 16-02	Реле РЭС-10	шт.	1	450	450
Пр. 16-03	Транзистор МП-105	шт.	1	50	50
Часть 1	Транзистор МП-101	шт.	1	10	10
Часть 1	Стабилитрон Д816Б	шт.	1	70	70
Часть 1	Стабилитрон Д815А	шт.	1	70	70
Часть 1	Диод Д-226	шт.	1	20	20
Пр. 16-01	Соппротивление ПЭВ-25	шт.	2	170	340
Часть 2	Соппротивление МЛТ-0,25	шт.	2	5	10
Часть 2	Соппротивление 16К1-А5К	шт.	1	70	70
Часть 2	Конденсатор МБГЧ-1 (1мкф,250В)	шт.	1	390	390
Часть 2	Конденсатор МБГЧ-1 (4мкф,250В)	шт.	2	450	900
Часть 2	Конденсатор К-50-3 (50мкф,50В)	шт.	1	12	12
Справочник	Текстолит	кг.	0,05	600	30
Справочник	Провод монтажный МГШВ-0,25	м.	3	30	90
Справочник	Крепеж	кг.	0,1	500	50
Итого:					9562
Стоимость монтажа 50%					4781
Стоимость наладки 50%					4781
Итого:					19124
Накладные расходы 100%					19124
Итого по смете:					38248



### **Выводы по главе**

1. Предложенная в данной работе схема ФТНП на трансформаторных датчиках тока с дополнительным контуром и подключенная к ним селективная сигнализация замыканий на землю, обеспечивает надежную и правильную работу устройств по определению поврежденной линии, при замыканиях в сети 10 кВ.

2. Оценка показателей надежности электроснабжения, с применением предложенного варианта, позволяет сделать вывод о том, что разработанные датчики тока, составляющие фильтр токов нулевой последовательности и подключенная к ним селективная сигнализация, способствуют снижению ущерба от недоотпуска электроэнергии (на 2034000 рублей) и повышают надежность электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, за счет уменьшения времени перерыва электроснабжения.

3. Проведенное технико-экономическое сравнение четырех вариантов выполнения селективной сигнализации замыканий на землю сельских линий с воздушными выводами подтвердили целесообразность предложенного решения в виду меньшей стоимости устройств, простоты исполнения и монтажа в КРУН, без реконструкции схемы первичной коммутации. Стоимость выполнения селективной сигнализации на существующих линиях 6-10 кВ с использованием разработанных устройств, вдвое меньше по сравнению с вариантом, требующим установку кабельной вставки с защитой ЗЗП-1.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Оценка надежности схем электроснабжения, которые применяются для питания сельскохозяйственных потребителей, позволила определить, что самый ненадежный элемент это воздушные линии 6-10 кВ, с максимальным временем перерыва электроснабжения  $T_{рл} = 20 - 27$  часов. Устройства селективной защиты и сигнализации замыканий на землю в воздушных линиях 10 кВ позволяют существенно снизить время перерыва электроснабжения потребителей и тем самым повысить надежность электроснабжения. Рассмотренные способы применения селективной сигнализации замыканий на землю на существующих подстанциях с воздушными выводами отходящих линий 6-10 кВ определили трудности реализации данной защиты, но требования надежности электроснабжения современного сельскохозяйственного производства и электробезопасности делают эти задачи наиболее актуальными.

2. Анализ разнообразных режимов работы датчиков тока в однофазных и трехфазных схемах позволяет проводить разработанная математическая модель и дает результаты, имеющие хорошее совпадение с экспериментом, расхождение не более 10%.

3. Разработанный макет датчика тока накладного типа для КРУН с воздушными выводами отходящих линий 6-10 кВ предназначенный для всего диапазона первичных токов сельскохозяйственных потребителей позволяет без реконструкции распределительного устройства и финансовых вложений реализовать защиту от замыканий на землю в воздушных линиях 6-10 кВ. Проведенные испытания различных режимов работы датчиков тока показали их преимущества. Для выполнения селективной сигнализации по определению поврежденной линии 6-10 кВ рекомендуются трансформаторные датчики тока с малым объемом стали, имеющие в сердечнике регулируемый воздушный зазор и несколько вторичных обмоток.

4. Предложенная в данной работе схема ФТНП на трансформаторных датчиках тока с дополнительным контуром имеющая показатель

чувствительности  $\lambda=150-200$  и подключенная к ним селективная сигнализация замыканий на землю, обеспечивает надежную и правильную работу устройств по определению поврежденной линии, при замыканиях в сети 10 кВ. В результате время перерыва электроснабжения потребителей сокращается.

5. Проведенные технико-экономические расчеты по реализации селективной сигнализации на существующих сельских подстанциях 35-110/6-10 кВ с применением разработанных устройств показали обоснованность рассматриваемого варианта, учитывая малую стоимость, простоту конструкции и установки в распределительных устройствах без изменения схемы первичной коммутации. Сметная стоимость разработанных устройств по сравнению с вариантом установки кабельной вставки с устройством ЗЗП-1, вдвое меньше и составляет 105200 рублей. Оценка показателей надежности электроснабжения, с применением предложенного варианта, позволяет сделать вывод о том, что разработанные датчики тока, составляющие фильтр токов нулевой последовательности и подключенная к ним селективная сигнализация, снижают ущерб от недоотпуска электроэнергии (на 2034000 рублей) и повышают надежность электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, за счет уменьшения времени перерыва электроснабжения.

Устройства являются перспективными для применения в схемах сельского электроснабжения и отвечают предъявленным техническим требованиям.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АВР – автоматическое включение резерва

АПВ – автоматическое повторное включение

ВЛ – воздушная линия

ДТ – датчик тока

ЗЗП – защита земляная полупроводниковая

ИПУ – изолятор проходной усиленный

КРУН – комплектное распределительное устройство наружной установки

ЛЭП – линия электропередач

НАМИ – трансформатор напряжения антирезонансный масляный с контролем изоляции

НТМИ - трансформатор напряжения трехфазный масляный с контролем изоляции

НТУ – нагрузочное токовое устройство

ОВБ – оперативная выездная бригада

ОЗЗ – однофазное замыкание на землю

ПХН – прямоугольная характеристика намагничивания

РТП – районная трансформаторная подстанция

РУ – распределительное устройство

СХН – спрямленная характеристика намагничивания

СЭС – система электроснабжения

ТДЗЛВ – трансформаторный датчик тока защитный с литой изоляцией для воздушных линий

ТДЗЛК – трансформаторный датчик тока защитный с литой изоляцией для кабельных линий

ТЗЛК– трансформатор тока защитный с литой изоляцией для кабельных линий

ТЗЛМ– трансформатор тока защитный с литой изоляцией модернизированный

ТТ – трансформатор тока

ТТНП – трансформатор тока нулевой последовательности

ФТНП – фильтр токов нулевой последовательности

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Лещинская, Т.Б. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник / Т.Б. Лещинская, И.В. Наумов - М.: Бибком-Транслог, 2015. -656 с.
2. Лещинская, Т.Б. Практикум по электроснабжению сельского хозяйства: учебник / Т.Б. Лещинская, И.В. Наумов - М.: Бибком-Транслог, 2015. -455 с.
3. Будзко, И.А. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов: учебник / И.А. Будзко, М.С. Левин – М.: Агропромиздат, 1985. – 320 с.
4. Будзко, И.А. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник / И.А. Будзко, Н.М. Зуль – М.:Агропромиздат, 1990. -496 с.
5. Виноградов, А.В. Повышение надежности электроснабжения сельских потребителей посредством секционирования и резервирования линий электропередачи 0,38 кВ: монография / А.В. Виноградов, А.В. Виноградова – Орел: Изд-во: Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина. 2016. – 281 с.
6. Волков, Н.Г. Надежность электроснабжения: учебное пособие / Н.Г. Волков, А.А. Сивков, А.С. Сайгаш – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2011. -160 с.
7. Шаметов, А.Н. Надежность электроснабжения: учебное пособие / А.Н. Шаметов – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова». 2006. -141 с.
8. Савина, Н.В. Надежность систем электроэнергетики: учебное пособие / Н.В. Савина – Благовещенск: Изд-во «Амурский государственный университет». 2011. – 268 с.
9. РМГ 29 – 2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.. – М.: Стандартинформ, 2014. – 56 с.
10. Приказ Министерства энергетики РФ от 29 ноября 2016 г. №1256 «Об утверждении методических указаний по расчету уровня надежности и

качества поставляемых товаров и оказываемых услуг для организаций по управлению единой национальной (общероссийской) электрической сетью и территориальных сетевых организаций». М.: 2016.

11. Правила устройств электроустановок. – 7-е изд., дополненное с исправлениями. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2010. – 222 с.
12. СТО 34.01-2.2-033-2017. Линейное коммутационное оборудование 6-35 кВ – секционированные пункты (реклоузеры). Стандарт организации / ПАО «РОССЕТИ». 2017. – 22 с.
13. Пеленев, Д.Н. Обоснование актуальности применения селективной защиты от однофазных замыканий на землю в электрических сетях 6-35 кВ / Д.Н. Пеленев, Б.Н. Абрамович // Материалы 13 Международной научной школы молодых ученых и специалистов: Сб. науч. Тр. – Москва, 2016. – 185-188 с.
14. Мартынов И.С. Анализ производственного электротравматизма в сельскохозяйственной отрасли. / И.С. Мартынов – Известия Нижневолжского Агроуниверситетского комплекса, 2015. - №2(38).
15. Hanninen, S. Single phase earth faults in high impedance grounded networks. Characteristics, indication and location [электронный ресурс] / Seppo Hanninen/ - 2001. – 143 p. Режим доступа: <http://www.inf.vtt.fi/pdg/>.
16. Roberts, J Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded and compensated distribution systems. [электронный ресурс] / Jeff Roberts, Dr. Hector, J. Altuve, Dr. Daqing Hou //- 2004. – P. 1-40. – Режим доступа: <http://www.selinc.com/techpprs/6123.pdf/>
17. Шуин, В.А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ: учебное пособие / В.А. Шуин, А.В. Гусенков. – М: НТФ «Энергопрогресс», 2001. – 104 с.
18. Рыжкова, Е.Н. Развитие теории переходных процессов при замыканиях на землю. Разработка методов и средств повышения надежности работы электрических сетей с изолированной и компенсированной нейтралью:

- дис. д-ра техн. наук 05.09.03 / Рыжкова Елена Николаевна – Павлодар, 2008. – 226 с.
19. Степанчук, Д.Н. Селективная сигнализация замыканий на землю / Д.Н. Степанчук, В.И. Ярмоленко, В.П. Кухта и др. // Электрические станции. – 1976. -№9. – С. 51-55.
20. Пронникова, М.И. Селективная сигнализация замыканий на землю в сельских распределительных сетях 6-10 кВ. / М.И. Пронникова, В.И. Сукманов // «Механизация и электрификация сельского хозяйства». -1972. - №5.
21. Шабад, М.А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ: учебное пособие / М.А. Шабад. – М.: Энергопрогресс: Энергетик, 2007. – 63 с.
22. Дьяченко, М.Д. Совершенствование метода дистанционного выявления поврежденного участка при однофазном замыкании на землю. / М.Д. Дьяченко, А.С. Миронов, В.В. Бурлака и др.// Энергетика. – 2009. - №11.
23. Мирошник, В.Ю. Методы и алгоритмы для определения места однофазного замыкания на землю в сетях 6-35 кВ с использованием параметров аварийного режима. / В.Ю. Мирошник, Д.В. Батулько, А.А. Ляшков. // Омский научный вестник. – 2015. - №1(15). – С. 62-66.
24. Беляков, И.Г. Исследование способа определения места замыкания на землю в сельских распределительных сетях: автореферат диссертации к.т.н / И.Г. Беляков, Москва. - 1967.
25. Сирота, И.М. Защита от однофазных замыканий в электрических системах: учебное пособие / И.М. Сирота – Киев. Изд. АН УССР. 1955. – 208 с.
26. Шалин, А.И. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. Направленные защиты. Особенности применения / А.И. Шалин // Новости электротехники. – 2005. -№6 (36). – С. 52-55.

27. Сапунков, М.Л. Об актуальности применения селективной защиты от однофазных замыканий в электрических сетях напряжением 6-35 кВ / М.Л. Сапунков // Нефтяное хозяйство. – 2013. - №4. – С. 68-71.
28. Защита электрических сетей. Seram 1000+ серии 40. Merlin Gerin. Руководство по установке и применению. – 2003. – 196 с.
29. Устройство микропроцессорной защиты «Сириус – 2-Л». Техническое описание, инструкция по эксплуатации, паспорт. – Москва. -2002. -54 с.
30. Комплектное устройство защиты и автоматики ТЭМП 2501. Руководство по эксплуатации. ГЛЦИ.656122.042 РЭ. – 2002. – 109 с.
31. Универсальные устройства защиты MICOM P120/121/122/123 (a3)/ Alstom. – 2001. – 201 с.
32. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ. Руководство по эксплуатации. ДИВГ.648228.001 РЭ. – 1999. -129 с.
33. Siemens siprotec 7SJ61 v.4.0/4.1. Максимальная токовая защита, защита от перегрузки и защита двигателей с функциями управления ячейкой. Руководство по эксплуатации. C53000-G1140-C118-1. – 2002. – 476 с.
34. Кискачи, В.М. Защита от однофазных замыканий на землю ЗЗП-1. (Описание, наладка и эксплуатация). / В.М. Кискачи. – М.: Энергия, 1972. – 73 с.
35. Реле защиты от однофазных замыканий на землю микропроцессорное (ЗЗМ-У2) типа «ЗЕРО». Техническое описание и инструкция по эксплуатации ЗЗМ.100.000.000 ТО. Компания «Объединенная энергия». – Москва. – 2003. – 17 с.
36. Устройство микропроцессорной защиты «Сириус – МЛ». Техническое описание, инструкция по эксплуатации, паспорт. – Москва. -2002. -58 с.
37. Защита электрических сетей. Seram серии 80. Merlin Gerin. Измерения, защита, управление и контроль. Руководство по установке и применению. – 2004. – 178 с.
38. Серия направленных / ненаправленных токовых реле MiCOM P125, P126, P127. Техническое руководство. – 2001. – 46 с.



39. Устройства сигнализации при однофазных замыканиях на землю типов УСЗ-3, УСЗ-3М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – «Электромарк», 2010. -3 с.
40. Калачев, Ю.Н. Новая серия устройств SPAC 810 для присоединений 6-35 кВ / Ю.Н. Калачев // Энергетик. -2004. - №9. С.36-37.
41. Донченко, А.М. Микропроцессорные устройства релейной автоматики: учебное пособие / А.М. Донченко, Т.В. Копейкина. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2015. – 68 с.
42. Попов, И.Н. Импульсная направленная защита электрических сетей от замыканий на землю типа ИЗС / И.Н. Попов, Г.В. Соколова, В.И. Махнев // Электрические станции. – 1978. - №4. – С.69-73.
43. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебное пособие / В.А. Андреев – М.: Высшая школа, 1991. – 496 с.
44. Борухман, В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ и мероприятия по их совершенствованию / В.А. Борухман // Энергетик. – 2000. - №1. – С. 20-22.
45. Дударев, Л.Е. Проблемы защиты от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ / Л.Е. Дударев, В.В. Зубков // Электричество. – 1979. -№2. – С. 8-12.
46. Бухтояров, В.Ф. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров: учебное пособие / В.Ф. Бухтояров, А.М. Маврицын – М.: Недра, 1986. – 184 с.
47. Вайнштейн, Р.А. Режимы заземления нейтрали в электрических системах: учебное пособие / Р.А. Вайнштейн, Н.В. Коломиец, В.В. Шестакова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 118 с.
48. Шабад, М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей: монография / М.А. Шабад. – 4-е изд. Перераб. и доп. – СПб: ПЭИПК, 2003. – 350 с.
49. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Норматика, 2022. – 188 с.

50. Лихачев, Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов: учебное пособие / Ф.А. Лихачев – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
51. Цедяков, А.А. Анализ датчиков тока для релейных защит и режимов замыканий на землю сельских распределительных сетей 6-10 кВ. / А.А. Цедяков.// Доклады ТСХА. – 2021. – С.39-42.
52. Воскресенский, А.А. Питание релейной защиты от трансформатора тока с шунтом. / А.А. Воскресенский, В.Е. Казанский. // «Электричество». - 1966. - №2.
53. Кутявин, И.Д. Трансформаторы тока с воздушным зазором. / И.Д. Кутявин. // Известия Томского политехнического института, вып. 2, том 70, 1951.
54. Мацкевич, Л.Н. Двухсердечниковый трансформатор тока для бесконтактной защиты на транзисторах. / Л.Н. Мацкевич. // «Электротехника». - 1965. - №4.
55. Катушки Роговского – реальная альтернатива традиционным трансформатором тока. [Электронный ресурс].URL: <http://digitalsubstation.com> (дата обращения 20.11.2020).
56. Катаргин, Ю.Н. Трансформаторы тока для защиты генератора. / Ю.Н. Катаргин. // Известия вузов СССР. «Энергетика». - 1968. - №8.
57. N006E – 0U Residual current sensor for Retrofit, with correction factors acc. IEC. [Электронный ресурс].URL: <http://greenwood-power.com> (дата обращения 12.12.2020).
58. Багинский, Л.В. О применении трансформаторов тока с малым объемом стали сердечника в схемах дифференциальных защит генераторов. / Л.В. Багинский. // «Электрические станции». -1959. - №3.
59. Нечаев, Б.А. Трансформаторы тока с малым объемом стали сердечников в схемах дифференциальных защит генераторов. / Б.А. Нечаев. // «Электрические станции». - 1956. - №1.

60. ТДЗЛВ-10 датчик тока трансформаторный защитный с литой изоляцией для воздушных линий. Руководство по эксплуатации. -2020. -5 с.
61. ТОНД трансформатор тока облегченный накладной для дифференциальной защиты трансформатора. Инструкция по эксплуатации. – М.: Внешторгиздат. – 1969. -7 с.
62. Булитко, А.Д. Накладные трансформаторы тока. / А.Д. Булитко. // «Электрические станции». - 1957. - №8.
63. Казанский, В.Е. Трансформаторы тока в устройствах релейной защиты и автоматики: учебник для вузов. / В.Е. Казанский. – М.: «Энергия», 1978. – 264 с.
64. Федосеев, А.М. Релейная защита электрических систем: учебник для вузов. / А.М. Федосеев. – М.: «Энергия», 1976. – 560 с.
65. Дроздов, А.Д. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите: учебник для вузов. / А.Д. Дроздов. – М.: «Энергия», 1965. – 240 с.
66. РД 153-34.0-35.301-2002. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерений. / ОАО «Институт Энергосетьпроект». –М.: 2003.
67. Петелин, С.В Модель однофазного трансформатора тока с насыщением. / С.В. Петелин. [Электронный ресурс].URL: <http://digitalsubstation.com> (дата обращения 21.11.2020).
68. Mathematical Models for Current, Voltage, and Coupling Capacitor Voltage Transformers. Working Group C-5 of the Systems Protection Subcommittee of the IEEE Power System Relaying Committee, Demetrios A. Tziouvaras, Chairman, Peter McLaren, Vice Chairman, George Alexander, Douglas Dawson, Jules Esztergalyos, Charles Fromen, Mietek Glinkowski, Irwin Hasenwinkle, Mladen Kezunovic, Ljubomir Kojovic, Bill Kotheimer, Richard Kuffel, Jerry Nordstrom, and Stanley Zocholl. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL.15, NO.1, JANUARY 2000.

69. Матюк В.Ф. Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса / В.Ф. Матюк, А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2011. - №2. – С.3-20.
70. Кадочников А.И. Аппроксимация основной кривой намагничивания параболической сплайн – функцией / А.И. Кадочников, Е.Б. Хан // Электромеханика. – 1991. - №3. – С. 70-73.
71. Кузьменко Н.И. К вопросу об аппроксимации основной характеристики намагничивания / Н.И. Кузьменко, Е.И. Гольдштейн // Электромеханика. – 1977. - №7. – С. 760-764.
72. Бессонов Л.А. Электрические цепи со сталью: Учебник для вузов. / Л.А. Бессонов – М.; Госэнергоиздат. 1948. – 344с.
73. Методы моделирования основной кривой намагничивания. [Электронный ресурс]. URL: <http://simenergy.ru> (дата обращения 30.09.2021).
74. Коломиец Л.В. Метод наименьших квадратов: методические указания / Л.В. Коломиец, Н.Ю. Поникарова – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 32 с.
75. Патент СССР № 288101. Устройство для защиты от однофазных замыканий на землю. / Р.Ф. Стасенко, Н.М. Фельдман. // заявитель и патентообладатель Украинское отделение Всесоюзного научно-исследовательского проектного института. Заявка № 1376809 опубликовано 01.01.1970, Бюллетень изобретений №36.
76. ТДЗЛК трансформаторный датчик тока защитный с литой изоляцией для кабельных линий. Руководство по эксплуатации. -2020. -2 с.
77. ТЗЛК трансформатор тока защитный с литой изоляцией для кабельных линий. Техническая информация. / ООО «НТЗ Волхов» -2022. - 15 с.
78. ТЗЛМ трансформатор тока защитный с литой изоляцией для кабельных линий, модернизированный. Техническая информация. / ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока» -2018. - 15 с.

79. Батулько, Д.В. Исследование датчиков тока ТДЗЛВ-10 и трансформаторов тока ТЗЛМ на помехоустойчивость при воздействии внешнего магнитного поля. / Д.В. Батулько. // «Энергетик». – 2006. - №6.
80. Патент СССР № 254645. Измерительный трансформатор переменного тока. / Ю.М. Силаев.// заявитель и патентообладатель Центральная лаборатория и экспериментальные мастерские Мосэнерго. Заявка № 1301666/18-10 опубликовано 17.10.1969, Бюллетень изобретений №32.
81. Кифер, И.И. Характеристики ферромагнитных сердечников. / И.И. Кифер. –М.: «Энергия», 1967. – 167 с.
82. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. / Л.А. Бессонов – М.; «Высшая школа». 1996. – 638с.
83. Цедяков, А.А. Аппроксимация кривой намагничивания сердечника датчика тока для релейных защит распределительных сетей 6-10 кВ. / А.А. Цедяков, Белов С.И, Стушкина Н.А. // Международный технико-экономический журнал. – 2021. - №5. С. 41-47.
84. Горелов, Ю.Н. Численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений (метод Рунге-Кутты): учебное пособие / Ю.Н. Горелов; Федеральное агентство по образованию. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 2006. – 48 с.
85. ИПУ изолятор проходной усиленного исполнения. Техническая информация. / ОАО «Разряд». – 2020. – 6 с.
86. Вольтметр С-95. Описание и технические характеристики. / Метроприбор. – 2020. – 3 с.
87. Вольтметр Ф-517. Описание и технические характеристики. / Эталонприбор. – 2019. – 4 с.
88. Осциллограф С1-16. Описание и технические характеристики. / ООО «Западприбор». - 2019. – 26 с.
89. Сирота, И.М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности / И.М. Сирота – Киев; «Наукова думка». 1983. – 268 с.

90. Евдокунин, Г.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6-10 кВ. / Г.А. Евдокунин, С.В. Гудилин, А.А. Корепанов // Электричество. – 1998. - №12. – С.8-23.
91. Булыбенко, В.Ю. Вариконды в электронных импульсных схемах / В.Ю. Булыбенко, Т.Н. Вербицкая, В.Ф. Анципарович и др. – М.: Сов.радио, 1971. -271 с.
92. Глушенко, М.Д. Проектирование трансформаторов для питания устройств автоматики, телемеханики и микропроцессорных систем: методические указания. / М.Д. Глушенко, Е.В. Васильев, А.А. Реморов, П.П. Смазнов. – М.: МИИТ, 2004. -86 с.
93. Иванов, С.В. Опыт внедрения селективной защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-35 кВ. / С.В. Иванов, А.А. Белянин, В.Ф. Лачугин, А.В. Буров, В.В. Жуков // Воздушные линии. – 2014. –№2(15). – С. 73-79.
94. Tsedyakov, A.A Analysis of a computer model of a power supply system for agricultural consumers in a single-phase ground fault mode / A.A. Tsedyakov, S. I. Belov, M.M. Galkin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Scientific and Practical Conference "Ensuring Sustainable Development in the Context of Agriculture, Green Energy, Ecology and Earth Science" - Green Energy and Earth Science" 2021. С. 052019.
95. Tsedyakov, A.A Simulation modeling of a three-phase voltage transformer in the MATLAB program / A.A. Tsedyakov, S. I. Belov, M.M. Galkin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. " II International Scientific and Practical Conference "Ensuring Sustainable Development in the Context of Agriculture, Green Energy, Ecology and Earth Science" - Green Energy and Earth Science" 2022. С. 012072.
96. Tsedyakov, A.A Comprehensive assessment of the technical condition of the 10 kV rural electrical network using a MATLAB software at various load factors of the 10/0,4 kV transformer substation / A.A. Tsedyakov, S. I.

- Belov, M.M. Galkin // Proc. SPIE 12296. International Conference on Remote Sensing of the Earth: Geoinformatics, Cartography, Ecology and Agriculture (RSE 2022), 122960K (6 July 2022).
97. СТО 34.01-4.1-008-2018. Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики. Методические указания по расчету надежности / ПАО «РОССЕТИ». 2018. – 41 с.
98. СТО 34.01-4.1-001-2016. Устройства определения места повреждения воздушных линий электропередачи. Общие технические требования / ПАО «РОССЕТИ». 2016. – 26 с.
99. Прытков, С.Ф. Надежность электроизделий: справочник. / С.Ф. Прытков, В.М. Горбачева, М.Н. Мартынова, Г.А. Петров // Издательство МО РФ, 2004. – 641 с.
100. Дубинский, Н.М. Надежность систем газоснабжения. / Н.М. Дубинский. – Киев: Техника, 1970. – 215 с.
101. Батулько, Д.В. Испытания датчиков тока ТДЗЛВ-10 и трансформаторов ТЗЛМ на помехоустойчивость при воздействии магнитного поля от расположенных рядом проводников с током. / Д.В. Батулько // Омский научный вестник, - №1(34), 01-02. 2006.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Аппроксимация кривой намагничивания датчика тока различными методами

Данные приведены в табличной и графической форме (таблица А.1 и рисунок А.1).

Таблица А.1 - Кривая намагничивания электротехнической стали Э-310

Н, А/см	0	0,1	0,14	0,2	0,25	0,28	0,3	0,35
В, Тл	0	0,05	0,07	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Н, А/см	0,4	0,45	0,52	0,6	0,68	0,7	0,85	1,04
В, Тл	0,35	0,4	0,45	0,5	0,54	0,55	0,6	0,65
Н, А/см	1,2	1,25	1,58	1,8	1,98	2,4	2,55	3,0
В, Тл	0,69	0,7	0,75	0,78	0,8	0,84	0,85	0,88

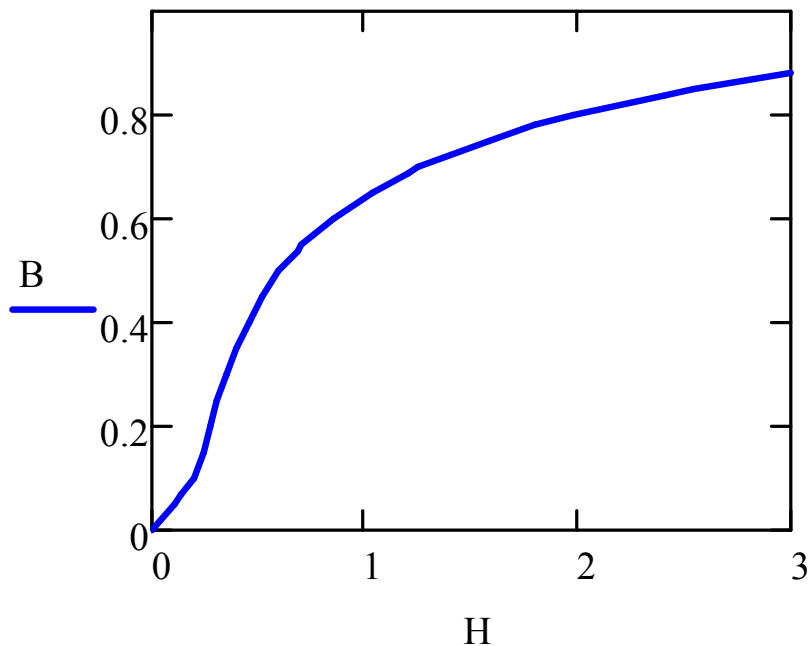


Рисунок А.1- Основная кривая намагничивания сердечника датчика тока

Первый способ, кусочно-линейная аппроксимация [72]. Это самый простой и распространенный способ аналитического представления кривой намагничивания, которая изображается несколькими линейными участками (два или более), все зависит от требуемой точности аппроксимации. В данном случае, кривая намагничивания сердечника датчика тока аппроксимируется двумя отрезками, рисунок А.2.



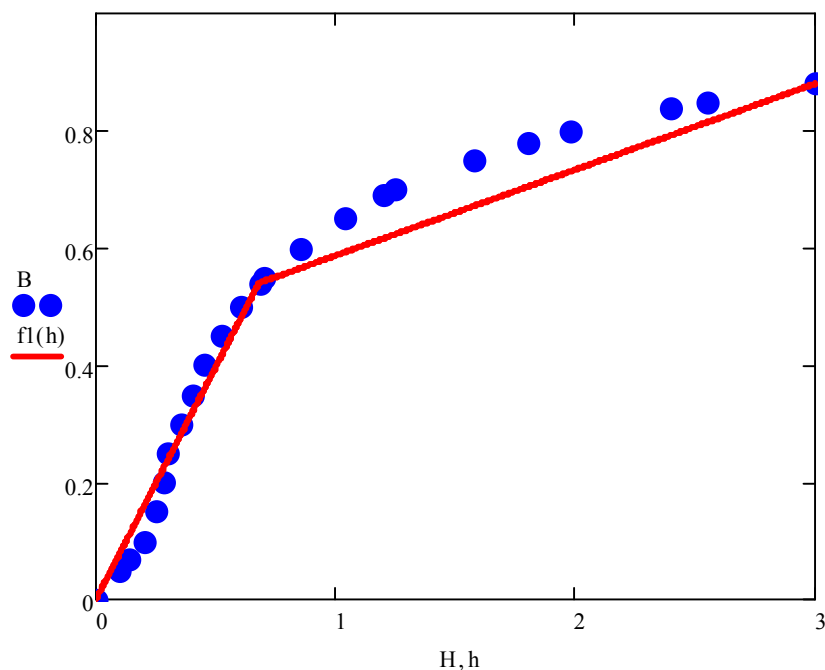


Рисунок А.2 - Кусочно-линейная аппроксимация кривой намагничивания

В результате, нелинейная характеристика приводится к линейному виду с достаточно простыми аналитическими зависимостями:

$$f1(H) = k_1 H + k_0. \quad (\text{A.1})$$

Коэффициенты  $k_1$  и  $k_0$  находятся по методу наименьших квадратов и для первой прямой составляют ( $k_0 = 0$ ;  $k_1 = 0,794$ ), для второй прямой ( $k_0 = 0,44$ ;  $k_1 = 0,147$ ).

При аппроксимации характеристик нелинейных элементов ломаной кривой, особенно при работе их в цепях переменного тока, большое количество аппроксимирующих участков приводит к усложнению решения и трудностям, связанным с определением постоянных интегрирования при согласовании решений в точках излома. Погрешность отклонения при кусочно-линейной аппроксимации двумя отрезками составила 1,961%, тремя 1,356%, пятью 0,72%.

Второй способ, аппроксимация степенным полиномом 3 и 7 степени [63,65,66,67]. Степенные функции позволяют производить расчеты магнитных цепей с переменными магнитными полями, чем больше количество определенных коэффициентов, тем больше точность аппроксимации кривой намагничивания.

Кривая намагничивания сердечника датчика тока может описываться с помощью степенного полинома вида:

$$f_2(H) = k_6 H^7 + k_5 H^6 + k_4 H^5 + k_3 H^4 + k_2 H^3 + k_1 H^2 + k_0 H ; \quad (\text{A.2})$$

или с дополнительным коэффициентом:

$$f_2(H) = k_7 H^7 + k_6 H^6 + k_5 H^5 + k_4 H^4 + k_3 H^3 + k_2 H^2 + k_1 H + k_0 . \quad (\text{A.3})$$

Кривая намагничивания сердечника имеет вид, рисунок А.3.

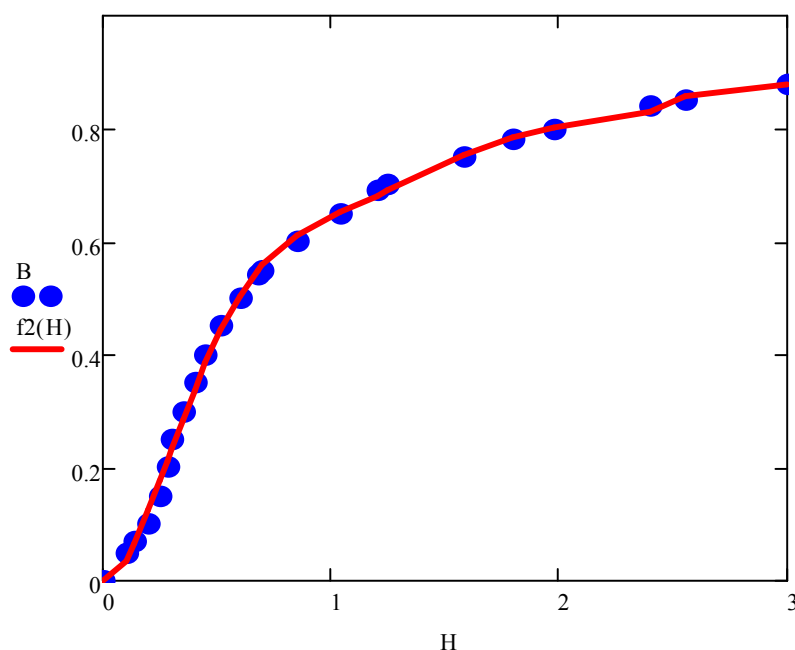


Рисунок А.3 - Аппроксимация степенным полиномом 7 степени

Коэффициенты  $k$  определялись по методу наименьших квадратов и составляют :( $k_0 = - 0,077$ ;  $k_1 = 5,236$ ,  $k_2 = - 10,437$ ,  $k_3 = 9,345$ ,  $k_4 = - 4,344$ ,  $k_5 = 1,018$ ,  $k_6 = - 0,095$ ) или с дополнительным коэффициентом: ( $k_0 = 0,000428$ ;  $k_1 = - 0,082$ ,  $k_2 = 5,252$ ,  $k_3 = - 10,463$ ,  $k_4 = 9,368$ ,  $k_5 = - 4,355$ ,  $k_6 = 1,02$ ,  $k_7 = - 0,095$  ).

Существенный недостаток данного метода большое количество коэффициентов и высокий порядок аппроксимирующего полинома. Достоинства: кривая задается непрерывной функцией без изломов и разрывов, погрешность отклонения при обоих вариантах аппроксимации полиномом 7 степени составила 0,501%, полиномом 3 степени 1,485%, с дополнительным коэффициентом 1,221%.

Для примера были рассмотрены нечетный и четный степенные полиномы.

Третий способ, аппроксимация нечетным степенным полиномом 3 и 13 степени. Кривая намагничивания сердечника описывается полиномом вида:

$$f_3(H) = k_6 H^{13} + k_5 H^{11} + k_4 H^9 + k_3 H^7 + k_2 H^5 + k_1 H^3 + k_0 H ; \quad (\text{A.4})$$

или с дополнительным коэффициентом:

$$f_3(H) = k_7 H^{13} + k_6 H^{11} + k_5 H^9 + k_4 H^7 + k_3 H^5 + k_2 H^3 + k_1 H + k_0 . \quad (\text{A.5})$$

Кривая намагничивания сердечника имеет вид, рисунок Б.4.

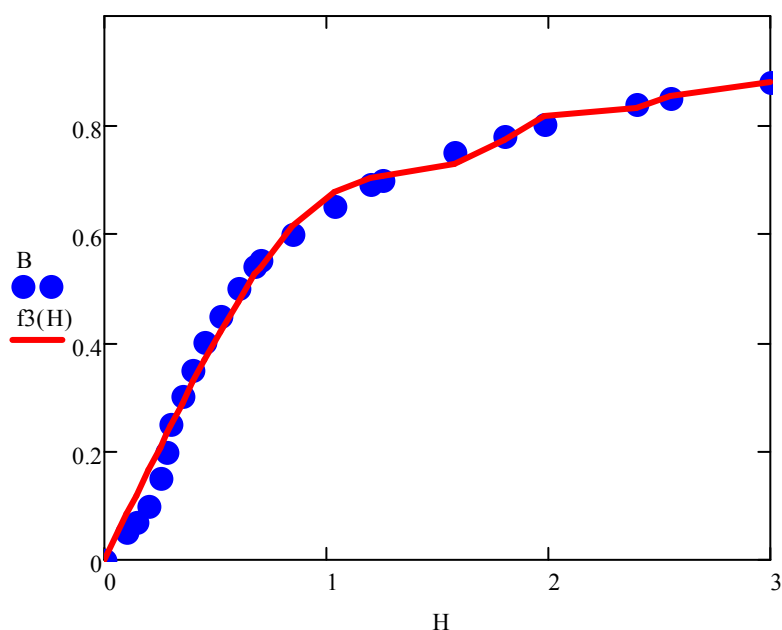


Рисунок А.4 - Аппроксимация нечетным степенным полиномом

Коэффициенты  $k$  определялись по методу наименьших квадратов и составляют :( $k_0= 0,834$ ;  $k_1 = -0,07$ ,  $k_2= - 0,185$ ,  $k_3=0,11$ ,  $k_4= - 0,025$ ,  $k_5=0,00264$ ,  $k_6= - 0,00012$ ) или с дополнительным коэффициентом: ( $k_0= -0,056$ ;  $k_1 = 1,041$ ,  $k_2= - 0,426$ ,  $k_3=0,104$ ,  $k_4= -0,00268$ ,  $k_5= - 0,003272$ ,  $k_6= 0,000524$ ,  $k_7= - 0,000024$  ).

Погрешность отклонения для первого варианта полинома 13 степени составила 1,165%, для варианта с дополнительным коэффициентом 0,924%. Для полинома 3 степени 3,605%, с дополнительным коэффициентом 3,089%.

Четвертый способ, аппроксимация четным степенным полиномом 4 и 14 степени. Кривая намагничивания сердечника описывается полиномом вида:

$$f_4(H) = k_6 H^{14} + k_5 H^{12} + k_4 H^{10} + k_3 H^8 + k_2 H^6 + k_1 H^4 + k_0 H^2; \quad (\text{A.6})$$

или с дополнительным коэффициентом:

$$f_4(H) = k_7 H^{14} + k_6 H^{12} + k_5 H^{10} + k_4 H^8 + k_3 H^6 + k_2 H^4 + k_1 H^2 + k_0. \quad (\text{A.7})$$

Аппроксимация кривой намагничивания четным полиномом производилась в ознакомительных целях, так как кривая намагничивания сердечника датчика тока является нечетной функцией, то аппроксимирующий ряд должен содержать только члены с нечетными степенями.

Кривая намагничивания сердечника имеет вид, рисунок А.5.

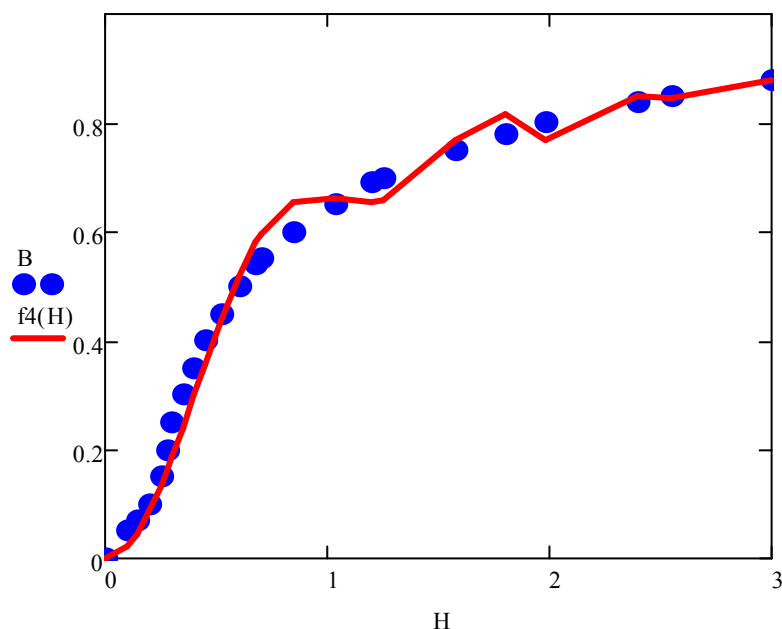


Рисунок А.5 - Аппроксимация четным степенным полиномом

Коэффициенты  $k$  определялись по методу наименьших квадратов и составляют:  $(k_0 = 2,308; k_1 = -3,039, k_2 = 1,929, k_3 = -0,637, k_4 = 0,112, k_5 = -0,00989, k_6 = 0,00034)$  или с дополнительным коэффициентом:  $(k_0 = 0,048; k_1 = 1,991, k_2 = -2,502, k_3 = 1,548, k_4 = -0,503, k_5 = 0,087, k_6 = -0,00767, k_7 = 0,000265)$ .

Погрешность отклонения для первого варианта полинома 14 степени составила 1,48%, для варианта с дополнительным коэффициентом 1,156%. Для полинома 4 степени 10,061%, с дополнительным коэффициентом 5,853%.

Пятый способ, аппроксимация кривой намагничивания гиперболическим синусом [73]. Функция гиперболического синуса при разложении в ряд преобразуется в степенные полиномы. Результаты аппроксимации близки с расчетными данными по способам степенных полиномов и имеют достаточно точное совпадение с реальной кривой намагничивания сердечника датчика тока.

Кривая намагничивания сердечника аппроксимируется гиперболической функцией синуса и содержит два коэффициента аппроксимации:

$$f_5(B1) = k_1 \times \sinh(k_2 \times B1). \quad (\text{A.8})$$

Кривая намагничивания сердечника имеет вид, рисунок А.6.

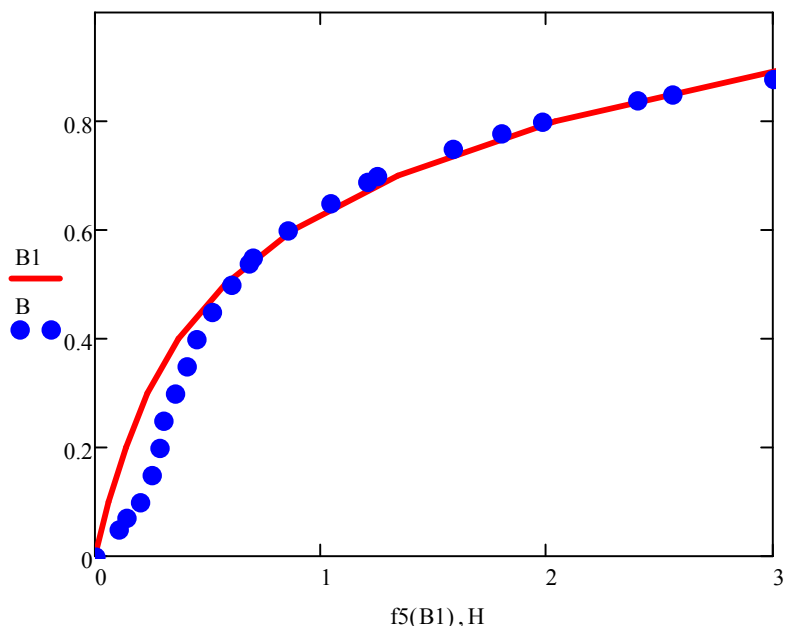


Рисунок А.6 - Аппроксимация функцией гиперболического синуса

Коэффициенты  $k$  определялись по методу наименьших квадратов и составляют :( $k_1 = 0,145$ ,  $k_2 = 4,173$ ).

Погрешность отклонения составила 1,9%.

Шестой способ, аппроксимация кривой намагничивания гиперболическим тангенсом [73]. Функция гиперболического тангенса, так же как и синуса, при разложении в ряд преобразуется в степенные полиномы.

Кривая намагничивания сердечника аппроксимируется гиперболической функцией тангенса и содержит три коэффициента аппроксимации:

$$f_6(H_1) = k_1 \times \tanh(k_2 \times H_1) + k_3 \times H_1. \quad (\text{A.9})$$

Кривая намагничивания сердечника имеет вид, рисунок А.7.

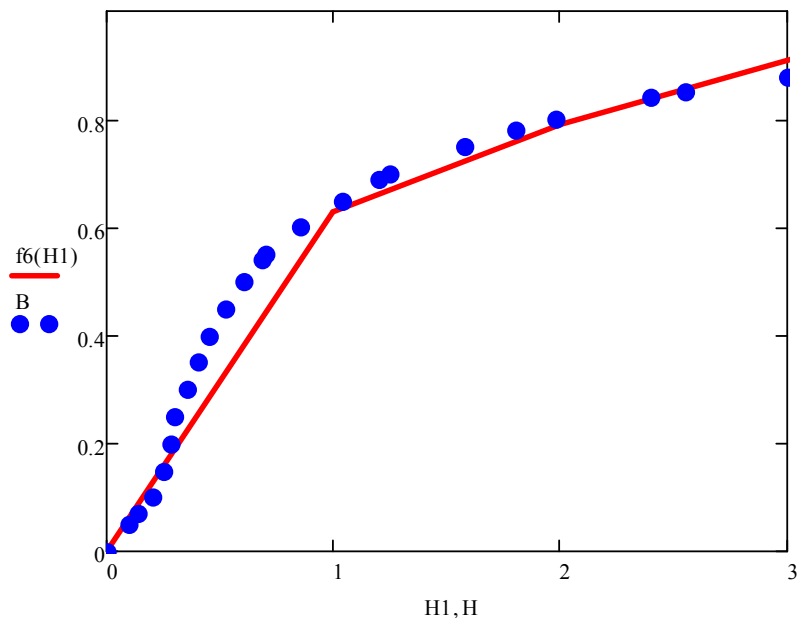


Рисунок А.7 - Аппроксимация функцией гиперболического тангенса

Коэффициенты  $k$  определялись по методу наименьших квадратов и составляют : (  $k_1 = 0,562$ ,  $k_2 = 1,542$ ,  $k_3 = 0,116$  ).

Погрешность отклонения составила 1,542%.

Седьмой способ, аппроксимация кривой намагничивания арктангенсом[73]. Арктангенсные функции аппроксимации получили широкое применение благодаря простоте вычисления самой функции и точности отображения кривой намагничивания.

Кривая намагничивания сердечника датчика тока аппроксимируется функцией арктангенса с линейным членом и содержит три коэффициента:

$$f_7(H_1) = k_1 \times a \tan(k_2 \times H_1) + k_3 \times H_1. \quad (\text{A.10})$$

Кривая намагничивания сердечника имеет вид, рисунок А.8.

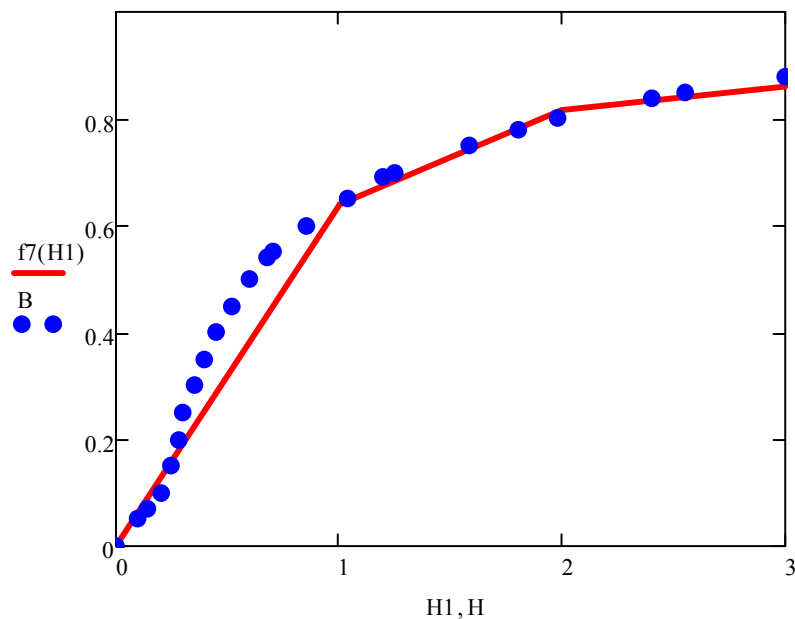


Рисунок А.8 - Аппроксимация функцией арктангенса

Коэффициенты  $k$  определялись по методу наименьших квадратов и составляют : (  $k_1 = 0,766$ ,  $k_2 = 1,248$ ,  $k_3 = - 0,047$  ).

Погрешность отклонения составила 1,382%.

Восьмой способ, аппроксимация кривой намагничивания сплайн – функциями [69,70]. Данный способ является очень эффективным, так как аппроксимирующая сплайн-функция представляет собой совокупность кривых. Каждая кривая описывается своей функцией, содержащей несколько коэффициентов, которые определяются так, чтобы в точках изгиба непрерывна была не только функция, но и ее производные. В результате аппроксимирующий сплайн очень точно описывает реальную кривую намагничивания сердечника датчика тока.

Для построения аппроксимирующей сплайн – функции применяется математический пакет MathCAD, который содержит встроенный сплайн аппарат для подбора функций, подразделяющийся на три группы:

- кубический сплайн (функция cspline);
- параболический сплайн (функция pspline);
- линейный сплайн (функция lspline).

Применим для построения аппроксимирующей кривой три группы сплайн функций, рисунок А.9.

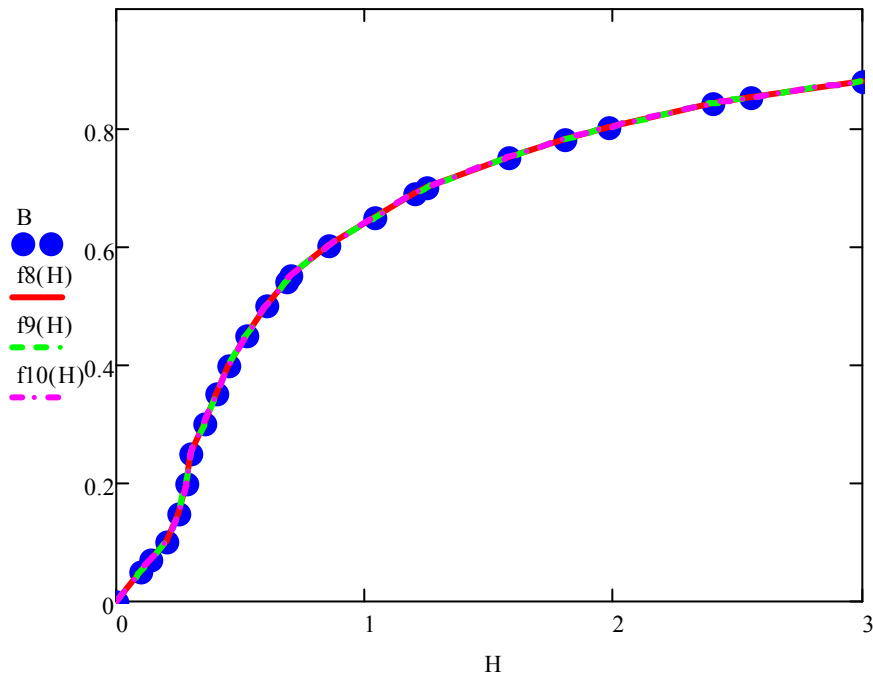


Рисунок А.9 - Аппроксимация сплайн - функциями

Как видно из рисунка А.9, при помощи сплайн – функций можно очень точно построить кривую намагничивания сердечника датчика тока. Погрешность отклонения составляет 0%, для всех сплайн – функций. Но данный способ не может использоваться для аппроксимации кривой намагничивания датчика тока, так как нет общего выражения, описывающего всю кривую. Для каждого участка применяется своя сплайн – функция со своими коэффициентами, требующая специальных программных средств.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Защита от перенапряжений во вторичной цепи и датчики тока в трехфазных схемах

### Защита от перенапряжений во вторичной цепи

В целом ряде случаев выдвигаются требования достижения предельной чувствительности ДТ к малым значениям первичных токов. В этом случае желательно использовать характеристику датчика, близкую к характеристике холостого хода, что осуществляется практически либо уменьшением числа витков вторичной обмотки, либо увеличением входного сопротивления устройства. Такой режим работы датчика тока при больших первичных токах будет сопровождаться насыщением сердечника и значительными перенапряжениями на вторичной обмотке. Ограничение сигнала и защита вторичных цепей датчика и устройства достигаются подключением на вход устройства стабилитронов, при этом последние, выходя на режим стабилизации, в целом изменяют магнитное состояние датчиков, приводя к снижению напряжений во вторичной цепи. В работе исследовался ряд вариантов подключения стабилитронов (рисунок Б.1).

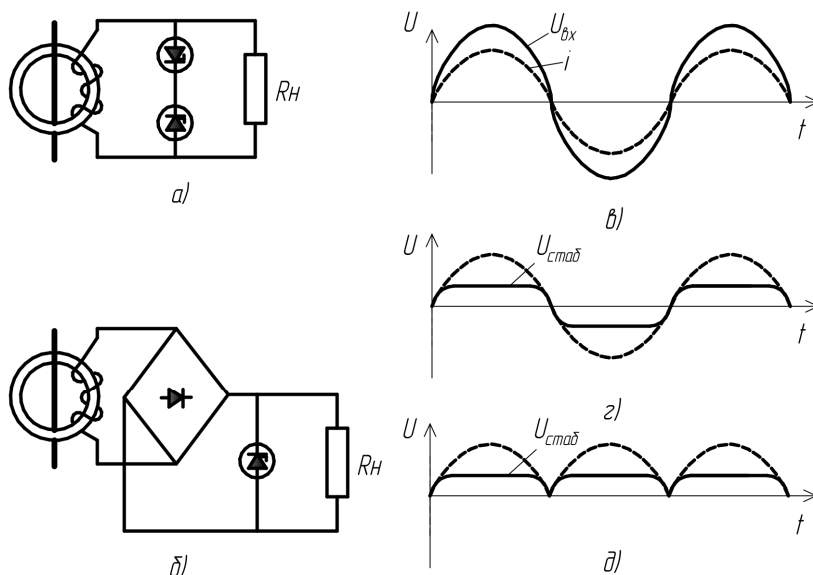


Рисунок Б.1 - Варианты подключения стабилитронов для защиты датчиков и полупроводниковых устройств от перенапряжений при больших первичных токах (а,б) и осциллограммы входного (в) и выходного напряжения (г,д).

Наиболее целесообразно, с точки зрения выполнения защитных функций, подключение стабилитронов на вход устройства (рисунок Б.1 а,б).

### Датчики тока в трехфазных схемах

При использовании датчиков тока в трехфазных схемах защиты взаимное влияние ДТ друг на друга при определенных значениях нагрузочных сопротивлений и первичных токов приводит к изменению нормального токораспределения в схемах (рисунок Б.2).

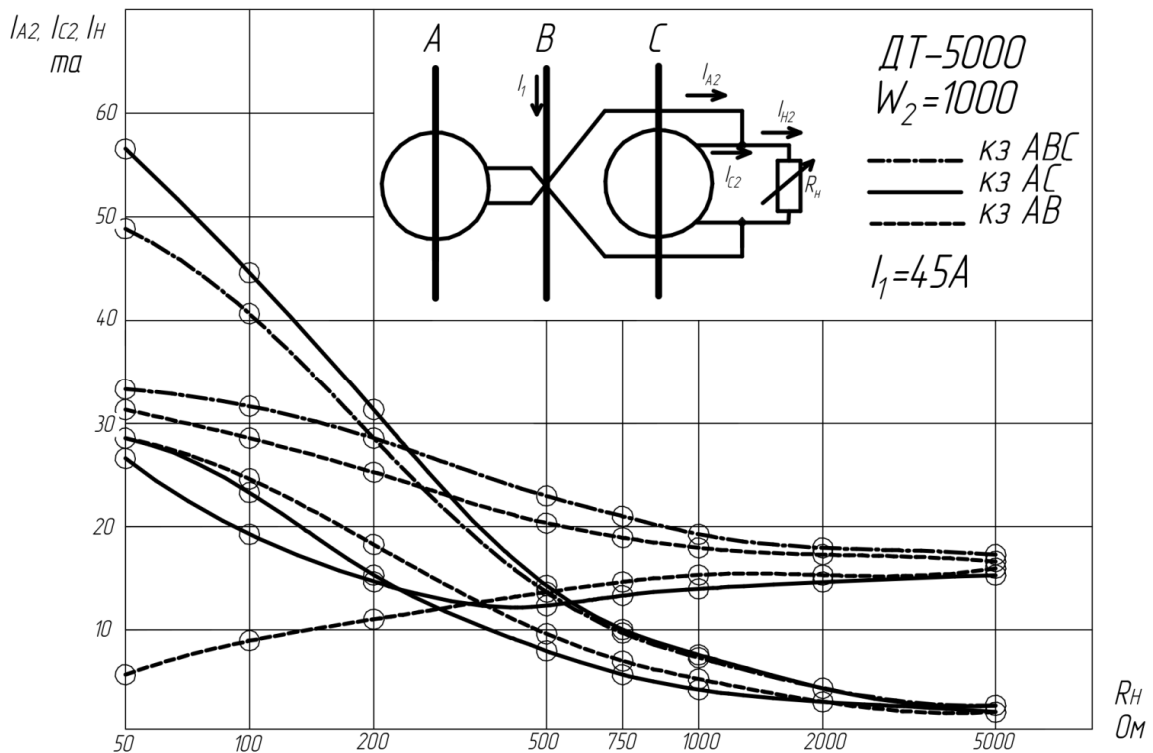


Рисунок Б.2 - Зависимости вторичных токов в трехфазной схеме включения датчиков на разность токов двух фаз от сопротивления нагрузки.

Эта особенность работы датчиков в трехфазных схемах в сочетании с использованием нелинейных свойств датчиков, представляет возможность осуществления специальных схем для улучшения параметров устройств защиты и противоаварийной автоматики (глава IV).

Далее в работе, эти свойства датчиков используются при разработке трехтрансформаторного фильтра тока нулевой последовательности с улучшенными показателями.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Сравнительный анализ фильтров токов нулевой последовательности для селективной сигнализации замыканий на землю

Проведём сравнительный анализ фильтров тока нулевой последовательности, предназначенных для подключения селективной сигнализации замыканий на землю в сельских распределительных сетях 6-10 кВ.

В исследовании рассматривались кабельные датчики тока ТДЗЛК и ТЗЛМ, а также датчики тока для воздушных линий ТДЗЛВ и ФТНП на разработанных разъемных накладных датчиках тока.

При проведении сравнительных испытаний трансформаторных датчиков тока было определено, что зависимость выходного сигнала от входного, при  $R_n = 1$  Ом, лучше у трансформаторных датчиков тока ТДЗЛК и ТЗЛМ, чуть хуже характеристика у предлагаемого ФТНП, датчик ТДЗЛВ имеет самый низкий выходной сигнал. Зависимость представлена на рисунке В.1.

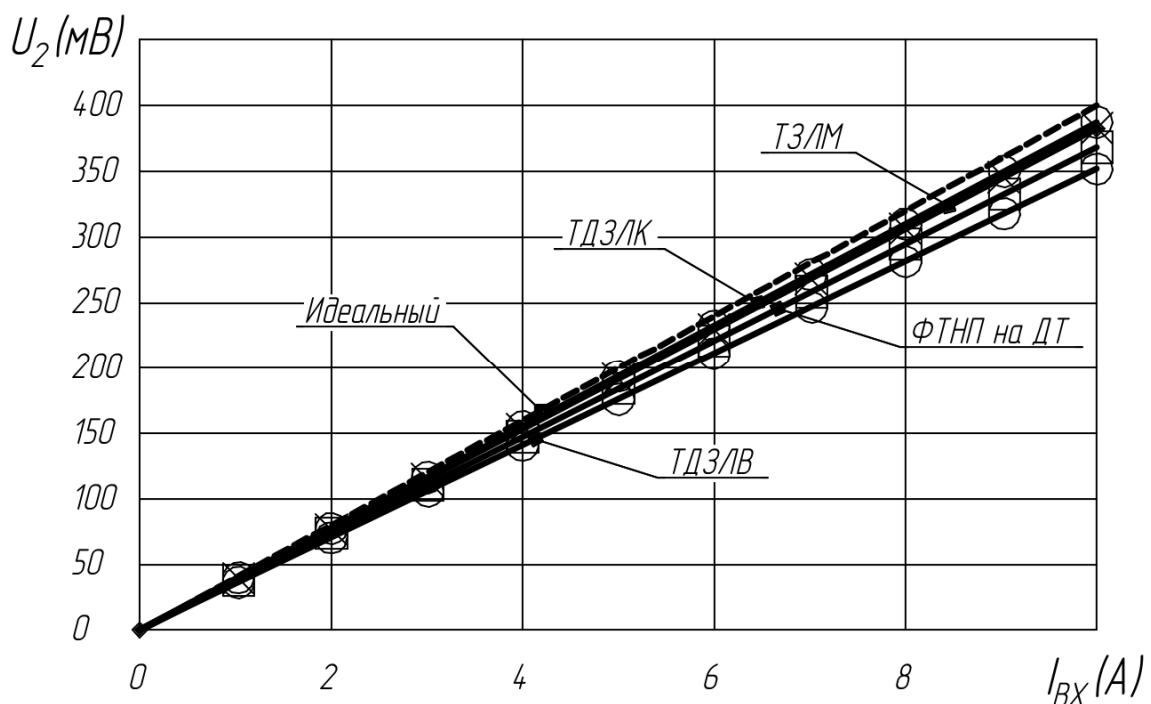


Рисунок В.1 - Зависимость выходного сигнала от входного, при  $R_n = 1$  Ом.

Это можно объяснить конструктивными особенностями датчиков ТДЗЛК и ТЗЛМ (увеличенное сечение магнитопровода и количество витков вторичной обмотки). К тому же, датчики ТДЗЛК и ТЗЛМ имеют более высокую

помехозащищенность к влиянию внешних магнитных полей, что объясняется более компактным расположением проводников в «окне» датчика [101].

Так как у нас сети переменного тока, то фазы тока и напряжения совпадать не будут, из-за наличия в сети определенной индуктивности и емкости. Это сильно влияет на величину передаваемой мощности. Были проведены сравнительные испытания трансформаторных датчиков тока, приведенные на рисунке В.2.

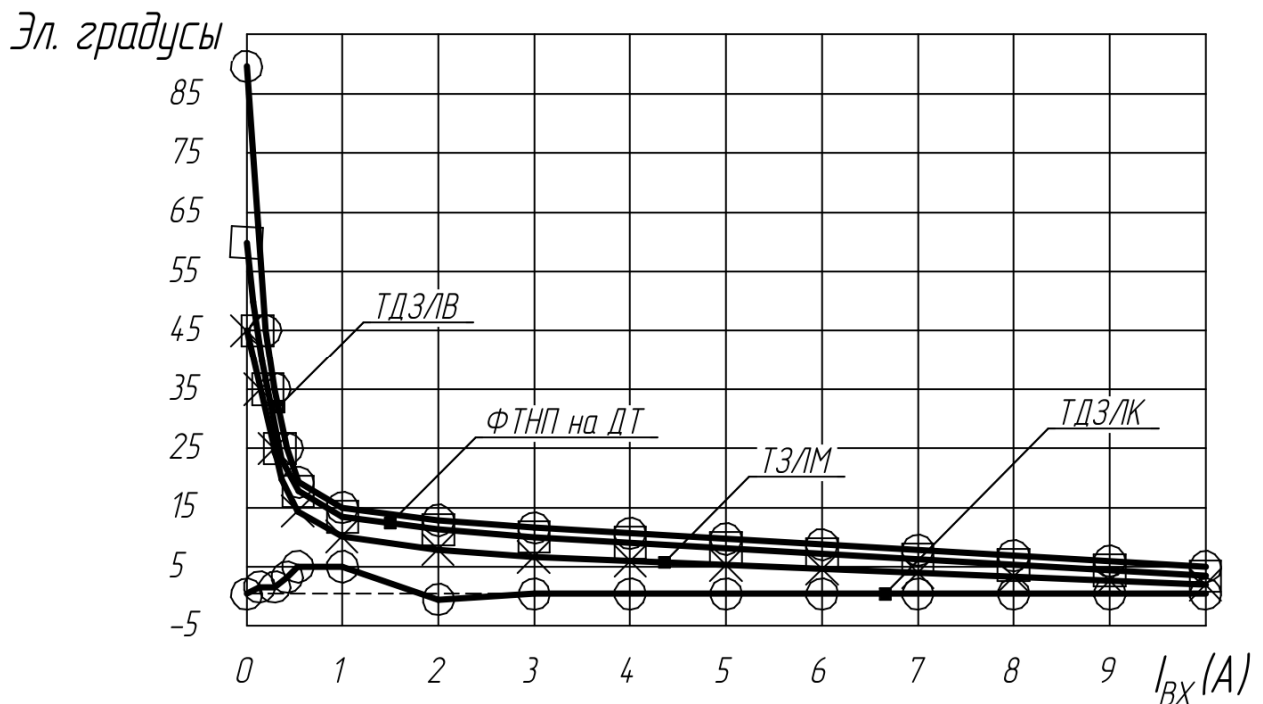


Рисунок В.2 - Сдвиг фаз между входным и выходным сигналом при  $R_n=1$  Ом.

По зависимости на рисунке В.2 видно, что у трансформаторного датчика тока ТДЗЛК сдвиг фаз минимальный из рассматриваемых датчиков, чуть больше у ТЗЛМ и предложенного ФТНП, самый большой сдвиг фаз у ТДЗЛВ. Можно сделать вывод, что величина полезной мощности у трансформаторного датчика тока ТДЗЛК, будет выше, чем у остальных.

Для трансформаторных датчиков тока нулевой последовательности, существенное значение имеет угловая погрешность. Так как при ненормальных режимах работы, из-за сильного насыщения трансформатора, угловая погрешность увеличивается, что может приводить к ложному срабатыванию реле.

Сравнительные испытания трансформаторных датчиков приведены на рисунках В.3 и В.4.

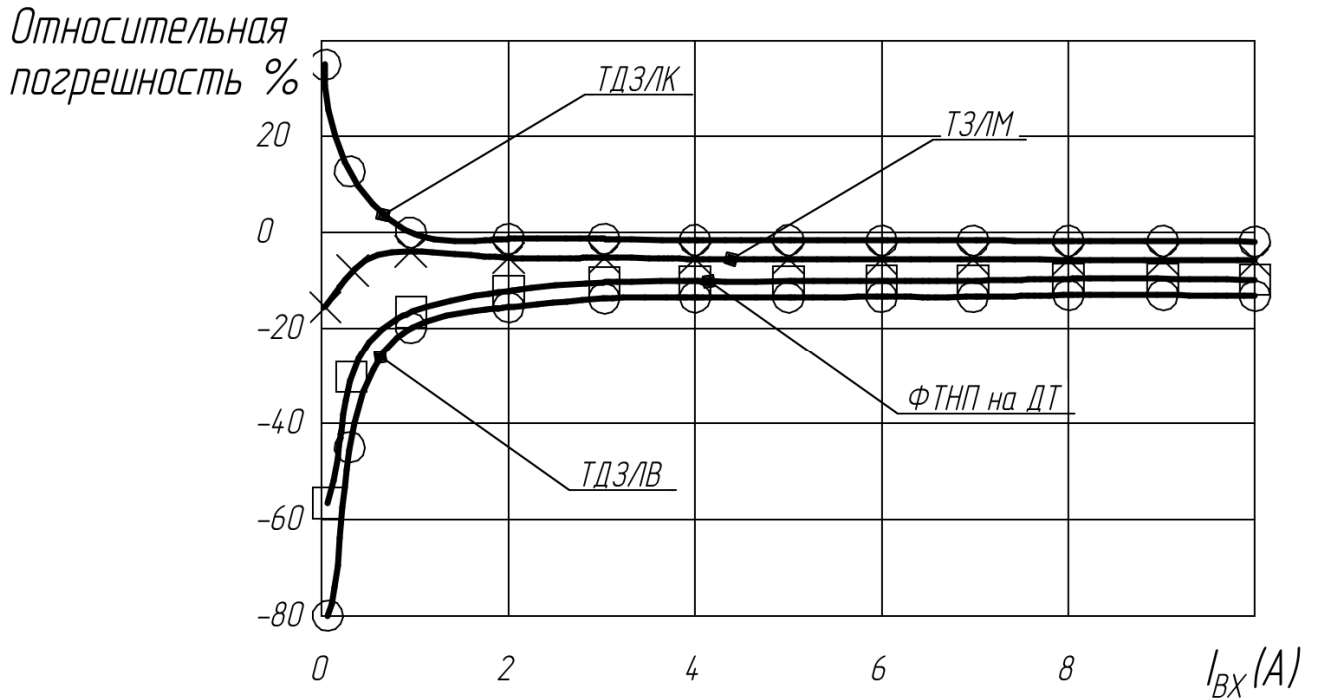


Рисунок В.3 - Значения относительных погрешностей при различных значениях нагрузки.

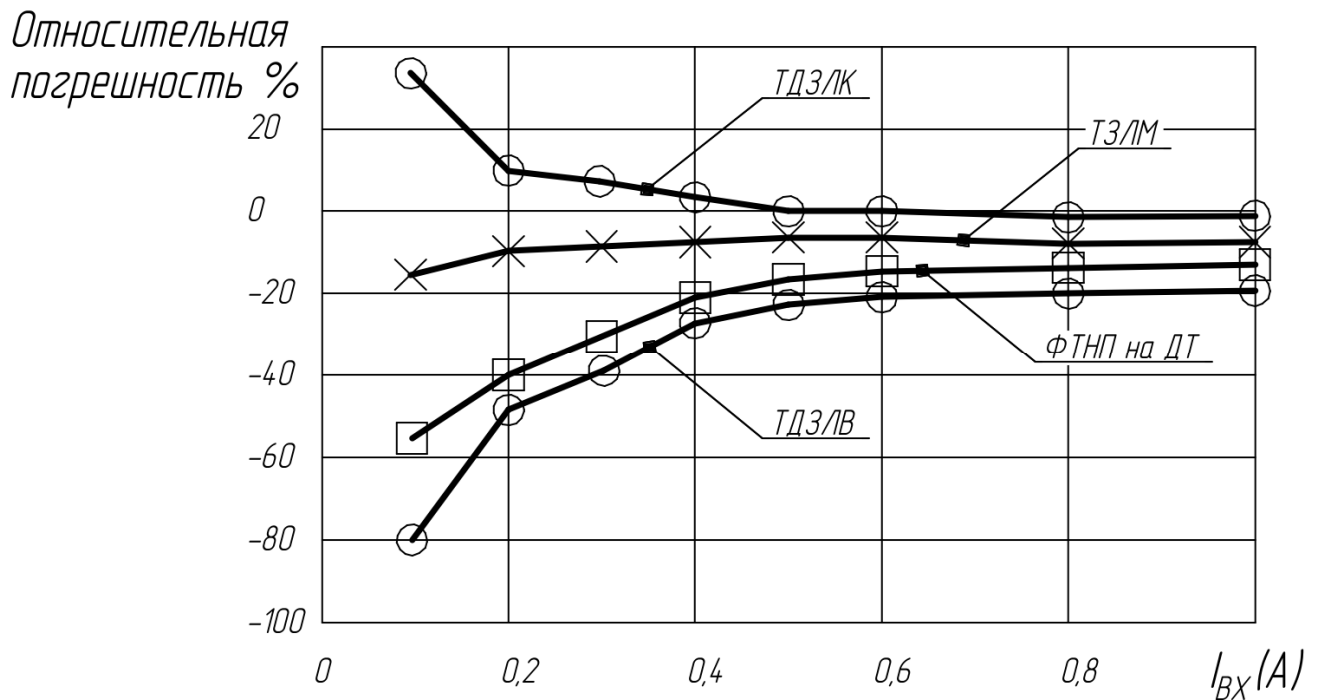


Рисунок В.4 - Значения относительных погрешностей при значениях нагрузки до 1 Ампера.

Данные зависимости показывают, что наибольшую чувствительность и меньшую угловую погрешность имеет трансформаторный датчик тока ТЗЛМ, чуть худшее показатели у ТДЗЛК и предложенного ФТНП, наименьшую чувствительность и большую угловую погрешность имеет датчик тока ТДЗЛВ.

По данным приведенным выше, можно сделать вывод, что в сетях с воздушными линиями и малыми значениями тока замыкания на землю для подключения к устройствам защиты и сигнализации, предпочтительным является применение кабельных датчиков тока ТДЗЛК и ТЗЛМ, имеющих большую чувствительность и меньшую угловую погрешность. Однако необходимость в реконструкции схемы первичной коммутации и значительные капитальные вложения ограничивают применение данных датчиков тока для создания фильтра токов нулевой последовательности. Поэтому наиболее приемлемым вариантом является фильтр токов нулевой последовательности на разработанных датчиках тока, обладающий необходимыми для подключения микропроцессорных и полупроводниковых устройств защиты характеристиками, устанавливаемый на проходные изоляторы РУ без реконструкции схемы первичной коммутации и имеющий незначительную стоимость за счет комплексного использования высоковольтной изоляции.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

## Протокол испытания устройства селективной сигнализации



«Утверждаю»

Начальник службы СИЗПИ

Никитин В.А.

28 июля 2022 года

## ПРОТОКОЛ

Испытания устройства селективной сигнализации замыкания на землю  
в воздушных сетях 6-10 кВ.

1. Характеристика устройства.

Представленное Российским государственным аграрным университетом – МСХА им. К.А. Тимирязева к испытаниям устройство, предназначено для селективной сигнализации однополюсных замыканий в воздушных сетях 6-10 кВ. Оно представляет собой устройство селективного направления токов нулевой последовательности и состоит из трех датчиков тока и полупроводниковой схемы органа направления мощности. Датчики тока, представляющие собой трансформаторы тока с малым объемом стали и несколькими вторичными обмотками, устанавливаются на проходные изоляторы ввода КРУН-10 кВ в шкафах отходящих линий. Наличие у датчиков нескольких вторичных обмоток позволило создать трехтрансформаторный фильтр токов нулевой последовательности с улучшенными показателями. К схеме органа направления мощности, кроме сигнала от фильтра токов нулевой последовательности подводится напряжение  $3U_0$  от трансформатора НТМИ. Устройство срабатывает при токах замыкания 0,4-2,0 Ампер и напряжении  $3U_0$  не менее 22 Вольт с выбором присоединения по наибольшей величине тока  $3I_0$ . Схема имеет контактный выход, через который могут быть задействованы сигнальные реле или лампы.

## 2. Характеристика объекта испытания и установка устройства.

Устройство селективной сигнализации замыкания на землю испытывалось на подстанции №564 Рождествено ПАО «Россети» Московский регион, имеющей установленную мощность 2х4000 кВА и питающей потребителей на напряжении 10 кВ по 4 фидерам общей протяженностью около 15 км. Ориентировочные токи замыкания 5-6 А.

Датчики тока были смонтированы в шкафу отходящей линии КРУН-10 на проходных изоляторах в отсеках трансформаторов тока 10 кВ, соединены со схемой органа направления мощности установленной в шкафу ТН. Для проверки направленности действия схемы было установлено два комплекта устройства сигнализации на фидерах № 1 и № 4.

## 3. Проведение испытаний и результаты.

Замыкания на землю осуществлялись включением масляного выключателя линии на предварительно установленное однополюсное заземление. Заземление одной фазы выполнялось на первой опоре отходящей линии, последовательно, сначала для фидера № 1, а затем для фидера № 4. Фидер, на котором проводились испытания, отключался от основных потребителей и его длина, в опыте составляла 2-3 км, а рабочие токи около 10 А. Срабатывание устройства отмечалось по замыканию контакта выходного реле. Было выполнено по пять замыканий на каждом фидере. Токи замыкания на фидерах №1, 3 и №2, 4 составили 4,3 и 5,7 А, напряжение  $3U_0 = 80$  В. Во всех случаях устройство селективно срабатывало, правильно информируя о повреждении линии.

## 4. Выводы.

а). Испытанное устройство селективной сигнализации замыкания на землю обладает направленным действием, правильно указывает поврежденную линию и имеет достаточно высокую чувствительность.



б). Использование упрощенных преобразователей тока (датчиков тока), устанавливаемых на проходных изоляторах в шкафах отходящих линий КРУН-10, позволяет применять это устройство на подстанциях 35/10 кВ, имеющих воздушный вывод, без реконструкции схемы первичной коммутации.

в). Считаю, что испытанное устройство должно быть установлено на подстанции №564 Рождествено на отходящих линиях для контроля естественных замыканий в сети.

В испытаниях участвовали:

Начальник службы СИЗПИ  
Ведущий инженер  
Электромонтер  
Аспирант РГАУ-МСХА



Никитин В.А.  
Ситников С.К.  
Герасимов О.А.  
Цедяков А.А.

**Акт внедрения**

# МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

ОГРН 1027739490976, ИНН 7719227050/КПП 771901001, место нахождения: 105425, г. Москва, Щелковский проезд, д. 13А, строение 1,  
т. (495) 965-5202, ф. (495) 965-5012, www.mieen.ru, e-mail: info@mieen.ru



УТВЕРЖАЮ

Ректор Московского института  
энергобезопасности и энергосбережения

- Аванесов В.М.

11.11.2022г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

результатов диссертационной работы на соискание ученой степени

кандидата технических наук

аспиранта РГАУ-МСХА имени К.А Тимирязева

Цедякова Андрея Александровича

Комиссия Московского института энергобезопасности и энергосбережения (МИЭЭ) под руководством Ректора Аванесова В.М., рассмотрела результаты исследования диссертационной работы Цедякова Андрея Александровича на тему «Повышение надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей за счет снижения времени перерыва электроснабжения при однофазных замыканиях на землю в воздушных линиях 6-10 кВ» и установила:

В рамках проведенных исследований:

- разработана математическая модель трансформаторного датчика тока для расчета характеристик и анализа режимов работы;
- разработан макет трансформаторного датчика тока накладного типа для установки на проходные изоляторы шкафов комплектных распределительных устройств отходящих воздушных линий 6-10 кВ;
- проведено исследование фильтра токов нулевой последовательности на разработанных датчиках тока для устройств селективной сигнализации замыканий на землю воздушных линий 6-10 кВ, обеспечивающих снижение времени перерыва электроснабжения;

- экспериментально установлено, что сигнализация однофазных замыканий на землю, подключенная к фильтру токов нулевой последовательности на разработанных датчиках тока селективно определяла поврежденное присоединение, тем самым способствуя уменьшению времени перерыва электроснабжения потребителей и повышению показателей надежности электроснабжения сельских воздушных линий 6-10 кВ.

Проведенные производственные испытания устройства состоящего из трех датчиков тока и направленной селективной сигнализации показали надежную и правильную работу, при замыканиях на воздушной линии 10 кВ. Датчики тока, представляющие собой трансформаторы тока с малым объемом стали и несколькими вторичными обмотками, устанавливаются на проходные изоляторы в шкафах отходящих линий КРУН-10. Наличие у датчиков нескольких вторичных обмоток позволило создать фильтр токов нулевой последовательности с улучшенными показателями. К схеме органа направления мощности, кроме сигнала от фильтра, подводится напряжение  $3U_0$  от трансформатора напряжения. Устройство срабатывает при токах замыкания 0,4-2,0 Ампер и напряжении  $3U_0$  20 – 40 Вольт в диапазоне первичных токов до 100 Ампер. Схема имеет контактный выход, через который могут быть задействованы сигнальные реле или лампы.

Время перерыва электроснабжения потребителей за год уменьшается на два часа, что ведет к уменьшению ущерба от недоотпуска электроэнергии и повышает надежность электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. Устройства монтируются без реконструкции распределительных устройств и существенных дополнительных затрат, отвечают предъявленным техническим требованиям и являются перспективными для применения в схемах сельского электроснабжения.

Результаты проведенных Цедяковым А.А. выше рассмотренных исследований приняты к внедрению в учебный процесс профессиональной переподготовки и повышения квалификации слушателей МИЭЭ и в научно-исследовательскую работу института.

Члены комиссии:

Ректор МИЭЭ, к.т.н, доцент

Проректор по учебной и научной работе, к.т.н, доцент

Зав. кафедрой электроснабжения, к.т.н, доцент

Аванесов В.М.

Растворов И.С.

Гудков В.В.

