

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.

4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2023

Работа выполнена на кафедре электроснабжения и электротехники имени академика И. А. Будзко ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

Научный руководитель: **Лещинская Тамара Борисовна,**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры электроснабжения и электротехники
имени академика И. А. Будзко ФГБОУ ВО
РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева.

Официальные оппоненты: **Тропин Владимир Валентинович,**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры применения электроэнергии ФГБОУ
ВО «Кубанский государственный аграрный
университет имени И. Т. Трубилина».

Бородин Максим Владимирович,
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Электроснабжение» ФГБОУ ВО
«Орловский государственный аграрный
университет имени Н. В. Парахина».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Российский государственный
аграрный заочный университет».

Защита состоится «18» мая 2023 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» по адресу: 127434, Москва, ул. Прянишникова, д. 19.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

Н. Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Сельское хозяйство выдвигает повышенные требования к качеству электрической энергии и надежности электроснабжения. Даже кратковременные перерывы электроснабжения сельскохозяйственных потребителей при наличии автоматизированных поточных линий значительно нарушают и дезорганизуют производственный процесс, приводя, в конечном счете, к большому народнохозяйственному ущербу.

В комплексе мероприятий по повышению надежности электроснабжения сельских потребителей важную роль играет совершенствование в сельских сетях 6-10 кВ устройств защиты и сигнализации от аварийных и ненормальных режимов, так как однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в этих сетях являются наиболее частым видом повреждений. Сельские распределительные сети наиболее разветвленные и протяженные, и в отличие от городских и промышленных электрических сетей чаще всего не имеют сетевого резервирования воздушных линий (ВЛ) 6-10 кВ. Поэтому для обеспечения надежности электроснабжения потребителей при ОЗЗ аварийная линия не отключается, а защита выполняется в виде сигнализации с действием на сигнал для информирования дежурного персонала подстанции. Такой режим работы связан с опасностью возникновения электропожаров и поражения людей и животных электрическим током, в результате чего вопросы обнаружения и поиска ОЗЗ, а, следовательно, и снижение времени перерыва электроснабжения в сильно разветвленных сельских сетях приобретают особо актуальное значение.

Для существующих подстанций, имеющих в основном воздушные выводы отходящих линий 6-10 кВ, вопросы выполнения селективной сигнализации и защиты еще окончательно не решены, так как это требует реконструкции схем первичной коммутации с установкой кабельных вставок или выводов. А так же монтаж фильтров тока нулевой последовательности (ФТНП), обеспечивающих необходимую чувствительность к малым токам замыкания и работу систем селективной сигнализации и защиты.

В связи с этим, для выполнения селективной сигнализации замыканий на землю линий 6-10 кВ, имеющих воздушный вывод из распределительного устройства (РУ), первостепенной задачей является разработка простых, надежных первичных преобразователей или датчиков тока (ДТ), которые устанавливаются в РУ без реконструкции схемы первичной коммутации и образуют ФТНП для подключения селективной сигнализации по обнаружению поврежденной линии, способствуя сокращению времени перерыва электроснабжения.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам оценки и повышения уровня надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей посвящен ряд работ отечественных ученых И.А. Будзко, Н. М. Зуля, М.С. Левина, Т.Б. Лещинской, И.В. Наумова и других. Для повышения надежности электроснабжения потребителей необходимо применение комплекса специальных мер и средств, к которым относятся устройства и приборы обнаружения мест повреждения в распределительных сетях 6-10 кВ.

Изучением проблем разработки и совершенствования 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 подстанций 35-110/6-10 кВ с воздушными выводами отходящих линий не имеют защит от ОЗЗ в связи с невозможностью подключения, что связано с отсутствием или недостаточным количеством датчиков тока.

Проблемой расчета и анализа режимов работы трансформаторов тока в схемах защит посвящены многочисленные исследования российских и зарубежных ученых, представленные в работах Федосеева А.М., Дроздова А.Д., Казанского В.Е., Сироты И.М. и других. В работах этих ученых подробно рассмотрены существующие методы расчета установившихся и переходных процессов в трансформаторах тока.

Цель работы. Повышение надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей за счет снижения времени перерыва электроснабжения при ОЗЗ в воздушных линиях 6-10 кВ.

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

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

Задачи исследования:

- оценить надежность электроснабжения сельскохозяйственных потребителей по времени перерыва электроснабжения при ОЗЗ и провести анализ современных устройств защиты и сигнализации ОЗЗ;
- разработать математическую модель датчика тока для расчета характеристик и анализа режимов работы в схемах защит;
- разработать макет датчика тока для микропроцессорных и полупроводниковых устройств защиты и сигнализации замыканий на землю;
- исследовать ФТНП на разработанных датчиках тока для устройств селективной сигнализации замыканий на землю воздушных линий 6-10 кВ, обеспечивающих снижение времени перерыва электроснабжения;
- провести технико-экономические расчеты предложенного варианта и определить время перерыва электроснабжения сельских потребителей.

Методика исследования: В процессе работы проведены расчеты с использованием теории электрических цепей, лабораторные и производственные испытания, а также моделирование процессов работы на компьютере в системе MatLab Simulink и численного анализа с использованием пакета MathCAD.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- разработана математическая модель трансформаторного датчика тока и алгоритм расчета характеристик в режиме холостого хода и нагрузки;
- разработанный алгоритм определения соотношения витков вторичных обмоток датчиков тока, образующих ФТНП для определения поврежденной линии, сокращает время перерыва подачи электроэнергии потребителям и повышает надежность электроснабжения.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработанная математическая модель и макет трансформаторного 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.

2. Полученная математическая модель и алгоритм расчета характеристик датчика тока приняты и используются в учебном процессе для профессиональной переподготовки и повышения квалификации слушателей Московского института энергобезопасности и энергосбережения.

3. На основе разработанного макета датчика тока было создано устройство селективного направления токов нулевой последовательности, состоящее из трех датчиков тока и направленной селективной сигнализации ЗЗП-1. Испытания, проведенные на подстанции № 564 Рождественно ПАО «Россети» Можайский РЭС, показали надежную и правильную работу устройства по определению поврежденной линии. Предполагается проведение опытной эксплуатации устройства для контроля при естественных замыканиях в сети.

Положения, выносимые на защиту:

- разработанная математическая модель трансформаторного датчик тока и результаты исследований, подтвержденные расчетами и лабораторными испытаниями характеризующие основные параметры датчиков тока;

- разработанный макет датчика тока накладного типа для установки на проходные изоляторы шкафов КРУН 6-10 кВ с воздушными выводами отходящих линий;

- 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. Основные положения работы докладывались 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 научных работ. 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. Диссертация изложена на 171 странице, состоит из введения, 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, проведена апробация результатов.

В первой главе «Современное состояние проблемы и задачи исследования» диссертационной работы проведена оценка надежности схем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей напряжением 6-10 кВ. Для предприятий различных направлений (птицефабрика, ферма КРС, молокозавод, тепличный комбинат и др.) единым показателем уровня надежности может рассматриваться ущерб от недоотпуска электроэнергии:

$$Y = Y_0 \times W_{нед}, \quad (1)$$

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

$$W_{нед} = P_{\Sigma} \times T_{\Sigma}, \quad (2)$$

где: P_{Σ} – активная мощность, кВт; T_{Σ} – 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:

$$P_{ens} = \sum_{j=1}^J P_j \times T_j, \quad (3)$$

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.

Следовательно, показатель времени перерыва электроснабжения потребителей за год (T_{Σ}) может оценивать уровень надежности системы электроснабжения (СЭС) и принят в данной работе. Полученные данные 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 $T_{рл} = 20...27$ часов, поэтому необходимо применение комплекса специальных мер и средств для повышения надежности электроснабжения потребителей. Устройства защиты и сигнализации от аварийных и ненормальных режимов в распределительных сетях 10 кВ позволяют уменьшить время отключения потребителей и тем самым повысить надежность электроснабжения. 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. В сетях среднего класса напряжения 80 % подстанций не имеют селективной защиты от ОЗЗ, то есть защиты, которая позволяет однозначно (селективно) определить воздушную линию с однофазным замыканием на землю. Данные подстанции снабжены только сигнализацией по напряжению нулевой последовательности с помощью трансформатора

напряжения, неселективной защитой, то есть защитой, определяющей однофазное замыкание на землю, которое произошло на одной из линий, но не указывающая на какой именно. Этот 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). Отсутствие селективной сигнализации для РУ 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, неприемлема по технико-экономическим соображениям, так как связана с реконструкцией схемы первичной коммутации и требует существенных дополнительных затрат. С другой стороны отсутствие селективной сигнализации связано с затруднениями выполнения ФТНП, так как необходима установка дополнительного трансформатора тока и фильтры на стандартных трансформаторах тока не обеспечивают необходимой чувствительности.

Проведенный аналитический обзор параметров сельских распределительных сетей 6-10 кВ и современных устройств защиты и сигнализации однофазных замыканий на землю, позволил определить основные требования к датчикам тока:

- соответствовать параметрам подключаемых устройств на микропроцессорных и полупроводниковых элементах;
- 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);
- обладать возможностью плавного регулирования 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 реконструкции схемы первичной коммутации и снижения надежности работы высоковольтного оборудования.

Во второй главе «Математическое обоснование модели датчика тока» представлены различные методы анализа и расчета схем с трансформаторными датчиками тока. 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 ℓ ; сопротивление рассеяния X_{2T}), величина и характер сопротивления нагрузки Z_H , φ_H и основная кривая намагничивания материала сердечника $B_m(H_m)$, снимаемая при синусоидальном токе. Основная кривая намагничивания получена для датчика тока накладного типа, сердечник которого выполнен из электротехнической стали Э-310 с незначительным воздушным зазором 0,5 мм.

В работе применялись следующие способы аппроксимации кривой намагничивания:

1) Кусочно-линейная аппроксимация: погрешность отклонения при кусочно-линейной аппроксимации двумя отрезками составила 1,961 %.

2) Аппроксимация степенным полиномом: погрешность отклонения при обоих вариантах (с дополнительным коэффициентом) аппроксимации полиномом 3 степени 1,485 % (1,221 %).

3) Аппроксимация нечетным степенным полиномом: погрешность отклонения для полинома 3 степени 3,605 % (3,089 %).

4) Аппроксимация четным степенным полиномом: погрешность отклонения для полинома полинома 4 степени 10,061 % (5,853 %).

5) Аппроксимация функцией гиперболического синуса: погрешность отклонения составила 1,9 %.

6) Аппроксимация функцией гиперболического тангенса: Погрешность отклонения составила 1,542 %.

7) Аппроксимация функцией арктангенса: Погрешность отклонения составила 1,382 %.

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

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. Хорошие показатели имеют арктангенсные и гиперболические функции, имеющие небольшое количество коэффициентов аппроксимации. Самый простой и распространенный способ кусочно-линейной аппроксимации также подходит для расчета трансформаторных датчиков тока в режимах холостого хода и нагрузки.

а) Метод расчета трансформаторных датчиков тока в однофазных схемах включения при кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания сердечника.

Полученные выражения средних и действующих значений вторичного напряжения для режима холостого хода имеют вид:

в режиме без насыщения, когда $I_{1m} \leq I_{1mk}$

$$U_{2cp} = \frac{2}{\pi} I_{1m} \frac{W_1}{W_2} X_1; \quad (4)$$

$$U_2 = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}} \times \frac{W_1}{W_2} X_1; \quad (5)$$

в режиме насыщения, когда $I_{1m} > I_{1mk}$

$$U_{2cp} = \frac{2}{\pi} I_{1m} \frac{W_1}{W_2} [X_2 + (X_1 - X_2) \sin \omega t_1]; \quad (6)$$

$$U_2 = I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \sqrt{\frac{1}{\pi} (X_1^2 - X_2^2) (\omega t_1 + \frac{1}{2} \sin 2\omega t_1) + \frac{1}{2} X_2^2}, \quad (7)$$

где: $\omega t_1 = \arcsin \frac{H_k \cdot l}{I_{1m} \cdot W_1}$ - угол коммутации, характеризующий изменения магнитного состояния датчика; X_1, X_2 – сопротивление ветви намагничивания, соответственно в ненасыщенном и насыщенном режимах работы; B_k и H_k – индукция и напряженность магнитного поля, соответствующие моменту коммутации; I_{1m} и I_{1mk} – первичный намагничивающий ток.

Расчетные и экспериментальные данные значений вторичного напряжения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные и экспериментальные данные значений вторичного напряжения.

I ₁ , А	Эксперимент		Расчет	
	U _{2cp} , В	U _{2, В}	U _{2cp} , В	U _{2, 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

В режиме нагрузки при переходе сердечника от одного магнитного состояния к другому, во вторичном контуре имеет место переходной процесс.

Выражения для средних и действующих значений вторичного тока в режиме нагрузки имеют вид:

в режиме без насыщения, когда $I_{1m} \leq I_{1mk}$

$$I_{2cp} = \frac{2}{\pi} I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \times \frac{X_1}{Z_1}; \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}} \times \frac{W_1}{W_2} \times \frac{X_1}{Z_1}; \quad (9)$$

в режиме насыщения, когда $I_{1m} > I_{1mk}$

$$I_{2cp} = \frac{2}{\pi} I_{1m} \frac{W_1}{W_2} \left[\frac{X_1}{Z_1} \sin(\omega t_1 - \varphi_1 + \varphi_2) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) - \frac{X_2}{Z_2} \sin(\omega t_1 - \varphi_1 + \varphi) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi + \varphi_1 - \varphi_2\right) \right]; \quad (10)$$

$$I_2 = I_{1m} \cdot \frac{W_1}{W_2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left\{ \left(\frac{X_1}{Z_1} \right)^2 \left[(\omega t_1 - \varphi_1 + \varphi) + \frac{1}{2} \cos 2\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \sin 2(\varphi_1 - \varphi - \omega t_1) \right] + \left(\frac{X_2}{Z_2} \right)^2 \left[(\pi + \varphi_1 - \varphi - \omega t_1) + \frac{1}{2} \cos 2\left(\frac{\pi}{2} - \varphi + \varphi_1 - \varphi_2\right) \sin 2(\varphi - \varphi_1 + \omega t_1) \right] \right\}}, \quad (11)$$

где: Z_1 и Z_2 – полные сопротивления в ненасыщенном и насыщенном состоянии.

Расчетные значения среднего выпрямленного напряжения на активной нагрузке датчика тока приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Экспериментальные и расчетные данные значений среднего выпрямленного напряжения

I ₁ , А	Эксперимент				Расчет			
	W ₂ =1000		W ₂ =2500		W ₂ =1000		W ₂ =2500	
	R _н =500	R _н =2000	R _н =500	R _н =2000	R _н =500	R _н =2000	R _н =500	R _н =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

Рассчитанные значения среднего выпрямленного напряжения в режиме холостого хода и на активной нагрузке датчика тока, приведенные в таблице 1 и таблице 2, имеют хорошее совпадение с экспериментом – не более 10 %.

б) Расчет характеристик датчиков тока при использовании аналитической аппроксимации кривой намагничивания.

Приведем 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.

При аппроксимации характеристики намагничивания сердечника датчика тока, гиперболическим синусом и синусоидальном первичном токе получены выражения средних и действующих значений вторичного напряжения для режима холостого хода:

$$U_{2cp} = \frac{2\omega W_2 Q}{\pi\beta} \ln \left[\frac{I_m W_1}{\alpha l} + \sqrt{1 + \left(\frac{I_m W_1}{\alpha l} \right)^2} \right]; \quad (12)$$

$$U_2 = \frac{\omega W_2 Q}{\beta} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{I_m W_1}{\alpha l} \right)^2} - 1}, \quad (13)$$

где: α и β – коэффициенты аппроксимации.

Результаты расчетов среднего и действующих значений вторичного напряжения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов среднего и действующих значений вторичного напряжения

I ₁	Датчик тока: $l=48,5$ см; $Q=0,525$ см ² ; $W_2=2500$; $W_1=1$; $\alpha=0,152$ 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

В режиме нагрузки, в качестве аппроксимирующей функции кривой намагничивания сердечника выбран нечетный степенной полином.

Дифференциальное уравнение (14) 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.

$$\left(W_2 Q + \frac{\alpha l}{W_2} L + \frac{6\beta l}{W_2} B \right) \frac{d^2 B}{dt^2} + \left(\frac{\alpha l}{W_2} R + \frac{3\beta l}{W_2} R B^2 \right) \frac{dB}{dt} + \frac{\alpha l}{W_2} \frac{1}{C} B + \frac{\beta l}{W_2} \frac{1}{C} B^3 = I_m \frac{W_1}{W_2} \left(\omega R \cos \omega t - \omega^2 L \sin \omega t + \frac{1}{C} \sin \omega t \right). \quad (14)$$

Расчетные и экспериментальные данные среднего вторичного тока представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Расчетные и экспериментальные данные среднего вторичного тока

I ₁ , А	Нагрузка R, L			
	W ₂ =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

Приемлемое совпадение расчетных и экспериментальных данных (расхождение не более 10 %) соблюдается как для режима холостого хода, так и для режима нагрузки в диапазоне сопротивлений вторичной цепи датчика в 2...3 раза больших сопротивлений ветви намагничивания.

в) Был произведен сравнительный анализ результатов расчета характеристик датчика тока, различными методами для режима холостого хода и нагрузки.

В режиме холостого хода расчет характеристик датчика тока производился методом кусочно-линейной аппроксимации и гиперболической функцией синуса, данные сравнительного анализа приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Режим холостого хода

I ₁ , А	Эксперимент		Расчет			
			Кусочно-линейная		Гиперболический синус	
	U _{2ср} , В	U ₂ , В	U _{2ср} , В	U ₂ , В	U _{2ср} , В	U ₂ , 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.

В режиме нагрузки расчет характеристик датчика тока производился методом кусочно-линейной аппроксимации и степенным полиномом, данные сравнительного анализа приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Режим нагрузки

I ₁ , А	Эксперимент		Расчет			
			Кусочно-линейная		Степенной полином	
	R _н =500	R _н =2000	R _н =500	R _н =2000	R _н =500	R _н =2000
	I _{2ср} , А	I _{2ср} , А	I _{2ср} , А	I _{2ср} , А	I _{2ср} , А	I _{2ср} , А
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.

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 (12), расчет действующего значения вторичного напряжения производится методом кусочно-линейной аппроксимации по формулам (5) и (7).

2) В режиме нагрузки расчет среднего значения вторичного тока следует производить методом степенного полинома по формуле (14).

В третьей главе «Разработка макета датчика тока для устройств защиты и сигнализации замыканий на землю сельских распределительных сетей» представлены исследования по выбору параметров датчиков тока, которые 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.

Конструктивно датчик тока представляет собой вторичную систему (магнитопровод с обмоткой), устанавливаемую на проходных изоляторах типа ИП, ИПУ и др. в шкафах КРУН-10 кВ (рисунок 1).

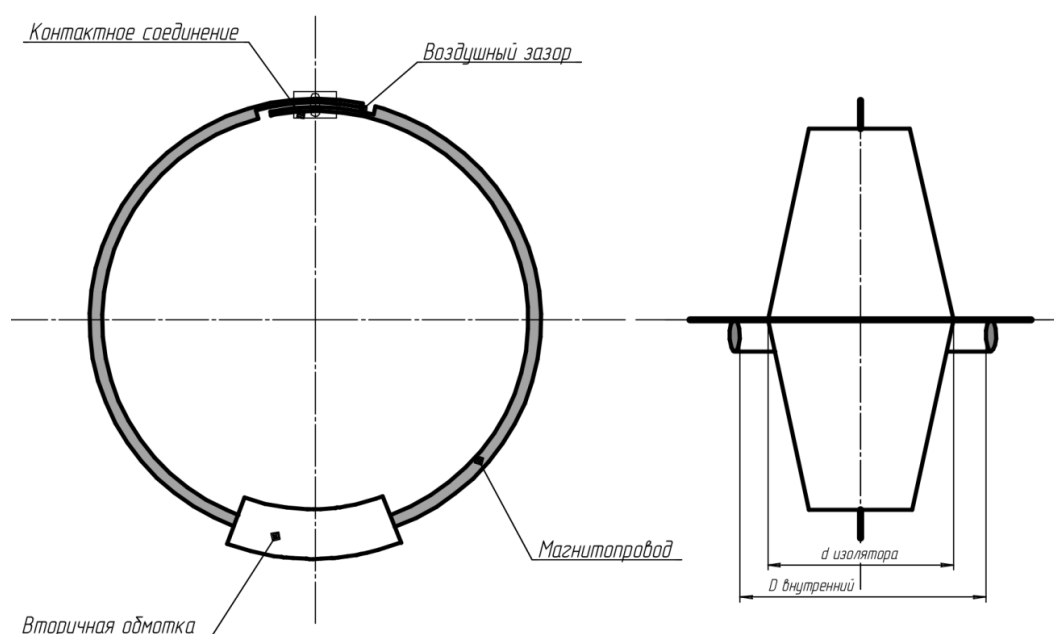


Рисунок 1 – Общий вид трансформаторного датчика тока накладного типа, устанавливаемого в КРУН 6-10 кВ

Роль первичной обмотки и основной высоковольтной изоляции выполняют конструктивные части (токоведущий стержень и изоляционное тело) проходного изолятора. В связи с тем, что первичная обмотка и основная изоляция в датчиках отсутствует, стоимость их незначительна. Внутренний диаметр датчика определяется размером проходного изолятора и с учетом обеспечения электроизоляционных расстояний составляет $D_{BH} = 150 \dots 180$ мм, длина пластин с учетом диаметра 450...600 мм. Сечение магнитопровода для датчиков с малым объемом стали 0,5...1,0 см², число витков и исполнение вторичной обмотки датчика определялись из условий требования линейности и идентичности характеристик, вторичных токов, напряжений, мощности и компактности конструкции.

Результаты исследований характеристик датчиков тока представлены в виде графиков и осциллограмм.

На рисунке 2 представлено амплитудное, действующее и среднее значения Э.Д.С. на выходе ДТ в зависимости от первичных токов и витков вторичной обмотки.

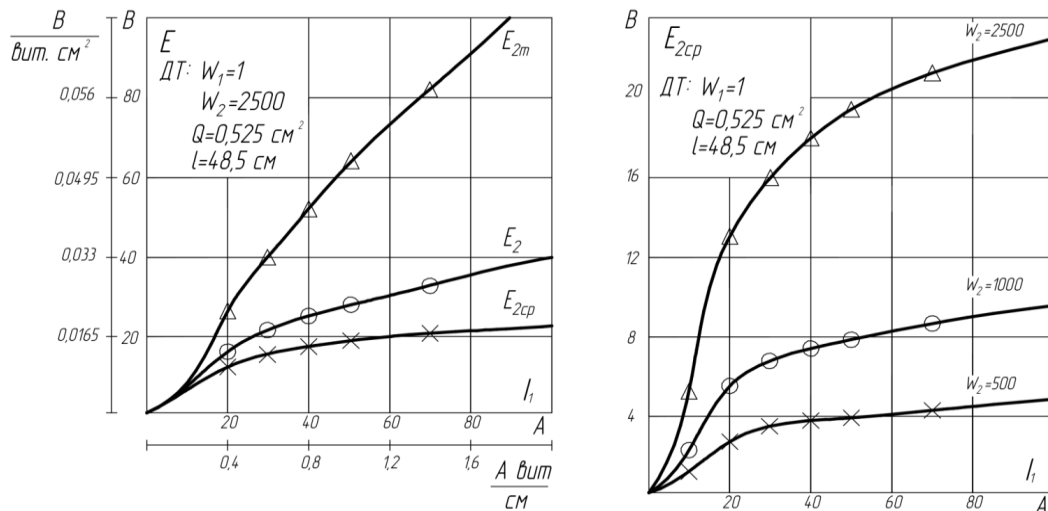


Рисунок 2 – Амплитудное, действующее и среднее значения Э.Д.С.

Удельные характеристики амплитудных, действующих и средних значений Э.Д.С. вторичной обмотки датчика в функции удельных ампервитков, которые приведены на рисунке 2, могут быть использованы для определения Э.Д.С. при других конструктивных параметрах датчиков.

$$E_{2yd} = \frac{E_2}{W_2 Q}; \quad (15)$$

$$aW_{yd} = \frac{I_1 W_1}{l}, \quad (16)$$

где: Q – сечение магнитопровода; l – длина средней магнитной линии сердечника, W_1 , W_2 – число витков первичной и вторичной обмотки.

По удельным характеристикам построена основная кривая намагничивания ($B_m(H_m)$) датчика (рисунок 3а).

$$B_m = \frac{E_{yd.cp.} \times 10^4}{4f}; Tл \quad (17)$$

$$H_m = \sqrt{2aW_{y0}}, A/см \quad (18)$$

где: f – частота; B_m и H_m – индукция и напряженность магнитного поля.

Рассматривались и другие варианты сердечника датчика тока (рисунок 3б), с более значительным зазором и различным исполнением вторичных обмоток.

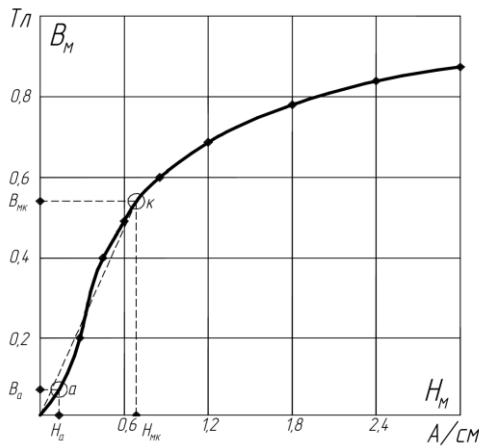


Рисунок 3а – Основная кривая намагничивания ДТ

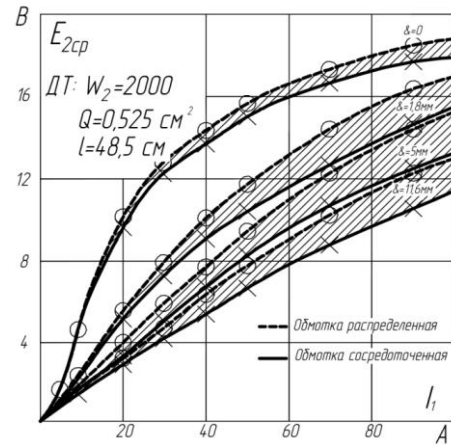


Рисунок 3б – Влияние на величину Э.Д.С. зазора и исполнения вторичной обмотки

Как видно из рисунка 3а, 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 максимальных Э.Д.С. или напряжений при больших первичных токах, так и для достижения линейности и идентичности характеристик датчиков.

При наличии зазора в магнитопроводе, рисунок 3б, отсутствует влияние остаточного намагничивания, что делает характеристику более линейной, тем самым способствуя снижению Э.Д.С. при больших первичных токах.

При исследовании режима нагрузки показано влияние сечения сердечника, числа витков и сопротивления нагрузки на величину вторичных токов и напряжений. На рисунке 4 приведена зависимость напряжения на выходе датчика тока от первичных токов, при различном сечении сердечника и количества витков вторичной обмотки.

Вследствие соизмеримости сопротивлений намагничивания и цепи вторичной обмотки датчика тока, режим работы последнего в сильной степени зависит от сопротивления нагрузки (рисунок 5а), что позволяет путем изменения регулируемого сопротивления, подключаемого параллельно входу устройства, получать требуемую характеристику, практически с любым коэффициентом преобразования.

$$K = \frac{dU_2}{dI_1}, \quad (19)$$

где: U_2 – напряжение вторичной обмотки; I_1 – первичный ток.

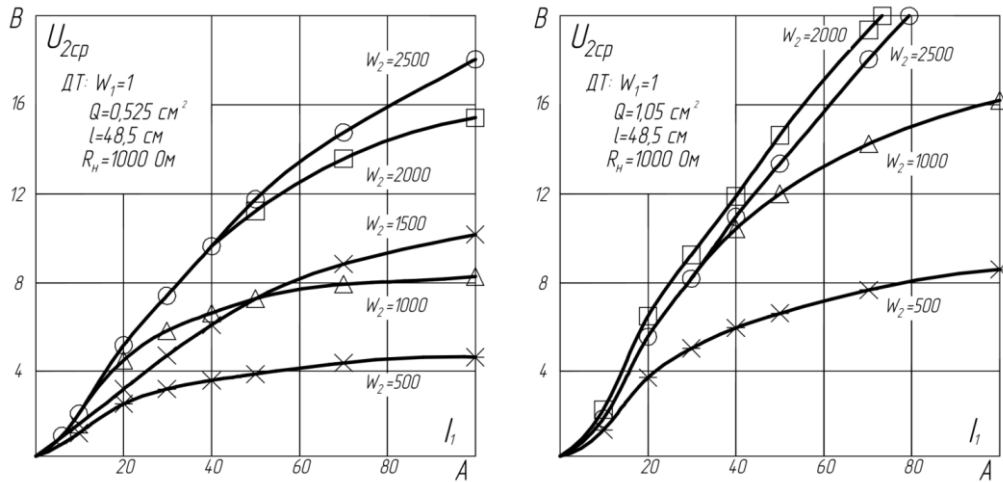


Рисунок 4 – Зависимости напряжения на выходе датчика от первичных токов, витков вторичной обмотки и сечения сердечника

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.

Зависимости влияния величины нагрузочного сопротивления на выходные характеристики датчика показаны на рисунке 5а и 5б.

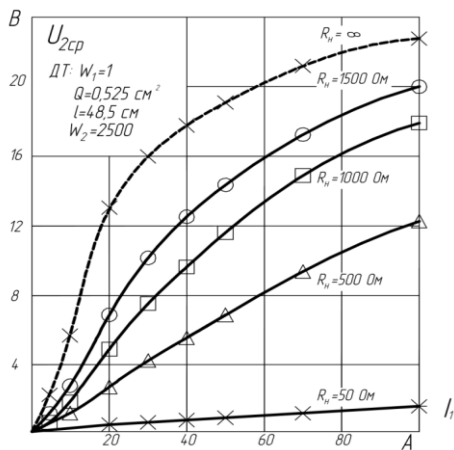


Рисунок 5а – Влияние величины нагрузочного сопротивления на выходные характеристики датчика

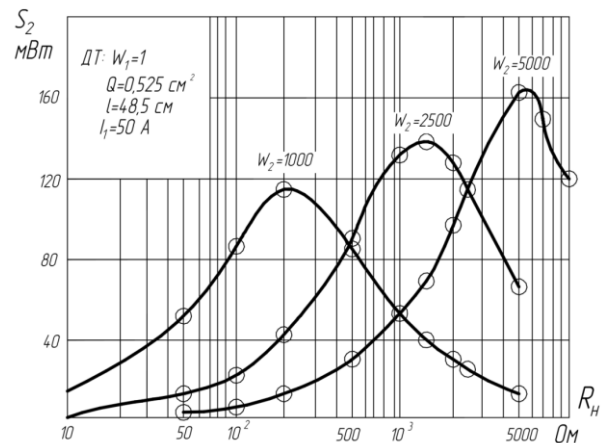


Рисунок 5б – Выходная нагрузка датчика от числа витков вторичной обмотки и величины сопротивления нагрузки

Проведенные экспериментальные исследования определили исполнение ДТ, удовлетворяющее требованиям микропроцессорных и полупроводниковых устройств защиты к параметрам сельских сетей. Магнитопровод, кольцевой, из 15 пластин электротехнической стали, собираемых внахлестку. Длина пластин 450...600 мм, ширина 10 мм, толщина 0,35 мм. Активное сечение магнитопровода 0,525 см². Зазор $\delta=0,5$ 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 $W_3=2000$. Выходные параметры (для значений рабочих токов $I_1=40-50$ А): напряжение $U_2=1,5...12$ В; мощность $S=50...140$ мВА; входные сопротивления подключаемых устройств $R_H=50...2000$ Ом.

Представленные характеристики трансформаторных датчиков тока позволяют выбрать необходимое число вторичных витков, для заданного диапазона первичных токов и вторичных параметров. 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.

В четвертой главе «Исследование фильтров токов нулевой последовательности на разработанных датчиках тока» приводятся теоретические и экспериментальные исследования фильтров токов нулевой последовательности на трансформаторных датчиках тока и результаты разработки оптимального варианта фильтра для сельских подстанций с воздушными выводами отходящих высоковольтных линий. 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:

1. ФТНП, образованный параллельным включением вторичных обмоток датчиков.

2. Схема ФТНП при соединении вторичных обмоток датчиков в открытый треугольник.

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

Анализ исследуемых схем показал, что наилучшими показателями обладает двухконтурная схема ФТНП, у которой в качестве рабочего принят параллельный контур, а дополнительный, предназначенный для повышения чувствительности, замкнут на емкость.

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 качества и выбор оптимального варианта.

Исследования проводились применительно к параметрам сельских сетей для значений первичных рабочих токов $I_{\text{раб}} = 40 \dots 100$ Ампер и токов замыкания $I_3 = 1 \dots 5$ Ампер.

При учете следующих допущений: а) к ФТНП подведена симметричная система первичных токов; б) датчики идентичны; в) из высших гармоник учитывается только третья.

В связи с тем, что схема фильтра симметрична, исследование данного режима работы фильтра будем проводить по двум однофазным схемам замещения, составленным для первой гармоники (режим нагрузки) и третьей гармоники (режим холостого хода), рисунок 6.

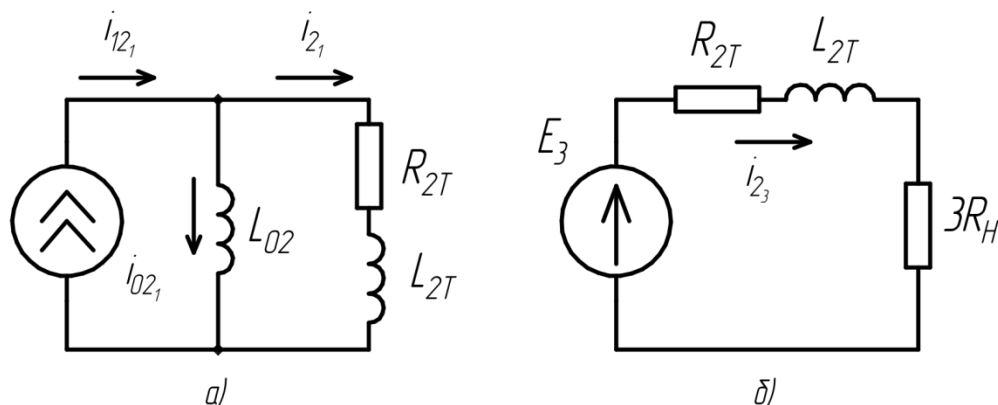


Рисунок 6 – Схемы замещения фильтров токов нулевой последовательности для симметричного режима нагрузки первичной цепи:

а – однофазная для первой гармоники; б – однофазная для третьей гармоники

Анализ проводим методом гармонического баланса при аппроксимации кривой намагничивания степенным полиномом:

$$H = \alpha B + \beta B^3; \quad (20)$$

$$B_A = B_1 \sin \omega t + B_3 \sin(3\omega t - \psi);$$

$$B_B = B_1 \sin(\omega t - 120^\circ) + B_3 \sin(3\omega t - \psi); \quad (21)$$

$$B_C = B_1 \sin(\omega t + 120^\circ) + B_3 \sin(3\omega t - \psi).$$

Уравнение для ФТНП без емкости в дополнительном контуре, позволяет определить взаимосвязь между первой и третьей гармониками магнитной индукции и соответствующие значения первичных токов:

$$I_1 = \sqrt{\frac{a_1^2 + b_1^2}{\left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 (R_{2T}^2 + \omega^2 L_{2T}^2)}}, \quad (22)$$

где: $a_1 = \omega B_1 W_2 Q - b R_{2T} - a \omega L_{2T}$; $b_1 = b \omega L_{2T} - a R_{2T}$; R_{2T} , L_{2T} – сопротивление обмоток рабочего контура фильтра; ω – угловая частота.

Среднее значение напряжения небаланса на выходе фильтра определяется:

$$U_{\text{нб.ср}} = 1,19 \omega W_2 Q B_3 \times 10^{-3}. \quad (23)$$

Приведенный метод анализа схем ФТНП дает возможность количественно оценить влияние отдельных параметров датчиков на величину небалансов. В связи с этим, уменьшения небалансов можно достичь увеличением сечения сердечников

датчиков, уменьшением длины средней магнитной линии, применение магнитных материалов с высокой магнитной проницаемостью.

Кроме того, 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 на дополнительную обмотку. Принципиальная схема ФТНП с дополнительным контуром и расчетные схемы замещения для первой и третьей гармоник в режиме симметричных первичных токов приведены на рисунке 7.

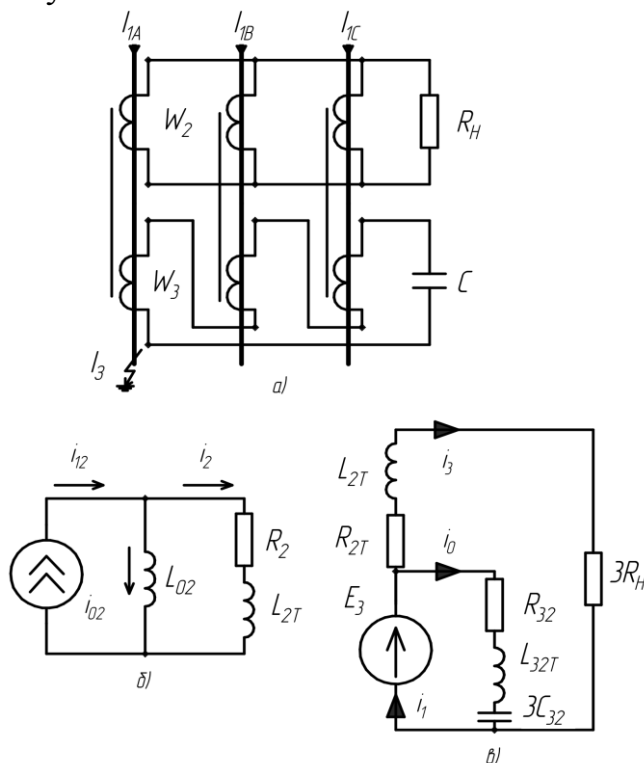


Рисунок 7 – Принципиальная схема ФТНП с дополнительным контуром (а), расчетные схемы замещения для первой (б) и третьей (в) гармоник в режиме симметричных первичных токов

Для этих условий уравнения по первой и третьей гармоникам для одной фазы рабочего и дополнительного контуров фильтра запишутся следующим образом:

$$W_2 Q \frac{dB_1}{dt} = i_{21} R_{2T} + L_{2T} \frac{di_{21}}{dt}; \quad (24)$$

$$W_2 Q \frac{dB_3}{dt} = i_3 R_{2T} + L_{2T} \frac{di_3}{dt} + 3i_3 R_H; \quad (25)$$

$$W_2 Q \frac{dB_3}{dt} = i_0 R_{32T} + L_{32T} \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{3C_{32}} \int i_0 dt, \quad (26)$$

где: R_{2T} , L_{2T} – сопротивления обмоток рабочего контура фильтра; R_{32T} , L_{32T} , C_{32} – сопротивления в цепи дополнительного контура, приведенные к виткам рабочих обмоток датчиков; i_{21} , i_3 – первая и третья гармоники вторичного тока в рабочем контуре; i_0 – ток в дополнительном контуре, приведенный к рабочему контуру.

Уравнениям (24) – (26) соответствует однофазная схема замещения ФТНП с дополнительным контуром по первой и третьей гармонике (рисунки 7б, 7в).

Из схемы замещения фильтра с дополнительным контуром для режима симметричных первичных токов (рисунок 7в) полное сопротивление по третьей гармонике равно:

$$Z_3 = \frac{(R_{2T} + 3R_H + j3X_{2T}) \left[R_{32T} + j \left(3X_{32T} - \frac{X_{C32}}{9} \right) \right]}{(R_{2T} + 3R_H + j3X_{2T}) + \left[R_{32T} + j \left(3X_{32T} - \frac{X_{C32}}{9} \right) \right]}. \quad (27)$$

Так как $R_{32T} \ll |R_{2T} + 3R_H + j3X_{2T}|;$ (28)

и если величина емкости в дополнительном контуре выбрана из условия:

$$3X_{32T} = \frac{X_{C32}}{9}; \quad (29)$$

то нагрузка фильтра по третьей гармонике будет равняться:

$$Z_K = R_{32T}. \quad (30)$$

Следует заметить, что нагрузка фильтра без контура по третьей гармонике составляет:

$$Z_0 = R_{2T} + 3R_H + j3X_{2T}. \quad (31)$$

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 (22) и (23), уровень их будет значительно ниже, так как $Z_K \ll Z_0$.

Величина емкости, обеспечивающая последовательный резонанс в дополнительном контуре по третьей гармонике, определяется в соответствии с (29) по выражению:

$$C = \frac{10^6}{27\omega X_{3T}}, \text{ мкФ} \quad (32)$$

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

Для анализа работы схемы фильтра с дополнительным контуром в режиме замыкания составим эквивалентные расчетные схемы замещения (рисунок 8).

Расчетные соотношения и величины вторичных токов нагрузки и утечки определяются по схеме замещения на рисунке 8б. Где:

$$Z_1 = \frac{(R_{2T} + jX_{2T}) [3R_{2T} + j(3X_{2T} + 3X_{02} - X_C)]}{\frac{9}{2}R_{2T} + j \left[\frac{9}{2}(X_{2T} + X_{02}) - X_C \right]}; \quad (33)$$

$$Z_2 = \frac{\frac{1}{2}(R_{2T} + jX_{2T}) [R_{2T} + j(X_{2T} + 3X_{02})]}{\frac{9}{2}R_{2T} + j \left[\frac{9}{2}(X_{2T} + X_{02}) - X_C \right]}; \quad (34)$$

$$Z_3 = \frac{\frac{1}{2} [3R_{2T} + j(3X_{2T} - X_C)] [R_{2T} + j(X_{2T} + X_{02})]}{\frac{9}{2}R_{2T} + j \left[\frac{9}{2}(X_{2T} + X_{02}) - X_C \right]}. \quad (35)$$

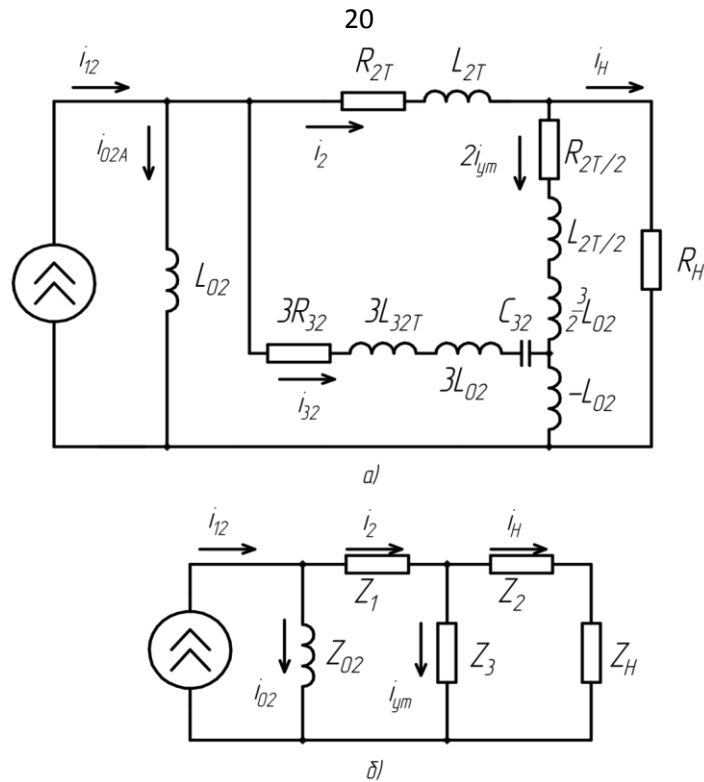


Рисунок 8 – Схемы замещения ФТНП с дополнительным контуром в режиме замыкания первичной цепи: а – принципиальная; б – расчетная

Входящее в приведенные формулы сопротивление ветви намагничивания датчика X_{02} определяется из выражения:

$$Z_{02} = \mu\omega \frac{W_2^2 Q}{\ell}, \quad (36)$$

где: $\mu_a \leq \mu \leq \mu_{\max}$ μ_a , μ_{\max} – соответственно начальная и максимальная магнитные проницаемости.

Значение первичного коммутационного тока определяется для данного случая следующим образом:

$$I_{1mk} = \frac{H_a \ell}{W_1 \frac{Z_{02a}}{Z_3}}; \quad (37)$$

где:

$$Z_3 = Z_1 + \frac{(Z_2 + R_H) Z_3}{Z_2 + Z_3 + R_H}. \quad (38)$$

Полученные выражения (33) – (38) 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 μ_a . Этот режим и является расчетным по условию чувствительности.

Из схемы замещения (рисунок 8а) может быть получено условие максимума выходного сигнала в рассматриваемом режиме, которому соответствует:

$$3X_{32} + 3X_{02} = X_{C32}. \quad (39)$$

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.

Результаты расчетов напряжения небаланса $U_{нб.ср}$ и полезного сигнала $U_{2.ср}$ фильтра, для трансформаторных датчиков приведенные на рисунке 9, имеют приемлемое совпадение с экспериментальными данными.

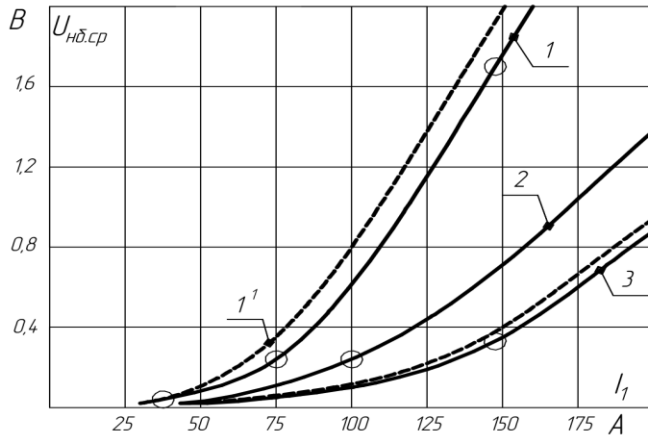


Рисунок 9а – Зависимости напряжения небалансов от первичных токов:

1 – для ФТНП с вторичными сосредоточенными обмотками (1¹-эксперимент); 2 – то же с распределенными обмотками; 3 – для ФТНП с дополнительным контуром и емкостью равной 1 мкФ

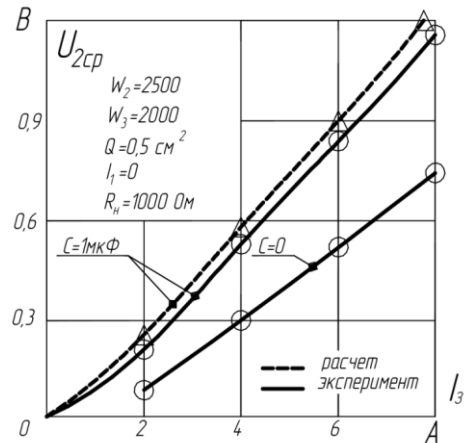


Рисунок 9б – Расчетные и экспериментальные характеристики ФТНП с дополнительным контуром в режиме холостого хода линии и замыкания на землю

Конструктивные параметры фильтра определяются из условия совмещения требования максимального повышения полезного сигнала при замыкании на землю в режиме холостого хода линии (39) и снижение небалансов на выходе фильтра в режиме рабочих токов линии (29). Совмещение этих требований достижимо при использовании двухконтурного фильтра с независимым выбором сопротивлений X_{2T} и X_{3T} .

Решаем совместно уравнения резонансов по третьей (29) и первой (39) гармоникам:

$$\begin{aligned} X_{C32} &= 27 X_{32}; \\ X_{C32} &= 3 X_{32} + 3 X_{02}. \end{aligned} \quad (40)$$

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:

$$X_{02} = 8 X_{32T}. \quad (41)$$

Из выражения (41) определяется оптимальное соотношение между витками рабочей и дополнительной обмотки датчика:

$$X_{02} = 8 X_{32T} \left(\frac{W_2}{W_3} \right)^2; \quad (42)$$

$$\frac{W_2}{W_3} = \sqrt{\frac{X_{02}}{8X_{3T}}}. \quad (43)$$

Экспериментальные исследования схемы фильтра подтвердили теоретические выводы, как показано на рисунке 9а, обеспечивается снижение небалансов при наличии дополнительного контура с емкостью и повышается полезный сигнал, рисунок 9б. Имеется величина емкости, при которой показатель фильтра «сигнал/помеха» имеет максимальное значение порядка 150...200:

$$\lambda = \frac{U_2}{U_{нб}} \times \frac{I_1}{I_{зам}}, \quad (44)$$

где: U_2 – напряжение в режиме замыкания линии; $U_{нб}$ – напряжение небаланса; I_1 , $I_{зам}$ – рабочий ток линии и ток замыкания.

В пятой главе «Оценка надежности и экономической эффективности устройства сигнализации замыканий на землю на сельских подстанциях» представлена реализация селективной сигнализации замыканий на землю, показывающая, что фильтр токов нулевой последовательности 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, сокращается в среднем на 2 часа. Показатель времени перерыва электроснабжения потребителей за год, оценивающий уровень надежности 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 7, уменьшение ущерба от недоотпуска электроэнергии за счет снижения времени поиска мест замыканий на землю, где в качестве примера рассмотрена среднестатистическая линия 10 кВ мощностью 565 кВт, получающая питание от двухтрансформаторной подстанции 35/10 кВ. Ущерб от недоотпуска электроэнергии определялся по формуле (1), среднее значение удельного ущерба равно $Y_0 = 1800$ руб./кВт·ч.

Таблица 7 – Уменьшение ущерба от недоотпуска электроэнергии, за счет снижения времени поиска мест замыканий на землю.

Система электроснабжения	P_{Σ} , кВт	$T_{ПОТР}$, ч	$W_{недоотп}$, кВт×ч	Y_0 , Руб./кВт×ч	Y , тыс. руб.	Уменьшение ущерба, тыс. 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	

Согласно данным таблицы 7, 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 поиска мест замыканий на землю.

Технико-экономическое сравнение четырех вариантов выполнения селективной сигнализации замыканий на землю сельских линий с воздушными выводами подтвердили целесообразность предложенного решения ввиду 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, примерно вдвое меньше по сравнению с вариантом, требующим установку кабельной вставки с защитой ЗЗП-1.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

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. Проведенный анализ способов выполнения селективной сигнализации замыканий на землю на существующих подстанциях с воздушными выводами из распределительных устройств 6-10 кВ показал отсутствие удовлетворительных решений.

2. Разработанная математическая модель трансформаторного датчика тока позволяет проводить анализ разнообразных режимов работы датчиков и дает результаты, имеющие хорошее совпадение с экспериментом, расхождение не более 10 %.

3. Разработанный макет упрощенных датчиков тока накладного типа для РУ 6-10 кВ унифицированного исполнения для всего диапазона требуемых первичных токов позволяют без существенных дополнительных затрат и реконструкции РУ выполнить защиты от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ. Исследования режимов работы датчиков тока показали их преимущества.

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 воздушной линии, при замыканиях в сети 10 кВ. В результате время перерыва электроснабжения потребителей сокращается.

5. Проведенные технико-экономические расчеты по выполнению селективной сигнализации на существующих сельских подстанциях 35-110/6-10 кВ с использованием разработанных устройств показали целесообразность предложенного решения ввиду незначительной стоимости, простоты исполнения и монтажа без реконструкции схемы первичной коммутации. Сметная стоимость

приблизительно вдвое меньше, по сравнению с вариантом установки кабельной вставки с устройством ЗЗП-1. Время перерыва электроснабжения потребителей за год, оценивающий уровень надежности СЭС уменьшается на два часа, что ведет к уменьшению ущерба от недоотпуска электроэнергии на 2034000 рублей, это позволяет сделать вывод о повышении надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, за счет применения ФТНП на разработанных датчиках тока.

Устройства монтируются без реконструкции РУ и существенных дополнительных затрат, отвечают предъявленным техническим требованиям и являются перспективными для применения в схемах сельского электроснабжения.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных перечнем ВАК Российской Федерации

1. Цедяков, А. А. Аппроксимация кривой намагничивания сердечника датчика тока для релейных защит распределительных сетей 6-10 кВ / А. А. Цедяков, С. И. Белов, Н. А. Стушкина // Международный технико-экономический журнал. – 2021. – № 5. – С. 41-47. – DOI 10.34286/1995-4646-2021-80-5-41-47. – 0,44 п.л. (авт. 0,37 п.л.).

Публикации в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных

1. Belov, S. I. Analysis of a computer model of a power supply system for agricultural consumers in a single-phase ground fault mode / S. I. Belov, A. A. Tsedyakov, M. M. Galkin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Smolensk, 25 января 2021 года. – Smolensk, 2021. – P. 052019. – DOI 10.1088/1755-1315/723/5/052019. – 0,31 п.л. (авт. 0,25 п.л.).

2. Belov, S. I. Simulation modeling of a two-winding three-phase voltage transformer in the MATLAB program / S. I. Belov, A. A. Tsedyakov, M. M. Galkin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : II International scientific and practical conference «Ensuring sustainable development in the context of agriculture, green energy, ecology and earth science», Smolensk, Russian Federation, 23–27 января 2022 года. Vol. 1045. – Smolensk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2022. – P. 012072. – DOI 10.1088/1755-1315/1045/1/012072. – 0,38 п.л. (авт. 0,31 п.л.).

Статьи в прочих изданиях

1. 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, Москва, 02-04 декабря 2020 года. Том ВЫПУСК 293 Часть III. – Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2021. – С. 39-42.

2. Belov, S. I. Comprehensive assessment of the technical condition of the 10 kV rural electrical network using the MATLAB software at various load factors of the 10/0.4 kV transformer substation / S. I. Belov, A. A. Tsedyakov, M. M. Galkin // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2022.