

Отчет за 2023 год по гранту РНФ «Разработка и исследование технологий для цифрового района электрических сетей (цифрового РЭС) на основе цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения», рук. Филатова Г.А.

Сведения о фактическом выполнении плана работы в отчетный период (**фактически проделанная работа, от 3 до 10 стр.**)

1. Разработка методики исследования работы цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения (ЦТТН) в условиях дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю (ОЗЗ).

1.1. Разработана методика исследования работы ЦТТН в условиях дуговых перемежающихся ОЗЗ (ДПОЗЗ) с применением методов физико-математического моделирования.

Основные задачи при воссоздании ДПОЗЗ в лабораторных условиях это:

- Создание токов и напряжений частоты, выше промышленной (порядка нескольких кГц).
- Создание прерывистого сигнала тока, соответствующего моментам горения и погасания дуги.
- Создание напряжений, кратно превышающих номинальные.

По результатам исследований делается заключение об устойчивости ЦТТН 6(10) кВ к воздействию ДПОЗЗ при последующей корректной работе на основании следующих признаков:

- визуального осмотра ЦТТН;
- измеренного сопротивления изоляции ЦТТН, сопротивления резистивного делителя и уровня кажущегося заряда частичных разрядов (при раздельном исполнении преобразователя тока и напряжения);
- измеренного сопротивления делителя напряжения и оценки уровня кажущегося заряда частичных разрядов (при комбинированном исполнении преобразователей тока и напряжения);
- оценки класса точности ЦТТН по току и напряжению после воздействия ДПОЗЗ.

В ходе разработки экспериментальной установки были проработаны несколько вариантов ее выполнения.

1.2. Вариант схемы экспериментальной установки № 1 – моделирование ОЗЗ с помощью левитирующего разрядника. Испытательная установка № 1 представляет собой трехфазный источник напряжения 6 кВ, подключенный к нему трехфазный комплект ЦТТН, электромагнитный ТН (при необходимости), физическую модель сети 6(10) кВ, имитатор ОЗЗ.

Трехфазный источник напряжения представляет собой источник бесконечной мощности (сеть) 0,4 кВ, работающий на трехфазный лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 0,4 кВ. ЛАТР подключен к обмотке низшего напряжения (НН) повышающего трансформатора 0,4/6(10) кВ. ЛАТР используется для плавной подачи напряжения на объект испытаний, что позволяет более точно управлять процессом замыкания.

Физическая модель сети представляет собой высоковольтные конденсаторы.

Имитатор ОЗЗ включает в себя следующие элементы:

- вентилятор;
- ЛАТР для управления вентилятором;
- пластинчатый разрядник;
- коммутационный аппарат с электромагнитом управления;
- систему управления коммутационным аппаратом.

В исходном положении (режим без ОЗЗ) электроды разрядника и пластина разомкнуты (пластина парит за счет потока воздуха от вентилятора). При плавном повышении напряжения с ЛАТР до значения, соответствующего напряжению пробоя в установленном промежутке между пластиной и электродами разрядника, происходит пробой промежутка и загорается дуга. При горении дуги пластина хаотично колеблется, поэтому зазор поддерживается постоянным, регулированием потока воздуха вентилятора. Имитация ДПОЗЗ (чередование момента замыкания и бестоковой паузы) происходит за счет отключения и включения цепи коммутационным аппаратом. Для этого на катушку управления импульсно подается ток, благодаря чему происходит прерывистое замыкание цепи ОЗЗ.

Проведение исследований по данной схеме предполагает наличие открытой дуги. Недостатком такой системы является то, что пластину разрядника трудно зафиксировать в одном положении. Это приводит к тому, что дугу сложно поддерживать, а в ряде случаев происходит сварка металлов пластины и электродов (металлическое замыкание).

При выполнении экспериментов, количество повторных зажиганий дуги составило не менее 20, длительность паузы после каждого погасания дуги – не менее 5 с. Длительность перемежающихся ОЗЗ при проведении экспериментов составила 5 с.

1.3. Вариант схемы экспериментальной установки № 2 – моделирование ОЗЗ и ДПОЗЗ с помощью RTDS.

В этой схеме центральным элементом проведения исследований является комплекс моделирования в режиме реального времени RTDS. Исследование устройств для электроэнергетики, например, устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), на RTDS, с формированием петли обратной связи между цифровой и аналоговой частями, называемой методом «замкнутого цикла», давно стало «стандартом» испытаний и позволяет провести множественные автоматизированные экспериментальные исследования с большим числом влияющих факторов.

Разработанная экспериментальная установка позволяет добиться уровней токов и напряжений при ДПОЗЗ, соответствующих реальным условиям эксплуатации, при этом не требует физического моделирования открытой дуги.

Было разработано несколько вариантов решений для выдачи токов и напряжений на комплект ЦТТН 6-10 кВ, отличающихся по следующим пунктам:

- различные виды повышающих трансформаторов (трехфазные трансформаторы ТЛС 0,1/10 кВ либо широкополосные лабораторные повышающие трансформаторы);
- различные виды усилителей (четырёх квадратные усилители мощности или отдельные усилители тока и напряжения);
- различные варианты исполнения ЦТТН 6-10 кВ (гальванически развязные каналы тока и напряжения или совмещенный канал измерения).

В качестве оптимальной была принята схема установки № 2 с трехфазными повышающими трансформаторами ТЛС 0,1/10 кВ, традиционными усилителями тока и напряжения PONOVO и ЦТТН 6-10 кВ с гальванически развязными каналами тока и напряжения.

1.4. Исследование проводится следующим образом:

- а. Снимаются характеристики испытуемого ЦТТН до проведения исследований.
- б. В среде RSCAD RTDS в режиме реального времени моделируются ДПОЗЗ по различным известным теориям (В. Петерсена, Дж. Петерса и Х. Слепяна, Н.Н. Белякова).
- в. Сигналы с модели сети подаются на усилители тока и напряжения PONOVO. Уровень сигналов при этом составляет: по фазному току до 40 А, по фазному напряжению до 50 В.
- г. Напряжение с усилителя PONOVO подается на повышающий трансформатор с коэффициентом трансформации $K_t=10\ 000/100$.
- д. Токи с усилителя и напряжения с повышающего трансформатора подаются на ЦТТН.
- е. Цифровой сигнал с ЦТТН по МЭК 61850 принимается RSCAD RTDS.
- ж. При необходимости также измеряются напряжения с усилителей напряжения (например, цифровым осциллографом) и токи с измерительных шунтов.
- з. Снимаются характеристики испытуемого ЦТТН после проведения исследований.
- и. Данные анализируются.

Управление моделью сети и ДПОЗЗ осуществляется в Runtime RSCAD. Выбор теории ДПОЗЗ, его длительности осуществляется оператором. Удаленность ДПОЗЗ и величина переходного сопротивления задается вручную или автоматизировано (с заданным оператором шагом и диапазоном изменения).

2. Разработка компьютерных имитационных моделей сети 6(10) кВ.

Разработаны упрощенные и комплексные модели сетей 6 и 10 кВ. Модели сети содержат следующие основные элементы:

- эквивалентная энергосистема;
- воздушная линия электропередачи (ВЛ);
- силовой трансформатор 35/10(6) кВ;
- силовой трансформатор 10(6)/0,4 кВ;
- нелинейная электрическая нагрузка;
- несимметричная электрическая нагрузка;
- модель ЦТТН (для проведения имитационного моделирования и, например, моделирования электромагнитных полей ЦТТН и последующего прогнозирования погрешностей ЦТТН в заданном режиме).

Для построения моделей сети используются статистические данные о районе электрических сетей (РЭС) европейской части России.

В упрощенной модели отсутствуют ответвления на ВЛ, а также нет электрической нагрузки. ДПОЗЗ моделируется в конце ВЛ. Контроль электрических величин осуществляется ЦТТН, установленном в начале линии. Смежная часть электрической сети 6 (10) кВ без повреждения моделируется эквивалентной ВЛ, длина которой равна суммарной длине неповрежденных ВЛ, отходящих от данного центра питания (шин 6 (10) кВ понизительной подстанции (ПС) 35/6 (10) кВ).

Разработаны модели однократных ОЗЗ и ДПОЗЗ по различным известным теориям (В. Петерсена, Дж. Петерса и Х. Слепяна, Н.Н. Белякова).

Упрощенные модели верифицированы с программным комплексом Matlab. Также результаты моделирования сравнивались с результатами, полученными другими авторами, в том числе, представленными в монографии Шуина В.А. и Гусенкова А.В. «Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ» и в книге Лихачева Ф.А. «Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов». Сравнивались амплитуды токов и напряжений при однократных ОЗЗ и ДПОЗЗ, их частный спектр, постоянные затухания.

Расчеты показали следующие частотные диапазоны разрядных и зарядных составляющих при ОЗЗ в воздушной сети РЭС:

- для разрядной составляющей 1300–16000 Гц, при изменении удаленности ОЗЗ от 0,1 до 10 км от шин ЦП;
- для зарядной составляющей 300–320 Гц, при изменении удаленности ОЗЗ от 0,1 до 10 км от шин ЦП.

Для примера, характеристики переходного процесса при ОЗЗ на модели сети 6 кВ:

- ток установившегося ОЗЗ: амплитуда $I_{уст\ ОЗЗ} = 4\text{ А}$ в RSCAD RTDS; $I_{уст\ ОЗЗ} = 4\text{ А}$ в Matlab+Simulink;
- время затухания 3U0: время затухания примерно 30 мс в RSCAD RTDS и 35 мс в Matlab+Simulink);
- максимальные уровни перенапряжений на неповрежденных фазах: 3,6Uном.ф. в RSCAD RTDS, до 3,6Uном.ф. в Matlab+Simulink при ДПОЗЗ по Петерсену.

При анализе осциллограмм при ДПОЗЗ получено, что при моделировании ДПОЗЗ по теориям Петерсена и Белякова напряжение нулевой последовательности 3U0 содержит в своем спектре большее количество четных гармонических составляющих, чем при моделировании в Matlab+Simulink. Это связано с математическим аппаратом программных комплексов, используемых методов расчета и минимальным шагом интегрирования для установленной в ИГЭУ комплектации RTDS. По уровням напряжений на неповрежденных фазах при ДПОЗЗ модели в RSCAD и Matlab совпадают. В целом, результаты моделирования процессов при ОЗЗ и ДПОЗЗ в RSCAD RTDS совпали с программным комплексом Matlab+Simulink. По результатам проведенных исследований, упрощенная модель РЭС в RSCAD RTDS принята за основную для дальнейших экспериментальных испытаний.

3. Исследование ЦТТН в условиях дуговых перемежающихся ОЗЗ.

Проведены экспериментальные исследования ЦТТН по описанной выше методике, с применением физико-математического моделирования и комплекса RTDS.

При проведении экспериментальных исследований были получены следующие численные характеристики переходных процессов при ОЗЗ:

- уровни перенапряжений на неповрежденных фазах до 18 кВ (3,6Uном.ф.);
- уровни высокочастотных составляющих токов до 40 А.

Ход экспериментальных исследований ограничивался условиями работы усилителей токов и напряжений PONOVO по нагреву. Также необходимо было принимать во внимание собственные амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики усилителей PONOVO. Поскольку в имеющемся исполнении усилители не имеют обратной связи, при обработке экспериментов нужно было учитывать не модельный сигнал с каналов усилителей, а, например, сигнал с цифрового осциллографа. Это необходимо, прежде всего, для каналов напряжения, которые нагружены на повышающий трансформатор. Для каналов тока моделируемый сигнал выдавался без погрешностей.

При анализе осциллограмм с цифрового осциллографа с высокой частотой дискретизации получено, что при переходе напряжения через ноль, и при его максимуме, искажения сигнала значительны, что определяется скоростью реакции на ступенчатые воздействия и частотными характеристиками усилителя PONOVO.

Также при анализе данных получено, что ЦТТН трансформирует сигнал практически без искажений. Было выявлено незначительное расхождение в области высоких частот (более 20 кГц), что допустимо при моделировании переходных процессов на воздушной линии с частотами разрядных составляющих до 16 кГц.

По результатам измерений, было получено, что после воздействия ДПОЗЗ основные характеристики ЦТТН не вышли за допустимые значения. А именно:

- сопротивление изоляции составило 1100 МОм (при допустимом значении не менее 1000 МОм);
- сопротивление резистивных делителей напряжения составило 15 – 15,1 МОм (при допустимых 15 МОм \pm 1%);
- уровень кажущегося заряда частичных разрядов составил менее 50 пКл (при максимально допустимом значении 50 пКл);
- измерительный канал для целей коммерческого учета электроэнергии и измерений соответствует классу точности 0,2; измерительный канал для целей релейной защиты и автоматики соответствует классу точности 3Р.

4. Разработка методики исследования работы ЦТТН совместно с цифровыми устройствами РЗА. На основе полученной ранее методики разработана методика исследования ЦТТН совместно с цифровыми устройствами РЗА. За основу взята схема экспериментальной установки № 2.

Исследование проводится следующим образом:

- а. На устройство РЗА подаются сигналы и эталонного источника SV потока по МЭК61850, соответствующие ДПОЗЗ по различным известным теориям.
- б. В среде RSCAD RTDS в режиме реального времени моделируются ДПОЗЗ по различным известным теориям (аналогичные п.1).
- в. Сигналы с модели сети подаются на усилители тока и напряжения PONOVO. Напряжение с усилителя PONOVO подается на повышающий трансформатор с коэффициентом трансформации $K_t=10\ 000/100$.
- г. Токи с усилителя и напряжения с повышающего трансформатора подаются на ЦТТН.
- д. Данные от ЦТТН по МЭК61850 передаются устройству РЗА.
- е. Цифровой сигнал с устройства РЗА принимается RSCAD RTDS.
- ж. Данные анализируются и сравниваются с полученными по п.1.

Посредством GOOSE-сообщения или дискретного сигнала в модели регистрируется факт срабатывания защиты. Проводились исследования при различном положении (удаленности от шин) места ОЗЗ и различных величинах переходного сопротивления, для ДПОЗЗ и устойчивых ОЗЗ.

5. Исследование работы ЦТТН совместно с цифровыми устройствами РЗА (имеющимися на полигоне «Цифровая подстанция»).

Исследована работа 2 устройств РЗА, содержащих функцию токовой защиты нулевой последовательности, основанной на использовании основной гармоники и на сумме высших гармоник (3, 5, 7 и 9 гармоник). Отметим, что в данной работе не рассматривались волновые устройства РЗА. Известно, что режим ДПОЗЗ является «сложным случаем» при функционировании защит от замыканий на землю (работы Шуина В.А., Шалина А.И. и др.). Защиты могут быть нечувствительными к данному виду ОЗЗ (например, при наличии большого переходного сопротивления), или сработать неселективно (например, в следствие большого броска собственного емкостного тока присоединения при внешнем ДПОЗЗ). В данном случае, не ставилось задачи оценить алгоритм работы защиты. Уставки защиты по току срабатывания задавались по методике, описанной в Стандарте организации (СТО) «Методические указания для выбора параметров настройки и срабатывания МП устройств РЗА оборудования 6-35 кВ объектов ЕНЭС», 2020 г.

В ряде случаев защита оказалась нечувствительна, но всегда работала по заданному алгоритму, и верно измеряла гармоники тока нулевой последовательности. ЦТТН не вносил искажений в работу защиты в заданном диапазоне измеряемых частот.

Получено, что применение ЦТТН позволяет уменьшить стандартные коэффициенты отстройки и коэффициенты предельных погрешностей трансформаторов тока и повысить чувствительность защит. Например, уменьшить коэффициент отстройки с 1,3 до 1,1, а коэффициент предельных погрешностей трансформаторов тока с 0,1 до 0,05.

6. Промежуточные выводы по работе. Общая оценка работы ЦТТН в условиях дугowych ОЗЗ и совместно с цифровыми устройствами РЗА.

В ходе выполнения экспериментальных исследований проведена оценка работы ЦТТН 6(10) кВ в условиях ДПОЗЗ. Разработаны модели элементов сети и самого ЦТТН.

В целом, были воссозданы электромагнитные переходные процессы, характерные для реальных ДПОЗЗ, однако лабораторные условия наложили значительные ограничения на длительность проведения экспериментов.

Предложенная схема экспериментальной установки и результаты исследований могут применяться разработчиками измерительных трансформаторов тока и напряжения (в том числе, цифровых). По результатам испытаний, выполненных на различных установках, ЦТТН выдержал воздействие электрических величин при ДПОЗЗ, не разрушаясь. Это основной показатель по воздействию повышенных напряжений при ДПОЗЗ. Замеренный после проведения исследований уровень кажущихся заряда частичных разрядов не был превышен. По метрологическим характеристикам ЦТТН также соответствовал тем, что указаны в его паспорте.

По такому критерию, как точность воспроизведения сигнала, наблюдалось увеличение погрешности ЦТТН при высоких частотах первичного сигнала (порядка 20 кГц). Данный показатель лучше, чем у традиционных измерителей [например, для характеристик, представленные в кандидатской диссертации Филатовой Г.А.], а с учетом того, что ЦТТН не вступает в феррорезонансные явления, которые могут возникнуть вследствие ОЗЗ, дает существенные преимущества при измерении токов и напряжений.

Полученные осциллограммы и совместные испытания с цифровыми устройствами релейной защиты от ОЗЗ позволяют сказать, что ЦТТН может использоваться в качестве источника сигнала для релейной защиты, основанной на измерении сигналов низкой частоты (в том числе, до 9 гармоники). Кроме того, применение ЦТТН позволяет уменьшить стандартные коэффициенты отстройки и коэффициенты предельных погрешностей трансформаторов тока и повысить чувствительность защит.

7. Представление результатов работы на Международных выставках и конференциях (не менее 2-х). Результаты работы представлены на 5 конференциях.

8. Публикация не менее 1 работы в изданиях, индексируемых в базах данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus).
Опубликовано 4 работы в изданиях, индексируемых в БД Scopus.

Все планируемые в отчетный период работы выполнены полностью:

да

Сведения о достигнутых конкретных научных результатах в отчетном периоде *(от 1 до 5 стр.)*

1. Разработана методика исследования работы ЦТТН в условиях дуговых перемежающихся ОЗЗ. Разработанная методика позволяет проводить типовые экспериментальные исследования работы ЦТТН в условиях, максимально приближенных к реальным электроустановкам. Разработанная методика исключает физическое моделирование открытой дуги, позволяет достаточно точно задавать закон изменения электрических величин при ДПОЗЗ, т.е. сделать эксперимент более контролируемым. Кроме того, применение комплекса моделирования в режиме реального времени RTDS позволяет автоматизировать проведение исследований, например, при задании автоматического изменения удаленности ОЗЗ от шин и величины переходного сопротивления в месте ОЗЗ. В методике приведены критерии оценки состояния ЦТТН после проведения экспериментальных исследований.

Разработанная методика имеет практическую ценность, и может применяться разработчиками измерительных трансформаторов тока и напряжения (в том числе, цифровых).

2. Разработаны компьютерные имитационные модели сети 6(10) кВ.

Разработанные в программной среде RSCAD комплекса моделирования в режиме реального времени RTDS модели сетей 6 и 10 кВ верифицированы с программным комплексом Matlab+Simulink и результатами исследований других авторов. Модели позволяют воспроизводить ДПОЗЗ по различным теориям, с различными параметрами возникновения ДПОЗЗ. Модели содержат основные объекты РЭС (системы, линии электропередачи, силовые трансформаторы, нагрузку, сам ЦТТН).

Имитационная модель ЦТТН позволяет проводить расчет электромагнитных полей ЦТТН для последующей оценки его точности, в том числе, при моделировании различных вариантах конструкции. Расчетные параметры модели линии электропередачи также верифицированы с расчетом в Simulink и «ручным» расчетом по методике, рассмотренной в «Руководящих указаниях по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования».

3. Проведены исследования ЦТТН в условиях дуговых перемежающихся ОЗЗ. Результаты исследования позволяют:

- оценить точность воспроизведения переходных процессов при ДПОЗЗ на разработанной установке.
- оценить работу самого ЦТТН в данных условиях.

Получено, что экспериментальная установка №2 позволяет воспроизвести переходные процессы при ОЗЗ и получить сигналы тока и напряжения, характерные для данного процесса.

Получены осциллограммы переходных процессов при ДПОЗЗ в воздушной сети РЭС.

По результатам измерений, было получено, что после воздействия ДПОЗЗ основные характеристики ЦТТН не вышли за допустимые значения. А именно:

– сопротивление изоляции составило 1100 МОм (при допустимом значении не менее 1000 МОм);

– сопротивление резистивных делителей напряжения составило 15 – 15,1 МОм (при допустимых 15 МОм \pm 1%);

– уровень кажущегося заряда частичных разрядов составил менее 50 пКл (при максимально допустимом значении 50 пКл);

– измерительный канал для целей коммерческого учета электроэнергии и измерений соответствует классу точности 0,2; измерительный канал для целей релейной защиты и автоматики соответствует классу точности 3Р.

4. Разработана методика исследования работы ЦТТН совместно с цифровыми устройствами РЗА.

Методика позволяет проводить типовые исследования совместной работы ЦТТН и цифровых устройств релейной защиты и сделать выводы о возможностях расширения области применения ЦТТН, применении ЦТТН в системах автоматизации РЭС. Применение комплекса моделирования в режиме реального времени RTDS позволяет автоматизировать проведение исследований, например, при задании автоматического изменения удаленности ОЗЗ от шин и величины переходного сопротивления в месте ОЗЗ.

5. Исследована работа ЦТТН совместно с цифровыми устройствами РЗА (имеющимися на полигоне «Цифровая подстанция»).

Получены осциллограммы аналоговых и цифровых сигналов токов и напряжений, а также запись дискретных сигналов срабатывания релейной защиты от ОЗЗ. Получено, что ЦТТН являются перспективными источниками сигналов для цифровых устройств РЗА, например, основанных на использовании гармоник первичного тока от 1 до 9.

Применение ЦТТН позволяет уменьшить стандартные коэффициенты отстройки и коэффициенты предельных погрешностей трансформаторов тока и повысить чувствительность защит. Например, по результатам оценки точности работы, в том числе, в переходных режимах, можно сделать вывод, что при расчете уставок коэффициент отстройки может быть уменьшен с 1,3 до 1,1, а коэффициент предельных погрешностей трансформаторов тока с 0,1 до 0,05.

6. Приведена общая оценка работы ЦТТН в условиях дуговых ОЗЗ и совместно с цифровыми устройствами РЗА.

Получено, что в рамках заданных длительностей протекания переходных процессов, ЦТТН выдерживает наличие ДПОЗЗ, не разрушаясь. При этом ЦТТН может использоваться для целей РЗА от ОЗЗ. Актуальными в этом случае являются преимущества ЦТТН:

– ЦТТН не вступают в феррорезонансные явления, которые являются частыми последствиями ОЗЗ;

– ЦТТН имеют лучшие частотные характеристики, по сравнению с традиционными преобразователями.

7. Опубликованы 4 статьи, рецензируемые в Scopus и 2, рецензируемые в РИНЦ. 1 статья отправлена на рецензирование в периодический журнал RSCI «Вестник ЮРГТУ» (задел на будущий год). На данный момент исправлены замечания от рецензента, публикация ожидается в следующем году.

8. Результаты исследований представлены на 5 научно-технических конференциях:

– Международная молодежная научная конференция Тинчуринские чтения – 2023 «Энергетика и цифровая трансформация» (апрель 2023, г. Казань);

– Международная научно-техническая конференция «Проминжиниринг-2023» (май 2023, г. Сочи);

– Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро и теплотехнологии» (XXII Бенардосовские чтения) (май 2023, г. Иваново);

– Международная научно-техническая конференция "Автоматизация" (сентябрь 2023, г. Сочи);

– Международная научно-техническая конференция "Электротехнические комплексы и системы" (октябрь 2023, г. Магнитогорск).

9. Результаты исследований составляют часть научно-квалификационной работы (НКР) аспирантки ИГЭУ, участницы Соглашения Кузьминой Н.В. В сентябре 2023 года состоялась успешная защита НКР с оценкой «отлично».