

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

1. Верифицированные имитационные модели ЛЭП классов напряжения 110-750 кВ различной конфигурации (имеющих отпайки, связанных взаимоиндукцией и др.) для проведения исследований.

1.1. Имитационные модели с двухцепными ЛЭП без отпаек и с одиночной отпайкой, а также с возможностью задания взаимоиндукции.

Расхождение параметров установившихся и переходных режимов, воспроизводимых на разработанных имитационных моделях, не превысило 1% относительно параметров, приведенных в СТО 56947007-29.120.70.241-2017 «Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА».

1.2. Имитационная модель реальной ЛЭП 330 кВ «Ленинградская – Центральная».

Расхождение параметров аварийного режима, воспроизводимого на разработанной модели, не превысило 5% относительно соответствующих параметров по осциллограммам реального КЗ.

2. Верифицированные имитационные математические модели электромагнитных и цифровых трансформаторов.

2.1. Имитационные математические модели электромагнитных ТТ с ПХН, СХН, НХН, на основе ВАХ и средней кривой намагничивания.

Погрешность имитационных математических моделей ТТ на основе ВАХ и средней кривой намагничивания не превысила 1% (по действующим значениям), 60 угловых минут (по углу) и 10% (по мгновенным значениям) в переходных режимах с насыщением магнитопровода ТТ, что является допустимым для проводимых исследований. Погрешности имитационных математических моделей ТТ с ПХН, СХН и НХН не превысили 10% по действующему значению, что соответствует принятым допущениям при их разработке.

Использование конкретной имитационной математической модели ТТ зависит от наличия исходных данных для неё. Имитационная математическая модель ТТ на основе средней кривой намагничивания использует конструктивные данные ТТ, имеющиеся только у производителя данного оборудования. Преимуществом разработанной имитационной математической модели ТТ на основе ВАХ является то, что она использует данные, имеющиеся у эксплуатирующего персонала энергообъектов (паспортные данные и ВАХ), и имеет высокую точность моделирования переходных процессов при насыщении магнитопровода ТТ. Имитационные математические модели ТТ с ПХН и НХН используют только паспортные данные, а ТТ с СХН дополнительно данные по ВАХ.

2.2. Имитационные математические модели цифровых ТТ с различными нетрадиционными первичными преобразователями (катушка Роговского, малогабаритный электромагнитный трансформатор, безиндуктивный шунт).

2.3. Имитационная математическая модель электромагнитного трансформатора напряжения с учетом кривой намагничивания.

2.4. Имитационная математическая модель цифрового трансформатора напряжения с резистивным делителем.

Различные имитационные модели ТТ и ТН предназначены для исследования влияния их характеристик на величину зоны обхода ЛЭП и разработки методов, уменьшающих данное влияние.

3. Результаты, полученные при анализе влияния различных факторов на величину зоны обхода ЛЭП.

3.1. Верифицированные методы одностороннего и двустороннего ОМП (13 выражений) на различных принципах для выполнения исследований, реализованные в программном коде на языке «MATLAB» (в дополнение к реализованным ранее в рамках проекта РНФ № 21-79-00122).

3.2. Модели цифровых фильтров УСВИ классов «М» и «Р» по стандарту IEC/IEEE 60255-118-1:2018. Модели реализованы в виде файлов-функций на языке «MATLAB», а их верификация осуществлена посредством сравнения выходных данных с соответствующими результатами, выданными функцией УСВИ в составе ПАК «RTDS». Формы кривых, отражающих динамику

изменения векторов, оказались идентичными; результаты сравнения опубликованы в издании уровня «Scopus» (DOI: 10.1109/RPA59835.2023.10319869). Разработанные модели цифровых фильтров УСВИ позволяют автоматизировать исследования в рамках «замкнутого цикла» (например, «MATLAB») без необходимости применения реальных УСВИ, что было использовано на этапах анализа влияния различных факторов на величину зоны обхода ЛЭП, исследования новых методов обоснованного формирования зоны обхода ЛЭП и тестирования разработанных алгоритмов-селекторов кадров данных СВИ.

3.3. Показано, что один и тот же искажающий замер фактор оказывает различное влияние на погрешность различных методов ОМП. В связи с этим, при формировании зоны обхода ЛЭП необходимо учитывать методическую погрешность конкретного метода ОМП.

Основными факторами, оказывающими влияние на величину зоны обхода ЛЭП при использовании двусторонних методов ОМП, являются:

- неточность задания параметров ЛЭП (сопротивлений прямой и, особенно, нулевой последовательности, а также длины линии);
- влияние насыщения измерительного ТТ при КЗ;
- влияние мгновенного значения напряжения в месте КЗ (угол возникновения КЗ), определяющего характер последующего переходного процесса (в частности, степень выраженности свободной апериодической составляющей тока КЗ);
- наличие ответвлений на ЛЭП;
- отсутствие транспозиции или неполный цикл транспозиции;
- наличие взаимоиндукции с другими ЛЭП.

Основными факторами, оказывающими влияние на величину зоны обхода ЛЭП при использовании односторонних методов ОМП (кроме описанных выше), являются:

- неточность задания параметров ЛЭП (в первую очередь – сопротивления нулевой последовательности);
- изменение степени загрузки ЛЭП;
- неопределенность и неустойчивость величины переходного сопротивления в месте КЗ.

4. Новые методы обоснованного формирования зоны обхода ЛЭП.

4.1. Новый метод формирования зоны обхода ЛЭП на основе анализа составляющих погрешностей ОМП (методической, инструментальной и погрешности моделирования).

4.2. Новый метод формирования зоны обхода ЛЭП на основе идентификации влияющих на замер факторов по осциллограммам нормального режима и КЗ.

4.3. Результаты исследований новых методов формирования зоны обхода.

4.3.1. Зона обхода ЛЭП зависит от используемого метода ОМП и изменяется в диапазоне от 1,6% до 20% от длины ЛЭП.

4.3.2. Существенное расширение зоны обхода ЛЭП происходит при насыщении ТТ. При отсутствии насыщения ТТ расширение зоны обхода ЛЭП из-за инструментальной погрешности не превышает 1%.

4.3.3. Неопределенность параметров линии существенно увеличивает зону обхода ЛЭП. Актуализация параметров ЛЭП позволяет в общем случае сократить формируемую зону обхода ЛЭП на 20% при использовании одностороннего метода ОМП. В случае использования двустороннего метода ОМП и актуализированных параметров ЛЭП зона обхода значительно сокращается и может достигать <1% от длины ЛЭП, что сопоставимо с протяженностью её нескольких пролетов с доверительным интервалом нахождения места КЗ 95%.

4.3.4. Показана необходимость в использовании уточненных удельных параметров ЛЭП, что наиболее существенным образом влияет на сокращение зоны обхода. Использование идеального первичного измерительного преобразователя (оптического трансформатора, преобразователя на магнитотранзисторных датчиках или преобразователя, выполненного на датчиках Холла, а также катушки Роговского с интегрированием сигнала во временной области или частотной области), позволяет минимизировать инструментальную погрешность методов ОМП за счет нивелирования эффектов насыщения и остаточной намагниченности, в сравнении с малогабаритным электромагнитным трансформатором тока.

4.3.5. Формируемая зона обхода ЛЭП у большей части исследуемых методов ОМП при использовании электромагнитных измерительных трансформаторов тока сопоставима с зоной обхода 5-15% от длины ЛЭП, указанной в действующей НТД (СТО 56947007-29.240.55.159-2013). Использование иных первичных преобразователей (оптического трансформатора, катушки Роговского с интегрированием вторичного сигнала) в совокупности с точными методами ОМП, не подверженными воздействию влияющих на замер факторов, при первом

или втором методе формирования зоны обхода ЛЭП дает существенное (до 3 раз при сравнении с нижней границей по НТД) сокращение зоны обхода. В сравнительном анализе зона обхода может быть сопоставима с протяженностью нескольких пролетов ЛЭП.

4.3.6. Результаты исследования первого разработанного метода формирования минимально возможной обоснованной зоны обхода опубликованы в статье, проиндексированной в базе данных Scopus (doi: 10.1109/REEPE60449.2024.10479762).

5. Результаты, полученные при разработке алгоритма автоматического выбора кадра данных измерений, зафиксированных во время электромагнитного переходного процесса, сопровождающего короткое замыкание.

5.1. Сценарии КЗ для имитационной модели ВЛ 750 кВ, реализованной в «MATLAB»/«Simulink» и верифицированной с соответствующей математической моделью, имеющейся в составе файлов «по умолчанию» специализированного программного комплекса моделирования ПП «АТР»/«АТРDraw». Путём многократного автоматического запуска модели «Simulink» получен банк осциллограмм ПП, который в рамках данной части исследования использовался на этапе тестирования алгоритма-селектора кадра данных СВИ, однако может впоследствии применяться в рамках других задач реализуемого проекта РНФ и аналогичных проектов. Банк осциллограмм содержит сигналы токов и напряжений всех фаз при однофазных КЗ в различных точках моделируемой ВЛ, при различных повреждённых фазах, разной величине переходного сопротивления, различной продолжительности КЗ. Общее количество отдельных сценариев – 180, при этом для каждого ПП отдельно моделировался также «установившийся режим КЗ», данные которого применялись при анализе работоспособности алгоритма-селектора кадра данных СВИ.

5.2. Алгоритмы-селекторы кадра данных СВИ при КЗ, функционирующие на уровне КСВД. Все разработанные формулировки имеют схожий принцип действия, однако различаются количественными критериями, на основании которых осуществляется выбор кадра данных СВИ (абсолютное и относительное изменение действующих значений векторов токов; абсолютное и относительное изменение значений расчётной активной мощности и, при дополнительном учёте, расчётной реактивной мощности; относительное изменение векторов токов и напряжений; относительное изменение комплексного значения вектора сопротивления (действительной и мнимой составляющей, абсолютного значения)).

5.3. Реализованные в программном коде на языке «MATLAB» в виде файлов-функций и протестированные на модельных данных алгоритмы-селекторы кадра данных СВИ при КЗ. Для наибольшей объективности результатов тестирования входными данными алгоритмов, помимо кадров данных СВИ, являлись метки времени начала и конца КЗ, а также информация о повреждённых фазах. В качестве наиболее перспективных определены алгоритмы, ориентирующиеся на минимальное совокупное приращение (в относительных единицах) векторов тока и напряжения при КЗ, на минимальное приращение действительной части комплексного вектора сопротивления по концам линии, на минимальное приращение мнимой части комплексного вектора сопротивления по концам линии, на результат ОМП при минимальном приращении относительно длины ЛЭП.

5.4. Результаты комплексного тестирования выбранных алгоритмов-селекторов кадра данных СВИ – с использованием как модельных данных (ВЛ 750 кВ), так и реальных архивов СВИ (ВЛ 500 кВ) для множества различных КЗ. В абсолютном большинстве случаев разработанные алгоритмы выбирают кадр данных СВИ, подстановка которого в наиболее точные выражения ОМП обеспечивает уровень погрешности, соответствующий отраслевому стандарту СТО 56947007.29.240.55.224-2016, даже при использовании УСВИ класса «М» и частоты выдачи векторов («frames per second», или FPS), равной 50 Гц. При использовании менее инерционных УСВИ класса «Р» и той же FPS, количество таких случаев достигает практически 100 %. Таким образом, разработанные алгоритмы-селекторы эффективны и могут использоваться для тестирования в рамках пилотного проекта по реализации ОМП на базе СВИ.

6. Результаты, полученные при разработке алгоритма использования синхронизированных векторных измерений с других элементов электроэнергетической системы, смежных по отношению к контролируемой ЛЭП, для решения задачи определения места повреждения.

6.1. Концепция централизованного ОМП, основанная на имитационной модели участка электрической сети и централизованном сборе режимных параметров (за счёт использования УСВИ, КСВД и централизованных РАС энергообъектов).

6.2. Имитационная модель участка ЭЭС, дополненная моделями ТТ и УСВИ классов «М» и «Р».

6.3. Результаты проверки концепции при различных случаях КЗ в части использования замеров со смежных элементов сети при насыщении ТТ. Выяснено, что насыщение магнитопроводов ТТ может приводить к существенному увеличению погрешности односторонних и двусторонних методов ОМП (в выполненных экспериментах – от 10 % до 50 % длины ВЛ), тогда как замена искажённых векторов на соответствующие вектора, полученные со смежных элементов ЭЭС, позволяет уменьшить погрешность методов ОМП вплоть до значений, полученных по данным «идеальных» ТТ (без насыщения). При этом требуемое время существования КЗ для достижения приемлемой точности ОМП при использовании двусторонних методов и процедуры «восстановления» векторов (детектирования и замены искажённых СВИ) – меньше по сравнению с применением односторонних методов ОМП, использующих СВИ без насыщения с противоположного конца повреждённой ВЛ.

6.4. Основные результаты исследования опубликованы в издании уровня «Scopus» (DOI: 10.1109/RPA59835.2023.10319855).

7. Опубликовано четыре статьи, одна из них в журнале с квартилем Q1.