

ОТЗЫВ

официального оппонента Зюзева Анатолия Михайловича на диссертацию соискателя Одинаева Ильи Назримадовича по теме «Снижение погрешности трансформаторов тока в режиме насыщения для цифровых устройств защиты и автоматики», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3.

Электроэнергетика.

Актуальность. Трансформаторы тока (ТТ), работающие по электромагнитным принципам, являются одним из основных источников информации, с помощью использования которых реализуются условия алгоритмов системы релейной защиты и автоматизации (РЗА). Конструкция магнитопроводов, применяемых в электроэнергетической системе России ТТ, в основном выполнена без воздушного зазора. Вследствие этого при коротких замыканиях (КЗ) магнитопроводы указанных ТТ могут насыщаться, что, очевидно, приводит к резкому росту погрешности измеряемой величины. В результате этого нарушается корректность функционирования системы РЗА, в частности, происходит замедление в срабатывании резервных защит из-за активации их вспомогательных ступеней и неселективное срабатывание основных защит. В качестве примера может служить авария на Ростовской атомной электростанции в 2014 году. Она была вызвана насыщением ТТ, в результате которого произошло ложное срабатывание защиты с последующим отделением объединенной энергосистемы Юга от объединенной энергосистемы Центра. Все это подчеркивает актуальность выбранной Одинаевым И.Н. темы исследований.

Диссертационная работа Одинаева И.Н. направлена на решение указанной проблематики.

Научная новизна заключается в следующем:

- 1) в результате анализа литературы по теме исследования показаны границы применимости существующих методов восстановления тока: чувствительность к зашумлённым измерениям, к начальной индукции в магнитопроводе ТТ и к режиму сети, сопровождающемуся насыщением ТТ;
- 2) предложена модификация метода детекции момента насыщения ТТ;
- 3) усовершенствован метод восстановления тока на основе метода наименьших квадратов с учетом введения весовых коэффициентов для «хороших», «подозрительных» и «плохих» измерений;
- 4) разработана модификация комбинированного метода с учетом оценки начальной индукции путем решения оптимизационной задачи.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа Одинаева И.Н. «Снижение погрешности трансформаторов тока в режиме насыщения для цифровых устройств защиты и автоматики» является законченной научно-исследовательской работой и соответствует паспорту научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика, а именно пунктам:

- Разработка и обоснование алгоритмов и принципов действия устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики для распознавания повреждений,

определения мест и параметров повреждающих (возмущающих) воздействий в электрических сетях.

- Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике.

Положения, выносимые на защиту. Соискателем сформулированы и вынесены на защиту следующие основные положения:

1. Границы применимости ранее разработанных методов компенсации погрешности ТТ в режиме насыщения магнитопровода.
2. Результаты проверки разработанного метода детекции момента возникновения насыщения относительно зашумленным измерениям и начальной индукции.
3. Алгоритм выявления момента возникновения насыщения ТТ с последующим восстановлением тока на основе комбинированного метода и метода наименьших квадратов с учетом весовых коэффициентов.
4. Снижение погрешности ТТ на основе расчётных значений тока по отношению к его измеренным значениям.

Теоретическая значимость работы заключается в анализе существующих методов детекции насыщения ТТ и восстановления «плохих» токовых измерений путем их замены расчётными значениями.

Практическая значимость работы заключается в выявлении границы применимости существующих методов детекции насыщения ТТ и восстановления тока; разработке модификации метода детекции момента возникновения насыщения ТТ; усовершенствовании метода восстановления тока на основе метода наименьших квадратов с учетом весовых коэффициентов для разных типов измерений; разработке модификации комбинированного метода с учетом оценки начальной индукции в магнитопроводе ТТ.

Методы и методология исследования. В исследовании применены методы математического моделирования, математического анализа и математической статистики. Анализ погрешностей, как существующих методов восстановления тока, так и предложенных, выполнялся на основе методов статистики и метрологии. Расчеты проводились на основе использования программного комплекса Matlab / Simulink.

Личный вклад автора, судя по публикациям, заключается в теоретическом исследовании упомянутых задач с проведением вычислительных экспериментов, разработке программы компенсации погрешности измерений на основе методов прогнозирования с учётом параметров магнитной цепи ТТ.

Апробация работы. Основные положения настоящей работы докладывались на научных семинарах кафедры "Автоматизированные электрические системы" УралЭНИН УрФУ, Екатеринбург, в период с 2017 по 2021 год, а также на 4-х конференциях, в том числе:

- 1) Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти проф. Данилова Н. И. (1945-2015) - Даниловские чтения, Екатеринбург - 2019, Екатеринбург - 2020;
- 2) Proceedings of the 2nd 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2020, Moscow, Russia 2020;

3) 19th International Conference on Renewable Energies and Power Quality, (ICREPQ'21), Almeria, Spain, 2021.

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 7 работ, в том числе в трех изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных WoS и Scopus, и в двух журналах из списка ВАК РФ.

Степень обоснованности основных положений, выводов и заключений. Работа включает в себя введение, 4 главы, заключение и библиографический список из 101 наименования, изложенных на 134 страницах текста, содержит 43 рисунка и 8 таблиц.

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации проведен анализ литературы по теме исследования. Выявлена степень проработанности темы. Показано, что задача компенсации погрешности ТТ, как правило, решается в два этапа – детекция момента возникновения насыщения ТТ и восстановление тока. Приведена систематизация методов восстановления тока и показано, что их условно можно разделить на группы:

- 1) восстановление путем прогнозирования временных рядов измеренного тока;
- 2) восстановление на основе параметров кривой намагничивания ТТ;
- 3) восстановление путем комбинации первых двух групп методов;
- 4) восстановление на основе применения методов нейронных сетей.

Дается численная оценка упомянутых методов восстановления тока на основе их программной реализации в среде Matlab. Показано, что методы прогнозирования чувствительны к зашумленным измерениям, а методы на основе использования параметров кривой намагничивания ТТ – к остаточной намагнченности. Методы использования искусственных нейронных сетей чувствительны к изменениям режима сети, а комбинированные методы – к зашумлению.

Во второй главе дается детальный анализ методов детекции насыщения ТТ. В результате выявлено, что их можно разбить на группы:

- 1) детекция насыщения на основе методов математического анализа;
- 2) детекция насыщения путем статистической обработки данных.

Описано, что методы детекции насыщения ТТ, разработанные на основе математического анализа, по быстродействию лидируют, однако чувствительны к шумам в измерениях. Методы второй группы являются робастными к зашумленным измерениям, однако имеют задержку и они указывают на наличие/отсутствие насыщения ТТ в рамках периода/полупериода, а не на момент возникновения насыщения.

Предложена модификация метода детекции насыщения ТТ на основе контроля магнитной индукции (КМИ). Показано, что метод КМИ обладает высокой устойчивостью к шуму в измерениях и к остаточной индукции в магнитопроводе ТТ.

Третья глава посвящена разработке модификации способа восстановления тока на основе взвешенного метода наименьших квадратов. Весовые коэффициенты в методе наименьших квадратов позволяют повысить его устойчивость к шуму в измерениях и к разнородности режима. Приведен усовершенствованный комбинированный метод, в котором

оценка остаточной намагниченности проводится путем решения нелинейной оптимизационной задачи.

В последней (четвёртой) главе приведены результаты вычислительных экспериментов. Проверка модифицированных методов восстановления сигнала первичного тока ТТ на устойчивость проводилась к таким факторам, как шум в измерениях, вариация апериодической составляющей тока КЗ, остаточная намагниченность, отклонение нагрузки ТТ от номинального значения и вариация степени насыщения магнитопровода, а также отклонение параметров кривой намагничивания ТТ.

В заключении описаны основные результаты диссертационной работы, связанные со снижением погрешности на выходе алгоритмов восстановления сигнала первичного тока ТТ на основе взвешенного метода наименьших квадратов и комбинированного метода. Приведен результат оценки быстродействия алгоритмов и перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

В приложениях к диссертации приведены основные параметры модели ТТ на основе теории Jiles-Atherton, в которой изменение магнитной индукции происходит по петле гистерезиса (со случайными восходящей и нисходящей траекториями). Приведены результаты проведенных вычислительных экспериментов с использования программно-аппаратного комплекса реального времени.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, опубликованные статьи в полной мере отражают основные положения и результаты диссертационного исследования.

Вопросы и замечания

1. Стр.12: «Для демонстрации влияния указанных факторов на рисунках 1-3 показаны усредненные на интервале моделирования КЗ погрешности ТТ. Эксперименты проводились на основе математической модели ТТ, в которой были заложены параметры ТТ типа ТФМД-110М.» Откуда и кем получены эти результаты?
2. Стр.12: « λ – магнитная индукция ТТ». Почему в обозначении не использовано В?
3. Стр.12: «Основными факторами, негативно влияющими на погрешности ТТ, являются остаточная индукция λ_0 , наличие и уровень и скорость затухания апериодической составляющей T_1 КЗ, угол и степень вторичной нагрузки ТТ R_h и x_h соответственно [9]». В [9] этого обнаружить не удалось?!:
4. Стр.90: «В ходе настоящего вычислительного эксперимента проверялась чувствительность методов КМ и ВМНК к скорости затухания апериодической составляющей тока КЗ. Скорость затухания была задана $T_1 = 0,1$ с.» Почему выделили «скорость затухания апериодической составляющей тока КЗ», и как исследовали чувствительность, не меняя T_1 !?
5. Стр.93 Таблица 7 – «Результат работы КМ и ВМНК при зашумлении измерений» – какой вариант испытаний поясняет эта таблица?
6. Стр.95 «Диапазон отклонения в $\pm 75\%$ выбран для того, чтобы «покрыть» ширину петли гистерезиса в магнитопроводе ТТ!. Пояснить эти 75% ?
7. Стр.102 «Это вызвано тем, что при работе алгоритмов происходит выделение памяти на электронно-вычислительной машине, от чего зависит скорость работы

алгоритмов. Т.е. выделенная на n-м эксперименте память распространяется на (n+1)-й эксперимент.» Весьма спорное утверждение!

8. Стр.123 «Тестовая модель для проведения испытаний с помощью использования ПАК РВ.! Стоило раскрыть более подробно, пояснив разделение задач на аппаратную и программную (реального времени) части!
9. Некорректные выражения, обозначения: «наклон магнитной индукции»; стр.100 «разрыв происходит при изменении индукции от положительного полупериода к отрицательному».

Сказанное никак не снижает качество и оригинальность подхода Одинаева И.Н. к решению задачи компенсации погрешности ТТ в режиме насыщения.

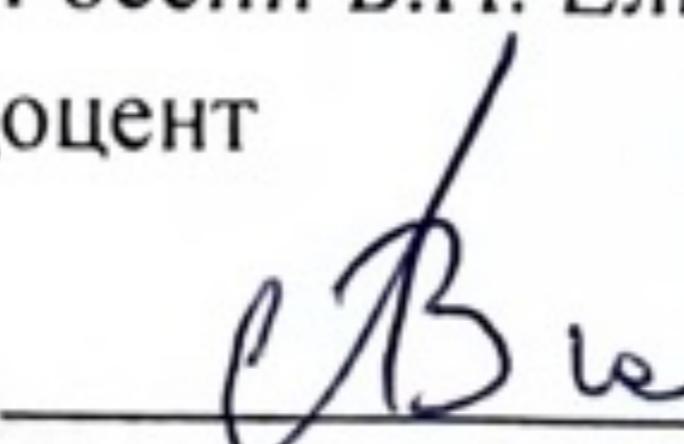
Общая оценка работы

Анализ содержания диссертации Одинаева И.Н. показывает, что работа написана логически последовательно, корректным с научной и технической точки зрения языком, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора в науку и соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «УрФУ», в том числе п. 9, 10 и 14.

Оценивая уровень работы в целом, считаю, что диссертация Одинаева И. Н. «Снижение погрешности трансформаторов тока в режиме насыщения для цифровых устройств защиты и автоматики», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой и вносит существенный вклад в решение важной научно-технической задачи улучшения качества функционирования систем РЗА, что способствует повышению надежности систем электроснабжения, работа соответствует паспорту научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика, а её автор – Одинаев Исмоил Назримадович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3. Электроэнергетика.

Официальный оппонент:

профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского энергетического института
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
доктор технических наук, доцент

 Зюзев Анатолий Михайлович

« 8 » 11 2022 г.

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, УрФУ, УралЭНИН
кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»,
Тел. 8(343) 357-46-46, e-mail: a.m.zyuzev@urgi.ru

ПОДПИСЬ 
ЗАВЕРЯЮ.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
МОРОЗОВА В.А.

