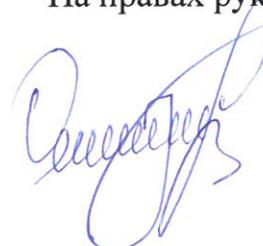


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



ОДИНАЕВ Исмоил Назримадович

**Снижение погрешности трансформаторов тока в режиме насыщения для
цифровых устройств защиты и автоматики**

2.4.3. Электроэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные электрические системы» Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Паздерин Андрей Владимирович

Официальные оппоненты:

Кужиков Станислав Лукьянович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск, профессор кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы»;

Зюзов Анатолий Михайлович, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина», профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок»;

Федорова Светлана Владимировна, кандидат технических наук, доцент, Негосударственное частное образовательное учреждение высшего образования «Технический университет УГМК», г. Верхняя Пышма, заведующий кафедрой Энергетики

Защита состоится 22 ноября 2022 года в 11:00 на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.10.26 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»: <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=3840>.

Автореферат разослан « » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Самойленко Владислав Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ликвидация аварийных режимов работы в электрических сетях осуществляется за счет устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), подключаемых к измерительным трансформаторам тока (ТТ) и напряжения. В Единой энергетической системе (ЕЭС) России в основном применяются ТТ, работающие по электромагнитному принципу. Их отличительной чертой является замкнутая магнитная цепь (параметры класса точности Р), поэтому в следующих случаях возникает риск насыщения: 1) при устойчивом коротком замыкании (КЗ) с последующим срабатыванием автоматического повторного включения может возникнуть остаточная индукция в магнитопроводе ТТ; 2) при КЗ, сопровождающемся большой апериодической составляющей. В результате погрешность вторичного тока может существенно превысить предельно допустимое значение, в следствие чего возможна неправильная работа устройств РЗА.

Влияние погрешности ТТ при неглубоких насыщениях на корректность функционирования защит, работающих по дифференциальному принципу, компенсируется тормозными характеристиками. При глубоком насыщении ТТ в дифференциальных защитах используется дополнительное торможение. Другим мероприятием повышения устойчивости защит при насыщении ТТ является ужесточение требований к выбору коэффициента трансформации ТТ, снижение уровня вторичной нагрузки и «завышение» напряжения точки изгиба на вольтамперной характеристике. Однако на практике все эти требования соблюдаются не в полной мере, что вызывает некорректное функционирование систем РЗА. Например, в 2018 г. на воздушной линии 110 кВ «Пыть-Ях» – «Угутский» ПС 110 кВ «Угутский» произошло КЗ с неуспешным повторным включением. При ручном включении выключателя этой линии произошло однофазное КЗ, при котором неселективно сработала дифференциальная защита шин с командой на отключение. Причиной неселективной работы защиты могла служить остаточная магнитная индукция ТТ ВЛ «Пыть-Ях» – «Угутский» и ТТ шиносоединительного выключателя, которая появилась при предыдущем КЗ с неуспешным автоматическим включением. Также из-за насыщения ТТ класса Р, установленных на ОРУ 500 кВ Ростовской АЭС, в 2014 году произошло некорректное срабатывание дифференциальной защиты шин ПДЭ-2006 IV СШ 500 кВ. Вследствие чего ОЭС Юга отделилась от ОЭС Центра.

В настоящее время все более широкое развитие находят цифровые подстанции, работающие на основе стандарта МЭК 61850. Согласно этому стандарту измерения с ТТ поступают в терминалы РЗА в оцифрованном виде и при насыщении магнитопровода возникает необходимость обработки и коррекции искаженных измерений тока. При наличии глубокого насыщения в соответствии со стандартом организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.120.70.241-2017 в области РЗА допускается замедление срабатывания быстродействующих защит до 60 мс. При высокой степени насыщения производят блокировку действия защит до момента восстановления

правильной работы ТТ, что может увеличивать время ликвидации КЗ более чем на 60 мс.

Степень научной разработанности темы исследования. Проблеме насыщения ТТ в переходном режиме посвящены работы многих ученых. Так из отечественных исследователей значительный вклад внесли А.Д. Дроздов, Л.В. Багинский, Б.С. Стогний, С.Л. Кужеков, Г.С. Нудельман и А. А. Дегтярев. Они предлагают методы компенсации ТТ, основанные на использовании кривой намагничивания ТТ. А.Б. Атнишкин, А.Д. Рыбалкин и др. предлагают компенсировать погрешности ТТ с помощью методов прогнозирования, когда искаженная кривая тока аппроксимируется зависимостью, подобной синусоидальной. Для решения данной задачи Ю.Я. Лямец предлагает использовать методы цифровой обработки сигналов.

Современные возможности цифровой техники позволяют использовать все более сложные и высокочисленные вычислительные алгоритмы, использующие оптимизационные подходы. Зарубежные исследователи помимо методов кривой намагничивания и методов прогнозирования для решения задачи компенсации погрешности ТТ в режиме насыщения также предлагают использовать методы, основанные на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС), и комбинацию методов прогнозирования с методами кривой намагничивания, в которых используется оптимизационные методы. Более подробный обзор всех методов и анализ их характеристик приведен в первой главе диссертации.

Целью исследования является разработка методов детекции момента возникновения насыщения магнитопровода ТТ и совершенствование методов «восстановления» искаженных измерений вторичного тока для их практического использования в алгоритмах РЗА на основе стандарта МЭК 61850.

Для выполнения намеченного необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ литературы по существующим методам снижения погрешности ТТ и детекции насыщения. На основе апробации существующих методов определить их достоинства и недостатки. Найти границы применимости методов восстановления тока.

2. Повысить эффективность методов детекции момента возникновения насыщения магнитопроводов ТТ, позволяющих снизить погрешность определения интервала правильной трансформации (ИПТ).

3. Улучшить эффективность методов восстановления тока на основе применения оптимизационных процедур для оценки остаточной индукции.

4. Обеспечить вычислительную эффективность предложенных методов для их использования в устройствах РЗА на основе МЭК 61850.

Объектом исследования являются ТТ класса Р, активно применяющиеся в энергосистеме России для информационного обеспечения системы РЗА и подверженные риску насыщения при КЗ или при наличии значительной остаточной индукции.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. В результате анализа литературы определена степень проработанности темы исследования и выявлена точность ранее разработанных методов, их чувствительность к зашумлению в измерениях и остаточной индукции.

2. Разработан метод детекции насыщения ТТ, основой которого является поиск участков стабильности магнитной индукции в магнитопроводе и отклонение формы вторичного тока от опорного сигнала.

3. Предложена модификация метода восстановления тока путем прогнозирования искаженного участка измеренного тока с учетом весовых коэффициентов.

4. Предложена модификация комбинированного метода, в котором на основе применения модели ТТ Jiles-Atherton путем решения оптимизационных нелинейных задач производится оценка остаточной индукции.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке метода детекции момента возникновения насыщения с гибкой настройкой к уровню насыщения и уровню зашумления в измерениях, а также в модификации методов восстановления тока в его искаженных участках. Применение этих методов позволяет исключить ложное срабатывание средств РЗА, вызванное повышением погрешности измерений ТТ в режиме насыщения их магнитопровода. Работа выполнялась по договору между УрФУ и российским производителем средств релейной защиты и противоаварийной автоматики – компанией «Прософт Системы» – на базе Уральского научного образовательного центра (договор № 20-50544).

Методология и методы исследования. При выполнении настоящей работы были применены методы математического моделирования, математического анализа и математической статистики. Анализ погрешностей как предложенных, так и ранее разработанных методов выполнялся на основе современных методов статистики и метрологии. Расчеты проводились с помощью программного комплекса MATLAB со средой графического моделирования Simulink и Microsoft Excel.

Положения диссертационного исследования, выносимые на защиту:

1. Границы применимости ранее разработанных методов компенсации погрешности ТТ в режиме насыщения их магнитопровода.

2. Результаты проверки разработанного метода детекции момента возникновения насыщения магнитопровода ТТ к зашумленным измерениям, отклонении вторичной нагрузки ТТ от номинального значения и остаточной индукции.

3. Повышение точности восстановленных значений вторичного тока по отношению к измерениям при насыщении ТТ с помощью разработанных методов.

4. Алгоритм выявления момента возникновения насыщения ТТ с последующим восстановлением тока методами прогнозирования и использованием параметров кривой намагничивания.

Апробация работы. Основные положения настоящей работы докладывались на научных семинарах кафедры "Автоматизированные электрические системы" УралЭНИИ 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.

Личный вклад автора. Автором выполнено теоретическое исследование упомянутых задач с проведением вычислительных экспериментов, разработаны программы компенсации погрешности измерений на основе методов прогнозирования и магнитных параметров ТТ. Полученные результаты обсуждались с научным руководителем.

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 7 работ, из них 5 статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных WoS и Scopus.

Структура и объем работы. Работа включает в себя введение, 4 главы, заключение и библиографический список из 101 наименования. Также работа содержит 134 страницы, 43 рисунка и 8 таблиц, список терминов и сокращений и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определены актуальность настоящей работы, ее цели, задачи и научная новизна, охарактеризована практическая ценность результатов исследования, описаны основные положения.

Первая глава включает в себя обзор нормативной документации, предъявляющей требования к погрешности ТТ при нормальных и аварийных режимах работы. Приводится описание основных влияющих факторов на погрешности ТТ. Дается краткое описание подходов к моделированию ТТ и их отличительные особенности. Приведен обзор отечественных и зарубежных работ по заявленной тематике.

Основными факторами, негативно влияющими на погрешности ТТ, являются остаточная индукция, наличие, уровень и скорость затухания апериодической составляющей КЗ, уровень и характер вторичной нагрузки ТТ.

Вопросу снижения погрешности ТТ при насыщении их магнитопровода посвящено большое количество исследований. Для исключения влияния погрешности ТТ на работу РЗА применяются два подхода:

1. конструктивное изменение ТТ;
2. математическая обработка сигнала.

Систематизация предложенных методов снижения погрешности ТТ в рамках обоих подходов показана на рисунке 1.



Рисунок 1 – Систематизация методов компенсации погрешности ТТ

Методы, предложенные в рамках первого подхода, не обеспечивают компенсации погрешности ТТ в условиях насыщения, далее они не рассматриваются. Компенсация погрешности ТТ методами второго подхода производится путем восстановления искаженных значений тока. Из правого столбца рисунка 1 видно, что методы второго подхода условно можно разбить на группы:

1. восстановление на основе использования кривой намагничивания;
2. восстановление путем прогнозирования;
3. восстановление на основе ИНС;
4. восстановление с помощью комбинированных методов.

Далее методы первой группы обозначим А1, второй группы – А2 и А3, т.к. они разделяются на две подгруппы, и методы третьей и четвертой групп – А4 и А5 соответственно. Для выявления свойств всех указанных методов в среде Matlab была произведена их программная реализация и проведены сравнительные расчеты. Эталонный сигнал, содержащий апериодическую составляющую, подвергался зашумлению и насыщению. Полученные отчеты рассматривались в качестве измерений и далее происходило математическое восстановление искаженного тока всеми рассматриваемыми методами. Ниже

приводятся результаты вычислительных экспериментов, которые показывают чувствительность методов А1-А5 к белому шуму и остаточной индукции.

Вычислительные эксперименты проводились в 4 этапа. В ходе первого эксперимента при насыщении ТТ отсутствовали зашумление и остаточная индукция. Во втором эксперименте был добавлен шум в $\pm 3\%$ от амплитудного значения тока и $\pm 1\%$ от каждого измеренного значения тока. Третий эксперимент включал в себя остаточную индукцию $\lambda_0 = 0,05$ Тл. В последнем эксперименте были учтены как шум, так и остаточная индукция. Для демонстрации на рисунке 2 показаны результаты работы А1-А5, соответствующие последнему вычислительному эксперименту. Во всех экспериментах амплитуда и начальная фаза периодической составляющей были $I_{m1} = 16800$ А и $\varphi_{КЗ} = -90^\circ$ соответственно, а начальная величина и скорость затухания аperiodической составляющей – $I_{m2} = 20400$ А и $T = 0,1$ с соответственно.

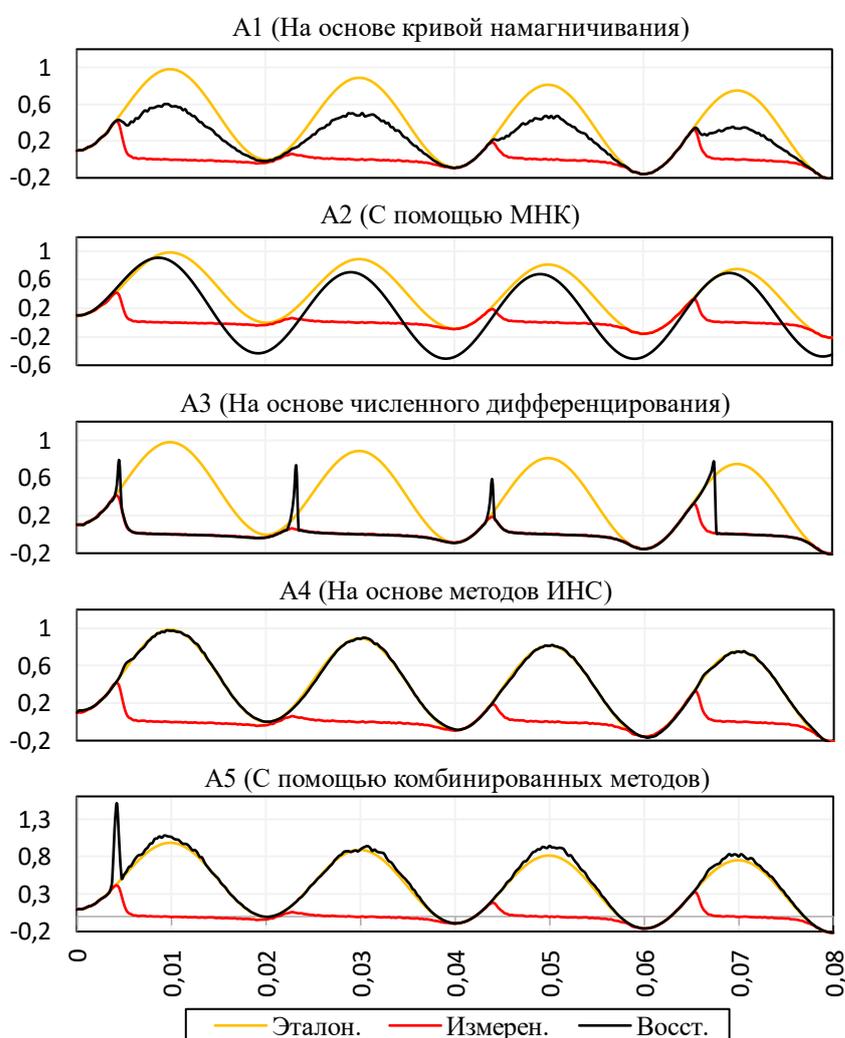


Рисунок 2 – Кривые токов при отсутствии белого шума и начальной индукции

Сравнение методов производилось путем расчета угловой $\Delta\varphi$, токовой f_i и полной ε погрешности восстановленных (в вычислительных экспериментах 1, 2, 3 и 4) токов в соответствии с инструкцией РД 153-34.0-35.301-2002.

Для этого определялась выраженная в процентах токовая погрешность:

$$f_i = \frac{|I_2 - I_1|}{I_1} \cdot 100. \quad (1)$$

Вычисление полной погрешности ε , также выраженной в процентах, производилось как:

$$\varepsilon = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{i_{1n}}{n_T} - i_{2n} \right)^2}. \quad (2)$$

Расчет угловой погрешности производился как:

$$\delta_\varphi = \frac{|\varphi_{эм.} - \varphi_{восст.}|}{\varphi_{эм.}} \cdot 100. \quad (3)$$

Здесь I_1 и I_2 – действующие значения приведенного к вторичной цепи первичного тока и вторичный ток соответственно; N – количество точек на период; $\varphi_{эм.}$ – фаза эталонного тока; $\varphi_{восст.}$ – фаза восстановленного тока. При моделировании КЗ фаза эталонного тока была задана $\varphi_{эм.} = -90^\circ$.

Следует отметить, что для расчета f_i и ε действующие значения тока были получены двумя способами – по алгоритму Герцеля и по формуле

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_n^2}. \quad (4)$$

Далее, для удобства, способ (4) обозначим М1, а алгоритм Герцеля – М2. С помощью М2 также рассчитывалась фаза эталонного, измеренного и восстановленного токов.

В таблице 1 приведен сравнительный анализ рассматриваемых методов с различными подходами к восстановлению измеренного тока. Для каждого из них были определены средние и максимальные значения f_i и ε восстановленного тока на интервале моделирования 4 периода 0,08 с. Для получения f_i и ε действующие значения всех сигналов рассчитывались по (4) (М1). В таблице 1 жирным шрифтом выделены результаты тех методов, погрешность которых превышает предельно допустимое значение ТТ. Максимальная f_i измеренного тока на интервале моделирования без использования методов восстановления при насыщении ТТ составляет порядка 95 – 96%, а средняя 84 – 86%.

Таблица 1 – Сравнительная таблица методов восстановления тока в режиме насыщения ТТ при определении действующего значения сигналов по М1

| Метод | Вычислительный эксперимент №1 | | | | Вычислительный эксперимент №2 | | | | Вычислительный эксперимент №3 | | | | Вычислительный эксперимент №4 | | | |
|-------|-------------------------------|-----|-------------------|-----|-------------------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------------------|-------------|-------------------|-----------|-------------------------------|-----------|-------------------|-----------|
| | $f_i, \%$ | | $\varepsilon, \%$ | | $f_i, \%$ | | $\varepsilon, \%$ | | $f_i, \%$ | | $\varepsilon, \%$ | | $f_i, \%$ | | $\varepsilon, \%$ | |
| | Макс | Ср. | Макс | Ср. | Макс | Ср. | Макс | Ср. | Макс | Ср. | Макс | Ср. | Макс | Ср. | Макс | Ср. |
| A1 | 6,7 | 4,2 | 7,1 | 4,2 | 42 | 41 | 44 | 43 | 7,2 | 3,4 | 8,2 | 5 | 48 | 42 | 51 | 45 |
| A2 | 4,1 | 3,2 | 6,1 | 4,3 | 2,2 | 1,2 | 2,9 | 1,8 | 17,6 | 10,2 | 37 | 33 | 22 | 12 | 64 | 58 |
| A3 | 78 | 36 | 91 | 57 | 78 | 36,6 | 90 | 58 | 91 | 75 | 100 | 98 | 91 | 75 | 99 | 97 |
| A4 | 1,2 | 1,1 | 4,3 | 2,2 | 0,3 | 0,2 | 3,1 | 1,8 | 1,44 | 1,2 | 3,2 | 2,8 | 1 | 0,3 | 3,2 | 2,2 |
| A5 | 6,2 | 3,6 | 5,8 | 4,1 | 8,3 | 5,2 | 8,3 | 6,2 | 5,8 | 3,7 | 9,3 | 5,1 | 12,7 | 8,7 | 26,5 | 12 |

В таблице 2 приведены средняя и максимальная f_i и δ_φ методов восстановления тока на интервале моделирования. При расчете f_i действующие значения токов были получены с помощью алгоритма Герцеля

(M2). При оценке фазы по M2 из-за аperiodической составляющей тока K3 в алгоритме Герцеля возникает ошибка. Для проведенных экспериментов, при фазе эталонного тока K3 $\varphi_{эм} = -90^\circ$, эта ошибка составляет 4%. В вычислительных экспериментах максимальная угловая погрешность $\delta\varphi$ измеренного тока составила 99,7 %, а средняя – 70%.

Таблица 2 – Сравнительная таблица методов восстановления тока в режиме насыщения ТТ при определении угла и действующего значения сигналов по M2

| Метод | Вычислительный эксперимент №1 | | | | Вычислительный эксперимент №2 | | | | Вычислительный эксперимент №3 | | | | Вычислительный эксперимент №4 | | | |
|-------|-------------------------------|-----|---------------------|------|-------------------------------|------|---------------------|------|-------------------------------|------|---------------------|------|-------------------------------|------|---------------------|------|
| | $f_i, \%$ | | $\delta\varphi, \%$ | | $f_i, \%$ | | $\delta\varphi, \%$ | | $f_i, \%$ | | $\delta\varphi, \%$ | | $f_i, \%$ | | $\delta\varphi, \%$ | |
| | Макс | Ср. | Макс | Ср. | Макс | Ср. | Макс | Ср. | Макс | Ср. | Макс | Ср. | Макс | Ср. | Макс | Ср. |
| A1 | 4,1 | 2,6 | 5,56 | 2,5 | 44 | 43,5 | 15,6 | 5,3 | 4,32 | 1,75 | 7,7 | 2,8 | 44 | 41 | 19,4 | 6,1 |
| A2 | 1,3 | 0,4 | 5,28 | 2,52 | 0,72 | 0,35 | 5 | 2,4 | 27,3 | 15,2 | 25,1 | 12,8 | 47 | 25 | 34,4 | 18,7 |
| A3 | 37 | 26 | 77,2 | 37,7 | 36 | 25,3 | 77 | 37,7 | 84,1 | 77 | 99,6 | 77,2 | 85 | 77 | 99,2 | 77,1 |
| A4 | 2,2 | 0,4 | 8,3 | 2,7 | 1 | 0,25 | 6 | 2,3 | 2,3 | 1,3 | 7,4 | 2,6 | 2,3 | 0,85 | 7,32 | 2,6 |
| A5 | 7,8 | 5,7 | 5,8 | 2,43 | 8,8 | 7,1 | 5,9 | 2,4 | 6,55 | 5,1 | 5,82 | 2,3 | 9,8 | 7,3 | 13,1 | 3,3 |

Результаты вычислительных экспериментов показывают, что при отсутствии шума в измеренном сигнале и остаточной индукции в сердечнике ТТ методы A1 и A2 способны восстановить сигнал с приемлемой точностью. Например, при оценке по M1 их максимальная токовая погрешность f_i не превышает 6,7%, а полная погрешность – 7,1%, что приемлемо для ТТ класса точности 10P. При оценке по M2 их максимальная f_i составила 4,1%, а угловая погрешность не превысила 6%. Однако при наличии остаточной индукции в сердечнике ТТ погрешность метода A1 резко возрастает. Так при оценке по M1 его максимальная f_i составляет 42%, а по M2 44% с максимальной угловой погрешностью 15,6%. Наличие шума сильно влияет на точность методов A2 и A3. Например, при наличии шума максимальная f_i метода A2 по M1 составляет 17,6%, а по M2 – 27,3%, максимальная угловая погрешность составляет 25%. Среди рассмотренных методов наиболее устойчивыми проявили себя методы A4 и A5. Так для наиболее тяжелого режима в вычислительном эксперименте №4 максимальная токовая погрешность f_i методов A4 и A5 согласно таблице 1 составляет 1% и 12,7% соответственно. По таблице 2 максимальная f_i этих методов составляет 2,3% и 9,8%, а максимальная $\delta\varphi$ – 7,3% и 13,1% соответственно. Метод A4 имеет чувствительность к изменению режима насыщения. Для демонстрации сказанного на рисунке 3 показан результат работы метода в случае отклонения режима, заданного путем изменения начальной величины аperiodики в $0,5Im_2$.

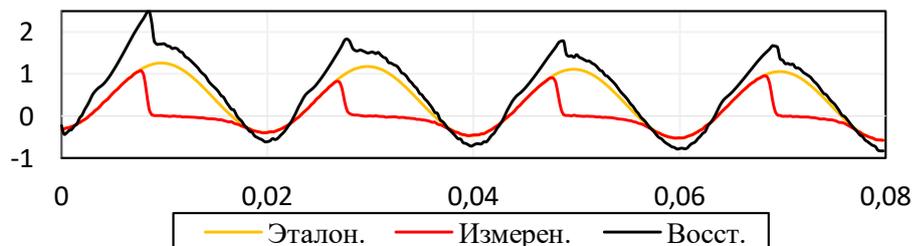


Рисунок 3 – Работа ИНС при отклонении входных данных от обучающей выборки

В представленном на рисунке 3 режиме насыщения ТТ максимальная ε на входе A4 составила 90%, а f_i и $\delta\varphi$ – 57% и 42% соответственно. На выходе A4 ε снизилась до 70%, а f_i и $\delta\varphi$ – до 64% и 5% соответственно.

Таким образом погрешности всех рассмотренных методов существенно зависят от влияющих факторов и нет универсального технического решения задачи компенсации погрешности ТТ в режиме насыщения.

Во второй главе приводится детальный анализ методов детекции возникновения насыщения магнитопровода ТТ. Описаны их достоинства и недостатки. Приведены описания разработанного метода детекции возникновения насыщения ТТ и метода разграничения нормального и аварийного режимов. Показаны чувствительность и надежность методов детекции насыщения к белому шуму, начальной индукции и углу возникновения КЗ.

Методы детекции насыщения ТТ условно можно разбить на две группы – детекция насыщения на основе методов математического анализа и детекция насыщения на основе статистического анализа данных.

Принцип действия методов, предложенных в рамках первой группы, основан на численном дифференцировании тока. В большинстве исследований приоритет отдается численному дифференцированию второго порядка. Определение наличия насыщения по этим методам производится на основе резкого спада измеренного тока, вызванного насыщением ТТ. Другими словами, детекция насыщения по указанным методам производится на основе поиска резкого среза графика измеренных значений вторичного тока. К положительным качествам методов первой группы можно отнести детекцию насыщения ТТ в темпе поступления информации. Однако в ходе апробации было выявлено, что при наличии шума в измерениях методы численного дифференцирования имеют высокую чувствительность, в результате чего происходит искажение момента возникновения насыщения. Более того, эти методы являются усилителями шума.

Методы второй группы основаны на анализе степени плотности расположения измеренных значений тока, характере изменения дифференциального тока и установлении связи между токами на низкой и высокой сторонах силового трансформатора с помощью коэффициента Пирсона. К положительным свойствам методов второй группы можно отнести их высокую устойчивость к шуму. Однако их применение не позволяет точно определить ни момент возникновения насыщения, ни работающий в режиме насыщения ТТ в дифференциальной схеме.

Разработанный метод относится ко второй группе методов детекции и работает на основе контроля магнитной индукции (КМИ). Для его реализации в качестве исходных данных используются общедоступные параметры ТТ:

- кривая намагничивания ТТ $H = f(\lambda)$;
- активная нагрузка вторичной цепи R_2 , Ом;
- индуктивность вторичной цепи L_2 , Гн;
- средняя длина магнитопровода l , м;
- поперечное сечение магнитопровода s , м²;
- количество витков вторичной обмотки w_2 .

Расчетные значения магнитной индукции можно получить из

$$\lambda(t) = \frac{R_2}{w_2 \cdot s} \int_{t_0}^t i_2(\zeta) d\zeta + \frac{R_2}{w_2 \cdot s} (i_2(t) - i_2(t_0)) + \lambda(t_0). \quad (5)$$

Сущность метода КМИ заключается в поиске участка времени, на котором магнитная индукция практически не изменяется во времени в результате перехода магнитопровода в режим насыщения. Для наглядности работы этого метода на рисунке 4 на графиках (а) и (б) показаны эталонные и измеренные токи, а на (с) и (д) – изменение магнитной индукции λ . Как видно из графиков (с) и (д), изменение λ в нормальных условиях работы ТТ подчиняется синусоидальному закону, а в условиях насыщения эта закономерность нарушается, в результате чего λ принимает форму, отдаленно напоминающую трапецию. Это означает, что мера разброса значений λ относительно своего выборочного среднего в насыщенных участках сильно снижается, что также заметно на графике (д) рисунка 4.

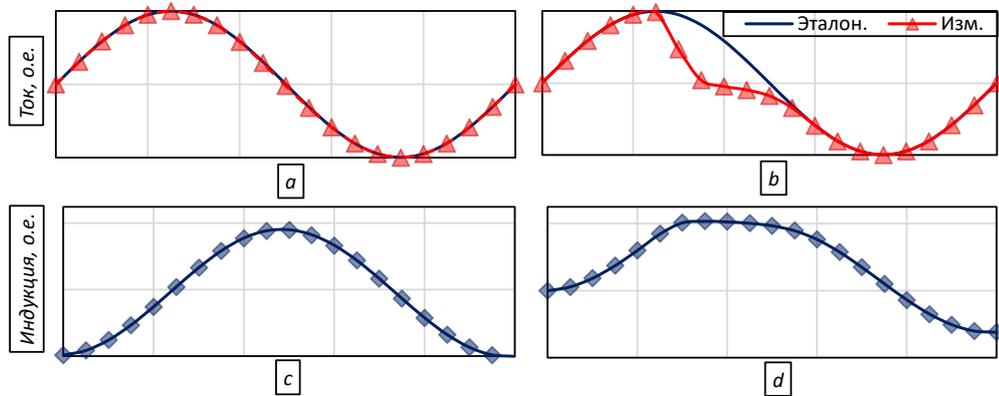


Рисунок 4 – Работа ТТ в нормальном и аварийном режимах: а и б – токи; с и д – индукция

Зная характер изменения λ , можно посчитать отклонение ее точек относительно выборочного среднего $\bar{\lambda}_e$:

$$\sigma^2 (n - N) = \frac{1}{N - 1} \sum_{m=1}^N |\lambda(n - m) - \bar{\lambda}_e|^2, \quad (6)$$

где n – номер текущего значения магнитной индукции λ ; N – размер окна; m – целое число, выполняющее функцию скольжения вдоль окна N .

Выборочное среднее определяется как:

$$\bar{\lambda}_e = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \lambda(n - m). \quad (7)$$

Далее, зная отклонение магнитной индукции σ на интервале N , можно определить наличие насыщения в ТТ. Для этого необходимо произвести сравнение σ^2 с пороговым значением λ_{min}^2 , которое характеризует наклон участка характеристики в диапазоне от k до m при номинальной нагрузке ТТ в максимальном режиме работы сети.

Для расчета λ_{min}^2 необходимо использовать значения λ , расположенные на участке кривой намагничивания ТТ в диапазоне от k до m . Точка k соответствует первому значению, точка m – максимальному значению λ на кривой намагничивания.

Расчет λ_{min}^2 производится следующим образом:

$$\lambda_{min}^2 = \frac{\sum_{k=1}^m (\lambda_k - \bar{\lambda}_e)^2}{m}. \quad (8)$$

Момент возникновения насыщения определяется в соответствии с условием:

$$\sigma^2(n) < \lambda_{min}^2. \quad (9)$$

Размер окна N должен быть выбран таким образом, чтобы в режиме КЗ, не сопровождающемся насыщением ТТ, не происходило ложное срабатывание детектора, т.е. λ_{min}^2 не превышало бы $\sigma^2(n)$.

Для повышения надежности работы КМИ предлагается использование второго критерия, в котором на основе временных рядов производится оценка параметров ранее заданной модели тока с последующим прогнозированием измерений.

Также для повышения надежности работы метода КМИ предлагается метод разграничения нормального и аварийного режимов на основе численного дифференцирования.

Для проверки работоспособности метода КМИ в условиях наличия белого шума и начальной индукции к измеренному сигналу добавлялся шум ρ с нормальным распределением и начальной магнитной индукцией λ_0 в сердечнике ТТ. Из графиков (а) на рисунке 5 можно заметить, что наличие шума на уровне $\pm 3\%$ не оказывает влияние на работу метода КМИ. На графиках (b) рисунка 5 представлены кривые эталонного, измеренного токов и результат работы метода КМИ. Из графиков (b) видно, что индукция в диапазоне от 0,5 до 1,8 Тл не оказывает влияние на работу метода КМИ.

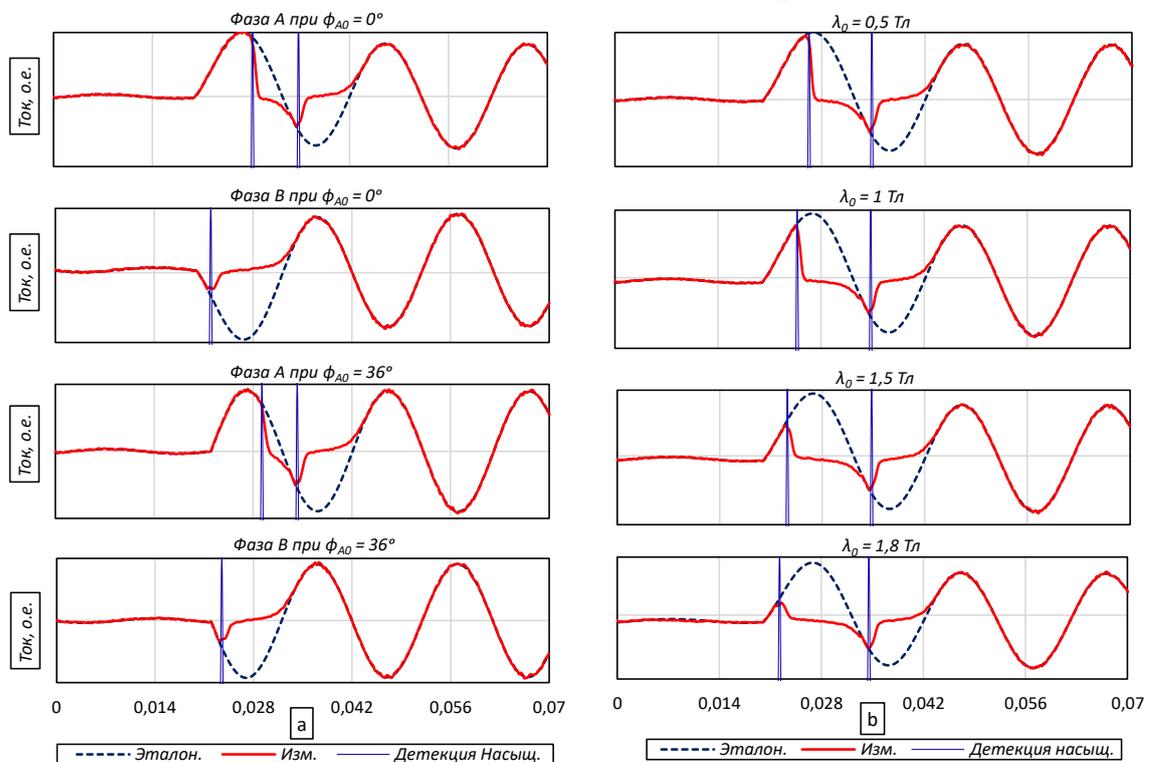


Рисунок 5 – Токи и детекция момента возникновения насыщения: а – при варьировании φ_{A0} ; б – при варьировании λ_0

В третьей главе предложена модификация метода восстановления тока на основе взвешенного метода наименьших квадратов (ВМНК). Приводится подробное описание определения весовых коэффициентов. Для измерений, находящихся в области точной работы ТТ, весовые коэффициенты большие. Для измерений, находящихся в области насыщения ТТ, они уменьшаются и это снижает степень доверия к плохим измерениям. Приведено описание метода кривой намагничивания ТТ (КМ). Дается детальное пояснение поиска индукции насыщения взамен поиска начальной индукции.

Решение задачи снижения погрешности ТТ по методу прогнозирования основано на использовании ВМНК. Процедура решения задачи следующая. Изначально задается выражение для модели вторичного тока $i_k^{pacч}$ в режиме КЗ:

$$i_k^{pacч} = I_{m1} \sin(\omega k + \varphi) + I_{m2} e^{-\gamma k}, \quad (10)$$

где I_{m1} и φ – амплитуда и фаза периодической составляющей тока КЗ; I_{m2} и γ – начальная величина и скорость затухания аperiodической составляющей тока КЗ.

Неизвестными параметрами в выражении (10) являются I_{m1} , φ , I_{m2} и γ . Применяя преобразование сумм и разности углов тригонометрических функций для первого слагаемого и разложение в ряд Тейлора (первый порядок) для второго слагаемого, неизвестные параметры выражения (10) можно представить как:

$$i_k^{pacч} = C_1 \sin(\omega k) + C_2 \cos(\omega k) + C_3 k + C_4. \quad (11)$$

Неизвестные параметры I_{m1} , φ и I_{m2} без учета γ заменились коэффициентами C_1 - C_4 . Поиск коэффициентов C_1 - C_4 осуществляется на основе минимизации взвешенной суммы квадратов невязок между измеренными и расчетными по (11) значениями тока.

$$F(C_{1-3}) = \sum_{k=1}^N w_k (i_k^{изм} - i_k^{pacч}(C_{1-4}))^2 = (\mathbf{B} - \mathbf{HC})^T \mathbf{W} (\mathbf{B} - \mathbf{HC}), \quad (12)$$

где N – количество измерений, охватывающее первый и второй ИПТ и все измерения, расположенные между этими ИПТ, w_k – весовой коэффициент k -го измерения;

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \sin(\omega k_i) & \cos(\omega k_i) & k_i & 1 \\ \sin(\omega k_{i+1}) & \cos(\omega k_{i+1}) & k_{i+1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin(\omega k_{i+n}) & \cos(\omega k_{i+n}) & k_{i+n} & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} i^{изм}(k_i) \\ i^{изм}(k_{i+1}) \\ \dots \\ i^{изм}(k_{i+n}) \end{bmatrix} \text{ и} \quad (14)$$

\mathbf{W} – диагональная матрица весовых коэффициентов измерений w_k ; \mathbf{C} – искомый вектор коэффициентов C_{1-4} .

Минимизация (12) сводится к решению нормальной системы линейных уравнений:

$$\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H} \mathbf{C} = \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{B} \quad (15)$$

с решением

$$\mathbf{C} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{B}, \quad (16)$$

Использование весовых коэффициентов вызвано увеличением погрешности измерения тока в условиях насыщения. В нормальном режиме работы ТТ дисперсиям измерений соответствует класс точности ТТ, а в режимах насыщения – степень отклонения измеренного тока от эталонного. Согласно сказанному в режиме насыщения ТТ измерения в зависимости от их погрешности можно разбить на три группы – хорошие, подозрительные и плохие. Хорошие измерения расположены в ИПТ, а подозрительные измерения – на двух концах ИПТ. Плохие измерения расположены после подозрительных измерений. Соответственно при решении нормальной системы линейных уравнений степень доверия к уравнениям с хорошими измерениями должна быть «высокой», с подозрительными – «средней» и с плохими – «низкой». Для этого элементы матрицы \mathbf{W} формируются как:

$$\mathbf{W} = \begin{cases} \frac{1}{\zeta_0 \cdot \eta^2} & \text{для хорошие изм.} \\ \frac{1}{\zeta_1 \cdot \eta^2} & \text{для подозрительные изм.,} \\ \frac{1}{\zeta_2 \cdot \eta^2} & \text{для плохие изм.} \end{cases} \quad (17)$$

где η – класс точности ТТ; ζ – коэффициент, регулирующий степень доверия к измерениям: для хороших $\zeta_0=1$, для подозрительных $\zeta_1=20$ и для плохих $\zeta_2 = 50$. Соотношение коэффициентов ζ_0 , ζ_1 и ζ_2 подбиралось в ходе имитационных вычислительных экспериментов на основе максимального снижения взвешенной суммы квадратов невязки. Выявлено, что при использовании 2-3 ИПТ надежность метода ВМНК относительно зашумленных измерений повышается. При использовании ВМНК для восстановления тока на интервале, покрывающем полупериод тока, исключение коэффициента C_4 из (11) также позволяет повысить надежность метода.

Недостаток ВМНК связан с тем, что он жестко привязан к параметрам моделирующей функции (11) и предполагает неизменность тока КЗ на интервале моделирования.

Методы, использующие кривую намагничивания, не привязаны к опорной моделирующей функции. Они позволяют восстанавливать первичный ток по вторичным измерениям в режиме насыщения. Основой метода КМ является выражение (5). На рисунке 6 показаны характеристика намагничивания ТТ (первый квадрант), изменение магнитной индукции

(второй квадрант) и кривые эталонного i_1 , измеренного i_2 (третий квадрант) и намагничивающего (четвертый квадрант) токов. Стоит отметить, что траектория изменения магнитной индукции и намагничивающего тока в первом квадранте рисунка б происходит по петле гистерезиса и эта траектория задает границы, в которых значения как магнитной индукции, так и намагничивающего тока могут изменяться рандомно. Как показано в первом и втором квадрантах этого рисунка, в момент возникновения насыщения t_0 одному значению намагничивающего тока $i_0(t_0)$ может соответствовать одно из множеств значений магнитной индукции, которые входят в область, выделенную закрашенным вертикальным эллипсом на изгибе кривой намагничивания (первый квадрант) или горизонтальным эллипсом кривой индукции λ_s . Какое из значений индукции насыщения λ_s какому моменту возникновения насыщения соответствует – неизвестно, однако известны границы ее изменения, которые принадлежат интервалу $[\lambda_a, \lambda_b]$.

Возникновение насыщения с точки зрения электрической цепи ТТ означает спад вторичного тока, а с точки зрения магнитной цепи ТТ – расположение магнитной индукции в интервале $[\lambda_a, \lambda_b]$ на изгибе кривой намагничивания ТТ. Из сказанного вытекает, что в момент возникновения насыщения ТТ вместо поиска начальной индукции λ_0 наиболее эффективным является поиск индукции насыщения λ_s , расположенной в интервале $[\lambda_a, \lambda_b]$. Для этого разобьем задачу на две части – прогнозирование измеренных значений тока в начале участка насыщения и определение λ_s .

Пусть m при решении первой части задачи – размерность выборки хороших измерений, расположенных в ИПТ, т.е. $i_2(m)$. На основе этих измерений необходимо определить коэффициенты ранее заданной функции и по ней произвести прогнозирование:

$$\mathbf{i}_n(k) = \sum_{d=0}^N x_d f_d(k), \quad (18)$$

где x_d и f_d – заданные коэффициенты и функции.

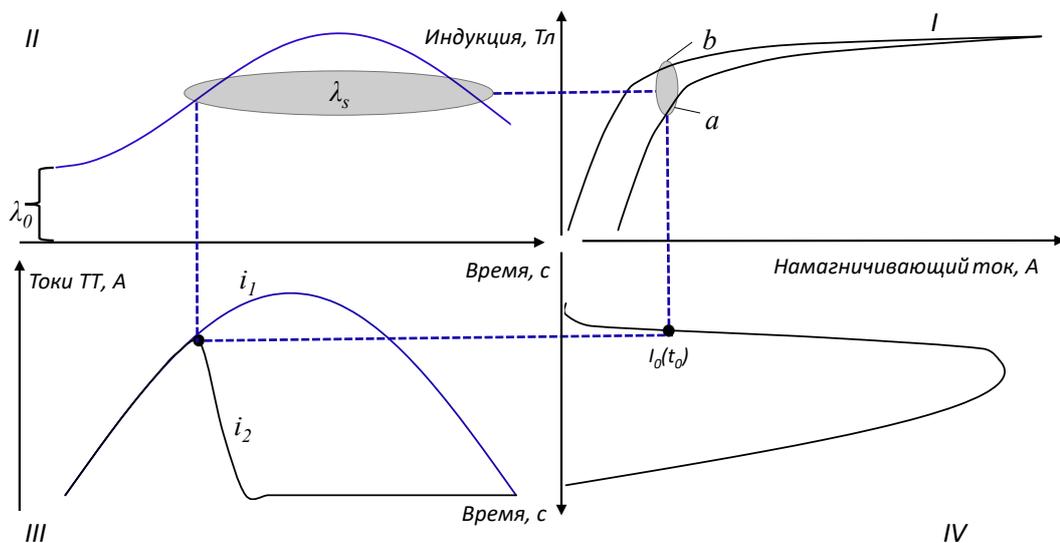


Рисунок 6. Графическая интерпретация момента насыщения

Для решения второй части задачи в предложенном методе КМ λ_s определяется путем минимизации разности прогнозных и измеренных значений вторичного тока. Это позволяет исключить влияние петли гистерезиса. Для этого предлагается составить векторную целевую функцию скалярного аргумента:

$$f_k(\lambda_s) = \sum_{k=1}^n \left| \frac{i_n(k) - i_b(k)}{i_n(k)} \right| \rightarrow \min \quad (19)$$

где i_b – восстановленные значения тока на основе использования кривой намагничивания.

Зная индукцию λ_s , по (5) легко можно рассчитать индукцию на всем участке насыщения, а затем намагничивающий и восстановленный токи.

В последней главе приведены вычислительные эксперименты, подтверждающие устойчивость методов ВМНК и КМ к различным уровням насыщения с наличием зашумления в измерениях и начальной индукцией. Показана робастность метода КМ к отклонению кривой намагничивания от эталонной. Приводится результат проверки методов ВМНК и КМ к увеличению скорости затухания апериодической составляющей тока КЗ.

Проверка методов восстановления тока ВМНК и КМ проводилась на основе данных, синтезированных с помощью ПК Matlab/Simulink, где была создана модель ТТ на основе теории Jiles-Atherton, учитывающая насыщение. Кривая первичного тока предварительно рассчитывалась для каждого опыта отдельно, она состоит из двух частей:

$$i_1(t) = \begin{cases} I_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1), & \text{если } t < 0 \\ kI_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1 + \varphi_2) + I_{m2} e^{-\frac{t-t_0}{T}}, & \text{если } t > 0 \end{cases}, \quad (20)$$

где I_{m1} – амплитуда тока в номинальном режиме, ω – угловая скорость, k – кратность тока КЗ, φ_1 и φ_2 – фаза нормального и аварийного режимов соответственно, I_{m2} – начальная величина апериодической составляющей, T – постоянная времени затухания апериодической составляющей, t_0 – момент перехода с одной характеристики на другую.

Для наглядности работы методов КМ и ВМНК на рисунке 7 показаны графики изменения эталонного, измеренного и восстановленного токов во времени. Имитация тока КЗ проведена с учетом его апериодической составляющей со скоростью затухания $T = 0,02$ с. Кратность k и угол возникновения тока КЗ φ_2 , а также угол тока в нормальном режиме φ_1 показаны над графиками.

Для оценки точности методов ВМНК и КМ рассчитывалась их полная ε , токовая f и угловая δ_φ погрешности. Интервал моделирования КЗ составлял три периода (0,06 с). Шум в измеренном токе – $\pm 3\%$ от амплитуды тока. Начальная индукция была учтена особенностью модели ТТ на основе теории Jiles-Atherton. Уровень насыщения ТТ варьировался кратностью тока КЗ kI_{m1} и начальной величиной апериодической составляющей I_{m2} , которая учитывалась путем начальной фазы нормального режима φ_1 и фазы возникновения КЗ φ_2 . Т.е. при $\varphi_1 = 0^\circ$ и $\varphi_2 = 0^\circ$ начальная величина апериодической составляющей

тока КЗ $I_{m2} = 0$ и, наоборот, при $\varphi_1 = 0^\circ$ и $\varphi_2 = 90^\circ$ эта величина равна $|I_{m2}| = kI_{m1}$. Условия проведения экспериментов с точки зрения шума и начальной индукции соответствуют четвертому эксперименту – тяжелый режим работы ТТ, – представленному в первой главе настоящей работы. Погрешности как на входе, так и на выходе методов ВМНК и КМ рассчитывались по формулам (1)-(3). Максимальная полная погрешность ε до использования ВМНК и КМ при различных степенях k , φ_1 и φ_2 варьировалась в диапазоне от 57 до 96%, а максимальная токовая погрешность f – в диапазоне от 19 до 72%. Что касается угловой погрешности δ_φ , она в среднем изменялась в диапазоне от 24 до 65%. Результат оценки методов ВМНК и КМ приведен в таблице 3.

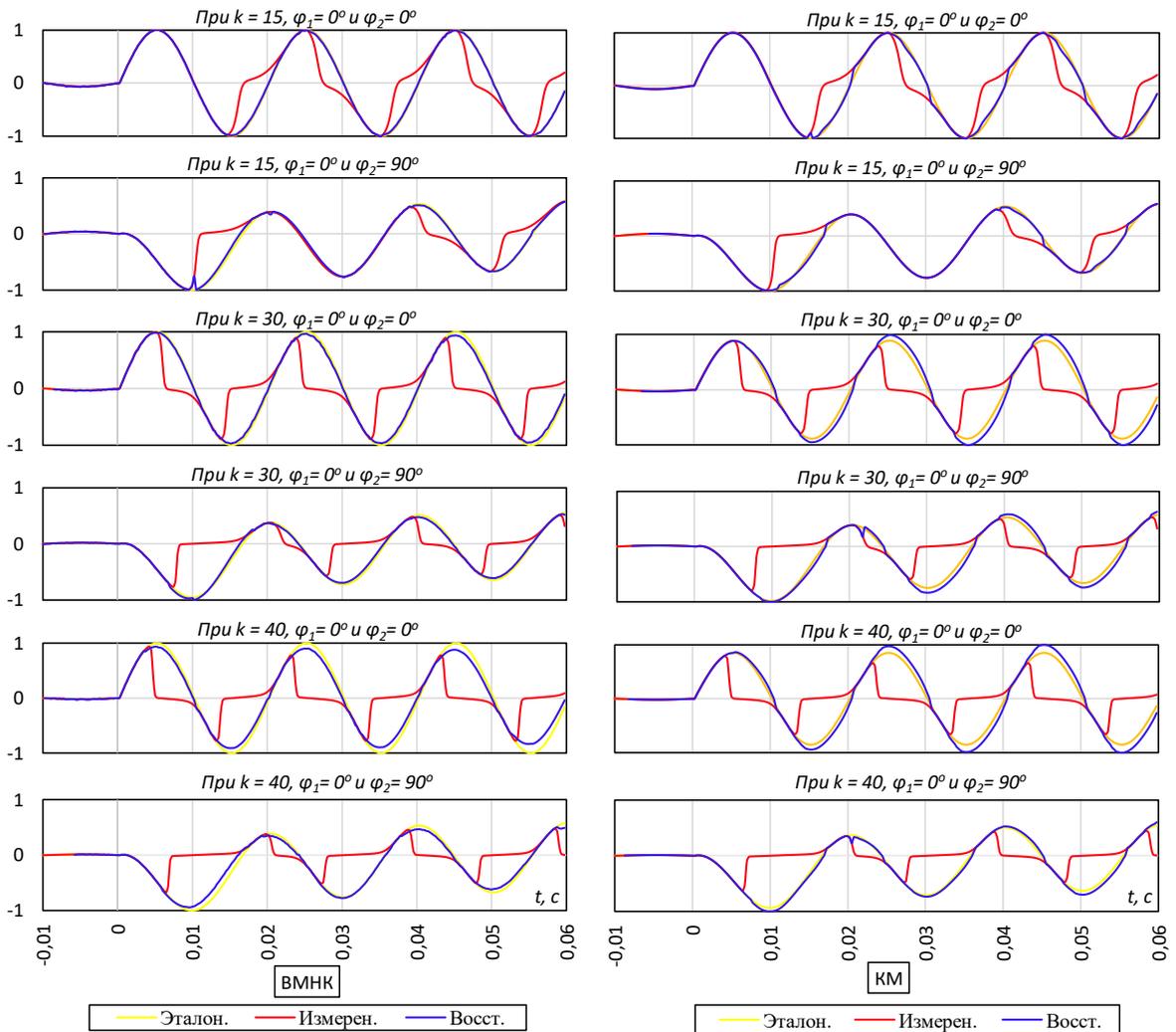


Рисунок 7 – Результат работы методов ВМНК и КМ при $T = 0,02\text{c}$

Таблица 3 – Сравнительная таблица методов КМ и ВМНК в режиме насыщения ТТ

| k | $\varphi_1/\varphi_2, ^\circ$ | Погрешности работы КМ/ВМНК, % | | | | |
|-----|-------------------------------|-------------------------------|-----------|-------------|---------------------|-----------------------|
| | | δ_φ | $f_{ср.}$ | $f_{макс.}$ | $\varepsilon_{ср.}$ | $\varepsilon_{макс.}$ |
| 15 | 0/0 | 2,2/0,9 | 0,8/0,8 | 1,4/1,1 | 6,5/2,1 | 7,7/2,7 |
| | 0/90 | 0,4/3 | 0,83,1 | 2,2/5,1 | 5,2/8,7 | 7,6/11,3 |
| 30 | 0/0 | 4,5/3,3 | 10,7/1,9 | 13,6/3,5 | 14,3/8,3 | 17,2/12,8 |
| | 0/90 | 2,6/4,8 | 8,9/5,1 | 12,8/6,7 | 13,8/9,4 | 16,9/12,7 |
| 40 | 0/0 | 4/3,4 | 14/3 | 17,8/5,7 | 16,4/6,7 | 20/8,2 |
| | 0/90 | 0,7/5 | 4,5/4,2 | 9,7/9,6 | 12,2/9,5 | 17,6/15,9 |

Данные таблицы 3 графически представлены на рисунке 8. На этом рисунке гистограмма (а) соответствует максимальной полной погрешности, гистограмма (b) и (c) – максимальной токовой и средней угловой погрешности на интервале моделирования тока КЗ 0,06 с. Синий цвет соответствует погрешности ТТ без обработки, а оранжевый и зеленый – методам ВМНК и КМ соответственно. Дополнительно группами выделены эксперименты, отличающиеся друг от друга кратностью тока КЗ и уровнем аperiodической составляющей. Из рисунка 8 видно, что в условиях наличия шума в $\pm 3\%$ максимальная полная погрешность ТТ как на выходе КМ, так и на выходе ВМНК не достигает 20%, что приемлемо для устройств РЗА в переходном режиме сети. При анализе максимальной токовой погрешности методы КМ и ВМНК позволяют снизить погрешность ТТ ниже 20%. Анализ угловой погрешности согласно этому рисунку показывает, что применения методов КМ и ВМНК позволяет сделать этот показатель меньше 5%.

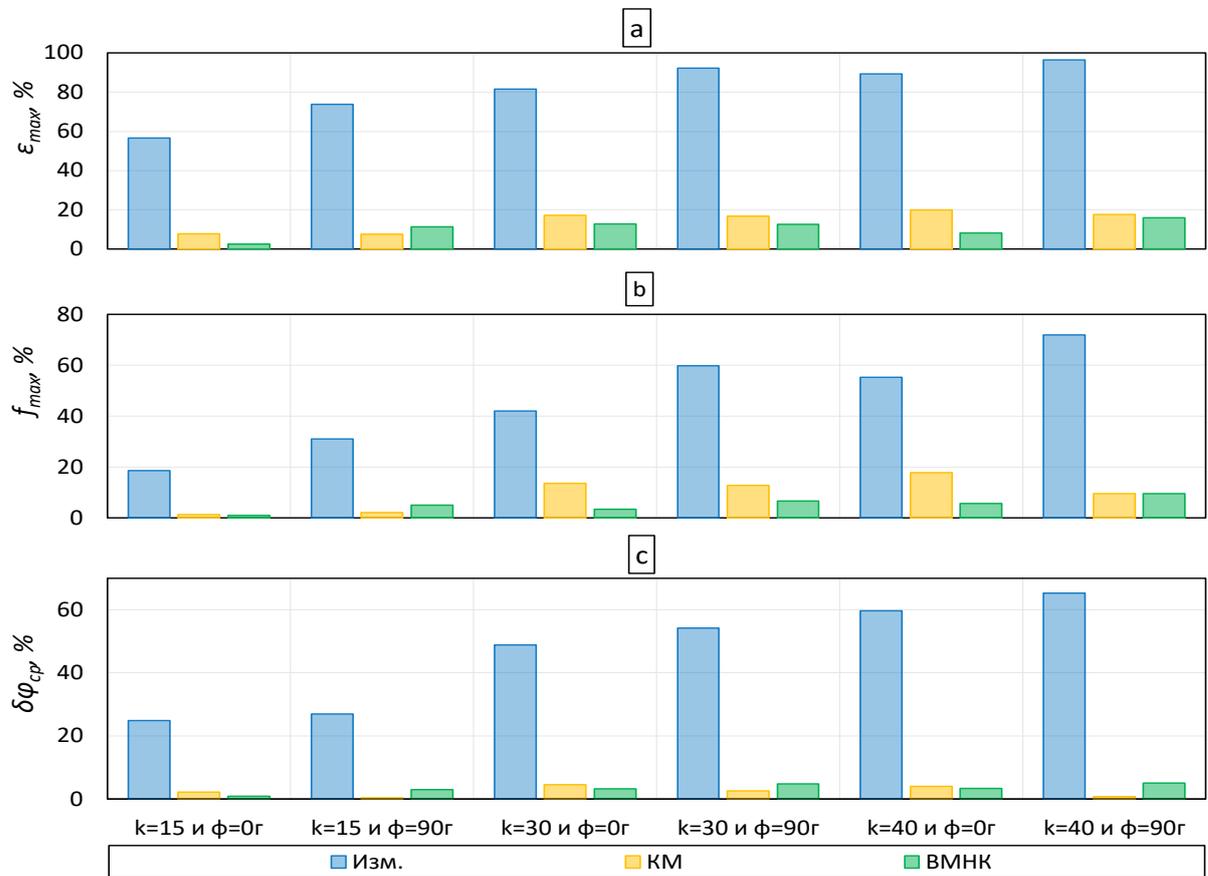


Рисунок 8 – Погрешности ТТ до и после применения методов ВМНК и КМ при $T = 0,02с$

Для проверки чувствительности методов ВМНК и КМ к скорости затухания тока КЗ T было смоделировано насыщение ТТ при $T = 0,1 с$. Результаты работы методов КМ и ВМНК представлены на рисунке 9. Варьирование начальной величины тока КЗ производилось путем начального угла нормального режима φ_1 и угла возникновения КЗ φ_2 . Значения φ_1 и φ_2 показаны над графиками на рисунке 9. Шум ρ с нормальным распределением задавался в $\pm 3\%$ от амплитуды тока КЗ. Кратность тока для всех экспериментов с вариациями φ_1 и φ_2 была фиксирована и задана $k = 15$.

Желтым цветом выделена кривая эталонного тока, красным и синим – кривые измеренного и восстановленного токов соответственно. Как показано на рисунке 9, кривые токов относятся к двум режимам – нормальному, продолжительностью 0,01 с, и режиму КЗ продолжительностью три периода промышленной частоты (0,06 с). Во всех экспериментах КЗ возникает в момент времени $t = 0$ с.

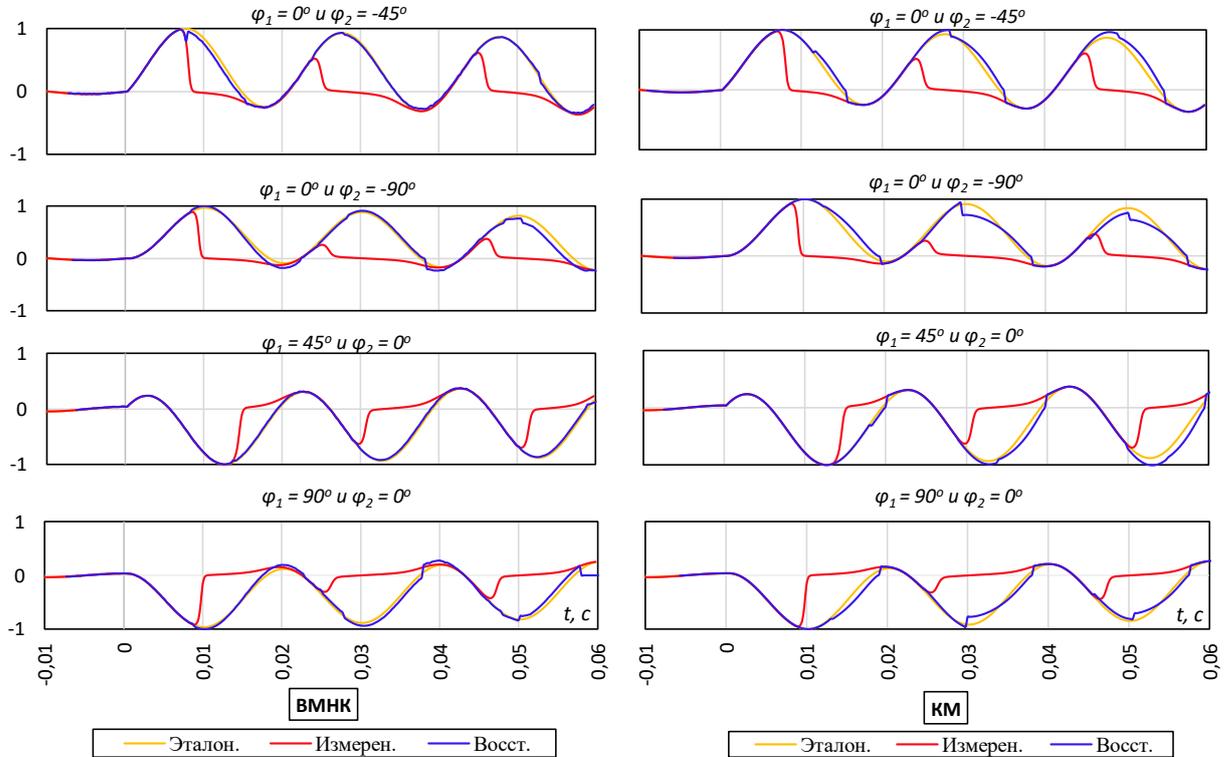


Рисунок 9 – Результат работы методов ВМНК и КМ при $T = 0,1$ с

Относительная полная ε и токовая f погрешности, а также средняя угловая δ_φ погрешность методов ВМНК и КМ для режима насыщения ТТ, показанного рисунке 9, приведены в таблице 4. Максимальная полная погрешность ε на входе методов ВМНК и КМ варьировалась в диапазоне от 57 до 98%. Максимальная токовая погрешность f – в диапазоне 18 – 82% и средняя угловая погрешность δ_φ – в диапазоне от 24 до 56%.

Таблица 4 – Сравнительная таблица методов КМ и ВМНК в режиме насыщения ТТ

| $\varphi_1/\varphi_2, ^\circ$ | Погрешности работы КМ/ВМНК, % | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------|-------------|---------------------|-----------------------|
| | δ_φ | $f_{ср.}$ | $f_{макс.}$ | $\varepsilon_{ср.}$ | $\varepsilon_{макс.}$ |
| 0/-45 | 3,9/3,5 | 5,4/2,7 | 10,8/5,9 | 10,9/6,4 | 15,7/11,2 |
| 0/-90 | 5,2/2,3 | 8,1/3,0 | 14,2/9,4 | 14,9/10,6 | 18,2/19,4 |
| 45/0 | 2,5/1,3 | 4,6/1,4 | 13,3/2,0 | 8,7/3,1 | 18,4/5,8 |
| 90/0 | 4,0/0,1 | 5,7/4,7 | 10,6/9,5 | 12,2/11,3 | 15,1/17,9 |

Данные таблицы Относительная полная ε и токовая f погрешности, а также средняя угловая δ_φ погрешность методов ВМНК и КМ для режима насыщения ТТ, показанного рисунке 9, приведены в таблице 4. Максимальная полная погрешность ε на входе методов ВМНК и КМ варьировалась в диапазоне от 57 до 98%. Максимальная токовая погрешность f – в диапазоне 18 – 82% и средняя угловая погрешность δ_φ – в диапазоне от 24 до 56%.

Таблица 4 графически представлены на рисунке 10. Гистограммы (а) и (б) демонстрируют максимальную полную и токовую погрешности соответственно, а (с) – среднюю угловую погрешность на интервале моделирования 0,06 с. По гистограмме (а) видно, что на выходе как ВМНК, так и КМ полная погрешность ниже 20%, максимальная токовая погрешность не превысила 14% (гистограмма (б)). Что касается фазовой погрешности, ее максимальная величина была получена на выходе метода КМ при $\varphi_1 = 0^\circ$ и $\varphi_2 = -90^\circ$.

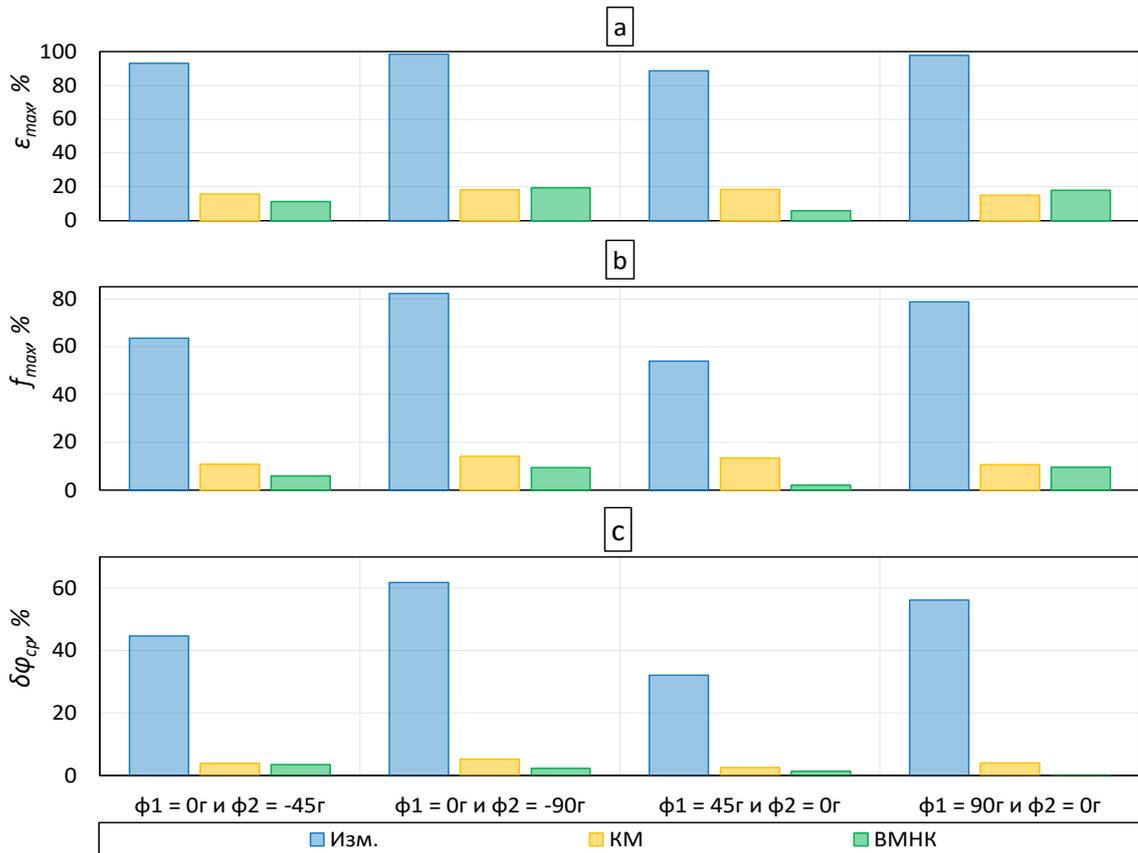


Рисунок 10 – Погрешности ТТ до и после применения методов ВМНК и КМ при $T = 0,1с$

Для корректной оценки быстродействия работы методов ВМНК и КМ проводились вычислительные эксперименты с изменением угла КЗ φ_2 от 0° до 90° с шагом 30° . Кратность тока КЗ соответствовал k в таблице 3. Оценка быстродействия указанных методов показана на рисунке 11. Из этого рисунка можно заметить, что в среднем метод ВМНК работает быстрее метода КМ более чем в 4 раза.

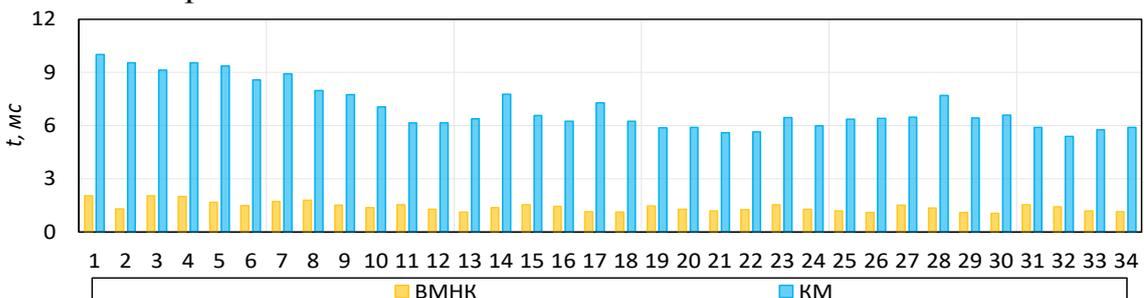


Рисунок 11 – Быстродействие методов ВМНК и КМ

В **Заключении** приведены основные выводы и обобщены полученные результаты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. В результате анализа литературы по теме компенсации погрешности ТТ установлено, что решение задачи, как правило, производится в два этапа – детекция момента возникновения насыщения и восстановление тока путем замены искаженных измерений расчетными значениями. Выполнена программная реализация ранее разработанных методов и произведено их сравнение в ходе вычислительных экспериментов. Выявлено, что погрешность существующих методов восстановления тока находится в пределах 10%, но при появлении зашумления измерения или остаточной индукции в магнитопроводе погрешность может резко увеличиться.
2. Показано, что методы детекции насыщения, работающие на основе численного дифференцирования, имеют высокую чувствительность к шуму, а методы детекции насыщения, работающие на основе статического анализа данных, не способны определить область возникновения насыщения ТТ. Был предложен более эффективный комбинированный метод, который имеет высокую устойчивость к зашумленным измерениям и остаточной индукции. Разработан метод на основе использования численного дифференцирования, который выделяет границу нормального и аварийного режимов работы ТТ, рассчитывает амплитуду периодической составляющей нормального и переходного режимов, а также их фазу.
3. Разработан способ восстановления тока на основе взвешенного метода наименьших квадратов. Предложен способ выбора весовых коэффициентов в зависимости от степени доверия ко вторичным измерениям. На основе комбинации методов прогнозирования и кривой намагничивания предложена модификация метода, в которой оценка остаточной индукции производится путем решения оптимизационной нелинейной задачи.
4. Проведены численные эксперименты, позволяющие оценить устойчивость разработанных/модифицированных методов к уровню насыщения ТТ и остаточной индукции. Как показали результаты вычислительных экспериментов, введенные в методе наименьших квадратов весовые коэффициенты позволяют повысить устойчивость метода, когда переходный процесс в начале и конце одного и того же интервала правильной трансформации отличается. Эксперименты показали, что комбинированный метод обладает высокой устойчивостью к флуктуациям параметров кривой намагничивания и остаточной индукции. По быстрдействию взвешенный метод наименьших квадратов опережает комбинированный метод в пять раз.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ

1. Паздерин А.В. Направления исследований для повышения достоверности информации цифровой подстанции / А.В. Паздерин, П.В. Мурзин, **И.Н. Одинаев**, Ф.З. Бобокалонов / Электротехнические системы и комплексы, – 2019. №4. – С. 4-11, (0,5/0,35 п.л.);
2. **Одинаев И.Н.**, Мурзин П.В., Паздерин А.В. Шукало А. Анализ математических методов снижения погрешности ТТ в режиме насыщения / **И.Н. Одинаев**, П.В. Мурзин, А.В. Паздерин, А. Шукало / Электротехнические системы и комплексы, – 2020. №2. – С. 11-18, (0,44/0,3 п.л.);
3. Giyoev B.M. Review of modern methods for busbar protection implementation / B.M. Giyoev, M. Kh. Safaraliev, R.O. Ayombekov, **I.N. Odinaev** // 2nd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, Moscow, Russia – 2020, (0,313/0,2 п.л.) (Scopus);
4. **Odinaev I.** Detection of the initial region of the current transformer core saturation / **I. Odinaev**, A.V. Pazderin, P.V. Murzin, V.A. Tashchilin, V.O. Samoylenko & B. Ghoziev // 19th International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Almeria, Spain – 2021. pp. 477-486, (0,375/0,25 п.л.) (Scopus);
5. **Odinaev, I.** Comparison of Mathematical Methods for Compensating a Current Signal under Current Transformers Saturation Conditions / **I. Odinaev** A. Gulakhmadov, P. Murzin, A. Tavlintsev, S. Semenenko, E. Kokorin, M. Safaraliev, X. Chen / Sensors, – 2021. №21. – 7273, (1,0625/0,9 п.л.) (Scopus);

В других изданиях

6. **Одинаев И.Н.** Способы компенсации искаженной информации в режиме насыщения трансформатора тока / **И.Н. Одинаев**, П.В. Мурзин, Ф.З. Бобокалонов, А.В. Паздерин // Международная научно-практическая конференция «энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика». Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2019. С. 292-295, (0,25/0,2 п.л.);
7. **Одинаев И.Н.** Компенсация погрешности трансформаторов тока в режиме насыщения / **И.Н. Одинаев**, П.В. Мурзин, Н.А. Морозенко // Международная научно-практическая конференция «энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика». Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2020. С. 133-137, (0,3125/0,3 п.л.).