

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого

Президента России Б.Н. Ельцина»

Уральский энергетический институт

Кафедра «Автоматизированные электрические системы»

На правах рукописи

Одинаев Исмоил Назримадович

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

Специальность 2.4.3. Электроэнергетика

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Паздерин Андрей Владимирович

Екатеринбург — 2022

Введение.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ВОПРОСУ НАСЫЩЕНИЯ ТТ.....	11
1.1. Нормативные документы, предъявляющие требования к ТТ	11
1.2. Подходы к моделированию ТТ	14
1.3. Обзор методов компенсации погрешности ТТ.....	17
1.3.1. Систематизация методов компенсации погрешности ТТ	17
1.3.2. Компенсация погрешности ТТ путем конструктивного изменения.....	19
1.3.3. Компенсация погрешности ТТ на основе математической обработки сигнала	20
1.4. Апробация методов восстановления тока ТТ.....	32
1.4.1. Вычислительный эксперимент №1. Проверка методов восстановления тока в условиях отсутствия белого шума и остаточной индукции	33
1.4.2. Вычислительный эксперимент №2. Проверка методов восстановления тока к остаточной индукции	35
1.4.3. Вычислительный эксперимент №3. Проверка методов восстановления тока к зашумленным измерениям.....	36
1.4.4. Вычислительный эксперимент №4. Проверка методов восстановления тока к остаточной индукции и белому шуму.....	40
1.4.5. Расчет погрешностей методов.....	42
ГЛАВА 2. ДЕТЕКЦИЯ НАСЫЩЕНИЯ ТТ НА ОСНОВЕ НАКЛОНА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ АВТОРЕГРЕССИИ.....	51
2.1 Обзор методов детекции насыщения ТТ	51
2.2 Детекция насыщения ТТ на основе контроля магнитной индукции	55
2.3 Детекция путем прогнозирования временных рядов измеренного тока	57
2.4 Определение границы между нормальным и аварийным режимами	59
2.5 Тестирование метода КМИ.....	61
2.5.1. Описание тестовой модели.....	62
2.5.2. Проверка метода КМИ на устойчивость к белому шуму.....	62
2.5.3. Проверка метода КМИ к остаточной индукции.....	63
ГЛАВА 3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТОКА ТТ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ	65
3.1. Взвешенный метод наименьших квадратов	65
3.2. Восстановление тока на основе комбинированного метода	72

ГЛАВА 4. ПРОВЕРКА МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТОКА В УСЛОВИЯХ НАСЫЩЕНИЯ ТТ.....	80
4.1. Проведение экспериментов	80
4.1.1. Тестовая модель для проведения экспериментов	80
4.1.2. Оценка погрешности алгоритмов восстановления тока	82
4.2. Вычислительный эксперимент №1. Проверка методов КМ и ВМНК в зависимости от уровня насыщения магнитопровода ТТ.....	83
4.3. Вычислительный эксперимент №2. Проверка чувствительности методов КМ и ВМНК к наличию шума в измерениях	87
4.4. Вычислительный эксперимент №3. Проверка чувствительности методов КМ и ВМНК к скорости затухания апериодической составляющей тока КЗ.....	90
4.5. Вычислительный эксперимент №4. Проверка чувствительности метода КМ отклонении кривой намагничивания ТТ	94
4.6. Вычислительный эксперимент №5. Проверка чувствительности метода КМ к остаточной индукции.....	98
4.7. Вычислительный эксперимент №6. Проверка чувствительности метода КМ к изменению нагрузки ТТ	101
4.8. Вычислительный эксперимент №7. Сопоставительный анализ быстродействия методов КМ и ВМНК.....	101
Заключение.....	104
Список терминов и сокращений	108
Список литературы.....	109
Список рисунков.....	119
Список таблиц.....	121
Приложение А.....	122
Приложение Б	123

Введение

Актуальность темы. Ликвидация аварийных режимов работы осуществляется за счет устройств релейной защиты и автоматизации (РЗА), подключаемых в высоковольтных сетях 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 с параметрами, соответствующими классу Р. Это позволяет повысить точность измерения в условиях нормального и ненагруженного режимов относительно таких же ТТ с разомкнутой магнитной цепи. Однако при двукратном отключении тока короткого замыкания (КЗ), вызывающего остаточную индукцию в магнитопроводе указанных ТТ с неблагоприятным знаком, или КЗ, сопровождающемся большой долей апериодической составляющей, возникает риск насыщения. В этом случае погрешность измеренного тока может превысить предельно допустимое значение, в результате чего возможна неправильная работа алгоритмов защиты. Вопрос насыщения ТТ с замкнутым магнитопроводом изучался в 80-х гг прошлого столетия [1]. Однако актуальность темы сохранилась и сегодня.

В [2] показано, что при первичном токе в пределах от 100 до 120% от номинального значения и при номинальной вторичной нагрузке время размагничивания остаточной магнитной индукции ТТ класса Р варьируется в диапазоне от 1 до 30 минут. Следует отметить, что если уровень первичного тока не превышает 20% от номинального, то затухания остаточной магнитной индукции не происходит. Это способствует возникновению насыщения магнитопровода и повышению погрешности ТТ при двукратных КЗ. Из-за влияния погрешности ТТ при неглубоких насыщениях на корректность функционирования защит, работающих по дифференциальному принципу, применяются тормозные характеристики. Также в целях исключения глубокого насыщения ТТ в дифференциальных защитах используется дополнительное торможение [3]. 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 характеристики [4]. Однако, как показывает практика, в условиях насыщения ТТ эти меры не способны обеспечить корректного функционирования системы РЗА. Например, в 2018 г. на воздушной линии 110 кВ «Пыть-Ях» – «Угутский» ПС 110 кВ «Угутский» произошло КЗ с неуспешным повторным включением. Из-за ошибочных действий оперативного персонала на этой же линии произошло однофазное КЗ, при котором неселективно сработала дифференциальная защита шин (ДЗШ) с командой на отключение первой и второй системы шин. По мнению авторов работы [5] причиной неселективной работы ДЗШ могла служить остаточная магнитная индукция ТТ ВЛ «Пыть-Ях» – «Угутский» и ТТ шиносоединительного выключателя, которая появилась при предыдущем двухкратном КЗ.

Также из-за насыщения ТТ класса Р, установленных на ОРУ 500 кВ Ростовской АЭС, в 2014 году произошло некорректное срабатывание ДЗШ ПДЭ-2006 IV СШ 500 кВ. Вследствие чего ОЭС Юга отделилась от Центра.

В соответствии с [6] и [7] в результате насыщения ТТ происходит:

- 1) замедление срабатывания дифференциальной защиты линии;
- 2) замедление срабатывания дифференциальной-фазной защиты;
- 3) замедление срабатывания первой ступени дистанционной защиты;
- 4) замедление срабатывания первой ступени токовой защиты нулевой последовательности;
- 5) некорректная работа алгоритмов определения места КЗ.

В настоящее время все более широкое развитие находят цифровые подстанции, работающие по стандарту 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. Также при насыщении производят блокировку действия защит до момента восстановления правильной работы ТТ, что увеличивает время ликвидации КЗ.

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 используются оптимизационные методы. Более подробный обзор всех методов и анализ их характеристик приведен в первой главе диссертации.

Целью работы является разработка метода детекции момента возникновения насыщения магнитопроводов ТТ и совершенствование методов восстановления искаженных измерений вторичного тока для их использования в алгоритмах РЗА на основе стандарта МЭК 61850.

Для выполнения намеченного необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ литературы существующих методов восстановления тока и детекции насыщения ТТ. 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 переходных режимах КЗ или при наличии значительной остаточной индукции.

Научная новизна:

1. В результате анализа литературы определена степень проработанности темы исследования и выявлена точность ранее разработанных методов восстановления, также выявлена их чувствительность к белому шуму 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. Усовершенствован комбинированный метод, в котором на основе применения модели ТТ Jiles-Atherton путем решения оптимизационных нелинейных задач производится оценка начальной индукции.

Теоретическая и практическая значимость заключается в разработке метода детекции момента возникновения насыщения с гибкой настройкой к уровню насыщения и уровню белого шума и модификации двух методов восстановления тока в его искаженных участках. Применение этих методов позволяет исключить ложное срабатывание средств РЗА, вызванное снижением точности 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 статистики и метрологии. Расчеты проводились с помощью программного комплекса MATLAB со средой графического моделирования Simulink и Microsoft Excel.

Основные 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» 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.

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

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

Объем и структура 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.

ГЛАВА 1. ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ВОПРОСУ НАСЫЩЕНИЯ ТТ

В рамках настоящей главы приводится анализ зарубежной и отечественной нормативной документации, предъявляющей требования к ТТ. Приводится описание методов математического моделирования ТТ. Представлен анализ отечественных и зарубежных методов компенсации погрешностей ТТ при насыщении магнитопровода. Дается описание методов, основой которых является оптимизация магнитной проницаемости ТТ и математическая обработка сигнала. Приводится апробация более эффективных методов компенсации погрешности ТТ. Выявляется степень проработанности темы.

1.1. Нормативные документы, предъявляющие требования к ТТ

Для обеспечения систем РЗА измерительной информацией в настоящее время широко применяются электромагнитные ТТ. Согласно IEC 60044-6 и IEC 61869-2 электромагнитные ТТ с характеристиками, учитывающими переходные процессы, можно разбить на четыре класса: TPX, TPS, TPY и TPZ. Основное различие этих классов заключается в конструкции магнитной цепи. Конструкция магнитопровода ТТ класса TPX и TPS выполнена в виде замкнутого сердечника. Это позволяет повысить точность ТТ в определенных диапазонах. Однако уровень остаточной магнитной индукции не нормируется и может достигать 80% [8]. Магнитопроводы ТТ класса TPY и TPZ имеют воздушный зазор. В нормальных режимах погрешность измерения этих ТТ выше, чем погрешности ТТ с замкнутым магнитопроводом. Наличие воздушного зазора в классе TPY позволяет снизить остаточную магнитную индукцию до 10%, а в TPZ остаточная магнитная индукция становится пренебрежимо мала, т. е. кривая намагничивания «выпрямляется». В соответствии с IEC 60044-1 магнитопроводы ТТ классов TPX и P имеют одинаковую конструкцию. К ТТ класса TPX дополнительно предъявляются требования к параметрам переходного режима. В таблице 1 приводятся

допустимые погрешности для каждого из вышеуказанных классов ТТ в соответствии с ПНС-283-2018.

Таблица 1 – Предельно допустимые погрешности ТТ согласно ПНС-283-2018

Класс точности	Допустимая погрешность			
	погрешность при номинальных значениях		полная при номинальной предельной кратности ε , %	при переходном процессе, %
	токовая, %	угловая, %		
5P	1	60	5	не нормируют
10P	3	не нормируют	10	не нормируют
TPY	1	60	10	≤ 10
TPZ	1	180 ± 18	10	≤ 10

Основными факторами, негативно влияющими на погрешности ТТ, являются остаточная индукция λ_0 , наличие и уровень и скорость затухания апериодической составляющей T_I КЗ, угол и степень вторичной нагрузки ТТ R_n и x_n соответственно [9]. 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: активное сопротивление вторичной обмотки и нагрузки $R_2 = 0,9 \text{ Ом}$ и $R_n = 0,48 \text{ Ом}$ соответственно; индуктивное сопротивление вторичной обмотки и нагрузки $x_2 = 0,2 \text{ Ом}$ и $x_n = 0 \text{ Ом}$ соответственно; коэффициент трансформации $n_T = 600/5$; индукция насыщения магнитопровода $\lambda_s = 1,9 \text{ Тл}$. Продолжительность интервала моделирования КЗ $t_m = 0,08 \text{ с}$.

На рисунке 1 показана зависимость токовой f_i и полной ε погрешности ТТ от λ_0 . При вариации λ_0 угол и степень вторичной нагрузки ТТ соответствовали своим номинальным значениям. Начальная величина апериодической составляющей тока КЗ была зада в 50% от амплитуды периодической составляющей со скоростью затухания $T_I = 0.05 \text{ с}$. Из графиков на рисунке 1 видно, что погрешности ТТ прямо пропорциональны λ_0 . Более того, по мере приближения λ_0 к своему предельно допустимому значению погрешности ТТ начинают резко расти. Сказанное видно по f_i ТТ на

рисунке 1, когда λ_0 превышает $1,6 Tл$. На практике такое возможно при неуспешном срабатывании автоматического повторного включения. В отличие от токовой погрешности полная погрешность ТТ при вариации λ_0 ведет себя относительно линейно.

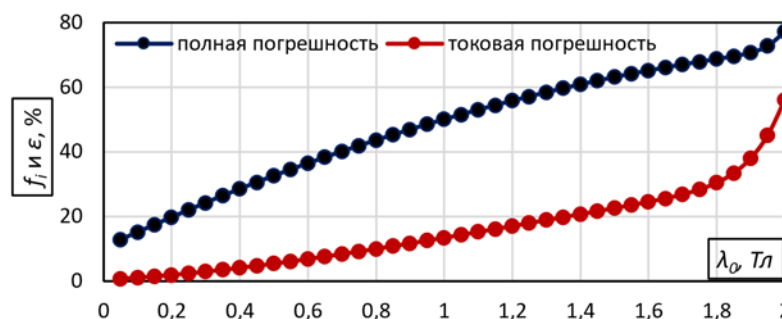


Рис. 1 Влияние остаточной индукции на погрешности ТТ

Зависимость погрешности ТТ от T_l показана на Рис. 2. На первом графике (а) вариация T_l производилась при $\lambda_0 = 0,5 Tл$, на втором графике (b) — при $\lambda_0 = 1,5 Tл$. Начальная величина апериодической составляющей не изменялась и соответствовала предыдущему эксперименту. Из графиков (а) и (b) видно, что при $\lambda_0 = 0,5 Tл$ ТТ все работает более точно, чем при $\lambda_0 = 1,5 Tл$. Значение полной погрешности ТТ при отсутствии апериодической составляющей тока КЗ и $\lambda_0 = 0,5 Tл$ расположено ниже 20%, в то время как при $\lambda_0 = 1,5 Tл$ оно превышает 30%. При $T_l \geq 0,05 c$ зависимость погрешности ТТ от T_l начинает снижаться. Это вызвано тем, что магнитопровод ТТ работает в области глубокого насыщения и дальнейшее увеличение влияющих факторов сильно не изменяет поведение ТТ.

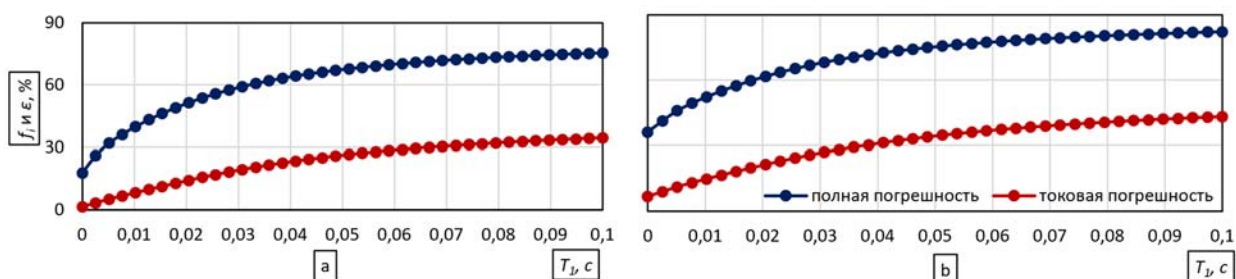


Рис. 2 Влияние T_l на погрешности ТТ

На Рис. 3 показано влияние активной (а) и индуктивной (b) вторичной нагрузки на погрешности ТТ. Вариация активной нагрузки производилась при

$\lambda_0 = 0$ Тл, $T_l = 0,5$ с и $x_n = 0$ Ом. Из графика (а) видно, что при номинальной вторичной нагрузке ($R_n = 0,48$ Ом) полная погрешность ТТ превышает 25%, что вызвано длительной продолжительностью T_l . Дальнейшее увеличение активной нагрузки при фиксированном уровне апериодической составляющей тока КЗ и T_l начинают оказывать сильное негативное влияние на погрешности ТТ. Из графика (b) видно, что влияние индуктивной нагрузки ТТ не так велико по сравнению с влиянием активной нагрузки. Это объясняется тем, что при трансформации тока на вторичной стороне ТТ возникает апериодическая составляющая благоприятного знака, т.е. противоположная по знаку апериодической составляющей первичного тока. Более того, стоит отметить, что при большой индуктивной нагрузке ТТ при насыщении происходит медленное отклонение измеренного тока от эталонного [10]. Сказанное можно заметить по поведению токовой и полной погрешности ТТ. На графике (а) разница между токовой и полной погрешностью большая, а на графике (b) – относительно мала.

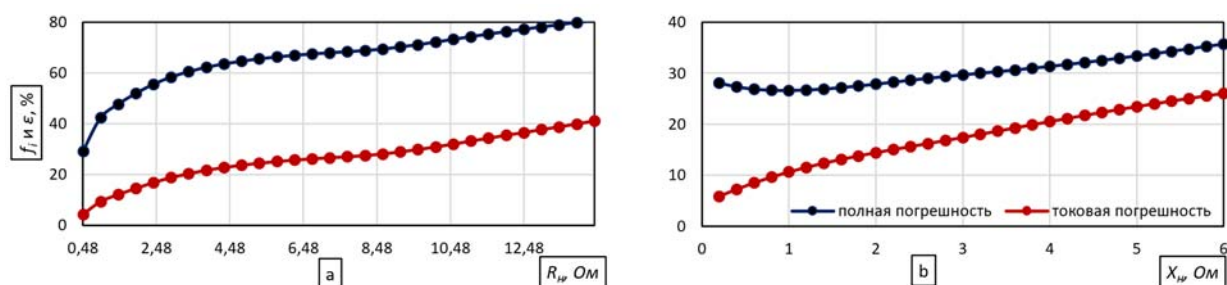


Рис. 3 Влияние вторичной нагрузки на погрешности ТТ

1.2. Подходы к моделированию ТТ

Для изучения задачи компенсации погрешности ТТ в режиме насыщения используются два типа моделирования – физическое [11]-[14] и математическое [15]-[22]. В рамках [11]-[14] авторы на основе реальных ТТ провели исследования, которые позволяют выявить изменение погрешности ТТ в зависимости от температуры окружающей среды, уровня и угла вторичной нагрузки. Предложенные в [15]-[22] модели ТТ можно разбить на модели ТТ с учетом и без учета петли гистерезиса в характеристике

намагничивания. В работах [15] и [16] предложена математическая модель ТТ, в которой не учитывается петля гистерезиса:

$$\begin{cases} \frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{w_2 \cdot s} \left(R_2 \cdot i_2 + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \right) \\ H \cdot l = w_1 \cdot i_1 - w_2 \cdot i_2 \\ H = f(\lambda) \end{cases}, \quad (1)$$

где λ – магнитная индукция ТТ, Тл; H – напряженность магнитного поля, А/м; l – средняя длина магнитного пути магнитопровода ТТ, м; i_1 и i_2 – первичный и вторичный токи соответственно, А; w_1 и w_2 – количество витков первичной и вторичной обмоток соответственно; s – поперечное сечение магнитопровода, м²; R_2 – активное сопротивление, Ом; L_2 – индуктивность вторичной цепи, Гн.

При моделировании ТТ с помощью (1) вместо петли гистерезиса применяется усредненная характеристика намагничивания, для получения которой было предложено большое количество функций-аппроксиматоров [23]-[25]. Настоящая модель среди русскоязычных исследователей получила широкое распространение. В Белорусском национальном техническом университете исследователи с помощью программного комплекса (ПК) Matlab-Simulink реализуют трехфазную модель ТТ, используя (1), [26];[27]. Затем на ее основе изучают поведение токовых защит линии электропередачи [28]. Также с помощью использования (1) исследователи из Южно-российского государственного политехнического университета и Объединенного диспетчерского управления Урала [29] создали модель ТТ, на основе которой изучаются вопросы насыщения.

Анализ литературы показывает, что среди зарубежных исследователей для изучения работы ТТ в режиме насыщения и его влияния на работу РЗА широкое применение нашли модели ТТ с учетом петли гистерезиса [17]-[22]. Среди моделей, учитывающих петлю гистерезиса, наиболее широкое распространение получила модель ТТ, основанная на теории Jiles-Atherton [20]- [22]. Например, исследователи из технологического университета Мазендерана (Иран) с помощью данной модели ТТ рассматривают вопросы

восстановления искаженного тока [30] , а исследователи из университета Бирдженд (Иран) изучают вопросы возникновения насыщения ТТ [31].

Согласно теории Jiles-Atherton [32] процессы, происходящие в магнитной цепи ТТ, описываются через связь между напряженностью магнитного поля H и намагниченностью M . Классическая кривая намагничивания, устанавливающая связь $H=f(\lambda)$, заменяется зависимостью безгистерезисной намагниченности M_{an} и эффективным значением напряженности H_e , $M_{an} = M_s f(H_e)$. Что касается электрической цепи, она остается неизменным. Модель ТТ на основе Jiles-Atherton можно представить как:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta H = \frac{w_1}{l} \Delta i_1 - \frac{w_2}{l} \Delta i_2 \\ \frac{w_2 s}{\Delta t} \Delta \lambda = R_2 \left(i_2^{n_{ped}} + \frac{\Delta i_2}{2} \right) + \frac{L_2}{\Delta t} \Delta i_2 \\ \Delta \lambda = \mu_0 (\Delta H + \Delta M) \\ H_e = H + \alpha M \\ c \frac{dM_{an}}{dH_e} + \frac{M_{an} - M}{\delta j - \alpha (M_{an} - M)} \\ \frac{\Delta M}{\Delta H} = \frac{\mu_0}{1 - \alpha c \frac{dM_{an}}{dH_e}} \\ M_{an} = M_s \frac{a_1 H_e + H_e^b}{a_3 + a_2 H_e + H_e^b} \\ \frac{dM_{an}}{dH_e} = M_s \frac{a_1 a_3 + b a_3 H_e^{b-1} + (b-1) H_e^b}{(a_3 + a_2 H_e + H_e^b)^2} \\ k_{mod} = j \left[1 - \beta \left(\frac{M}{M_s} \right)^2 \right] \\ M_s = \frac{\lambda_s}{\mu_0} \end{array} \right. , \quad (2)$$

где α – коэффициент, описывающий взаимодействие между доменами; M_s – намагниченность насыщения; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная; a_1, a_2, a_3 и b – коэффициенты кривой намагничивания; c и j – параметры вещества; δ – параметр направления, $\delta = 1$ при $dH/dt > 1$ и $\delta = -1$ в противном случае; k_{mod} – модифицированный коэффициент, регулирующий ширину гистерезиса; λ_s – индукция насыщения.

С помощью j и β можно регулировать ширину гистерезиса. На основе системы (2) можно составить систему линейных уравнений, решая которую относительно таких неизвестных величин, как ΔH , ΔM , $\Delta \lambda$ и Δi_2 , можно получить вторичный ток.

1.3. Обзор методов компенсации погрешности ТТ

1.3.1. Систематизация методов компенсации погрешности ТТ

В целях снижения погрешности измерения ТТ или избегания ее влияния на работу системы РЗА применяются два подхода:

- 1) конструктивное изменение ТТ [33]-[35];
- 2) математическая обработка сигнала [36]-[82].

Основой методов, предложенных в рамках первого подхода, является изменение магнитной и электрической цепи ТТ.

В рамках второго подхода для компенсации погрешности ТТ в режиме насыщения или для исключения ее влияния на работу системы РЗА используются методы детекции насыщения [36]-[52] и [53]-[82]. В терминах цифровой обработки сигналов задачу компенсации погрешности ТТ можно разбить на три группы – сегментация, селекция и фильтрация [83]; [84]. Сегментация – разграничение нормального и аномального режимов. Селекция – выбор измерений тока, находящихся в зоне того ИПТ, после которого происходит насыщение ТТ с сохранением однородности режима наблюдаемого участка сети. Фильтрация – восстановление искаженных измерений тока, находящихся вне зоны ИПТ того же режима или компенсация погрешности ТТ в режиме его насыщения. Из всех трех перечисленных подзадач наиболее сложными являются селекция и фильтрация. Условно говоря, предложенные в рамках второго подхода методы предназначены для решения задачи селекции [36]-[52] и фильтрации [53]-[82].

При использовании методов селекции решается задача детекции возникновения насыщения магнитопровода ТТ [36]-[52]. Более подробный анализ этих методов будет рассматриваться в следующей главе.

В случае применения методов фильтрации [53]-[82] выполняется восстановление эталонного сигнала на основе составляющей, которая обусловлена насыщением ТТ. Сущность этих методов заключается в использовании параметров ТТ и измерений тока. Методы фильтрации были предложены после появления микропроцессорных устройств, согласно [86]-[88] их можно разбить на группы:

- 1) восстановление с использованием кривой намагничивания [53]-[60];
- 2) восстановление путем прогнозирования [61]-[68];
- 3) восстановление с помощью нейронных сетей [69]-[77];
- 4) восстановление с помощью комбинированных методов [78]-[82].

На Рис. 4 показана систематизация методов компенсации погрешности ТТ. Следует отметить, что на этом рисунке из блока «Математическая обработка сигнала» исключены методы сегментации и селекции, т.к. они имеют косвенное отношение к компенсации погрешности ТТ.



Рис. 4 Систематизация методов компенсации погрешности ТТ

Более подробное описание методов, предложенных в рамках обоих подходов, приводится далее.

1.3.2. Компенсация погрешности ТТ путем конструктивного изменения

Основой обеих групп, связанных с подходом конструктивного изменения ТТ, является оптимизация абсолютной магнитной проницаемости μ_a магнитной цепи ТТ. На Рис. 5 показаны зависимость μ_a от индукции λ и λ от напряженности магнитного поля H .

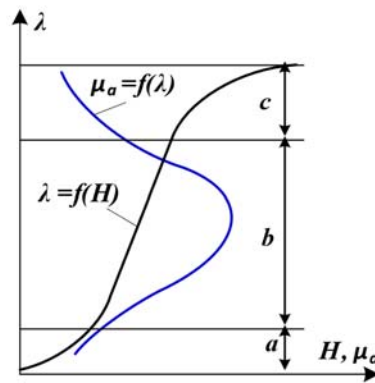


Рис. 5 Зависимость $\mu_a = f(\lambda)$ и $\lambda = f(H)$

В соответствии с [33] токовую погрешность с помощью использования магнитных параметров ТТ можно представить как:

$$f_i = \frac{0,225 \cdot I_2 \cdot z_2 \cdot l}{\sqrt{2} \cdot \mu_a \cdot s \cdot f \cdot w_2 \cdot F_1} \times \sin(\psi + \alpha) \cdot 100, \quad (3)$$

где z_2 – полное сопротивление вторичной цепи и вторичной обмотки, Ом; l – средняя длина магнитного пути магнитопровода ТТ, м; f – частота переменного тока, Гц; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость; s – поперечное сечение магнитопровода ТТ, м²; F_1 – первичная м.д.с, А; ψ – угол потерь; α – угол между вторичным I_2 и вторичной э.д.с. E_2 , °.

Из Рис. 5 видно, что при расположении точки на линейном участке кривой намагничивания – зона b – абсолютная магнитная проницаемость μ_a достигает своего максимума, а в зонах a и c снижается. По (3) также можно заметить, что μ_a обратно пропорциональна токовой погрешности ТТ. Таким

образом, методы, основой которых является конструктивное изменение ТТ, направлены на оптимизации μ_a в магнитопроводе ТТ.

Следует отметить, что эти методы предназначены для снижения погрешности ТТ в режимах, когда первичный ток находится в диапазоне 5-120% от номинального [33]. В режимах, вызывающих насыщение ТТ, данные методы не обеспечивают компенсации погрешности ТТ до предельно допустимого значения.

1.3.3. Компенсация погрешности ТТ на основе математической обработки сигнала

1.3.3.1. Восстановление тока ТТ на основе использования кривой намагничивания

В [53]-[56] предложены методы восстановления тока ТТ в режиме насыщения. Основой этих методов является расчет намагничивающего тока с помощью использования параметров кривой намагничивания и измерениям тока. В [53] и [54] авторы соответственно рассматривают возможные варианты обеспечения правильного функционирования дифференциальной защиты в условиях насыщения ТТ и способы снижения влияния погрешности ТТ на корректность функционирования системы РЗА. Одним из предложенных способов в обеих рассмотренных работах является восстановление тока ТТ. Позднее в [55] и [56] авторы предлагают ряд методов восстановления тока ТТ, куда входит предложенный в [53] и [54] метод. По мнению авторов среди предложенных методов наиболее эффективным является:

$$i_0(t) = -\frac{R_2}{\omega x_0} \cdot \frac{d}{dt} i_2(t), \quad (4)$$

где i_2 и i_0 – мгновенные значения вторичного и намагничивающего токов ТТ соответственно, A ; R_2 , x_0 – активное сопротивление вторичной цепи и индуктивное сопротивление намагничивающей ветви ТТ, $Ом$; ω – угловая скорость, $рад/с$.

Таким образом, зная намагничивающий ток для каждого момента времени на участках насыщения и складывая его с вторичным током можно восстановить ток:

$$i_1^l(t) = i_0(t) + i_2(t). \quad (5)$$

К положительным сторонам этого метода можно отнести его быстродействие, т.к. отсутствуют какие-либо сложные математические функции. Основным недостатком данного метода является поиск индуктивного сопротивления x_0 в реальных условиях, когда траектория изменения напряженности магнитного поля в кривой намагничивания ТТ представляет из себя петлю гистерезиса. Т.е. каждому значению λ соответствуют два значения H . К другому недостатку данного метода можно отнести численное дифференцирование, которое является усилителем белого шума.

В работах [57] и [58] предложен метод восстановления тока с помощью использования кривой намагничивания ТТ. Далее для удобства записи данный метод обозначим А1. Сущность настоящего метода заключается в использовании зависимости $\lambda = f(H)$, которая позволяет получить намагничивающий ток. Для этого необходимо знать магнитную индукцию λ , которую можно рассчитать следующим образом:

$$\lambda(t) = \frac{R_2}{w_2 \cdot s} \int_{t_0}^t i_2(\zeta) d\zeta + \frac{R_2}{w_2 \cdot s} (i_2(t) - i_2(t_0)) + \lambda(t_0), \quad (6)$$

где s – поперечное сечение магнитопровода ТТ, m^2 ; R_2 – активное сопротивление ТТ, Ω ; L_2 – индуктивность вторичной цепи ТТ, Hn ; i_2 – измеренный ток, A ; w_2 – количество витков вторичной обмотки ТТ.

Далее, зная магнитную индукцию, с помощью зависимости $\lambda = f(H)$ можно определить намагничивающий ток:

$$i_0(t) = \frac{H(t)l}{w_2}, \quad (7)$$

где l – средняя длина магнитного пути, m .

Затем по (5) можно получить восстановленный ток.

В исследованиях [59] и [60] предлагается метод восстановления тока, в основу которого заложен предложенный в [58] метод. Первое отличие [59] и [60] от [58] заключается в учете петли гистерезиса в кривой намагничивания ТТ, второе – в учете составляющих намагничивающего тока, т.е. вихревых токов i_{eddy} и потерь на гистерезис i_h . Расчет намагничивающего тока с учетом i_{eddy} и i_h :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt}i_h(t) = f\left(\mu_0, \lambda(t), \frac{d}{dt}\lambda(i_h), \frac{d}{dt}\lambda(t)\right) \\ i_{eddy}(t) = f\left(v, \frac{d}{dt}\lambda(t)\right) \\ i_0(t) = i_h(t) + i_{eddy}(t) \end{array} \right., \quad (8)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, v – коэффициент, учитывающий потери на вихревые токи.

Преимущество предложенных методов заключается в их устойчивости относительно наличия шума и гармонических составляющих в измеренном токе. Однако главным их недостатком является их высокая чувствительность к остаточной индукции в магнитопроводе ТТ. Также форма кривой намагничивания может оказать негативное влияние на результат работы этих методов.

1.3.3.2. Восстановление тока ТТ с помощью методов прогнозирования

В работах [61]-[64] предложены методы восстановления тока ТТ, основой которых является известный метод наименьших квадратов (МНК). В [62] при восстановлении тока выполняется сравнение методов искусственных нейронных сетей (ИНС) и МНК, в результате которого МНК оказывается более робастным к наличию шума в измерениях. В работе [41] при насыщении ТТ с помощью МНК производится восстановление тока. Затем восстановленные значения тока подаются на вход максимальной токовой

защиты для оценки ее времени срабатывания. В дальнейшем метод МНК обозначим А2.

Согласно [61] и [62] в процедуру восстановления тока ТТ с помощью А2 закладывается модель кривой тока, которая соответствует режиму КЗ. В этой модели неизвестными параметрами являются: амплитуда синусоидальной I_{m1} и экспоненциальной I_{m2} составляющих, скорость затухания экспоненциальной составляющей γ и начальная фаза тока КЗ φ :

$$\dot{i}_1(t) = I_{m1} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) + I_{m2} \cdot e^{-\gamma \cdot t}, \quad (9)$$

где ω – угловая скорость, в данном методе она считается известной и принимается равной номинальной частоте сети (50 Гц).

Процедура определения основных параметров измеренного тока следующая. Используя метод преобразования сумм и разностей углов тригонометрических функций для первого слагаемого и разложение в ряд Тейлора для второго слагаемого, модель (9) можно переписать как:

$$\dot{i}_1(t) = C_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + C_2 \cdot \cos(\omega \cdot t) - C_3 \cdot t + C_4. \quad (10)$$

Коэффициенты C_1 - C_4 заменяют четыре неизвестных параметра модели (9). Более подробное описание процедуры получения коэффициентов C_1 - C_4 приводится в главе 3, посвященной взвешенному МНК.

В [63], в отличие от [61], [62] и [64], определение начальной фазы выполняется без ее линеаризации. Для определения этого параметра требуется наличие измерений, часть из которых покрывает первый полупериод, а часть – второй полупериод синусоидального сигнала. Далее предполагается, что насыщение имеется только в одном из полупериодов, например в первом, красная линия на Рис. 6.

В таком случае модулю максимального значения второго полупериода ставится в соответствие угол $\pi/2$ ($n_{\pi/2}$ – вторая красная точка справа на Рис. 6). Зная угол в момент времени $n_{\pi/2}$ и шаг дискретизации сигнала Δt , можно

определить угол произвольного измерения в выборке, в которой однородность режима сети сохраняется.

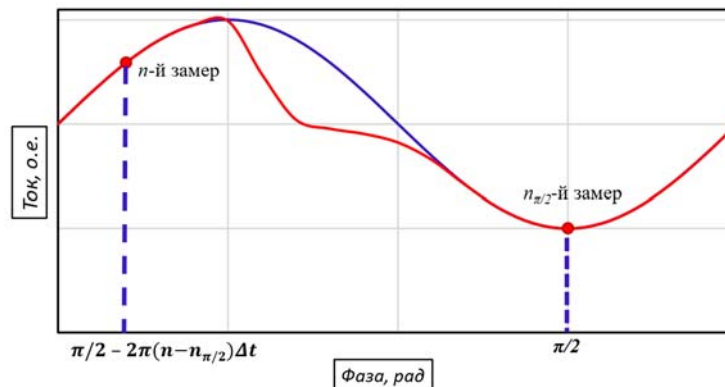


Рис. 6 Определение начальной фазы тока

В отличие от [61]-[63] в [64] при использовании метода А2 из процедуры оценки параметров модели исключается параметр C_3 , отвечающий за скорость затухания апериодической составляющей.

Достоинство предложенного метода А2 заключается в его высокой устойчивости относительно остаточной намагниченности в сердечнике ТТ. Однако метод имеет высокую чувствительность к белому шуму и гармоническим составляющим в измеренном токе. Наличие шума оказывает существенное негативное влияние на точность оценки скорости затухания апериодической составляющей. При наличии насыщения в двух полупериодах определение фазы на основе измерений, как показано на Рис. 6, не представляется возможным.

В работе [65] предложен метод, который позволяет выполнить искусственное расширение ИПТ. Для удобства записи его обозначим А3. Работа этого метода основана на использовании численного дифференцирования измерений тока, полученных в ИПТ. Т.е. предполагается, что приращения вторичного тока в ИПТ постоянные. Таким образом, на основе полученных в зоне ИПТ измерений можно прогнозировать следующее измерение за пределами этой зоны, Рис. 7.

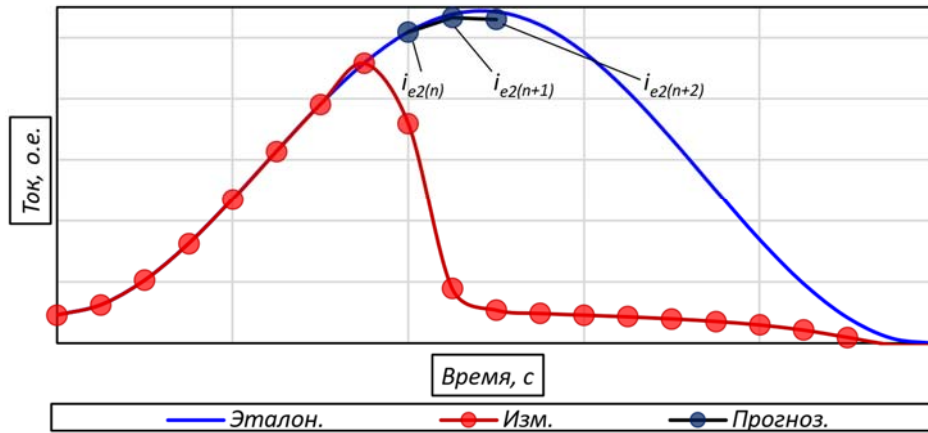


Рис. 7 Искусственное расширение ИПТ

Среди предложенных в [65] методов наиболее высокой точностью обладает метод численного дифференцирования 3-го порядка:

$$i_{2e}(n) = 4 \cdot i_2(n-1) - 6 \cdot i_2(n-2) + 4 \cdot i_2(n-3) - i_2(n-4), \quad (11)$$

где n – номер первого недостоверного измерения тока вне зоны ИПТ, ток i_2 – измерение вторичного тока и i_{2e} – прогнозируемое значение тока, получаемое с помощью экстраполяции на основе ИПТ.

Преимуществами предложенного метода являются отсутствие необходимости использования параметров магнитопровода ТТ и низкая вычислительная нагрузка микропроцессорных устройств. Однако предложенный метод не способен обеспечить восстановление искаженного тока на всем интервале насыщения, а также его эффективность зависит от частоты дискретизации сигнала тока. Более того, наличие шума оказывает существенное влияние.

В работе [66] предложен метод восстановления тока ТТ на основе интерполяционной формулы Ньютона [89]:

$$i_{2e}(n) = 2 \cdot i_2(n-1) - i_2(n-2) \cdot (2\pi \cdot f \cdot \Delta t)^2 - i_2(n-2), \quad (12)$$

где f – частота сети и Δt – шаг дискретизации.

Нетрудно заметить, что в формуле (12) присутствует численное дифференцирование первого порядка, предложенное в [65]. Для повышения

устойчивости метода к белому шуму в нем учитывается частота сети. Как показали результаты апробации, учет частоты сети снижает влияние белого шума, однако метод становится чувствительным к моменту перехода измеренного тока через нуль. В случае КЗ с большой апериодической составляющей момент перехода через нуль смещается и погрешность метода сильно растет.

В работах [67] и [68] предложен метод, который на основе использования измерений вторичного тока рассчитывает намагничивающий ток:

$$L_0 \cdot \frac{d}{dt} i_0(t) = R_2 \cdot i_2(t) + L_2 \cdot \frac{d}{dt} i_2(t), \quad (13)$$

$$i_0(t) = (\xi + \theta) \cdot i_2(t) + (\xi - \theta) \cdot i_2(t - \Delta t) + i_0(t - \Delta t), \quad (14)$$

где L_0 – индуктивность намагничивающей ветви ТТ; ξ и θ – коэффициенты, заменяющие параметры электрической и магнитной цепи ТТ.

В (14) неизвестными являются коэффициенты ξ и θ и намагничивающий ток. Процедура их определения следующая. На основе измерений ИПТ производится прогнозирование искаженных значений измеренного тока, как это показано на Рис. 7. Затем из прогнозных значений вычитаются измеренные значения тока. Далее на основе формулы (14) составляется система из двух уравнений, решая которые, находим коэффициенты ξ и θ . Таким образом по (14) определяется намагничивающий ток, по (5) – восстановленный ток.

Преимуществом данного метода является небольшое количество коэффициентов в уравнениях, что позволяет сократить количество измерений и упростить систему уравнений. Главным недостатком предложенного метода является его невысокая точность, т.к. при КЗ, вызывающем насыщение магнитопровода ТТ, погрешность может достигать 20% [68].

1.3.3.3. Восстановление тока ТТ с помощью ИНС

В работе [69] предложен метод восстановления тока ТТ путем обучения ИНС. Для наглядности на Рис. 8 показана работа одного нейрона. Из этого рисунка видно, что на вход каждого нейрона в ИНС поступает результат произведения набора входных значений $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ с весовыми коэффициентами $(w_1, w_2, \dots, w_n)$.

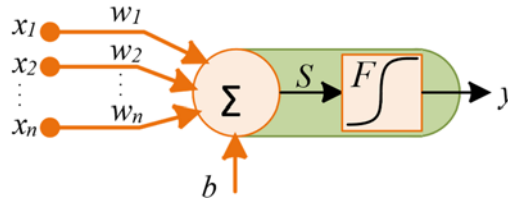


Рис. 8 Модель нейрона

После входа результата произведения в нейрон производится их суммирование с добавлением к ним величины смещения b :

$$S = (x_1 \cdot w_1 + x_2 \cdot w_2 + \dots + x_n \cdot w_n) + b. \quad (15)$$

Затем результат передается на вход функции активации:

$$\bar{y} = f([w_1 w_2 \dots w_n][x_1 x_2 \dots x_n]^T + b). \quad (16)$$

Таким образом, происходит передача данных через нейроны по сети. Связь нейронов одного слоя с нейронами предыдущего и последующего слоёв образует ИНС. Как правило, ИНС состоит из входного, скрытых и выходного слоев. В качестве скрытого слоя может быть использован как один, так и множество слоев. Одна из возможных топологий ИНС показана на Рис. 9.

После построения топологии ИНС следующим шагом является ее обучение. Под обучением ИНС понимается подача на вход сети наборов данных и минимизации ошибки между возвращаемыми $(\bar{y}_m^1, \bar{y}_m^2, \dots, \bar{y}_m^i)$ и желаемыми $(y_m^{1*}, y_m^{2*}, \dots, y_m^{i*})$ значениями. Минимизация ошибки производится путем регулирования набора весовых коэффициентов и смещений каждого слоя сети по алгоритму обратного распространения [91].

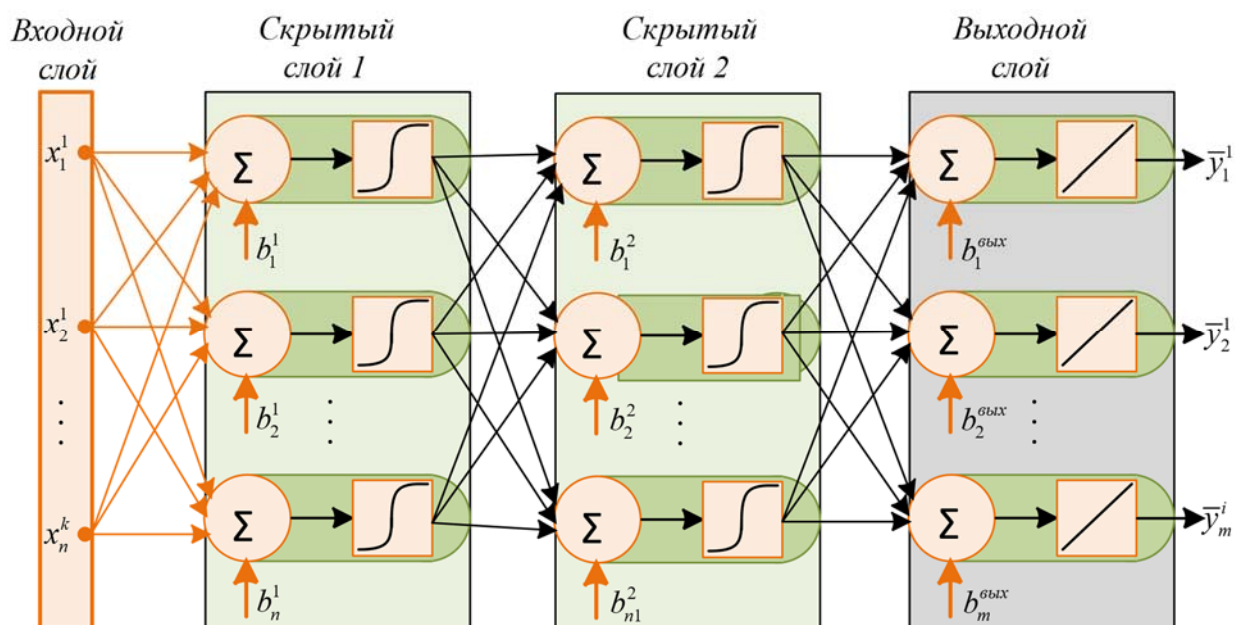


Рис. 9 Топология ИНС

Таким образом, регулируемыми параметрами между входными и выходными значениями обучающей выборки являются весовые коэффициенты и векторы смещений. Изменяя количество слоев в ИНС и ширину сети (количество нейронов в сети), можно получить желаемое количество параметров.

Восстановление тока ТТ на основе использования ИНС нашло широкое теоретическое развитие [70]-[77]. В рассматриваемых в данной работе методах ИНС в качестве функции-активации чаще всего используется сигмоидальная функция [90], которая расположена на выходе каждого нейрона скрытых слоев. Далее этот метод будем обозначать А4. Существует большое количество функций-активации, применение которых конкретизируется в зависимости от типа решаемой задачи [101].

Достоинством предложенных методов является отсутствие необходимости использования параметров ТТ и их независимость от ИПТ, также предложенные методы при различных режимах сети и степенях искаженности вторичного тока способны произвести восстановление тока с высокой точностью. Однако, учитывая различные режимы сети и их динамичность, основным недостатком метода А4 является необходимость их

обучения и адаптации ко всем режимам и факторам, влияющим на насыщение ТТ, что может привести к существенному увеличению требований к скорости вычислений микропроцессорных устройств.

1.3.3.4. Восстановление тока ТТ на основе комбинированных методов

В исследованиях [78] и [79] предложен метод восстановления тока ТТ в режиме насыщения. Предложенный метод состоит из двух частей: нахождение намагничивающего тока на основе использования представленной аналитическим путем кривой намагничивания, т.е. A1, и восстановление тока с помощью A2. Для восстановления тока по A2 сначала предлагается модель тока, которая описывает режим КЗ (9). Затем выполняется линеаризация этой модели относительно неизвестных коэффициентов C_1 - C_4 . Далее намагничивающий ток представляется как:

$$i_0 = f(H(B(i_2, C_5))), \quad (17)$$

где C_5 – неизвестный коэффициент, заменяющий начальную индукцию в магнитопроводе ТТ. Формула (17) в развернутом виде представлена в (6) и (7).

На основе (9) и (17) составляется целевая функция, которая включается в себя методы A1 и A2:

$$F(C) = \underbrace{i_2(t_i) + (i_0(t_i), C_5)}_{A1} - \underbrace{C_1 \cdot \sin(\omega t_i) + C_2 \cdot \cos(\omega t_i) - C_3 t_i + C_4}_{A2}, \quad (18)$$

где t_i – моменты времени, в которых производились замеры, охватывающие как хорошие, так и плохие измерения.

Таким образом, комбинацией методов A1 и A2 решается задача восстановления тока в режиме насыщения ТТ. Ввиду нелинейности неизвестного коэффициента C_5 минимизация функции (18) производится итерационной процедурой. Для повышения скорости сходимости при минимизации этой функции авторы метода на основе [92] и [93] предлагают разбить (18) на две части:

$$F(C_5) = (E - LL^+)(i_2 + f(C_5)) \text{ и} \quad (19)$$

$$C_{1-4} = L^+(i_2 + f(C_5)), \quad (20)$$

где E – единичная матрица; L – матрица при неизвестных коэффициентах C_{1-4} и L^+ – псевдообратная матрица для матрицы L .

После разделения (18) итерационная процедура распространяется только на функцию с неизвестным коэффициентом C_5 . Зная C_5 , с помощью (20) можно определить остальные коэффициенты. Т.е. в результате работы данного метода получим как начальную индукцию, так и вектор коэффициентов модели тока C_{1-4} .

К положительным сторонам метода можно отнести его устойчивость при определении начальной индукции, которая вызывает глубокое насыщение ТТ. Однако результаты апробации показали, что при легких насыщениях этот метод не обеспечивает точного определения начальной индукции, в результате чего погрешность восстановления возрастает. Авторы при поиске C_5 в своих вычислительных экспериментах оценивают работоспособность метода при глубоких насыщениях, где за 8-9 итераций определяется начальная индукция в (20). Однако, как показали результаты апробации, при легких насыщениях бывают случаи, когда за 20 итераций свести (20) к минимуму не представляется возможным.

В работах [80]-[82] предложен метод восстановления тока ТТ в режиме его насыщения. В целях избегания влияния начальной индукции на результат работы метода А1, предложенного в [57] и [58], авторы [80] и [81] комбинируют метод А1 с методами прогнозирования. Для удобства записи далее этот метод обозначим А5. Более подробное описание метода предложено в [82]. Восстановление тока по предложенному методу выполняется с использованием параметров как магнитной, так и электрической цепи ТТ. В этом методе процедура вычисления магнитной индукции $\lambda(t_0)$, соответствующей началу насыщения, выполняется в обратную сторону, т.е. искусственно расширяется ИПТ, в результате которого для

одного искажённого значения тока получим одно прогнозное значение. Затем рассчитывается намагничивающий ток, соответствующий началу насыщения магнитопровода:

$$i_0(t_0) = i_{2e}(t_0) - i_2(t_0), \quad (21)$$

где t_0 – момент возникновения насыщения или конец ИПТ, которому соответствует начальная индукция.

Процедура получения намагничивающего тока в момент t_0 графически показана на Рис. 10.

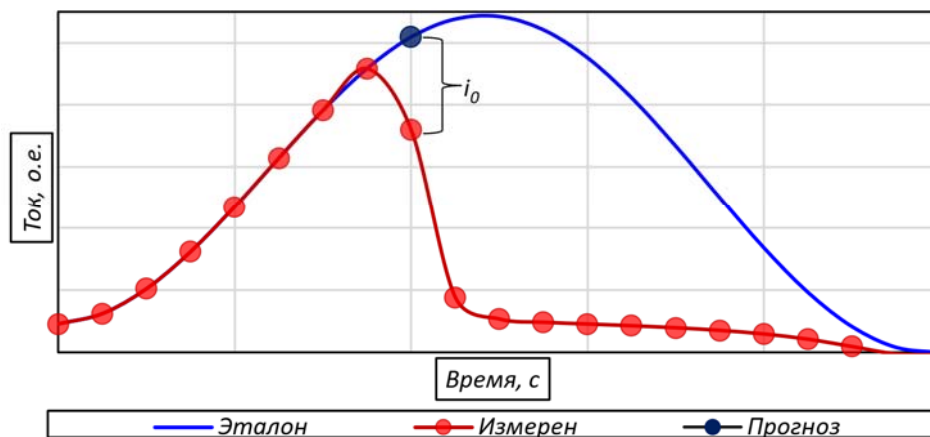


Рис. 10 Процедура расчета намагничивающего тока

Таким образом, зная намагничивающий ток в момент t_0 , по (7) можно определить напряженность магнитного поля $H(t_0)$, а по кривой намагничивания – магнитную индукцию $\lambda(t_0)$. Далее, зная $\lambda(t_0)$, с помощью по (6) можно рассчитать магнитную индукцию, которая соответствует участку насыщения ТТ и после по (7) и (5) рассчитать намагничивающий и восстановленный токи соответственно.

Преимуществом предложенного метода является улучшение его устойчивости относительно начальной индукции. Однако следует отметить, что первая часть метода включает в себя методы прогнозирования, которые имеют высокую чувствительность к белому шуму и гармоническим составляющим. Это приводит к снижению точности прогнозного значения

тока $i_{2c}(t_0)$, от которого зависит точность $\lambda(t_0)$. Сказанное может оказать существенное негативное влияние на результат работы метода, применяемого для восстановления тока ТТ класса Р, ввиду ширины петли гистерезиса на колене кривой намагничивания.

Предложенные в [53]-[82] методы ввиду сложности их адаптации к реальным условиям не нашли широкого практического развития.

Далее для численной оценки методов приводится их апробация.

1.4. Апробация методов восстановления тока ТТ

В данном разделе выполнена апробация методов А1, А2, А3, А4 и А5. Для выполнения апробации с помощью ПК Matlab была создана математическая модель ТТ типа ТФНД-110М с замкнутым магнитопроводом. В модель были заложены такие параметры, как: вторичная нагрузка $Z_2 = 2,48 + j0,2 \text{ Ом}$, коэффициент трансформации $n_T = 600/5$, средняя длина магнитного пути $l = 0,67 \text{ м}$ и площадь поперечного сечения $s = 17,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Частота дискретизации модельного сигнала была выбрана 80 точек/период в соответствии со стандартом МЭК 61850. В качестве первичного тока был использован сигнал:

$$i_1(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t < 0 \\ I_{m1} \sin\left(100\pi t - \frac{\pi}{2}\right) + I_{m2} e^{-\frac{t}{0.1}}, & \text{если } t > 0 \end{cases} \quad (22)$$

Известно, что момент насыщения сердечника ТТ зависит от ряда факторов, основными из которых являются начальный угол, амплитуда периодической составляющей, постоянная времени затухания и кратность тока КЗ, а также остаточная магнитная индукция и степень загруженности ТТ. В данной работе апробация методов фильтрации была произведена с учетом изменения начальной магнитной индукции и зашумлённости исходного сигнала. Выбор указанных факторов обусловлен тем, что методы прогнозирования имеют чувствительность к белому шуму, а методы использования кривой намагничивания – к начальной индукции. Далее

приводится описание условий проведения и результаты вычислительных экспериментов.

1.4.1. Вычислительный эксперимент №1. Проверка методов восстановления тока в условиях отсутствия белого шума и остаточной индукции

В ходе эксперимента в качестве эталонного сигнала была задана модель тока с параметрами, соответствующими (22). Начальная магнитная индукция была принята $\lambda_0 = 0$ Тл, белый шум $\delta = 0\%$. Целью настоящего вычислительного эксперимента являлась проверка работоспособности методов А1, А2, А3, А4 и А5. На Рис. 11 показаны кривые эталонного, измеренного и восстановленного токов. Из кривой измеренного тока на этом рисунке можно заметить, что насыщение магнитопровода ТТ возникает в момент времени $t = 6,25$ мс.

На первом графике Рис. 11 представлен результат работы метода кривой намагничивания А1. Т.к. начальная индукция в магнитопроводе ТТ отсутствует, этот метод восстанавливает ток с высокой точностью.

На втором графике Рис. 11 показана работа первого метода прогнозирования (МНК) А2. При восстановлении измеренного сигнала для всех 4 периодов по методу А2 в качестве измерения были включены ИПТ только первого периода, т.е. измерения, полученные в момент времени $t = 0 - 6,25$ мс. Из рисунка видно, что этот метод при отсутствии белого шума обеспечивает восстановление тока с высокой точностью.

На третьем графике Рис. 11 представлен результат работы второго метода прогнозирования А3. Следует отметить, что настоящий метод предназначен для расширения ИПТ. Однако, как показано на третьем графике, при правильном выборе ИПТ и при отсутствии белого шума в измеренном токе данный метод может перейти от короткого искусственного расширения ИПТ к частичному восстановлению тока, что существенно может снизить погрешность измерения при насыщении ТТ.

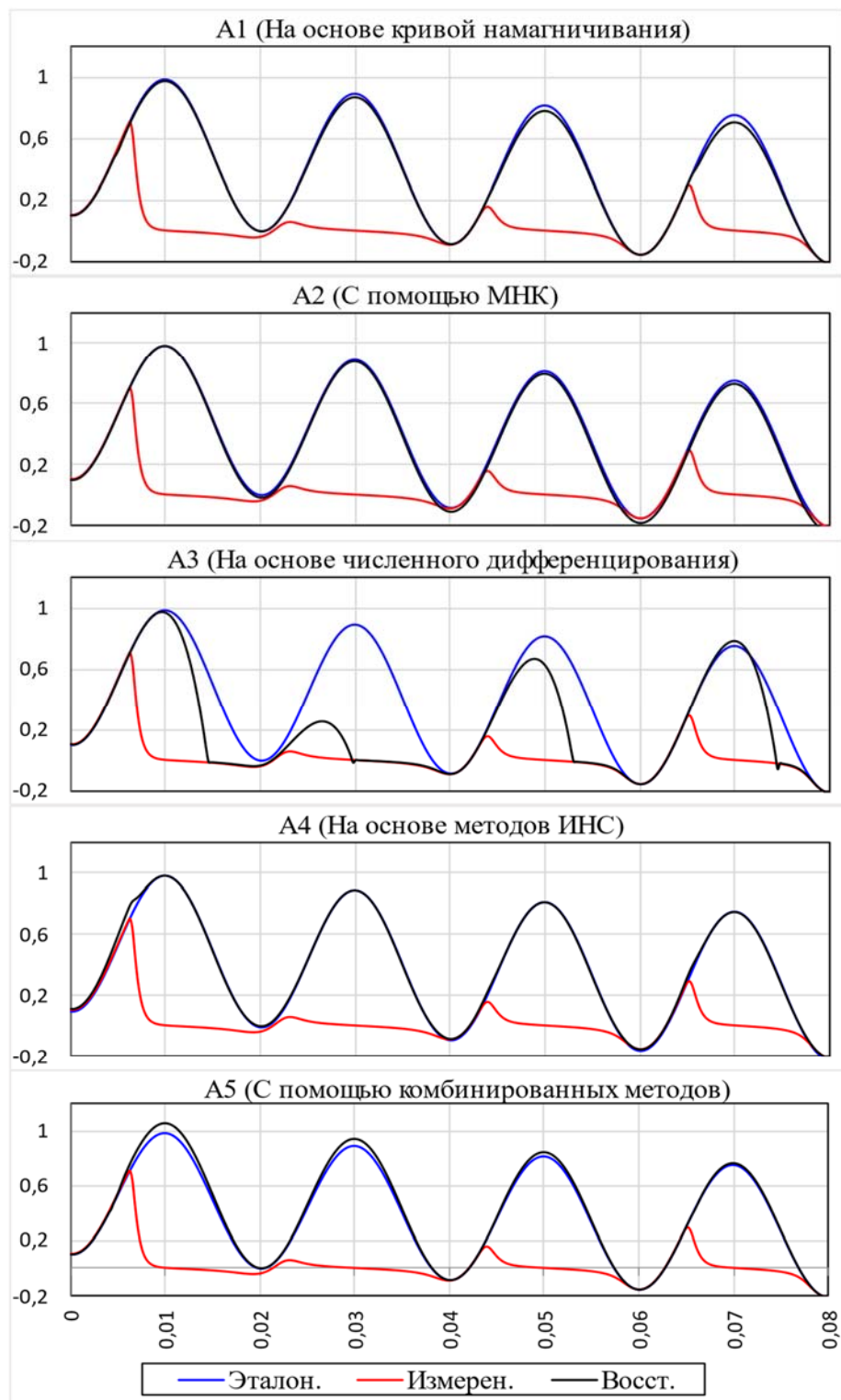


Рис. 11 Кривые токов, эксперимент №1

Восстановление тока с помощью методов ИНС А4 показано на четвертом графике Рис. 11. Следует отметить, что при восстановлении измеренного тока в режиме насыщения ТТ с помощью методов ИНС были использованы вычислительные средства, встроенные в среду Matlab. Данная возможность позволяет выбрать как топологию нейронных сетей, так и

алгоритмы ее обучения. Для восстановления измеренного тока была выбрана топология «feedback», состоящая из трех уровней – входного, скрытого и выходного. Обучение сети выполнялось на основе алгоритма Левенберга-Марквардта. Как видно из четвертого графика, метод А4 способен произвести восстановление тока с высокой точностью.

Результат работы комбинированного метода А5 показан на последнем графике Рис. 11. В процессе восстановления сначала с помощью метода А2 было получено первое прогнозное значение тока, затем, определив λ , с помощью метода А1 был восстановлен измеренный ток насыщенного участка.

Как показывают результаты вычислительного эксперимента №1, все методы, кроме А3, способны произвести восстановление измеренного сигнала тока, полученного в режиме насыщения ТТ, при отсутствии белого шума и начальной магнитной индукции.

1.4.2. Вычислительный эксперимент №2. Проверка методов восстановления тока к остаточной индукции

Целью эксперимента является анализ влияния начальной магнитной индукции λ_0 на результат работы методов. Для этого была произведена симуляция насыщения ТТ при $\lambda_0 = 0.05$ Тл. Белый шум был задан $\delta = 0\%$. Параметры эталонного сигнала тока идентичны предыдущему эксперименту. На Рис. 12 показан эталонный, измеренный и восстановленный токи. Из этого рисунка видно, что из-за наличия начальной магнитной индукции и совпадения ее знака с током (положительный полупериод), насыщение возникает в момент времени $t = 4$ мс, т.е. раньше, чем в предыдущем эксперименте.

Результат работы метода А1 показан на первом графике Рис. 12. Из этого рисунка хорошо заметно, что наличие даже небольшой начальной магнитной индукции оказывает существенное негативное влияние на результат работы метода.

На втором графике Рис. 12 показан результат работы метода А2. Видно, что этот метод имеет высокую устойчивость относительно начальной магнитной индукции и способен произвести восстановление измеренного тока при наличии в сердечнике ТТ λ_0 и отсутствии белого шума.

Работа метода А3 показана на третьем графике Рис. 12. Из этого графика также можно заметить, что этот метод имеет высокую устойчивость относительно начальной магнитной индукции λ_0 .

На предпоследнем графике Рис. 12 показан результат работы метода А4. Этот метод, также, как и методы А2 и А3, имеет высокую устойчивость относительно начальной магнитной индукции λ_0 .

Результат восстановления тока по методу А5 показан на последнем графике Рис. 12. В отличие от метода А1 этот метод обеспечивает восстановление измеренного тока при наличии в магнитопроводе ТТ начальной индукции λ_0 . Благодаря первой части данного метода – прогнозированию – наличие λ_0 не оказало влияния на результат восстановления.

В ходе вычислительного эксперимента проведена апробация методов с учетом начальной магнитной индукции $\lambda_0 = 0.5 \text{ Тл}$. В ходе эксперимента выявлено, что наличие λ_0 оказывает существенное негативное влияние на результат работы метода А1. Что касается остальных методов, то они имеют высокую устойчивость к λ_0 .

1.4.3. Вычислительный эксперимент №3. Проверка методов восстановления тока к зашумленным измерениям

В ходе настоящего вычислительного эксперимента была проверена устойчивость/чувствительность методов относительно белого шума. Для этого на первичной стороне ТТ задавался эталонный сигнал с параметрами, идентичными предыдущим экспериментам. Затем было произведено зашумление измеренного сигнала с помощью выражения (23).

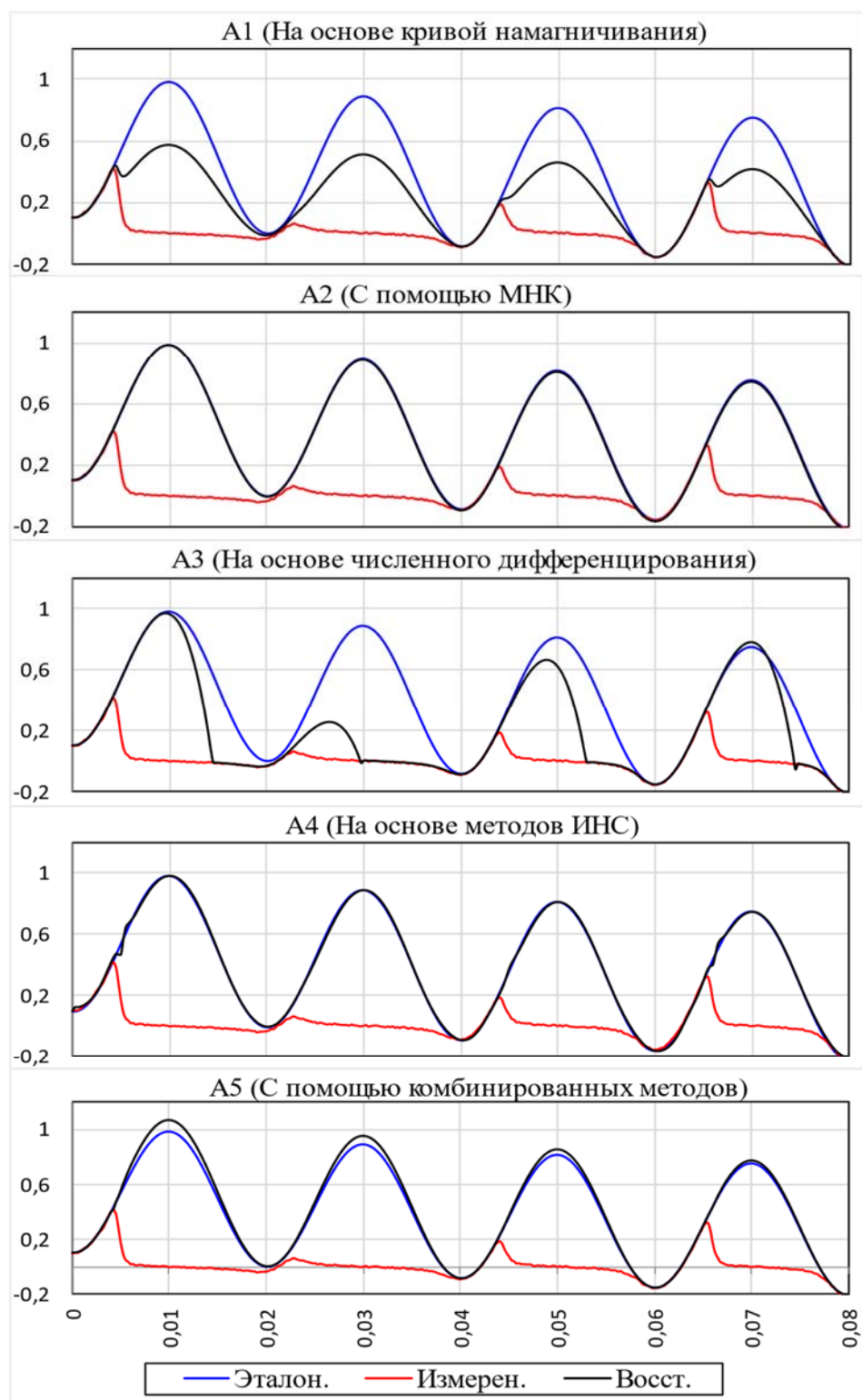


Рис. 12 Кривые токов, эксперимент №2

Значения δ_1 и δ_2 были заданы 0,03 и 0,01 соответственно. Начальная индукция принималась равной $\lambda_0 = 0$ Тл.

$$i_{изм.}(t) = i_2(t) \cdot (1 + \delta_1 \cdot \rho) + \left(\frac{\max(i_2)}{n_T} \cdot \delta_2 \cdot \rho \right), \quad (23)$$

где $i_2(t)$ – измеренный ток; δ_1 и δ_2 – априорно заданные значения уровня зашумления эталонного тока на основе оценки зашумленности в цепях измерений; ρ – случайное число в диапазоне от -1 до +1, имеет равномерное распределение; n_T – коэффициент трансформации ТТ.

На Рис. 13 показаны кривые эталонного, измеренного и восстановленного токов. Момент возникновения насыщения в первом периоде соответствует предыдущему эксперименту и составляет $t = 4 \text{ мс}$.

На первом графике Рис. 13 показан результат работы метода А1 при зашумлении измеренного тока. Как видно из этого графика, при наличии шума и отсутствии начальной магнитной индукции данный метод способен произвести восстановление тока с высокой точностью.

Результат апробации метода А2 в условиях наличия шума в измеренном токе показан на втором графике Рис. 13. Стоит отметить, что поскольку белый шум – это случайное число, для проверки метода А2 при восстановлении тока производилась серия из 1000 расчётов, для каждого из которых были получены свои восстановленные токи. После, путем усреднения всех этих сигналов, был получен усредненный восстановленный ток, показанный на втором графике Рис. 13. Также следует отметить, что из-за параметра скорости затухания экспоненциальной составляющей среди восстановленных токов могут быть получены сигналы тока с большой погрешностью, которые при усреднении будут искажать полученный результат. В целях избегания их влияния на результат работы метода они были исключены из расчета усреднения. Однако по второму графику на Рис. 13 все еще заметно, что метод А2 имеет высокую чувствительность относительно белого шума.

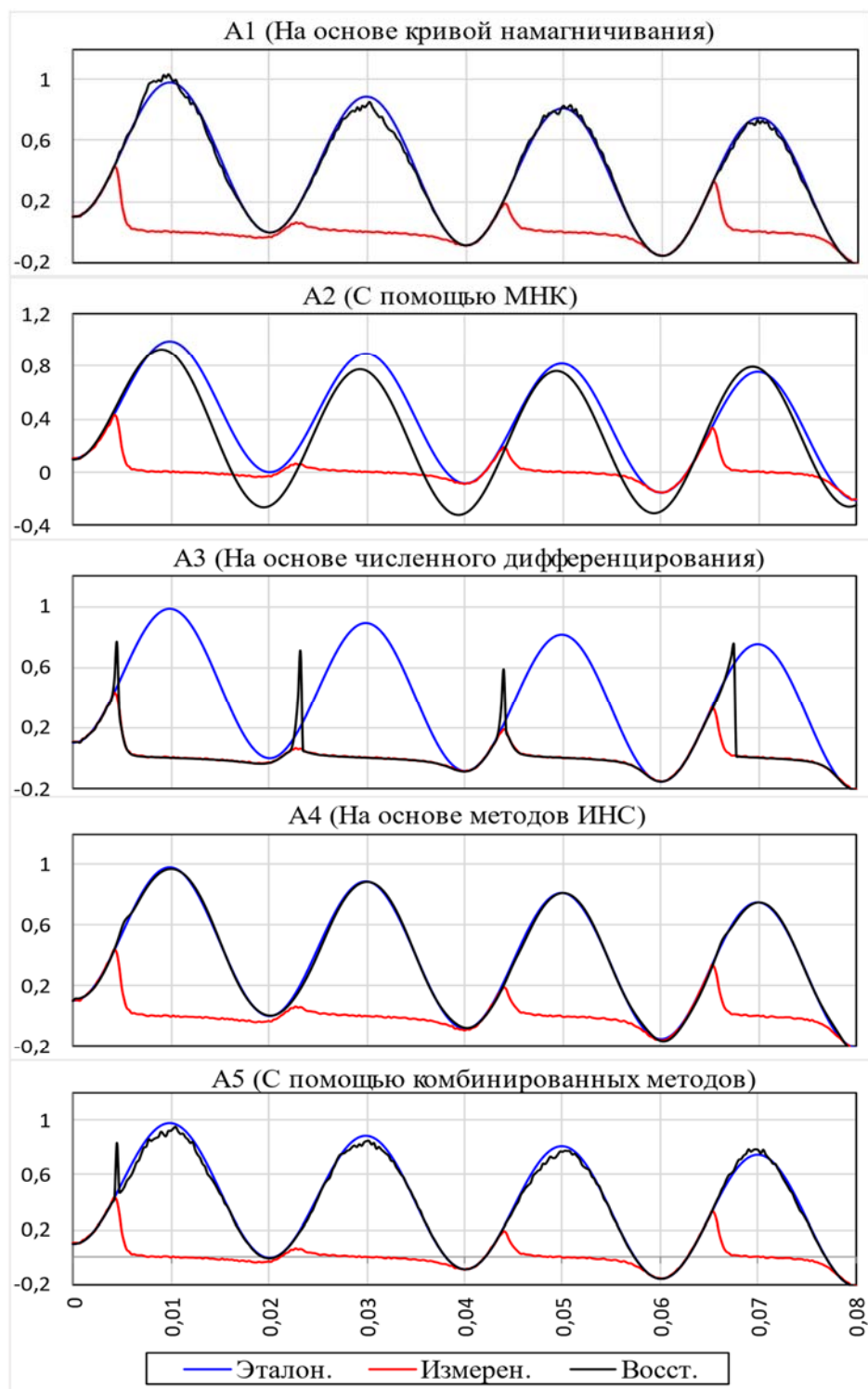


Рис. 13 Кривые токов, эксперимент №3

На третьем графике Рис. 13 представлен результат работы метода А3. Видно, что при применении данного метода в первом полупериоде было произведено расширение ИПТ с 4 мс на 4,5 мс. Таким образом, установлено, что настоящий метод имеет высокую чувствительность относительно белого

шума и расширение ИПТ сигнала с частотой дискретизации 80 точек/период по данному методу не представляется возможным.

Работа метода А4 показана на предпоследнем графике Рис. 13. Как видно из этого графика, настоящий метод обладает высокой надежностью к белому шуму и производит восстановление тока с высокой точностью.

На последнем графике Рис. 13 показан результат работы метода А5. Из данного графика заметно, что настоящий метод способен восстанавливать ток с допустимой для корректной работы систем РЗА погрешностью. Небольшие искажения во втором и последнем периодах вызваны прогнозированием первого отсчета измеренного тока в первой части метода.

В рамках вычислительного эксперимента №3 произведена апробация методов восстановления в условиях наличия белого шума в измеренном токе. Установлено, что при наличии шума в измеренном токе погрешность методов прогнозирования А2 и А3 заметно растет. Что касается методов использования кривой намагничивания, комбинированных методов и методов использования ИНС, то при восстановлении тока они обеспечивают приемлемую для работы системы РЗА точность.

1.4.4. Вычислительный эксперимент №4. Проверка методов восстановления тока к остаточной индукции и белому шуму

В ходе данного вычислительного эксперимента была проведена апробация методов восстановления тока с учетом начальной магнитной индукции $\lambda_0 = 0.5 \text{ Тл}$ и белого шума $\delta_1 = 3\%$ и $\delta_2 = 1\%$. Как и в вычислительном эксперименте №3 для оценки метода А2, при наличии белого шума, была проведена серия из 1000 расчётов, на основании усреднения которых был получен восстановленный ток. Графическое представление результата вычислительного эксперимента показано на Рис. 14.

На первом графике Рис. 14 показан кривая восстановленного тока по методу использования кривой намагничивания А1. Из этого графика хорошо

видно, что, как и в случае второго эксперимента, наличие начальной индукции сильно влияет на точность работы метода.

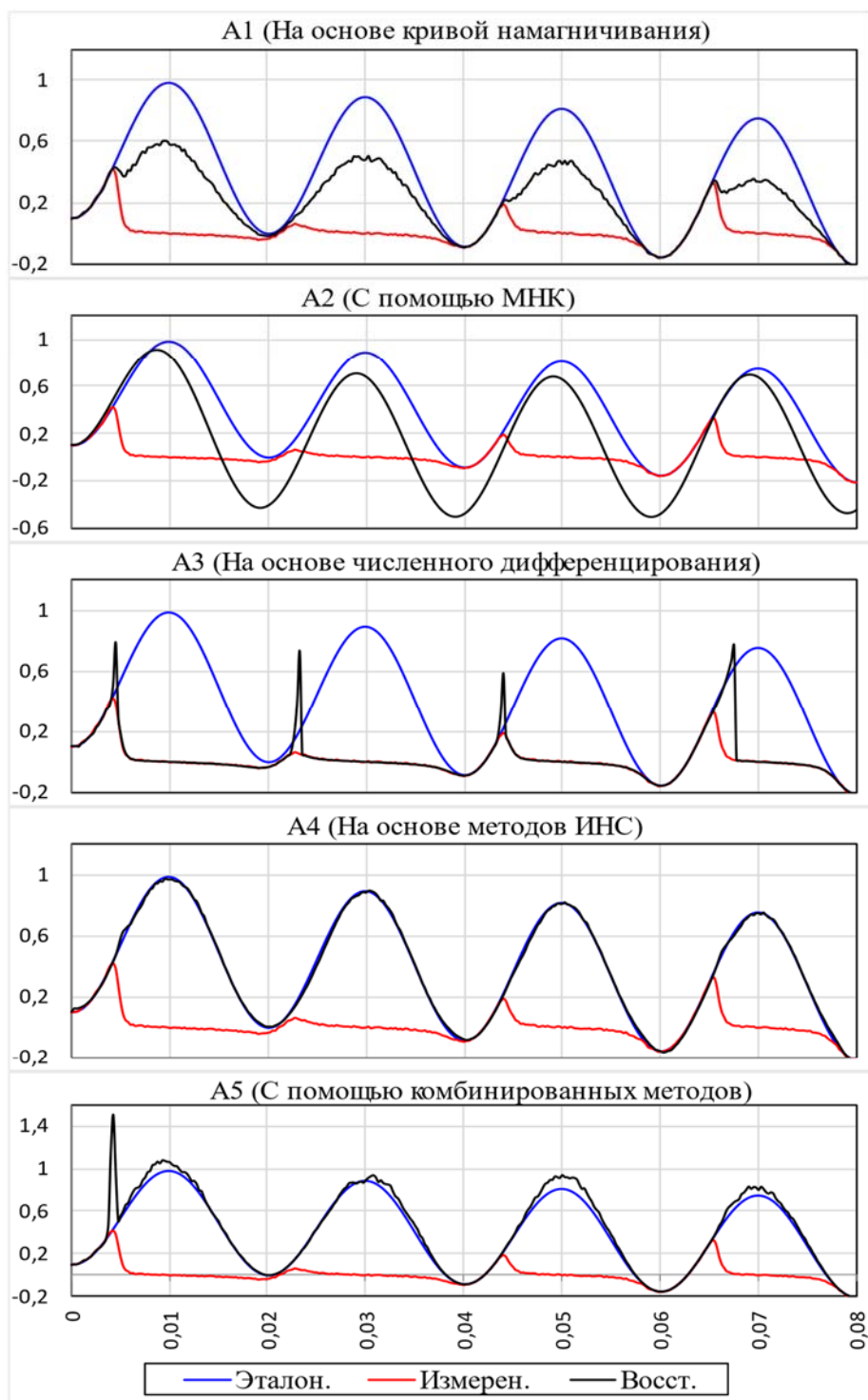


Рис. 14 Кривые токов, эксперимент №4

Работа метода прогнозирования по A2 показана на втором графике Рис. 14. Из этого графика видно, что наличие белого шума, как в случае с экспериментом №3, сильно искажает результат работы метода. Это вызвано

тем, что при использовании измерений с ИПТ из-за наличия шума происходит отклонение измеренного тока от эталонного.

Результат работы метода прогнозирования на основе численного дифференцирования А3 показан на третьем графике Рис. 14. Из этого графика видно, что ввиду отсутствия привязки метода к угловой частоте в условиях наличия белого шума расхождение между значениями восстановленного и эталонного токов резко начинает расти.

На четвертом графике Рис. 14 показан результат работы методов использования ИНС А4. На этом графике видно, что метод А4 обладает высокой устойчивостью как к начальной индукции, так и к белому шуму в измерениях.

На последнем графике Рис. 14 представлен результат работы комбинированного метода А5. Из этого графика можно заметить, что метод А5, который содержит методы А1 и А2, обладает устойчивости к белому шуму и начальной индукции.

Результаты вычислительного эксперимента №4 показывают, что в условиях белого шума и начальной индукции ни методы использования кривой намагничивания А1, ни методы прогнозирования А2 не обладают способности восстановить ток с приемлемой погрешностью. Однако их комбинация А5 позволяет повысить устойчивость их работы как к белому шуму, так и к начальной индукции. Также использование методов ИНС А4 позволяет восстановить ток с приемлемой точностью.

1.4.5. Расчет погрешностей методов

Для сравнения методов производится расчет угловой, токовой и полной погрешности восстановленных (в вычислительных экспериментах 1, 2, 3 и 4) токов. Для этого определяется выраженная в процентах токовая погрешность:

$$f_i = \frac{|I_2 - I_1'|}{I_1'} \cdot 100. \quad (24)$$

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

$$\varepsilon = \frac{100}{I_1'} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{i_{1n}}{n_T} - i_{2n} \right)^2}. \quad (25)$$

Здесь I_1' и I_2 – действующие значения приведенного к вторичной цепи первичного тока и вторичный ток соответственно, N – плотность частоты дискретизации.

Согласно МЭК 61850 частота дискретизации для систем РЗА должна быть $N = 80$ точек/период. Следует отметить, что действующие значения тока в (24) и (25) были получены двумя способами: по алгоритму Герцеля [94] и по формуле:

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_n^2}. \quad (26)$$

Далее для удобства записи способ получения действующего значения тока по формуле (26) обозначим М1, а по алгоритму Герцеля – М2.

С помощью М2 также была рассчитана начальная фаза эталонного, измеренного и восстановленного токов. После чего была произведена оценка угловой погрешности методов:

$$\delta_\varphi = \frac{|\varphi_{\text{эт.}} - \varphi_{\text{восст.}}|}{\varphi_{\text{эт.}}} \cdot 100, \quad (27)$$

где $\varphi_{\text{эт.}}$ – фаза эталонного тока; $\varphi_{\text{восст.}}$ – фаза восстановленных тока. При моделировании КЗ фаза эталонного тока была задана $\varphi_{\text{эт.}} = -90^\circ$.

В таблице 2 приведен сравнительный анализ рассматриваемых методов с различными подходами к восстановлению измеренного сигнала тока. Для каждого из них определена средняя и максимальная токовая f_i и полная ε погрешности восстановленного сигнала тока на интервале моделирования 0,08 с. Для получения f_i и ε действующие значения всех токов рассчитывались по М1. В таблице 2 жирным шрифтом выделены результаты тех методов,

погрешность которых превышает предельно допустимое значение для ТТ. Необходимо отметить, что максимальная токовая погрешность f_i измеренного тока i_2 на интервале моделирования без использования методов восстановления тока при насыщении ТТ составляет порядка 95 – 96%, а средняя 84 – 86%.

В таблице 3 приведены средняя и максимальная токовая f_i и угловая δ_φ погрешности методов фильтрации на интервале моделирования. При расчете f_i действующие значения сигналов были получены с помощью алгоритма Герцеля (M2). Стоит отметить, что M2 при определении фазы синусоидального сигнала, в котором содержится апериодическая составляющая, вносит свою ошибку. Например, при оценке начальной фазы эталонного тока (22), которая была $\varphi = -90^\circ$, угловая погрешность M2 равнялась $3,6^\circ$ (4%), при задании начальной фазы $\varphi = -5^\circ$ погрешность составила $0,6^\circ$ (12%). Т.к. в проведенных экспериментах начальная фаза моделированного тока КЗ была $\varphi = -90^\circ$, погрешность алгоритма Герцеля (M2) составляет 4%. Необходимо учесть, что при определении действующего значения тока по M2 не учитывалась апериодическая составляющая. В процессе проведения вычислительных экспериментов максимальная угловая погрешность измеренного сигнала на интервале моделирования тока КЗ была 99,7%, средняя – 70%.

Средние токовая и угловая погрешности измеренного и восстановленного токов на интервале моделирования тока КЗ представлены на рисунке 15 (а) и (б). Из гистограммы (а) можно заметить, что при идеальном токе и отсутствии начальной индукции в магнитопроводе ТТ токовая погрешность всех методов не превышает 7,6%, однако при наличии остаточной индукции погрешность метода A1, а при наличии белого шума погрешность метода A2 резко возрастают и превышают 20%.

Таблица 2 – Сравнительная таблица методов восстановления тока в режиме насыщения ТТ при определении действующего значения токов по М1

Метод и источник	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 [57;58]	6,7	4,2	7,1	4,2	42	41	44	43	7,2	3,4	8,2	5	48	42	51	45
A2 [61-63]	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 [65]*	78	36	91	57	78	36,6	90	58	91	75	100	98	91	75	99	97
A4 [69-77]	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 [80-82]	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

*данный метод предназначен для расширения ИПТ.

Таблица 3 – Сравнительная таблица методов восстановления тока в режиме насыщения при определении угла и действующего значения токов по М2

Метод и источник	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 [57;58]	4,1	2,6	5,56	2,5	44	43	15,6	5,3	4,32	1,75	7,7	2,8	44	41	19,4	6,1
A2 [61-63]	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 [65]	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 [69-77]	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 [80-82]	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

Из гистограммы (b) рисунка 15 видно, что при вычислительном эксперименте №1 наибольшее фазовое отклонение возникает при использовании метода А4. Однако в вычислительном эксперименте №2 погрешность этого метода снижается, а погрешность метода А1 резко возрастает. В вычислительном эксперименте №3 самую высокую погрешность имеет метод А2. Следует отметить, что наиболее высокой стабильностью во всех вычислительных экспериментах обладает метод А5.

Результаты вычислительных экспериментов показывают, что при отсутствии белого шума в измеренном сигнале и остаточной намагниченности в сердечнике ТТ методы А1 и А2 способны восстановить сигнал с приемлемой точностью. Например, при оценке по М1 их максимальная токовая погрешность f_{i_max} не превышает 6,7%, а полная погрешность – 7,1%, что приемлемо для ТТ класса точности 10Р. При оценке по М2 их f_{i_max} составила 4,1%, а максимальная угловая погрешность $\delta_{\varphi max}$ не превысила 6%. Однако при наличии остаточной намагниченности в сердечнике ТТ погрешность метода А1 резко возрастает. Так при оценке по М1 его f_{i_max} составляет 42%, а по М2 – 44% с $\delta_{\varphi max} = 15,6\%$.

Наличие белого шума сильно влияет на точность методов А2 и А3. Например, при наличии белого шума f_{i_max} метода А2 по М1 составляет 17,6%, а по М2 – 27,3% с $\delta_{\varphi max} = 25\%$. Среди рассмотренных методов наиболее устойчиво проявили себя методы А4 и А5. Так для наиболее тяжелого режима в вычислительном эксперименте №4 f_{i_max} методов А4 и А5 согласно таблицы 2 составляет 1 и 12,7% соответственно. По таблице 3 f_{i_max} этих методов составляет 2,3 и 9,8%, а угловая погрешность $\delta_{\varphi max} = 7,3\%$ и $\delta_{\varphi max} = 13,1\%$ соответственно.

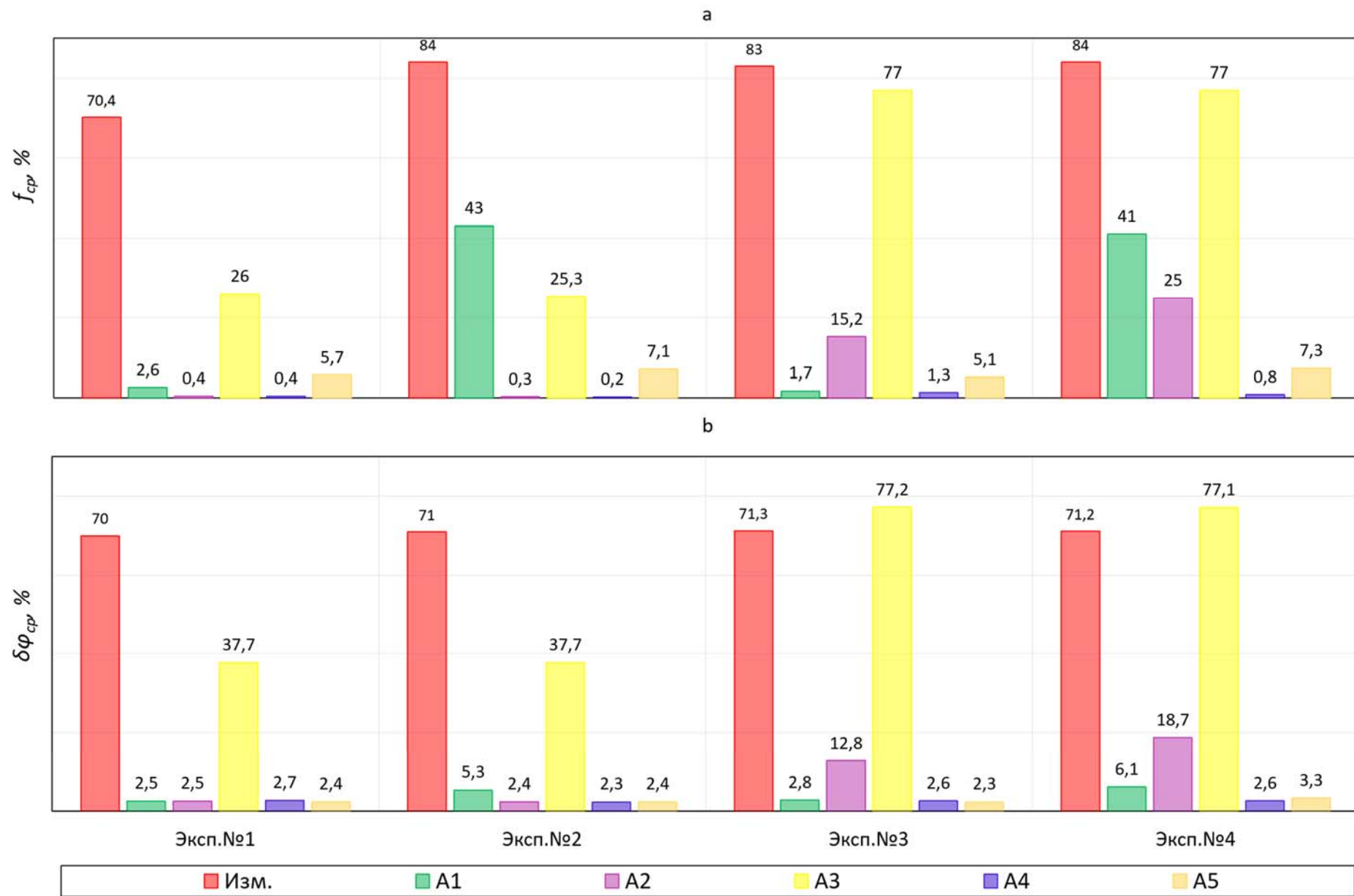


Рис. 15 Средняя на интервале моделирования тока КЗ токовая (а) и угловая (б) погрешности методов восстановления

Стоит отметить, что метод А4 на основе ИНС во всех вычислительных экспериментах проявил себя более устойчиво. Полная погрешность этого метода во всех экспериментах не превышает 10%, что приемлемо для системы РЗА. Однако стоит отметить, что во всех экспериментах форма тока и момент возникновения насыщения изменились не сильно. Дальнейшие эксперименты показали, что обученные на конкретном режиме насыщения ИНС не способны восстановить ток в других режимах насыщения с требуемой точностью. Для демонстрации сказанного на рисунке 16 показан результат работы метода в случае отклонения режима, заданного путем снижения начальной величины апериодики в два раза.

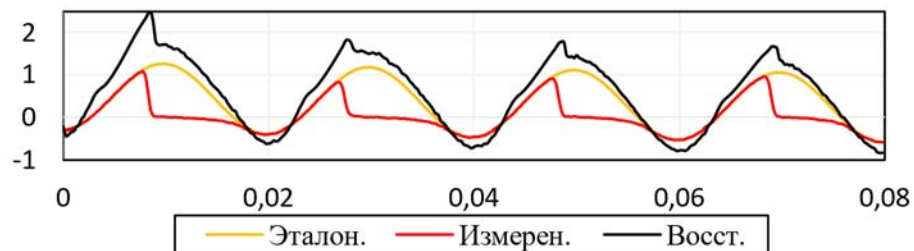


Рис. 16 Работа ИНС при отклонении входных данных от обучающей выборки

В представленном на рисунке 16 режиме насыщения ТТ максимальная ε на входе ИНС составила 90%, а f_i и δ_φ – 57% и 42% соответственно. На выходе ИНС ε снизилась до 70%, а f_i и δ_φ – до 64% и 5% соответственно. На данном достигнутом уровне применение ИНС в задаче восстановления тока ТТ не представляется возможным.

Для наглядности рассмотренных методов ниже в табличном виде приводятся их достоинства и недостатки, а также используемые подходы к восстановлению тока.

Таблица 4 – Достоинства и недостатки методов восстановления тока

Обозначение и источник	Подход	Достоинства и недостатки
A1 [57;58]	На основе использования кривой намагничивания	(+) Высокая устойчивость относительно белого шума, способность восстанавливать сигнал вне зависимости от ИПТ, (-) Высокая чувствительность относительно начальной магнитной индукции
A2 [61-63]	На основе использования измерений ИПТ	(+) Отсутствие зависимости от параметров ТТ и высокая устойчивость относительно начальной магнитной индукции, (-) Высокая чувствительность относительно белого шума, привязанность к ИПТ
A3 [65]		
A4 [69-77]	На основе применения ИНС	(+) Высокая точность при наличии как начальной магнитной индукции, так и белого шума, не привязанность к ИПТ и параметрам ТТ, (-) Для учета всех факторов, влияющих на возникновение насыщения требуется большой объем памяти микропроцессорного устройства, а также необходимо решить ряд задач, связанных с точностью распознавания текущего режима насыщения нейросетью
A5 [80-82]	На основе использования кривой намагничивания и измерений ИПТ	(+) Устойчивость относительно начальной магнитной индукции и белого шума, (-) Зависимость от параметров магнитопровода ТТ и количества отсчетов измеренного сигнала в ИПТ, также точность метода зависит от используемых методов прогнозирования

Выводы по главе 1:

1. Выполнен обзор нормативно-технической документации, предъявляющей требования к погрешности измерения ТТ. Представлена систематизация методов моделирования ТТ, на основе которых изучается вопрос снижения погрешности ТТ в режиме насыщения. Также приведена классификация подходов к снижению погрешности ТТ.

2. Проведен сравнительный анализ методов восстановления измеренного тока ТТ в режиме насыщения. Выявлена степень проработанности темы повышения точности и достоверности измерительной информации при насыщении ТТ. Выявлена устойчивость/чувствительность методов восстановления тока ТТ и проведено их сравнение в условиях наличия белого шума в измеренном токе и начальной индукции в магнитопроводе ТТ. Дана численная оценка методов восстановления тока ТТ. В результате проведения численных экспериментов установлено, что наиболее перспективными являются методы прогнозирования А2 и комбинированный метод А5. Однако для практического применения А2 необходимо повысить его устойчивость к белому шуму, а для метода А5 необходимо повысить точность определения начальной индукции, когда кривая намагничивания ТТ в нелинейном участке содержит петлю гистерезиса.

ГЛАВА 2. ДЕТЕКЦИЯ НАСЫЩЕНИЯ ТТ НА ОСНОВЕ НАКЛОНА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ АВТОРЕГРЕССИИ

В рамках настоящей главы предложен детальный анализ методов детекции насыщения магнитопроводов ТТ. Описаны их достоинства и недостатки. Приведено описание: разработанного метода детекции возникновения насыщения ТТ, метода разграничения нормального и аварийного режимов. Показаны чувствительность/надежность метода детекции насыщения к белому шуму, начальной индукции и углу возникновения КЗ.

2.1 Обзор методов детекции насыщения ТТ

Как упоминалось выше одним из способов исключения влияния насыщения ТТ на корректность функционирования системы РЗА является использование методов детекции насыщения ТТ [36]-[52]. Согласно [85] существующие на сегодняшний день методы детекции насыщения ТТ условно можно разбить на две группы:

- 1) детекция насыщения на основе методов математического анализа [36]-[47];
- 2) детекция насыщения на основе статистического анализа [48]-[50].

Принцип действия методов, предложенных в рамках первой группы [36]-[47], основан на взятии производной измеренных значений тока путем численного дифференцирования, предложенного в [95].

В большинстве исследований приоритет отдается численному дифференцированию второго порядка:

$$del_2(n) = i_2(n) - 2i_2(n-1) + i_2(n-2), \quad (28)$$

где n – индекс измерений вторичного тока i_2 .

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 разрыва функции.

В исследовании [47] также предложен метод детекции насыщения, который относится к численному дифференцированию [65]. Отличие между методами детекции, предложенными в [95] и [65], заключается в следующем: в первой работе детекция насыщения производится на основе оценки всплеска измерений по (28), во второй работе при использовании измерений ИПТ производится их прогнозирование на участке насыщения и на основе анализа прогнозного и измеренного значения тока на насыщенных участках делается вывод о наличии/отсутствии насыщения ТТ.

К положительным качествам методов [36]-[47] можно отнести детекцию насыщения ТТ в темпе поступления информации, т.е. индекс n в (28) соответствует текущему измерению. Однако в ходе апробации было выявлено, что при наличии шума в измерениях методы численного дифференцирования имеют большую чувствительность, в результате чего происходит смещение момента возникновения насыщения. Более того, эти методы являются усилителями белого шума. Для исключения влияния белого шума на работу этих методов в исследованиях [37] и [43] применяется фильтр Совицкого-Голея [96]. Однако в условиях насыщения, когда отклонение измерений от эталона происходит без резкого спада, что характерно при легких насыщениях или при большой индуктивной нагрузке ТТ, методы [36]-[46] также не способны произвести детекцию насыщения. Метод [47] ввиду небольшой доли охвата измерений (два соседних измерения) в условиях наличия белого шума также сильно искажает прогнозное значение, в результате чего определить момент возникновения насыщения становится невозможным.

В [48] и [49] предложены методы, которые относятся к второй группе методов детекции насыщения ТТ и применяются в схеме дифференциальной защиты двухобмоточного трансформатора. Работа этих методов основана на установлении связи между токами на низком и высоком напряжении

двухобмоточного трансформатора с помощью коэффициента корреляции Пирсона. К преимуществам этих методов можно отнести их высокую устойчивость к белому шуму. Следует заметить, что в случае использования одного ТТ применение данного метода не представляется возможным.

В рамках второй группы также предложен метод, работа которого основана на характере измерения дифференциального тока в режимах КЗ [50]. При КЗ вне зоны защиты, сопровождающемся насыщением ТТ, дифференциальный ток принимает специфическую форму, состоящую из двух участков – до и после ИПТ. Следует отметить, что с помощью такого подхода можно произвести детекцию насыщения в ТТ, которые включены в схемы дифференциальной защиты. Более того, этот метод определяет только наличие насыщения, но не позволяет определить, на каком из ТТ оно возникло, вследствие чего усложняется задача восстановления.

Метод детекции, предлагаемый в [51], основан на анализе плотности расположения отсчетов вторичного тока и также относится к второй группе методов детекции насыщения ТТ. При глубоком насыщении измеренные значения вторичного тока расположены близко к временной оси, а в нормальных режимах они имеют большой разброс около данной оси, который вызван тем, что значения вторичного тока в нормальном режиме располагаются на линейном участке синусоиды. Распределение измерений относительно временной оси, эталонный и измеренный токи показаны на Рис. 17. Следует отметить, что метод может производить детекцию при глубоком насыщении или при насыщении, связанном с резким ограничением кривой тока, вследствие которого измерения начинают располагаться близко к нулю, Рис. 17 (а). При насыщении, вследствие которого кривая измеренного тока медленно отклоняется от эталонного, произвести детекцию насыщения данным методом не представляется возможным, Рис. 17 (b).

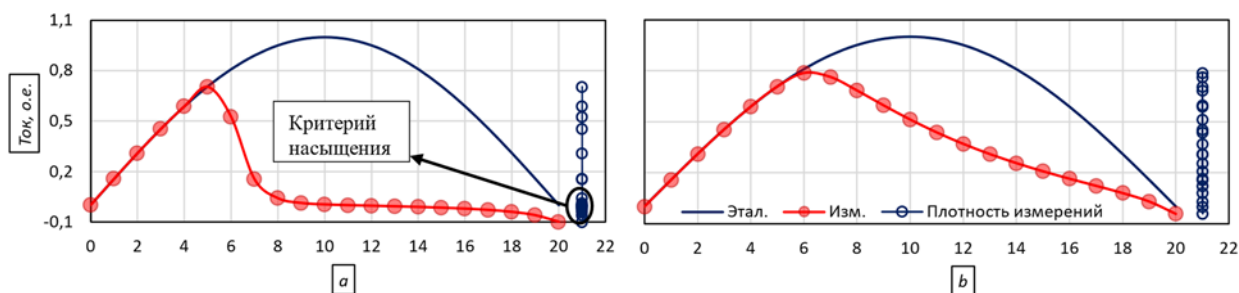


Рис. 17 Графическая интерпретация метода [51]

В [52] предложен метод, принцип действия которого основан на двух соседних экстремальных точках первой производной (численное дифференцирование) измеренного тока. Этот метод можно отнести как к первой, так и ко второй группе методов детекции насыщения ТТ. На основе этих экстремальных точек можно сформулировать два критерия:

1. Длина временного отрезка между двумя соседними экстремальными точками первой производной измеренного тока не должна превышать 10 мс (полупериод) $\left(\left| t_{last} - t_{penultimate} \right| < 10ms \right)$.

2. Отношение значений последней и предпоследней соседних экстремальных точек должно быть больше 1 $\left(\left| \frac{i_{last}}{i_{penultimate}} \right| > 1 \right)$.

При одновременном выполнении обоих критериев фиксируется наличие насыщения ТТ. Обоснованием данного метода является тот факт, что при многократном дифференцировании слагаемое аperiodической составляющей стремится к нулю. Применяя этот метод, как указано в [52], можно решить задачу детекции с точностью, не превышающей половины периода, ввиду необходимости детектирования двух последних экстремальных значений измеренного тока, отнесенных к двум соседним полупериодам. В результате этого происходит задержка на $\frac{3}{4}$ периода. Более того, у метода есть допущение – неизменность частоты сети и отсутствие гармонических составляющих, вызывающих временное смещение перехода измеренного тока через нуль.

2.2 Детекция насыщения ТТ на основе контроля магнитной индукции

Основой метода является контроль магнитной индукции ТТ (КМИ). Для реализации метода в качестве исходных данных применяются следующие 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 .

Расчет магнитной индукции по измерениям тока производится по формуле (6). Стоит отметить, что полученная расчетным путем магнитная индукция будет соответствовать эталонной только по форме и иметь смещение на величину начальной индукции λ_0 . Сущность метода КМИ заключается в поиске участка λ , на котором она имеет небольшие отклонения. Для наглядности работы этого метода на Рис. 18 на графиках (а) и (с) показаны эталонные и измеренные токи, а на (b) и (d) – изменение магнитной индукции λ . Как видно из графиков (b) и (d), 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 (d) Рис. 18.

Основным недостатком метода (6) является необходимость учета начальной индукции λ_0 . При детекции момента возникновения насыщения ТТ с помощью использования метода КМИ производится оценка расположения точек λ относительно своего выборочного среднего $\bar{\lambda}_e$, что позволяет не учитывать λ_0 , т.к. это не оказывает влияния на результат работы метода.

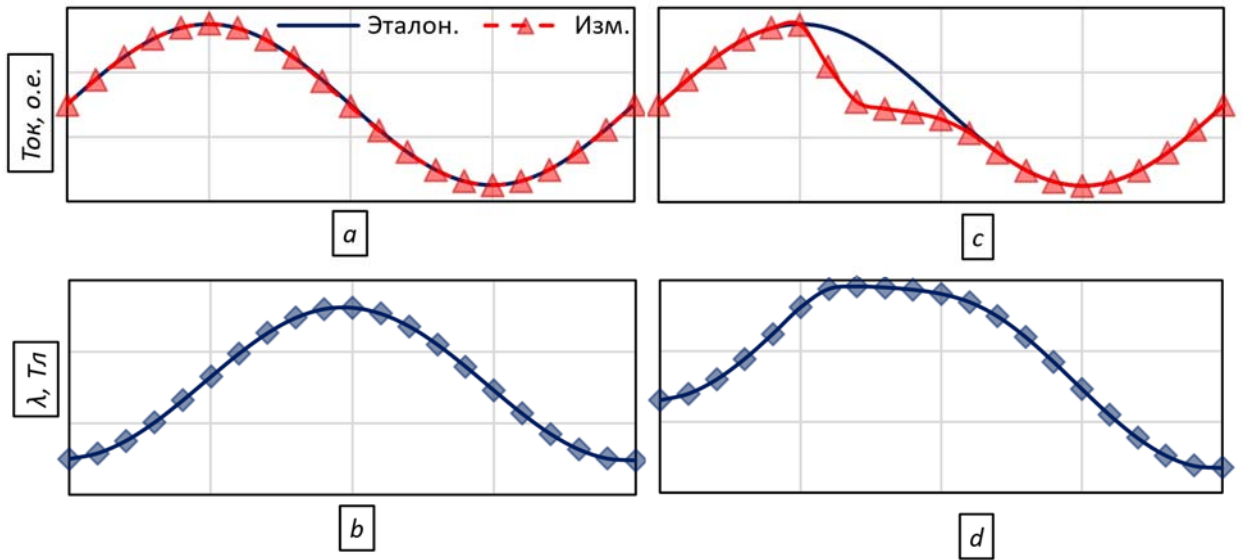


Рис. 18 Эталонный и измеренный токи при нормальной работы ТТ (а) и в условиях насыщения (с); магнитная индукция при нормальной работы ТТ (b) и в условиях насыщения (d)

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

$$\sigma^2(n-N) = \frac{1}{N-1} \sum_{m=1}^N |\lambda(n-m) - \bar{\lambda}_e|^2, \quad (29)$$

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

Выборочное среднее определяется как:

$$\bar{\lambda}_e = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \lambda(n-m). \quad (30)$$

Размер окна N , входящего в расчет выборочного среднего и отклонения точек, является основным параметром метода КМИ. Варьируя N , можно изменять чувствительность метода к уровню насыщения ТТ.

Далее, зная отклонение магнитной индукции σ^2 на интервале N , можно определить наличие насыщения в магнитопроводе 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, при работе сети в максимальном режиме. Для наглядности на Рис. 19 показана кривая намагничивания, по которой определяются точки k и m .

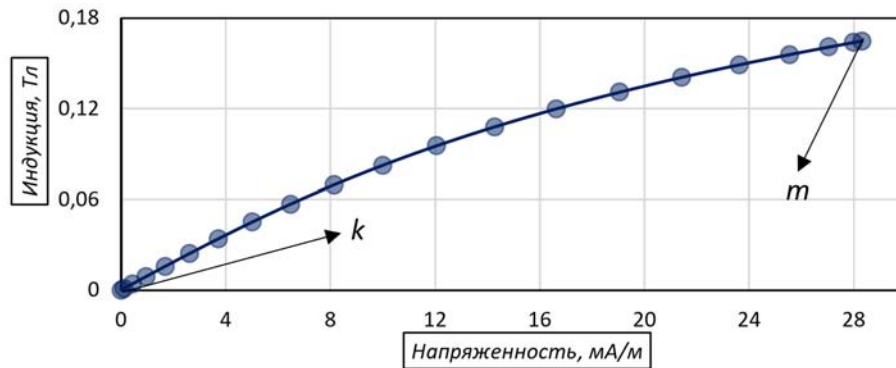


Рис. 19 Кривая намагничивания ТТ

Расчет λ_{min}^2 производится следующим образом:

$$\lambda_{min}^2 = \frac{\sum_{k=1}^m (\lambda_k - \bar{\lambda}_e)^2}{m}. \quad (31)$$

Момент возникновения насыщения определяется в соответствии с условием:

$$\sigma^2(n) < \lambda_{min}^2. \quad (32)$$

Размер окна 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 $\sigma^2(n)$.

2.3 Детекция путем прогнозирования временных рядов измеренного тока

Для повышения надежности работы КМИ предлагается использование второго критерия, в котором на основе временных рядов производится оценка параметров модели (9) с последующим прогнозированием измерений.

По прогнозным точкам, полученными с помощью (9) для произвольного количества точек n , рассчитывается погрешность измеренных значений тока, записываемая в векторном виде:

$$\mathbf{Det}(k, n) = \left[\left| \frac{i_{расч}^{k-n+1} - i_{изм}^{k-n+1}}{i_{расч}^{k-n+1}} \right|, \dots, \left| \frac{i_{расч}^k - i_{изм}^k}{i_{расч}^k} \right| \right]^T \cdot 100, \quad (33)$$

где $i^{изм}$ – измеренные значения тока и k – дискретное время.

Для наглядности на Рис. 20 показаны кривые эталонного, измеренного и расчетного токов. Размерность произвольной выборки в случае насыщения ТТ, представленной на Рис. 20, принята $n=4$.

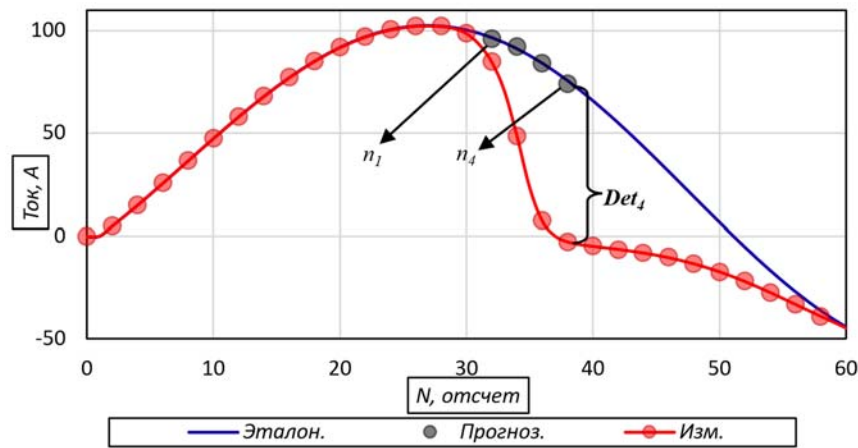


Рис. 20 Детекция насыщения ТТ

Так как относительная погрешность $\mathbf{Det}$ – матрица-столбец, то используется два критерия наличия насыщения ТТ:

$$SAT = 1 \quad \text{если} \quad \begin{cases} \sum_{k=1}^n Det_k \geq n \cdot \delta \\ u \\ Det_1 > \delta \end{cases}, \quad (34)$$

где δ – класс точности ТТ.

Т.е. насыщение ТТ согласно (34) определяется в случае, когда сумма относительных погрешностей измерений, полученных для интервала времени $l = \overline{k, n}$, в n раз превышает класс точности ТТ δ и относительная погрешность первого измерения в интервале l также превышает класс точности ТТ δ .

Путем детекции насыщения ТТ решается одна из трех подзадач в задаче компенсации погрешности ТТ – селекция ИПТ. Запуск метода КМИ необходимо произвести после возникновения КЗ, когда разброс между отсчетами магнитной индукции начинает резко расти. Другими словами, задачу селекции необходимо решить после решения задачи сегментации. Запуск метода КМИ при КЗ вызван тем, что при расчете Th по формуле (31) уставка была отстроена от максимального режима сети. Для детекции насыщения ТТ в других режимах, если таковое имеется, необходимо отстроить уставку от нормального режима или ненагруженного режима работы ТТ. Далее приводится подробное описание разработанного метода сегментации нормального и аварийного режимов.

2.4 Определение границы между нормальным и аварийным режимами

Для разграничения аварийного и нормального режимов необходимо выполнение следующего условия:

$$I_m > \sqrt{2} \cdot I_{max}. \quad (35)$$

где I_{max} – действующее значение тока, соответствующее максимальному режиму сети; I_m – прогнозное значение амплитуды измеренного тока. Действующее значение тока заранее известно.

Процедура получения I_m основана на численном дифференцировании измеренного тока. Пусть имеется набор мгновенных значений некоторого синусоидального тока, его аналитическое выражение

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (36)$$

где ω – круговая частота и φ_0 – начальная фаза.

Возьмем произвольное измерение и установим для него время измерения $t = 0$, тогда мы можем записать

$$i(0) = I_m \sin(\varphi_0). \quad (37)$$

Запишем также формулу производной от тока в момент времени t :

$$i'(t) = \frac{di}{dt} = \omega I_m \cos(\omega \cdot t + \varphi_0). \quad (38)$$

Для момента $t = 0$ получим:

$$i'(0) = \omega I_m \cos(\varphi_0). \quad (39)$$

Значение $i(0)$ нам известно – это мгновенное значение тока, для которого мы приняли $t = 0$. Обозначим это измерение i_0 . В качестве производной $i'(0)$, которую обозначим i'_0 , можем взять тангенс угла наклона линии, проведенной между двумя измерениями, расположенными слева i_{-1} и справа i_{+1} относительно нулевого измерения:

$$i'_0 = \frac{di}{dt} \approx \frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{i_{+1} - i_{-1}}{2\Delta t}, \quad (40)$$

где Δt – шаг дискретизации.

На основе комбинации формул (37), (39) и тождества

$$\sin^2(\varphi_0) + \cos^2(\varphi_0) = 1 \quad (41)$$

можно получить следующие выражения:

$$\left(\frac{i_0}{I_m}\right)^2 + \left(\frac{i'_0}{\omega I_m}\right)^2 = 1, \quad (42)$$

$$(i_0)^2 + \left(\frac{i'_0}{\omega}\right)^2 = I_m^2, \quad (43)$$

$$I_m = \sqrt{(i_0)^2 + \left(\frac{i'_0}{\omega}\right)^2}. \quad (44)$$

Таким образом, на основе ИПТ и с помощью использования (40) и (44) можно прогнозировать амплитуду тока. Для повышения точности прогнозного значения I_m и надежности метода численного дифференцирования к белому шуму предлагается произвести определение i'_0 на основе усреднения 5-6 значений тока на ИПТ. Таким образом, решается подзадача сегментации задачи снижения погрешности ТТ.

На Рис. 21 показана структурная схема решения задачи отделения измерений аварийного режима от нормального и детекции насыщения ТТ. На этом рисунке также показан алгоритм компенсации погрешности ТТ. В случае наличия режима КЗ, вызывающего насыщение ТТ, данные передаются на вход методов восстановления тока, описание которых приводится в следующих главах.

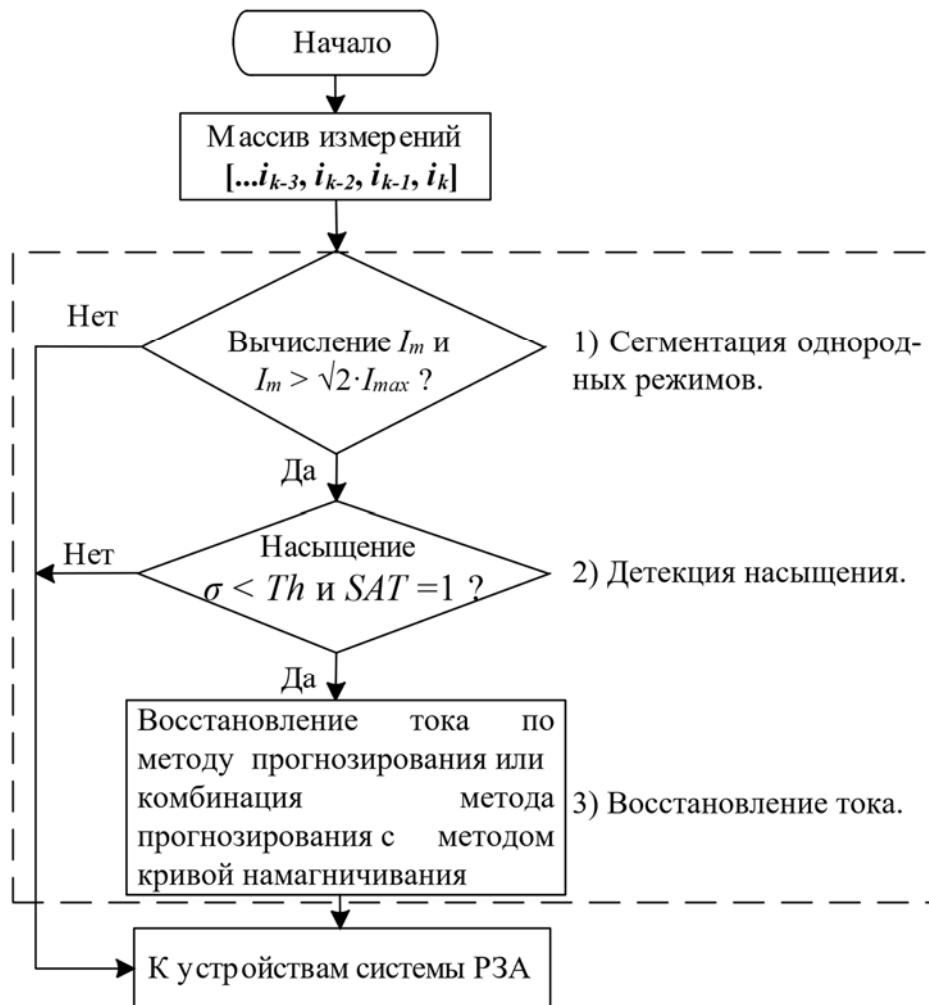


Рис. 21 Структурная схема детекция насыщения ТТ

2.5 Тестирование метода КМИ

Для проверки работоспособности метода КМИ в условиях наличия белого шума в измеренном токе и начальной индукции в магнитопроводе ТТ к измеренному сигналу добавлялся шум δ и начальная магнитная индукция λ_0 в сердечнике ТТ. Шум задавался с помощью выражения (23).

2.5.1. Описание тестовой модели

Для проведения экспериментов в ПК Matlab/Simulink была смоделирована сеть, которая включает в себя нагрузку, энергосистему S, линию электропередачи и двухобмоточный трансформатор T с трансформаторами токов на высокой CT1 и низкой CT2 сторонах. Мощность нагрузки была задана 70% от номинальной мощности силового трансформатора, $\cos\varphi = 0,8$. Конфигурация элементов сети и их основные параметры представлены на Рис. 22.

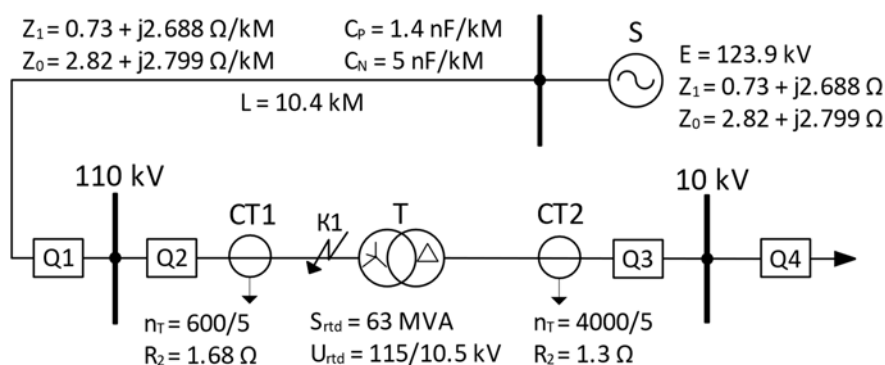


Рис. 22 Схема моделируемой сети

2.5.2. Проверка метода КМИ на устойчивость к белому шуму

В ходе настоящего эксперимента была произведена проверка устойчивости/чувствительности метода КМИ относительно зашумлённости измеренного тока. Для этого перед проверкой наличия насыщения к измеренному току был добавлен шум $\delta_1 = 3\%$ и $\delta_2 = 1\%$. Угол возникновения КЗ моделировался путем задания начальной фазы φ_{A0} по фазе A и изменялся в диапазоне от 0° до 90° . Начальная магнитная индукция в сердечниках всех ТТ не изменялась и принималась $\lambda_0 = 0$ Тл. На первых двух колонках Рис. 23 показаны кривые эталонного и измеренного токов с результатом работы метода КМИ для фазы A и B при КЗ между ними. Поскольку при таком режиме КЗ корректность функционирования ТТ третьей фазы не нарушалась, проверка наличия насыщения ТТ этой фазы не производилась.

Из первых двух колонок Рис. 23 можно заметить, что наличие шума на уровне 3% не оказывает влияние на работу метода КМИ. Из последних

четырёх графиков также можно заметить, что при насыщении сердечников ТТ форма измеренного тока в фазе B значительно отличается от формы того же тока в фазе A . Тем не менее метод способен произвести детекцию насыщения в обоих случаях.

2.5.3. Проверка метода КМИ к остаточной индукции

В рамках настоящего эксперимента выполняется детекция насыщения только по фазе A . Варьируя начальную магнитную индукцию λ_0 от $-0,5$ до $1,8$ Тл в сердечнике ТТ, установленного в фазе A , проверяем устойчивость/чувствительность метода КМИ. Для всех опытов начальную фазу примем постоянной $\varphi_{A0} = 0^\circ$. На последней колонке Рис. 23 представлены кривые эталонного, измеренного токов и результат работы метода КМИ при вариации начальной индукции в магнитопроводе ТТ.

Как показывают результаты эксперимента, при наличии остаточной намагниченности в сердечнике ТТ и коротком окне ИТТ (порядка 3-4 измерений) метод КМИ сохраняет свою работоспособность и обеспечивает точную детекцию начала насыщения сердечника ТТ.

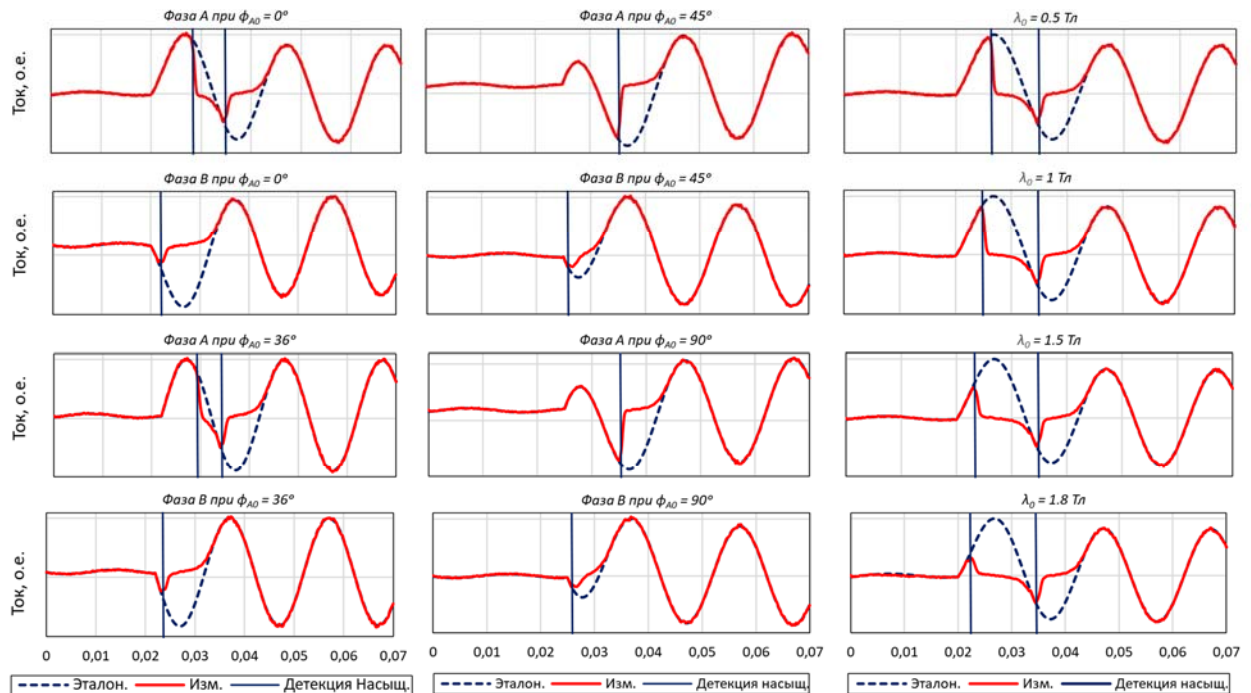


Рис. 23 Токи и детекция насыщения при варьировании φ_{A0} и начальной индукции λ_0

Выводы по главе 2:

1. Проведен детальный анализ существующих методов детекции насыщения ТТ. Описаны их достоинства и недостатки. Выявлена степень проработанности темы детекции насыщения. Для решения первых двух подзадач задачи компенсации погрешности ТТ в условиях насыщения предложены методы детекции насыщения ТТ и разграничения нормального и аварийного режимов.

2. В целях избегания ложного срабатывания метода КМИ в нормальных и нагруженных режимах сети была предложена методика прогнозирования амплитуды тока на основе численного дифференцирования.

3. Была произведена проверка работоспособности метода КМИ относительно белого шума и наличия начальной индукции в магнитопроводе ТТ. Также была выполнена проверка метода КМИ по отношению к начальной фазе КЗ. Результаты экспериментов показывают, что предложенный метод КМИ обладает высокой робастностью к белому шуму в измеренном токе и начальной индукции в магнитопроводе ТТ.

ГЛАВА 3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТОКА ТТ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ

3.1. Взвешенный метод наименьших квадратов

Решение задачи снижения погрешности ТТ по методу прогнозирования основан на использовании взвешенного метода наименьших квадратов (ВМНК). Процедура решения задачи следующая. Изначально задается модель, описывающая характер тока в режиме КЗ:

$$i(t) = I_{m1} \sin(\omega t + \varphi) + I_{m2} e^{-\gamma t}, \quad (45)$$

где I_{m1} и φ – амплитуда и начальная фаза синусоидальной функции соответственно и I_{m2} и γ – амплитуда и скорость затухания экспоненциальной функции.

Затем, применяя преобразования сумм и разности углов тригонометрических функций к первому слагаемому (45) и разложение функций в ряд Тейлора для первого порядка ко второму слагаемому (45), модель тока КЗ можно представить как:

$$i(t) = I_{m1} \cos(\varphi) \sin(\omega t) + I_{m1} \sin(\varphi) \cos(\omega t) - I_{m2} \gamma t + I_{m2}. \quad (46)$$

Неизвестными параметрами в модели (46) являются I_{m1} , φ , I_{m2} и γ и для упрощения записи модели примем следующие обозначения:

$$\begin{cases} C_1 = I_{m1} \cos(\varphi) \\ C_2 = I_{m1} \sin(\varphi) \\ C_3 = I_{m2} \\ C_4 = -I_{m2} \gamma \end{cases}. \quad (47)$$

Таким образом модель (45) после ее преобразования можно записать как:

$$i(t) = C_1 \sin(\omega t) + C_2 \cos(\omega t) + C_3 + C_4 t. \quad (48)$$

Модель (48) в дискретном виде можно представить как:

$$i(k) = C_1 \sin(\omega k) + C_2 \cos(\omega k) + C_3 + C_4 k. \quad (49)$$

Стоит отметить, что в (49) коэффициенты C_1 - C_4 по отношению к функции тока выражены в линейной форме. Далее для поиска указанных коэффициентов задача формулируется как:

$$F(C_{1-4}) = \sum_{k=1}^N w_k (i_k^{uzm} - i_k^{pacu})^2 = (\mathbf{B} - \mathbf{H}\mathbf{C})^T \mathbf{W} (\mathbf{B} - \mathbf{H}\mathbf{C}), \quad (50)$$

где N – количество измерений, охватывающее первый и второй ИПТ и все измерения, расположенные между этими ИПТ:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \sin(\omega k_i) & \cos(\omega k_i) & k_i & 1 \\ \sin(\omega k_{i+1}) & \cos(\omega k_{i+1}) & k_{i+1} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sin(\omega k_{i+n}) & \cos(\omega k_{i+n}) & k_{i+n} & 1 \end{bmatrix}, \quad (51)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} i^{uzm}(k_i) \\ i^{uzm}(k_{i+1}) \\ \dots \\ i^{uzm}(k_{i+n}) \end{bmatrix} \text{ и} \quad (52)$$

$\mathbf{W}$ –диагональная матрица весовых коэффициентов измерений.

Минимизация функции (50) сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H} \mathbf{C} = \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{B} \quad (53)$$

с решением

$$\mathbf{C} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{B}, \quad (54)$$

Необходимо отметить, что одним из факторов, влияющих на точность оценки коэффициентов C_1 - C_4 является размер окна N [97]. Однако при непосредственном «увеличении» N в условиях насыщения ТТ с счет «плохих» измерений снижается точность оценки C_1 - C_4 . Во избежания этого применяются весовые коэффициенты.

ВМНК чаще всего применяется в задачах с неоднородными наблюдениями, содержащими неравномерную дисперсию случайных ошибок. В таких случаях путем введения весов, соответствующих каждому наблюдению, варьируется степень доверия к уравнениям в нормальной

системе уравнений. Согласно [98] весовые коэффициенты каждого измерения должны быть обратно пропорциональны дисперсиям измерений, а дисперсия измерений теоретически должна быть известной. Как правило, на практике (в том числе для задачи восстановления тока ТТ) дисперсия возмущений в измерениях является неизвестной, что усложняет задачу выбора весовых коэффициентов. 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 дисперсии возмущения условно можно разбить на три группы – низкодисперсные, среднedisперсные и высокодисперсные. В качестве первой группы выступают хорошие измерения, расположенные в ИПТ, ко второй группе относятся подозрительные измерения, расположенные на двух концах ИПТ, и к последней группе относятся плохие измерения, расположенные после подозрительных измерений.

Как правило, количество хороших и плохих измерений больше количества подозрительных измерений. Но количественное превосходство хороших измерений над плохими зависит от степени тяжести режима и характера вторичной нагрузки ТТ. Т.е. в случаях легкого насыщения количество хороших измерений больше количества плохих, в противном случае – наоборот. В связи с вышеописанным в режиме насыщения ТТ возникает задача деления измерений на три группы для последующего их использования в расчете весовых коэффициентов. Для решения этой задачи применяется метод КМИ, с помощью которого определяется момент возникновения насыщения ТТ и, начиная с этого момента, измерениям присваивается дисперсия с большим возмущением. Так как в режиме насыщения ТТ измерения разбиваются на три группы, то для них вводится три градации весовых коэффициентов – для правильных, подозрительных и плохих измерений. Таким образом, элементы диагональной матрицы весовых

коэффициентов оказываются неравномерными и формируются следующим образом:

$$W = \text{diag}(w_{\text{хор}1}^{\text{ИПТ1}}, w_{\text{под}1}, w_{\text{плох}1}, w_{\text{под}}, w_{\text{хор}2}^{\text{ИПТ2}}, w_{\text{под}2}, w_{\text{плох}2}), \quad (55)$$

где $w_{\text{хор}1}^{\text{ИПТ1}}$, $w_{\text{под}1}$ и $w_{\text{плох}1}$ – векторы весовых коэффициентов хороших, подозрительных и плохих измерений соответственно. Они связаны непосредственно с первым ИПТ; $w_{\text{хор}2}^{\text{ИПТ2}}$, $w_{\text{под}2}$ и $w_{\text{плох}2}$ – векторы весовых коэффициентов соответственно хороших, подозрительных и плохих измерений, связанные со вторым ИПТ и $w_{\text{под}}$ – вектор подозрительных измерений, расположенный между первым и вторым ИПТ.

Диагональная матрица (55) соответствует случаю работы метода ВМНК на основе использования хороших, подозрительных и плохих измерений на интервале от ИПТ1 до ИПТ2 включительно. Из выражения (55) видно, что при формировании весовых коэффициентов на основе двух ИПТ образуются векторы хороших и плохих измерений, число которых равно числу ИПТ. Число векторов подозрительных измерений на единицу больше. Размерность векторов плохих, хороших и подозрительных измерений в (55) определяется исходя из двух факторов: частоты дискретизации аналогового сигнала и времени работы ТТ до насыщения. Согласно [15] в тяжелых режимах работы ТТ длина временного отрезка ИПТ может составить в 2-3 мс. Исходя из этого, при детекции насыщения ТТ методом КМИ можно утверждать, что измерения, полученным в течение времени 2-3 мс до момента возникновения насыщения, можно присвоит статус «хорошие измерения». Согласно МЭК 61850 для системы РЗА – 80 точек/период – число хороших измерений при 2-3 мс составит 8-12. Так как метод КМИ указывает не точный момент возникновения насыщения, а его область, количество подозрительных измерений может варьироваться в диапазоне 2-5. Что касается длины плохих измерений, то она варьируется в зависимости от длины временных отрезков соседних ИПТ, т.к. находится между ними.

Для наглядности длин участков хороших, подозрительных и плохих измерений на Рис. 24. показаны измерения, полученные в режиме насыщения ТТ. На этом рисунке в качестве границ между типами измерений используются закрашенные прямоугольники. Цветом в этих прямоугольниках выделены указан переход от одного типа измерений к другому. На нижних концах этих прямоугольников (по оси ОХ) указана индексация типов измерений. Хорошим измерениям присвоен индекс m , подозрительным и плохим – индексы n и g соответственно. Для демонстрации разных длин однородных измерений, расположенных вне соседних участках, на Рис. 24 показаны два участка с хорошими измерениями (m_1 и m_2), три участка с подозрительными (n , n_1 и n_2) и два участка с плохими измерениями (g_1 и g_2). Сравнивая участки однородных измерений между собой, можно заметить, что их длины отличаются. Например для насыщения ТТ, показанного на Рис. 24, режим работы ТТ оказался таким, что длина участков хороших измерений получилась $m_1 > m_2$, для подозрительных измерений эта длина оказалась $n_1, n_2 > n$, и для плохих измерений $g_1 < g_2$. Минимальная длина хороших измерений изначально известна [15].

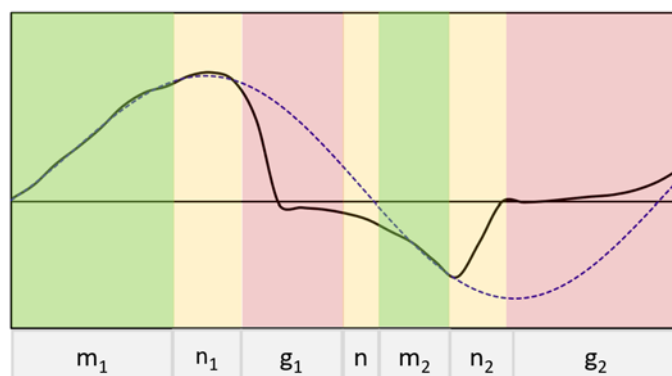


Рис. 24 Иллюстрация индексов весовых коэффициентов

Необходимость введения весовых коэффициентов подозрительных измерений возникает по следующей причине: использование метода КМИ позволяет определить момент возникновения насыщения и разбить измерения на плохие и хорошие. Так как момент возникновения насыщения и скорость перехода измерений от участки ИПТ к плохому зависят от таких основных

факторов, как начальная индукция в сердечнике ТТ, доля апериодической составляющей в токе КЗ, начальный угол тока КЗ и режим работы ТТ до момента КЗ, то метод КМИ может смещать момент возникновения насыщения ТТ на 0,5-1 мс. При плотности частоты дискретизации по стандарту МЭК 61850 – 80 точек/период – погрешность определения момента возникновения насыщения ТТ методом КМИ варьируется в диапазоне 2-4 измерений.

Исходя из сказанного, 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 диагональной матрицы формируются как:

$$\mathbf{W} = \begin{cases} \frac{1}{\varsigma_0 \cdot \eta^2} & \text{хорошие} & \text{изм.} \\ \frac{1}{\varsigma_1 \cdot \eta^2} & \text{подозрительные} & \text{изм.}, \\ \frac{1}{\varsigma_2 \cdot \eta^2} & \text{плохие} & \text{изм.} \end{cases} \quad (56)$$

где η – класс точности ТТ; $\varsigma_0 = 1$, $\varsigma_1 = 20 \cdot \eta$ и $\varsigma_2 = 50 \cdot \eta$.

В большинстве исследований при снижении погрешности ТТ по МНК учитывается скорость затухания экспоненциальной функции [41], [61]-[63]. Причем коэффициенты C_1 - C_4 определяются с помощью использования различных длин измерений, относящихся к нескольким или к одному и тому же ИПТ. Однако в большинстве исследований проверка метода МНК к таким важным с практической точки зрения факторам, как белый шум и гармонические составляющие в измеренном токе, не производится. Например, в [41], [61] и [62] при использовании МНК производится его проверка к параметрам ТТ, начальному углу КЗ и уровню периодической и апериодической составляющих тока КЗ соответственно. Проверка надежности данного метода к параметрам ТТ не имеет смысла, т. к. из названия метода ясно, что он не имеет привязки к геометрическим и электрическим параметрам

ТТ. Переход от МНК к ВМНК позволяет повысить устойчивость метода к измерениям с различными дисперсиями возмущений, включая белый шум.

На рисунке 25 показана структурная схема программы восстановления тока на основе ВМНК и процедуры формирования: матрицы при неизвестных коэффициентах **H**, диагональной матрицы весовых коэффициентов **W** и вектора измерений **B** в зависимости от числа ИПТ в полученных измерениях.

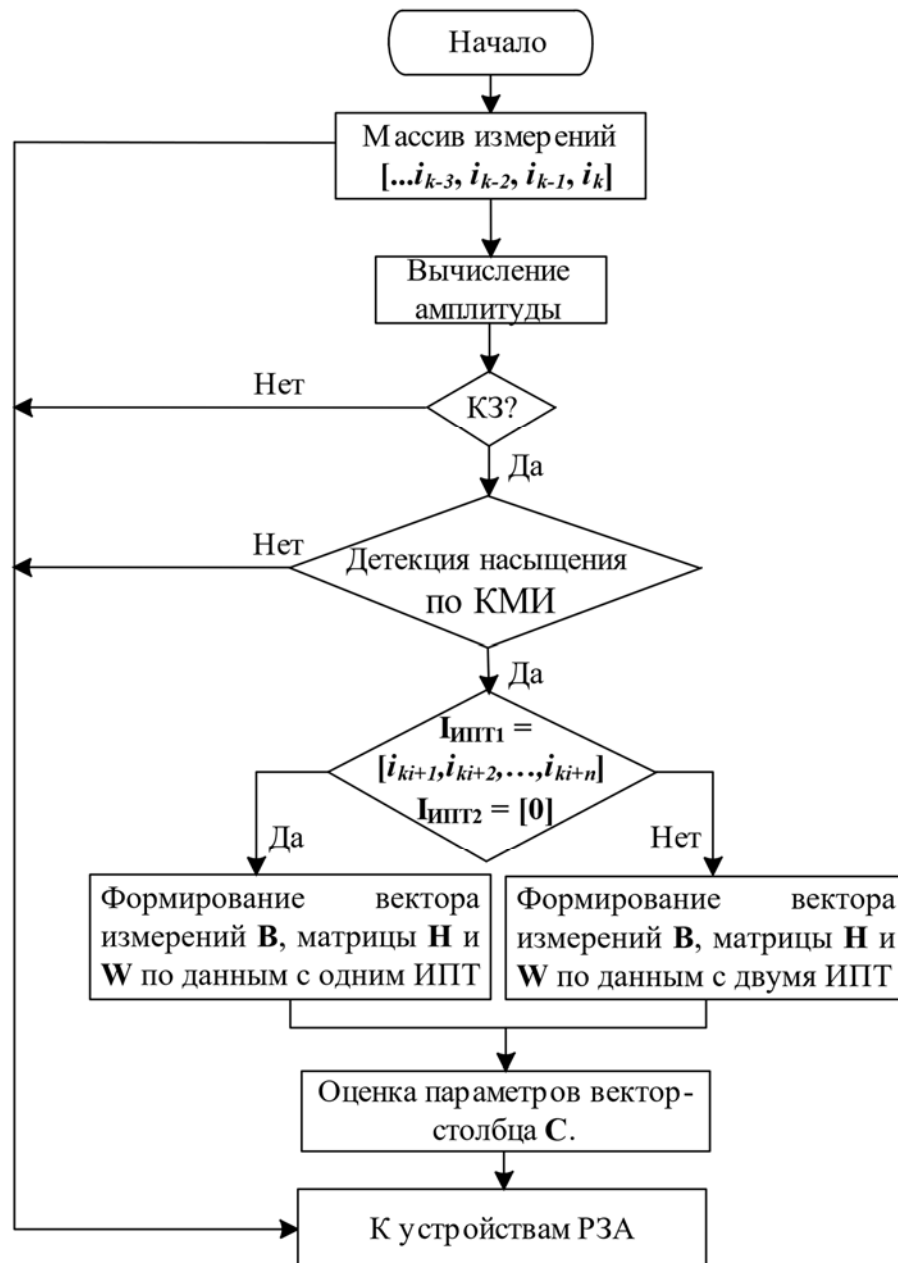


Рис. 25 Структура алгоритма ВМНК с процедурой формирования вектора измерений **B** и матриц **H** и **W**

В соответствии с программой, показанной на рисунке 25, оценка вектора неизвестных коэффициентов модели **C** производится в темпе поступления информации и в два этапа. Первому этапу соответствует насыщение с одним ИПТ. На этом этапе на основе хороших измерений одного ИПТ формируются вектор **B**, матрицы **H** и **W**. После производится оценка параметров модели **C** и выполняется восстановление искаженных измерений того полупериода, на основе ИПТ которого производилась оценка параметров. На втором этапе при получении новых данных проверяется наличие насыщения и в случае его обнаружения определяется второй ИПТ. Далее вектор **B** с матрицами **H** и **W** переформируются. Теперь в **B** содержатся три типа измерений – хорошие, подозрительные и плохие. В соответствии с этими измерениями в **W** подбираются соответствующие веса. Затем производится оценка параметров модели **C** и восстанавливается тот полупериод, в котором содержится последний ИПТ. При получении новых данных с насыщением ТТ второй ИПТ переходит в буфер с историей данных и занимает место первого ИПТ и место второго ИПТ заполняется «свежими» измерениями на основе текущих данных. Таким образом, по методу ВМНК на основе последних полученных данных производится восстановление тока.

3.2. Восстановление тока на основе комбинированного метода

В основе комбинированного метода лежит предложенный в работах [57] и [58] способ:

$$\lambda(t) = \frac{R_2}{w_2 \cdot S} \int_{t_0}^t i_2(\zeta) d\zeta + \frac{R_2}{w_2 \cdot S} (i_2(t) - i_2(t_0)) + \lambda(t_0). \quad (57)$$

Известным недостатком метода (57) является неправильный учет начальной индукции λ_0 . В целях избегания данного недостатка авторы метода в [80] предлагают комбинированный метод, в котором сначала производится прогнозирование измеренного тока в момент возникновения насыщения $i'_1(t_0)$. Затем путем вычитания из прогнозного значения тока его измеренного значения $i'_1(t_0) - i_2(t_0)$ определяется намагничивающий ток в момент

возникновения насыщения $i_0(t_0)$. Зная $i_0(t_0)$, можно определить начальную индукцию, соответствующую моменту возникновения насыщения $\lambda(t_0)$.

Предложенный комбинированный метод был рассмотрен в рамках первой главы настоящей работы и при апробации в условиях наличия начальной индукции зарекомендовал себя в качестве робастного метода восстановления тока ТТ. Однако в вычислительных экспериментах, проведенных как в первой главе настоящей работы, так и в работах автора данного метода [80], было сделано допущение – траектория изменения индукции в нелинейной части кривой намагничивания ТТ не содержит петлю гистерезиса, что ухудшает точность метода в реальных условиях. Вторым главным недостатком данного метода является определение начальной индукции по одному прогнозному значению тока. Для демонстрации второго недостатка на Рис. 26 показан момент ложного расчета намагничивающего тока.

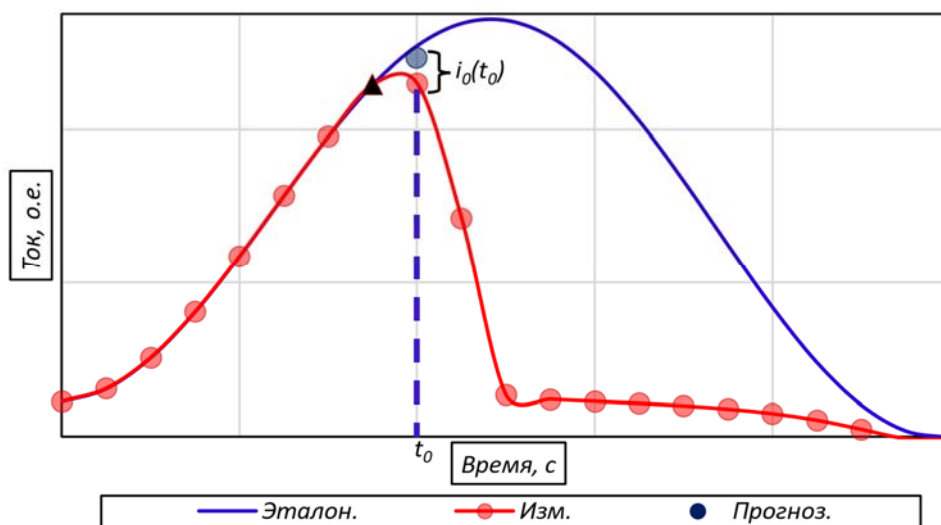


Рис. 26 Неправильное определение намагничивающего тока

Из Рис. 26 видно, что прогнозное значение тока было получено неверно, в результате чего неверно определился намагничивающий ток, что в свою очередь сильно влияет на точность определения начальной индукции λ_0 в момент t_0 . Как показали результаты апробации методов в первой главе настоящей работы, небольшое отклонение расчетной начальной индукции от

фактической может привести к резкому возрастанию погрешности методов использования кривой намагничивания.

Другим фактором, влияющим на точность определения начальной индукции является неправильное определение момента возникновения насыщения t_0 . Например, в случае небольшой ошибки детекции момента возникновения насыщения, в результате которого присвоение t_0 смещается в сторону ИПТ на одно измерение (черная треугольная точка на Рис. 26), начальная индукция будет равняться нулю. В таком случае в условиях наличия начальной индукции в ТТ восстановление по комбинированному методу не представляется возможным.

Из вышесказанного следует, что привязанность к одному измерению усложняет задачу определения начальной индукции. Далее предлагается способ исключения упомянутых недостатков комбинированного метода и повышения его робастности в случае наличия в кривой намагничивания петли гистерезиса.

На Рис. 27 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 Рис. 27 происходит по петле гистерезиса и эта траектория задает границы, в которых значения как магнитной индукции, так 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 колене кривой намагничивания (первый квадрант) или горизонтальным эллипсом кривой индукции λ_s . Какое из значений λ_s какому моменту возникновения насыщения соответствует

неизвестно, однако известны ее границы, 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 колене кривой намагничивания ТТ. Из сказанного вытекает, что в момент возникновения насыщения ТТ вместо поиска начальной индукции λ_0 наиболее эффективным способом является поиск индукции насыщения λ_s , расположенной в интервале $[\lambda_a, \lambda_b]$. Для этого разобьём задачу на две части – прогнозирование начала участка насыщения и определение λ_s .

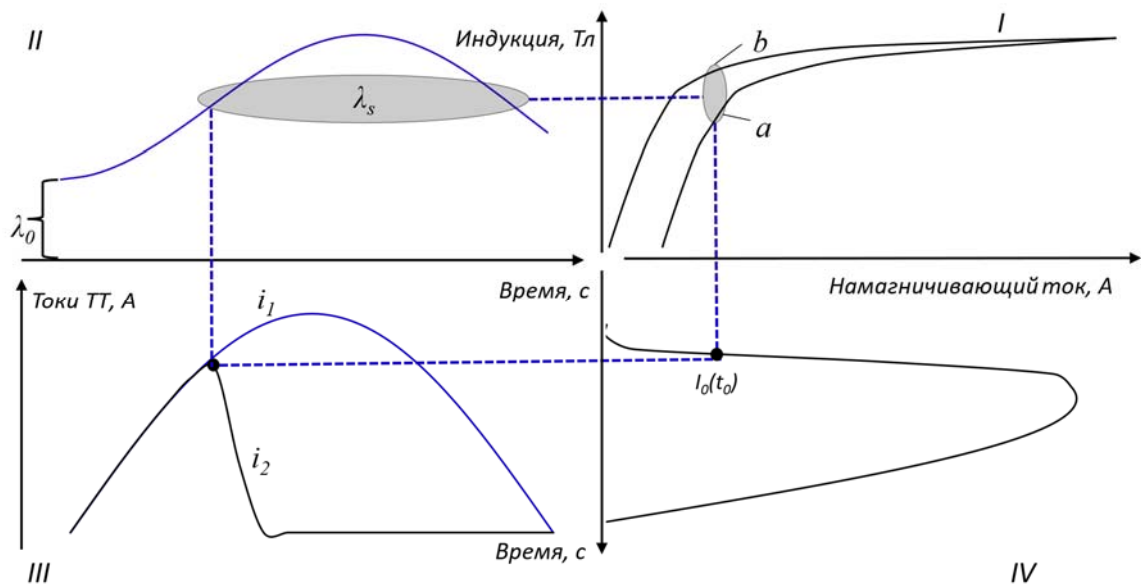


Рис. 27 Графическая интерпретация момента насыщения

Для решения первой части задачи пусть m – размерность выборки хороших измерений, расположенных в ИПТ, т.е. $\mathbf{i}_2(m)$. На основе этих измерений необходимо определить коэффициенты ранее заданной функции и по ней произвести прогнозирование:

$$\mathbf{i}_n(k) = \sum_{d=0}^N x_d f_d(k), \quad (58)$$

где x_d и f_d – заданные коэффициенты и функции.

Размерность выборки прогнозных значений тока n является ключевой частью комбинированного метода, с помощью которой варьируется надежность определения индукции λ_s . В целях избегания ложного определения λ_s в момент возникновения насыщения минимальное количество прогнозных значений тока i_n должно быть $n = 3$. Увеличение n с одной стороны может повысить надежность определения λ_s за счет большего охвата искаженного участка измеренного тока, с другой стороны может снизить точность определения λ_s за счет погрешности прогнозирования при увеличении количества прогнозных значений тока. Результаты экспериментов показали, что оптимальным количеством прогнозных значений тока считается $n = 3, \dots, 6$. На размерность n может оказать влияние тип функции, с помощью которой производится прогнозирование. Для более надежных к белому шуму и гармоническим составляющим функций количество прогнозных значений тока можно принимать $n = 6$, в противном случае их нужно снизить.

Для решения второй части задачи – поиск λ_s – в отличие от комбинированного метода в [80], где поиск начальной индукции производится на основе разности значений прогнозного и измеренного токов на участке насыщения, в предложенном комбинированном методе λ_s определяется наоборот – путем минимизации разности прогнозных и измеренных значений вторичного тока. Это позволяет исключить влияние петли гистерезиса. Для этого предлагается составить следующую векторную целевую функцию скалярного аргумента:

$$f_k(\lambda_s) = \sum_{k=1}^n \left| \frac{i_n(k) - i_b(k)}{i_n(k)} \right| \rightarrow \min \quad (59)$$

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

В (59) опорными значениями являются прогнозные значения тока i_n . Т.к. восстановленные значения тока i_b получаются на основе кривой намагничивания и плохих измерений $i_b = f(\lambda_s, i_2)$, минимизация (59)

производится путем поиска индукции λ_s одним из алгоритмов минимизации нулевого порядка. Как упоминалось ранее, значения λ_s при насыщении находятся в известном интервале $[\lambda_a, \lambda_b]$, Рис. 27.

Далее, зная индукцию λ_s , по (57) легко можно рассчитать индукцию на всем участке насыщения и для этого участка рассчитать намагничивающий ток:

$$i_0 = \frac{l \cdot f(i_2(t), \lambda_s)}{w_2} \quad (60)$$

Зная намагничивающий ток, рассчитать эталонный ток на участке насыщения не составит труда:

$$i'_1 = i_0 + i_2 \quad (61)$$

Условием хорошей работы предложенного метода в части прогнозирования является применение тех методов детекции, которые способны «ловить» момент возникновения насыщения.

Для поиска экстремума функции типа $\mathbf{f} : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^m$ в основном используются оптимизационные методы высокого порядка, т.е. в их процедуре заложено взятие производных от $\mathbf{f}$. Для применения таких методов оптимизации исследуемая функция должна быть непрерывной, дифференцируемой и в ней не должны присутствовать участки, на которых скорость изменения функции резко снижается [99]. При решении задачи компенсации погрешности ТТ в режиме насыщения поиск экстремума функции $\mathbf{f}$, которая выражается в поиске λ_s , методами высокого порядка оказывается малоэффективным. Это вызвано тем, что при поиске индукции λ_s ее изменение начинает резко снижаться в нелинейной части кривой намагничивания. Для наглядности сказанного на Рис. 28 показано изменение индукции λ на упрощенной кривой намагничивания ТТ. Из этого рисунка видно, что кривую индукцию в линейной части графика – зона a – можно представить как непрерывную функцию от напряженности магнитного $\lambda =$

$f(H)$ с хорошей скорости изменения. В момент перехода графика индукции от зоны a в зону b скорость изменения функции $\lambda=f(H)$ резко снижается.

Именно из-за вышесказанного предложенный в [78] и [79] метод в условиях неглубокого насыщения ТТ не способен восстанавливать ток, т.к. неглубокое насыщение означает, что изменение индукции происходит на границе между зонами a и b на Рис. 28. Более того, оптимизация методами высокого порядка из-за наличия взятия производных в них оказывается чувствительным к белому шуму в измеренном токе.

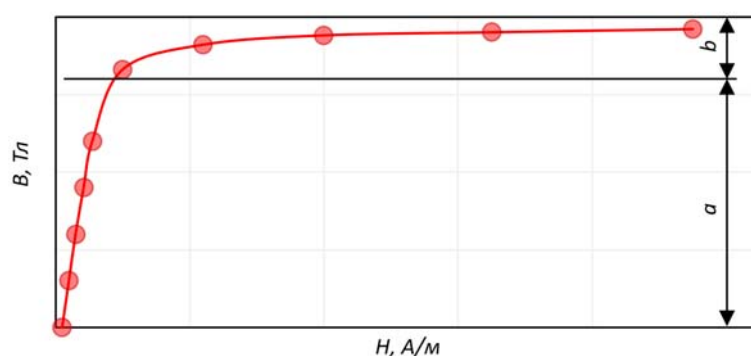


Рис. 28 Изменение индукции на кривой намагничивания

На Рис. 29 показан алгоритм восстановления тока на основе метода КМ. Из первой части этого алгоритма нетрудно заметить, что условием его запуска является детекция насыщения ТТ методом КМИ. После чего алгоритм на основе ВМНК производит прогнозирование нескольких плохих измерений и по ним выполняет поиск индукции насыщения. Затем, запускается восстановление тока на всем интервале насыщения. По моменту перехода через нуль алгоритм заново запускается.

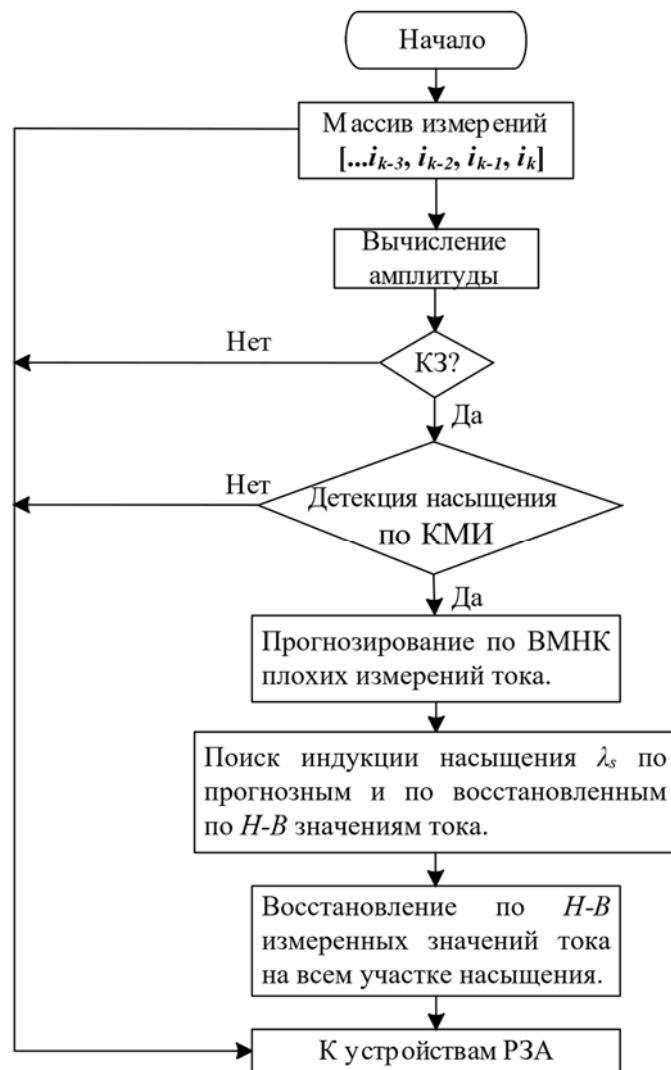


Рис. 29 Структурная схема алгоритма восстановления тока на основе КМ

Выводы по главе 3:

1. Предложен модифицированный взвешенный метод наименьших квадратов. Дано детальное описание выбора его весовых коэффициентов и их градация. Приведено описание разработанного алгоритма восстановления тока на основе взвешенного метода наименьших квадратов. Показано формирование матрицы при неизвестных коэффициентах и вектора измерений в темпе поступления информации.

2. Предложено детальное описание недостатков ранее разработанного комбинированного метода. Предложены пути преодоления этих недостатков. Описаны поведение индукции на кривой намагничивания и низкая эффективность методов оптимизации высокого порядка. Обоснованы методы оптимизации нулевого порядка для поиска индукции насыщения.

ГЛАВА 4. ПРОВЕРКА МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТОКА В УСЛОВИЯХ НАСЫЩЕНИЯ ТТ

4.1. Проведение экспериментов

4.1.1. Тестовая модель для проведения экспериментов

Проверка методов восстановления тока ВМНК и КМ проводилась на основе данных, синтезированных с помощью ПК Matlab/Simulink, где была создана модель ТТ, учитывающая насыщение. На рисунке 30 показана модель ТТ, которая создана на основе теории Jiles-Atherton. С помощью блока управления изменяется амплитуда тока, подаваемого на ТТ. На выходе выполняется фиксация вторичного тока с учетом насыщения i_{sat} и первичного тока i_{red} , приведенного к вторичной стороне.

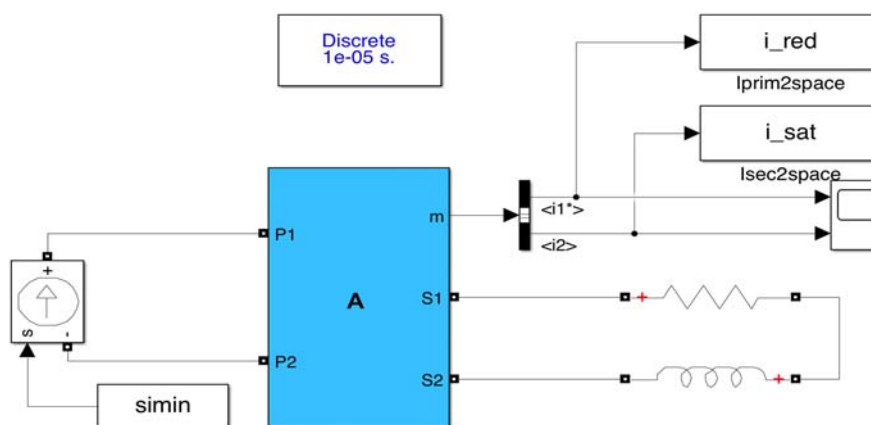


Рис. 30 Тестовая модель ТТ в ПК Matlab/Simulink

Анализ работы предложенных методов восстановления следует проводить для разных степеней насыщения, что достигается за счет варьирования амплитуды первичного тока и доли апериодической составляющей в ней. Кривая первичного тока предварительно рассчитывалась для каждого опыта отдельно, она состоит из двух частей:

$$i_1(t) = \begin{cases} I_{m1} \sin(\omega t_0 + \varphi), & \text{если } t < 0 \\ k \cdot I_{m1} \sin(\omega t_0 + \varphi_{cd}) + I_{m2} \cdot e^{-\frac{t-t_0}{T}}, & \text{если } t > 0 \end{cases}, \quad (62)$$

где I_{m1} – амплитуда тока в номинальном режиме, ω – угловая скорость, k – кратность тока короткого замыкания, φ и φ_{cd} – фаза периодической

составляющей тока, I_{m2} – амплитуда апериодической составляющей, T – постоянная времени затухания апериодической составляющей, t_0 – момент перехода с одной характеристики на другую.

Амплитуда апериодической составляющей выбирается из условия постоянства тока при изменении режима работы.

$$I_{m1} \sin(\omega t_0 + \varphi) = k I_{m1} \sin(\omega t_0 + \varphi_{cd}) + I_{m2}, \quad (63)$$

Отсюда можно получить выражение для амплитуды апериодической составляющей:

$$I_{m2} = I_{m1} \sin(\omega t_0 + \varphi) - k I_{m1} \sin(\omega t_0 + \varphi_{cd}), \quad (64)$$

Параметр t_0 определяется на основе заданной фазы возникновения КЗ. При синтезировании различных режимов тока КЗ варьирование происходит по таким параметрам, как кратность тока k , начальная фаза φ и фаза смещения φ_{cd} . Уровень апериодической составляющей в токе КЗ был задан с помощью вариации фаз φ и φ_{cd} . Начальная фаза варьировалась в диапазоне от 0 до 180° с шагом 90°. Изменение φ_{cd} производилось от 0 до 90° с шагом 30°. Кратность тока КЗ варьировалась в диапазоне от 0 до 45 с шагом 15. Последовательность вариаций k , φ и φ_{cd} следующая: сначала задаются k и φ , затем, при фиксации этих параметров, варьируется фаза смещения φ_{cd} . Таким образом, для заданного уровня тока КЗ с фиксированной начальной фазой варьируется уровень апериодической составляющей тока КЗ. Это позволяет изменять степень насыщения ТТ. В результате для одного параметра k и φ получим 4 φ_{cd} , т.е. 4 эксперимента с разной степенью насыщения ТТ.

Синтезируемые кривые тока преобразуются с помощью модели ТТ, соответствующей СТО 56947007-29.120.70.241-2017 «Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА» в части измерительных трансформаторов тока ТФДН-110М, используемых для испытаний дифференциальной защиты трансформатора 110 кВ. Наименование и значение констант описаны в приложении А.

На Рис. 31 и Рис. 32 показаны примеры приведенного ко вторичной цепи ТТ эталонного тока при варьировании φ_{cd} .

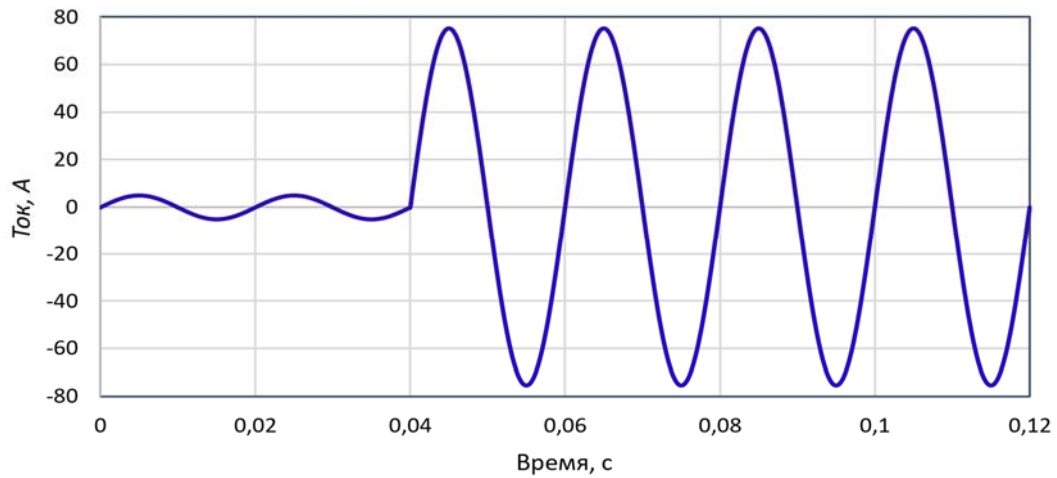


Рис. 31 Пример кривой эталонного тока ТТ при $k = 15$, $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi_{cd} = 0^\circ$

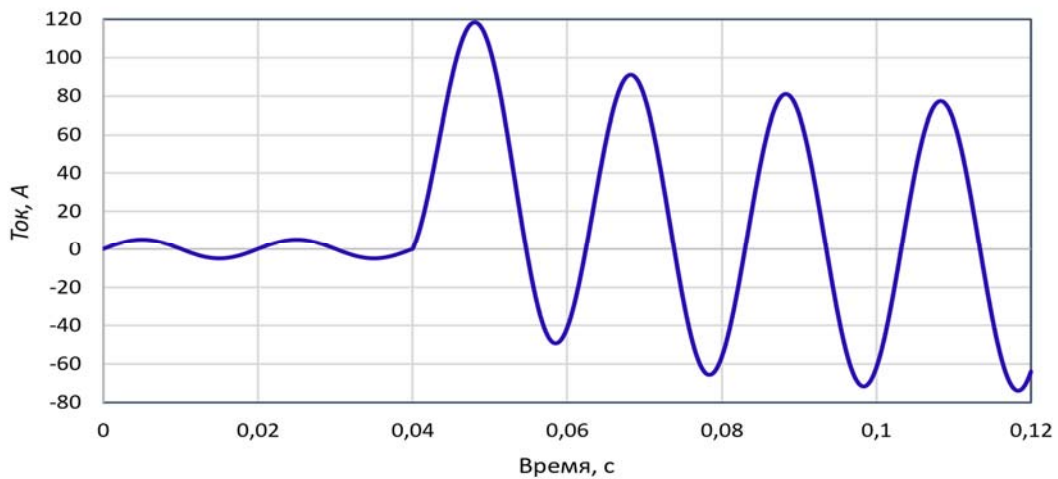


Рис. 32 Пример кривой эталонного тока ТТ при $k = 15$, $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi_{cd} = 60^\circ$

4.1.2. Оценка погрешности алгоритмов восстановления тока

После применения методов восстановления кривой измеренного тока с учетом насыщения необходимо оценить их погрешность. Для этого по формулам (25)-(27) рассчитывалась относительная полная, токовая и угловая погрешности методов.

Также для оценки точности восстановленных значений тока рассчитывалось их среднее квадратичное отклонение (СКО) от эталонного:

$$CKO = \sqrt{\frac{100}{N} \sum_{k=1}^N \frac{(i_k^{эм} - i_k^{расч})^2}{I_{мл_эм}}}, \quad (65)$$

где N – количество точек тока КЗ на интервале моделирования; $I_{мл_эм}$ – амплитуда периодической составляющей тока КЗ на входе ТТ; $i_k^{эм}$ и $i_k^{расч}$ – k -е значение эталонного и расчетного токов соответственно.

Для сопоставительного анализа по быстрдействию ВМНК и КМ оценивалась их временная эффективность. Эти алгоритмы в условиях насыщения ТТ запускаются на каждом полупериоде и выполняется серия восстановлений тока, в которых учитывается поведения работы алгоритмов при смещении окна наблюдаемого тока относительно начала переходного процесса. Смещение производилось в 20 раз в соответствии с устройствами ОАО «Прософт Системы». Сначала для каждого смещения окна наблюдаемого тока рассчиталось свое усредненное время восстановления на интервале моделирования 0,06 с. Затем рассчиталось усредненное время смещенных окон и путем деления полученного результата на количество полупериодов на интервале моделирования, посчиталось усредненное время каждого алгоритма, затраченное на восстановления одного полупериода тока.

4.2. Вычислительный эксперимент №1. Проверка методов КМ и ВМНК в зависимости от уровня насыщения магнитопровода ТТ

В рамках настоящего эксперимента производилась проверка КМ и ВМНК в условиях отсутствия шума в измеренном токе. Скорость затухания тока КЗ была задана $T_I = 0,02$ с. Для четырех частных случаев на Рис. 33 показан результат работы метода КМ и ВМНК при варьировании кратности тока КЗ k , начальной фазы нормального режима φ и фазы смещения момента возникновения КЗ $\varphi_{сд}$ (вариация кратности и апериодики тока КЗ). Из этого рисунка видно, что ТТ работает в двух режимах: нормальном до момента $t_0 \leq 0$ с и аварийном с момента $t_0 > 0$ с. Стоит отметить, что в нормальном режиме магнитная индукция ТТ отстает от тока на 90° , и в момент возникновения КЗ

при $k = 15$ и $\varphi = \varphi_{сд} = 0^\circ$ она принимает «благоприятный» знак по отношению к первому полупериоду тока КЗ, что приводит к нормальной работе ТТ в этом полупериоде. Кривые восстановленного тока, как в методе КМ, так и в методе ВМНК, имеют отклонения в начале искаженных участков измеренного тока. Это связано с погрешности метода КМИ при детекции момента возникновения насыщения ТТ.

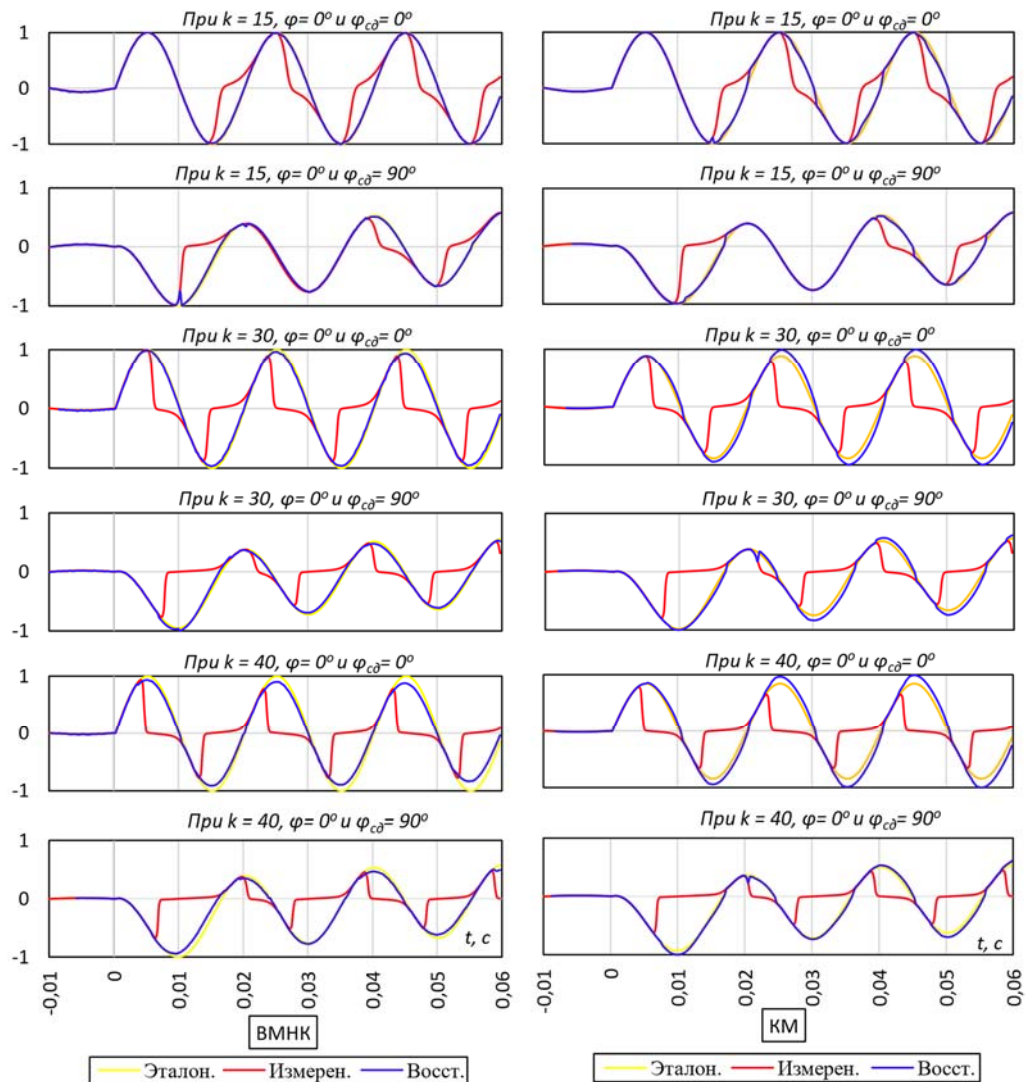


Рис. 33 Результат работы ВМНК и КМ при вариации k , φ и $\varphi_{сд}$

В таблице 5 приведены максимальное и среднее значение полной ε и токовой f_i погрешности, а также средняя угловая δ_φ погрешность. Указанные погрешности для каждого эксперимента рассчитывались отдельно и выражаются в процентах от эталонного тока, поступающего на вход ТТ. Среднее значение полной погрешности измеренных значений тока на

интервале моделирования КЗ во всех вычислительных экспериментах варьировалось в диапазоне от 76 до 91%. Что касается ее максимального значения, оно было в диапазоне 83-97%. Токовая погрешность измеренного тока по среднему значению варьировалась в диапазоне от 40 до 60%, а по максимальному – от 49 до 76%. Среднее значение фазовой погрешности во всех вычислительных экспериментах в находилось в диапазоне от 46 до 66%.

Таблица 5 – Результат работы КМ и ВМНК при отсутствии шума в измерениях

k	Фаза, °		Погрешности методов, %									
	φ	$\varphi_{сд}$	δ_{φ}		$f_{ср.}$		$f_{макс.}$		$\varepsilon_{ср.}$		$\varepsilon_{макс.}$	
			КМ	ВМНК	КМ	ВМНК	КМ	ВМНК	КМ	ВМНК	КМ	ВМНК
15	0	0	1	0,4	0,3	0,4	1	0,6	6	1	7	1
		30	2	1	1	0,3	3	1	9	2	12	3
		90	1	3	1	3	2	6	5	9	8	15
	90	0	1	2	3	1	6	3	10	5	18	7
		30	1	1	2	1	4	1	8	2	11	3
		60	2	3	2	2	3	7	8	8	9	14
		90	4	0,3	2	0,3	5	0,4	11	1	16	1
	180	0	1	0,3	0,2	0,4	1	1	6	1	7	1
		30	2	1	2	0,23	4	1	8	1	11	2
		90	1	4	1	7	2	11	5	13	8	16
30	0	0	5	3	13	3	15	6	17	9	19	15
		30	5	2	14	5	17	5	17	6	20	7
		60	4	3	10	5	15	6	15	7	19	8
		90	3	3	10	3	14	5	15	7	18	8
	90	0	3	4	10	3	15	5	15	8	19	10
		30	5	4	12	3	18	5	16	7	22	10
		60	3	3	6	4	14	5	10	7	18	8
		90	6	3	14	4	15	5	18	6	19	7
	180	0	5	3	13	5	15	5	17	6	19	7
		30	4	2	13	5	17	5	17	6	20	7
		60	4	3	10	5	15	6	16	7	19	8
		90	3	4	10	4	14	5	15	8	18	11
40	0	0	4	4	11	3	13	5	14	7	16	10
		30	3	5	9	13	11	15	11	16	14	18
		60	3	4	7	9	10	13	14	11	20	15
		90	1	5	6	6	12	10	13	10	18	14
	90	0	1	5	4	6	11	11	11	10	15	17
		30	2	6	8	9	10	14	10	13	13	16
		60	3	3	11	6	14	13	13	11	16	18
		90	4	5	11	13	13	15	13	16	16	18
	180	0	4	5	12	13	13	15	14	16	16	18
		30	3	5	8	12	11	14	11	15	14	17
		60	2	6	5	10	10	13	13	14	19	16
		90	1	5	5	4	12	9	12	10	15	16

На рисунке 34 показаны результаты работы методов КМ и ВМНК. На первых двух верхних гистограммах показана средняя на интервале моделирования КЗ относительная полная и токовая погрешности соответственно. На двух последних – средняя угловая погрешность всех экспериментов и мера разброса измеренных и восстановленных значений тока от эталонного в форме СКО. Из первой гистограммы можно заметить, что в экспериментах с неглубоким насыщением ТТ (эксперименты №1-23) метод ВМНК восстанавливает ток с более низкой погрешности, чем метод КМ. Это связано с тем, что в условиях неглубокого насыщения хороших измерений в ИПТ больше, чем плохих измерений в искаженных участках. Следовательно, при составлении СЛАУ для поиска параметров тока КЗ хорошие измерения доминируют над подозрительными и плохими. Что касается количества хороших измерений в методе КМ, то оно фиксировано и является инвариантом относительно уровня насыщения ТТ. Как видно из первой гистограммы рисунка 34, при глубоких насыщениях (эксперименты №24-34) погрешность метода ВМНК из-за уменьшения количества хороших измерений в ИПТ начинает расти. В этом случае метод КМ относительно уровня насыщения ТТ ведет себя инвариантно. На этой гистограмме заметно, что среднее значение полной погрешности метода КМ на интервале моделирования КЗ не превышает 18%, а погрешность ВМНК – 16%.

На второй гистограмме рисунка 34 – средняя токовая погрешность – также можно заметить, что при неглубоких насыщениях ВМНК работает более точно, а при глубоких, наоборот, точность КМ опережает точность ВМНК. Средняя токовая погрешность КМ на интервале моделирования не превышает 13,6%, а ВМНК – 13,4%.

Из третьей гистограммы рисунка 34 – средняя фазовая погрешность – видно, что погрешность метода КМ ниже погрешности метода ВМНК. Это связано с тем, что в процедуре восстановления тока по методу КМ принимают непосредственное участие измеренные значения тока без изменения фазы.

Однако, как показано на последней гистограмме рисунка 34 (эксперименты №16-21), из-за погрешности оценки начальной индукции или отклонения формы кривой намагничивания от кривой, заложенной в методе КМ, или же отклонения значения нагрузки ТТ от значения, используемого в методе КМ, этот метод может внести небольшие искажения в фазу тока. Несмотря на сказанное, среднее значение фазовой погрешности метода КМ во всех экспериментах не превышает 5,5%, а ВМНК – 6,3%.

Из четвертой гистограммы рисунка 34 также видно, что в экспериментах с небольшой кратностью тока КЗ, вызывающей неглубокое насыщение ТТ, СКО восстановленных значений тока, полученных по ВМНК, ниже, чем СКО, полученное по методу КМ. Однако по мере углубления насыщения ТТ СКО ВМНК начинает расти, что по точности уступает СКО КМ.

4.3. Вычислительный эксперимент №2. Проверка чувствительности методов КМ и ВМНК к наличию шума в измерениях

В рамках настоящего эксперимента производилась проверка методов восстановления тока к зашумлению в измерениях. Характеристики шума соответствуют белому шуму с гауссовым распределением. Зашумление измеренных значений тока производилось в соответствии с формулой (23) при $\delta_1 = 0$ и $\delta_2 = 0,03$. Остальные параметры эталонного тока были идентичны предыдущему эксперименту. Средняя и максимальная полная, токовая и средняя фазовая погрешности измеренных значений тока также соответствуют предыдущему эксперименту. Результаты проверки методов приведены в таблице 6.

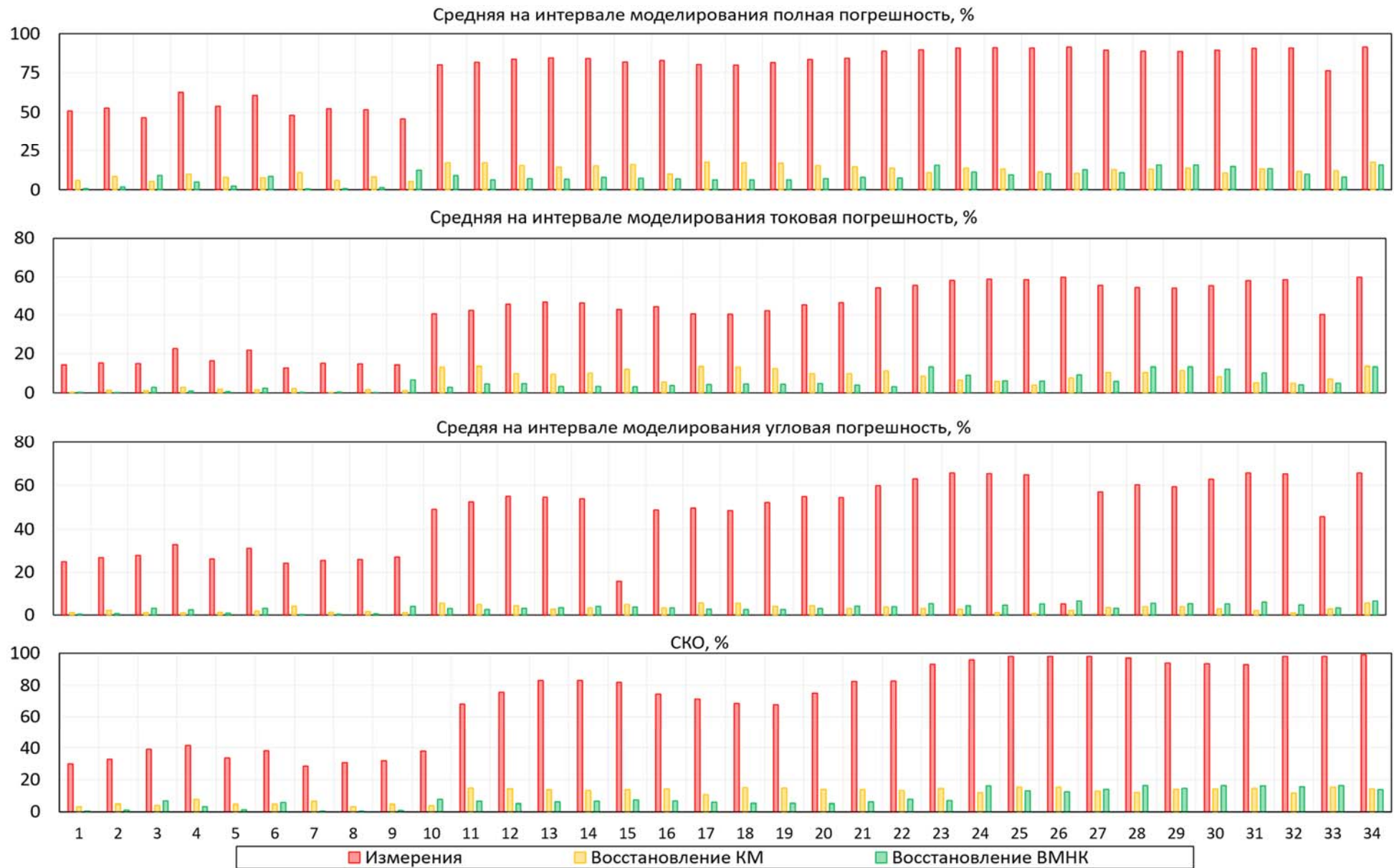


Рис. 34 Погрешности методов КМ и ВМНК при отсутствии шума в измерениях, интервал моделирования КЗ – 0,06 с

Таблица 6 – Результат КМ и ВМНК при зашумлении измерений

k	Фаза, °		Погрешности методов, %									
	φ	$\varphi_{сд}$	δ_{φ}		$f_{ср.}$		$f_{макс.}$		$\varepsilon_{ср.}$		$\varepsilon_{макс.}$	
			КМ	ВМНК	КМ	ВМНК	КМ	ВМНК	КМ	ВМНК	КМ	ВМНК
15	0	0	2	1	1	1	1	1	6	2	8	3
		30	2	2	1	1	3	1	8	3	10	4
		90	0,4	3	1	3	2	5	5	9	8	11
	90	0	1	4	2	2	5	4	8	7	14	10
		30	2	1	2	1	4	2	7	2	10	3
		60	2	3	2	2	3	6	7	8	9	13
		90	4	1	2	1	4	1	9	2	13	3
	180	0	2	1	1	1	1	1	6	1	7	2
		30	2	0,2	1,3	0,2	3	1	7	2	9	2
		90	0,4	3	1	3	2	5	5	9	8	11
30	0	0	5	3	11	2	14	3	14	8	17	13
		30	5	3	12	4	15	6	16	6	18	8
		60	4	3	10	4	14	5	15	6	18	7
		90	3	4	9	3	13	5	14	7	17	10
	90	0	3	3	10	2	13	5	15	6	18	9
		30	5	3	11	1	14	3	14	5	17	8
		60	4	3	9	3	13	6	13	6	17	8
		90	5	3	11	5	13	6	14	7	17	8
	180	0	5	3	11	5	13	6	15	7	17	8
		30	5	3	12	6	15	7	16	9	18	10
		60	4	3	10	6	14	8	15	8	18	11
		90	3	5	9	5	13	7	14	9	17	13
40	0	0	4	3	14	3	18	6	16	7	20	8
		30	3	4	9	11	12	13	11	13	14	15
		60	2	4	6	8	11	12	14	10	19	14
		90	1	4	5	4	10	8	13	9	18	14
	90	0	1	4	5	4	10	10	13	10	18	17
		30	2	5	5	6	11	10	8	10	14	15
		60	3	3	9	7	12	14	11	13	14	20
		90	4	4	11	11	14	12	13	13	16	14
	180	0	4	4	12	11	17	14	15	13	20	16
		30	3	4	8	9	11	15	11	12	14	17
		60	2	4	5	4	11	9	13	9	19	15
		90	1	5	4	4	10	10	12	10	18	16

Результаты работы методов показаны на рисунке 35. На первой гистограмме показана средняя на интервале моделирования КЗ (0,06 с) полная погрешность, на второй и на третьей – токовая и угловая погрешности соответственно. На последней гистограмме приведены результаты методов в форме СКО. Из первой гистограммы видно, что в отличие от предыдущего эксперимента (восстановление незашумленного тока) в большинстве случаев

погрешность метода ВМНК ниже погрешности метода КМ. Однако по мере углубления насыщения ТТ, как и в предыдущем вычислительном эксперименте, наблюдается рост погрешности метода ВМНК. Средняя полная погрешность ВМНК для проведенных экспериментов не превысила 13,4%. Что касается методу КМ, его значение по этому показателю не превышало 16,4%.

Средняя токовая погрешность метода ВМНК в проведенных экспериментах не превышала 11,3%, в то время как погрешность КМ по этому параметру достигла 14%. При сопоставительном анализе работы методов ВМНК и КМ по гистограмме токовой погрешности рисунка 35 наблюдается та же картина, которая была при анализе методов по полной погрешности.

Фазовая погрешность ВМНК при углублении насыщения ТТ начинает расти и становится больше фазовой погрешности метода КМ (третья гистограмма рисунка 35). Это вызвано тем, что при глубоких насыщениях хороших измерений в ИПТ становится меньше, чем плохих, и при решении СЛАУ погрешность оценки параметров тока КЗ по ВМНК начинает расти. Что касается метода КМ, то за счет непосредственного участия измеренных значений тока при их восстановлении сохраняется фаза тока.

Как видно из четвертой гистограммы рисунка 35, поведение ВМНК и КМ по СКО аналогично их поведению по полной погрешности (первая гистограмма).

4.4. Вычислительный эксперимент №3. Проверка чувствительности методов КМ и ВМНК к скорости затухания аperiodической составляющей тока КЗ

В ходе настоящего вычислительного эксперимента проверялась чувствительность методов КМ и ВМНК к скорости затухания аperiodической составляющей тока КЗ.

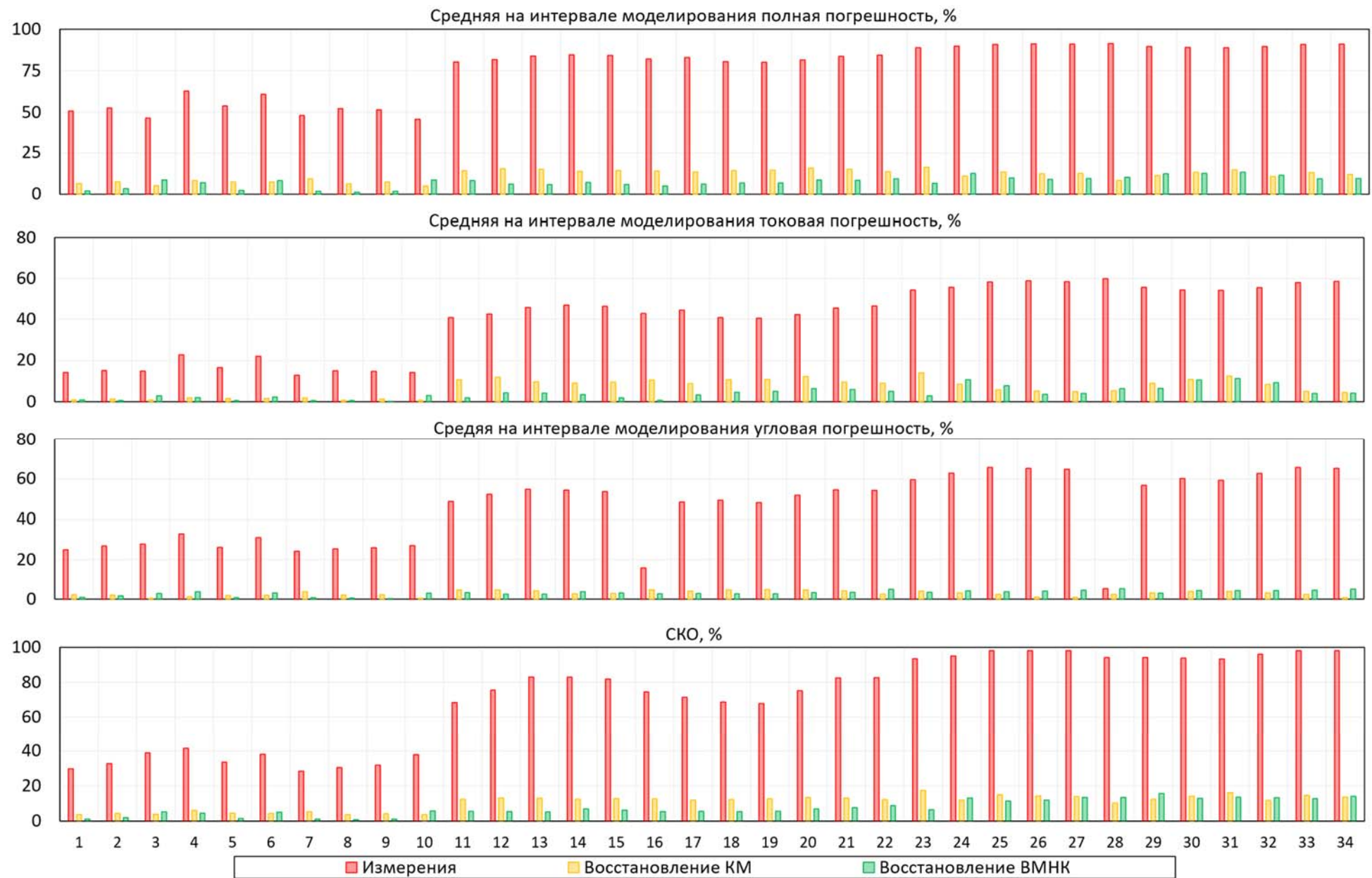


Рис. 35 Погрешности методов КМ и ВМНК при наличии шума в измерениях, интервал моделирования КЗ – 0,06 с

Скорость затухания была задана $T_l = 0,1$ с, кратность тока КЗ $k = 15$, уровень апериодической составляющей тока КЗ варьировался с помощью фазы тока нормального φ и аварийного $\varphi_{сд}$ режимов. Интервал моделирования нормального режима составлял 0,01с, а режима КЗ – 0,06 с. На рисунке 36 показаны изменения графиков эталонного, измеренного и восстановленного по КМ и ВМНК токов. Как видно из графиков ВМНК, метод не имеет чувствительности к скорости затухания тока КЗ. Что касается метода КМ, он также обладает устойчивости к T_l , т.к. восстановление происходит по кривой намагничивания ТТ. Небольшие разбросы в начале участка восстановленных значений тока вызваны поведением детектора момента возникновения насыщения. При возникновении КЗ с фазами $\varphi = 45^\circ$ и $\varphi_{сд} = 0^\circ$ происходит реверс тока, но все же методы сохраняют свою способность восстановления тока.

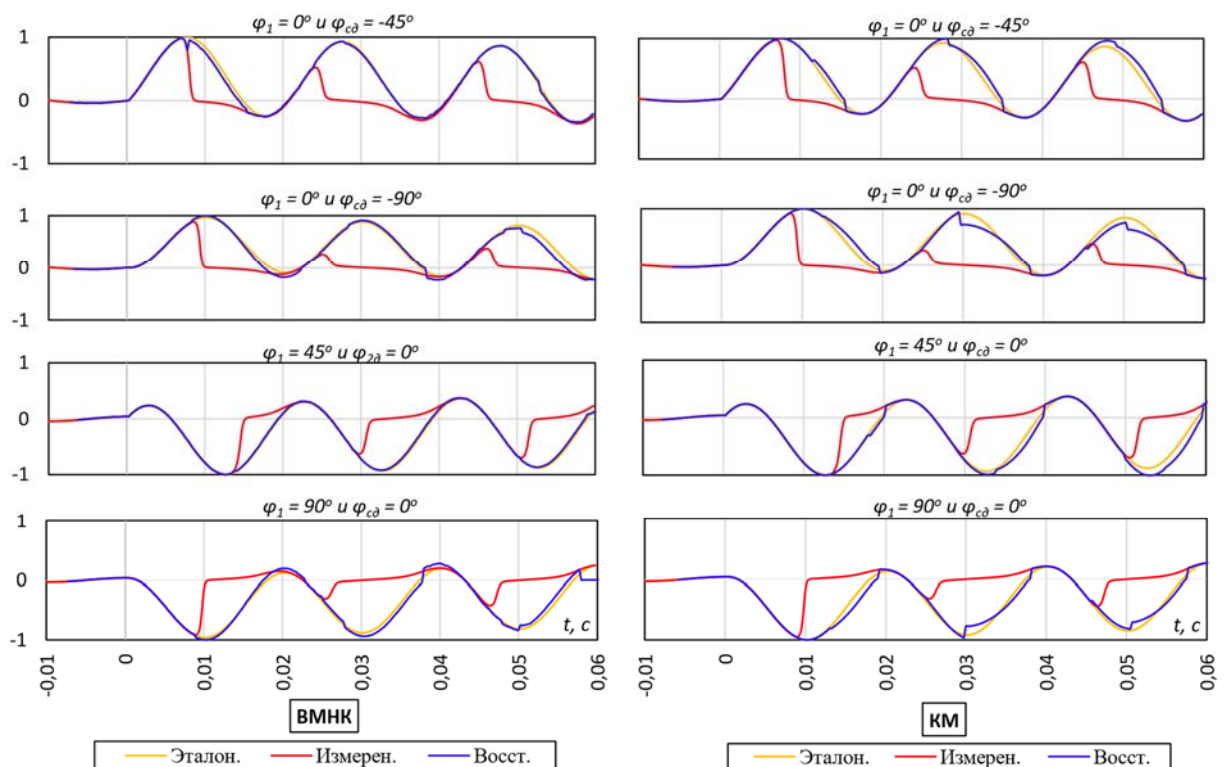


Рис. 36 Результат работы КМ и ВМНК при $T_l = 0,1$ с

Результат работы методов КМ и ВМНК в форме полной, токовой и угловой погрешности приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Результат работы КМ и ВМНК при зашумлении измерений

k	Фаза, °		Погрешности методов, %									
	φ	$\varphi_{сд}$	$\delta\varphi$		$f_{ср.}$		$f_{макс.}$		$\varepsilon_{ср.}$		$\varepsilon_{макс.}$	
			КМ	ВМНК	КМ	ВМНК	КМ	ВМНК	КМ	ВМНК	КМ	ВМНК
15	0	-45	4	3,5	5,4	2,7	10,8	6	11	6,4	15,7	11,2
	0	-90	5,2	2,3	8,1	3	14,2	9,4	15	10,6	18,2	19,4
	45	0	2,4	1,3	4,6	1,4	13,3	2	8,7	3	18,4	5,8
	90	0	5	0,1	5,7	4,7	10,6	9,5	12,2	11,3	15	18

На рисунке 37 показаны средняя на интервале моделирования тока КЗ (0,06 с) полная, токовая и угловая погрешности методов КМ и ВМНК. Полная погрешность измеренного тока во всех экспериментах варьировалось в диапазоне от 74% (соответствует случаю КЗ с $\varphi = 45^\circ$ и $\varphi_{сд} = 0^\circ$, эксперимент №3) до 93% (соответствует $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi_{сд} = -90^\circ$, эксперимент №2). Токовая погрешность измеренного тока в среднем изменилась от 38% (эксперимент №3) до 68% (эксперимент №2). Средняя угловая погрешность на входе методов варьировалась в диапазоне от 32% (эксперимент №3) до 62% (эксперимент №2).

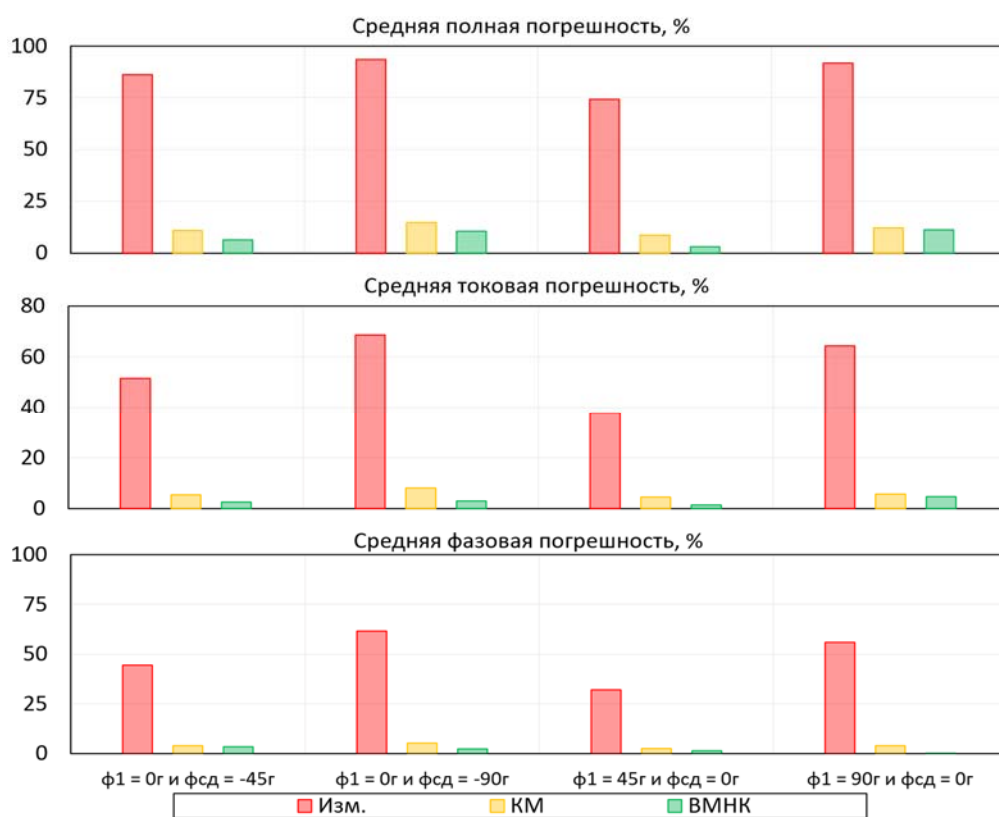


Рис. 37 Результат работы методов КМ и ВМНК в форме полной, токовой и угловой погрешности при $T_l = 0,1$ с

Из первой гистограммы рисунка 37 можно видно, что среднее значение полной погрешности на выходе КМ не превышает 15% (эксперимент №2), в то время как на выходе ВМНК этот параметр составляет 11,3% (эксперимент №4). Среднее значение токовой погрешности метода КМ ниже 8%, на выходе метода ВМНК эта погрешность составляет 5%. Угловая погрешность в среднем на интервале моделирования тока КЗ на выходе КМ не превышает 5,2%, а на выходе ВМНК – 3,5%.

Как показывает анализ работы КМ и ВМНК, характеристики этих методов не имеют сильной зависимости от скорости затухания апериодической составляющей тока КЗ. Более высокая точность метода ВМНК вызвана отсутствием его привязки к параметрам кривой намагничивания и тем, что точность линеаризации апериодической составляющей тока КЗ прямо пропорциональна ее скорости затухания. При использовании метода КМ начало восстановленного участка тока, где присутствуют небольшие отклонения, соответствует «колену» кривой намагничивания.

4.5. Вычислительный эксперимент №4. Проверка чувствительности метода КМ отклонении кривой намагничивания ТТ

В рамках настоящего эксперимента производилась проверка устойчивости метода КМ к погрешности задания коэффициента кривой намагничивания. Интерес к данному эксперименту вызван тем, что в реальных условиях магнитные процессы в магнитопроводе ТТ происходят по петле гистерезиса. На рисунке 38 показана серия кривых намагничивания ТТ.

На этом рисунке синяя линия соответствует эталонной кривой намагничивания, заложенной в модели ТТ для синтеза измерений тока в режиме насыщения. Другие 10 серых линий были получены с помощью изменения коэффициента кривой намагничивания, отвечающего за предельно допустимое значение индукции, в диапазоне $h = \pm 75\%$ относительно своего эталонного значения с шагом 15%. Искаженные значения измеренного тока,

которые были получены с помощью эталонной кривой (синяя), восстанавливались с применением измененных кривых (серые линии). Диапазон отклонения в $\pm 75\%$ выбран для того, чтобы «покрыть» ширину петли гистерезиса в магнитопроводе ТТ. Таким образом проверялась устойчивость метода КМ к отклонению кривой намагничивания ТТ.

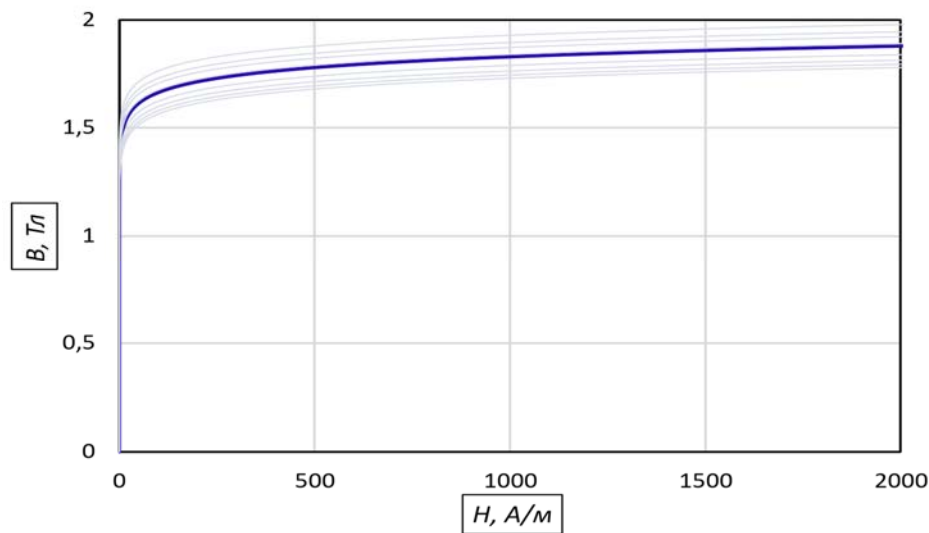


Рис. 38 Демонстрация отклонения кривых намагничивания

При восстановлении тока каждой из 10 измененных кривых соответствует 34 эксперимента. В результате получено 340 экспериментов, усредняя которые по каждой из 10 измененных кривых намагничивания, вновь получаем 34 эксперимента, но уже со средними значениями.

На рисунке 39 показан результат работы метода КМ после усреднения полученных по измененным кривым серий восстановленных токов. Моделирование тока содержит два режима: нормальный, продолжительностью 0,01 с, и аварийный, продолжительностью 0,06 с.

Из рисунка 39 видно, что в аварийном режиме, вызывающем насыщение магнитопровода ТТ, метод КМ при отклонении кривой намагничивания способен восстанавливать ток. Сохранение способности восстановления тока у метода при изменении кривой намагничивания происходит в результате поиска начальной индукции итерационным путем, т.е., например, отклонение

коэффициента кривой намагничивания в $h = +5\%$ от эталонной («завышение нелинейного участка кривой намагничивания» вдоль оси ОУ) означает, что при поиске начальной индукции найденная итерационным путем начальная индукция на $+5\%$ отличается от фактической, находящейся в магнитопроводе ТТ. Таким образом, происходит компенсация отклонения кривой намагничивания ТТ.

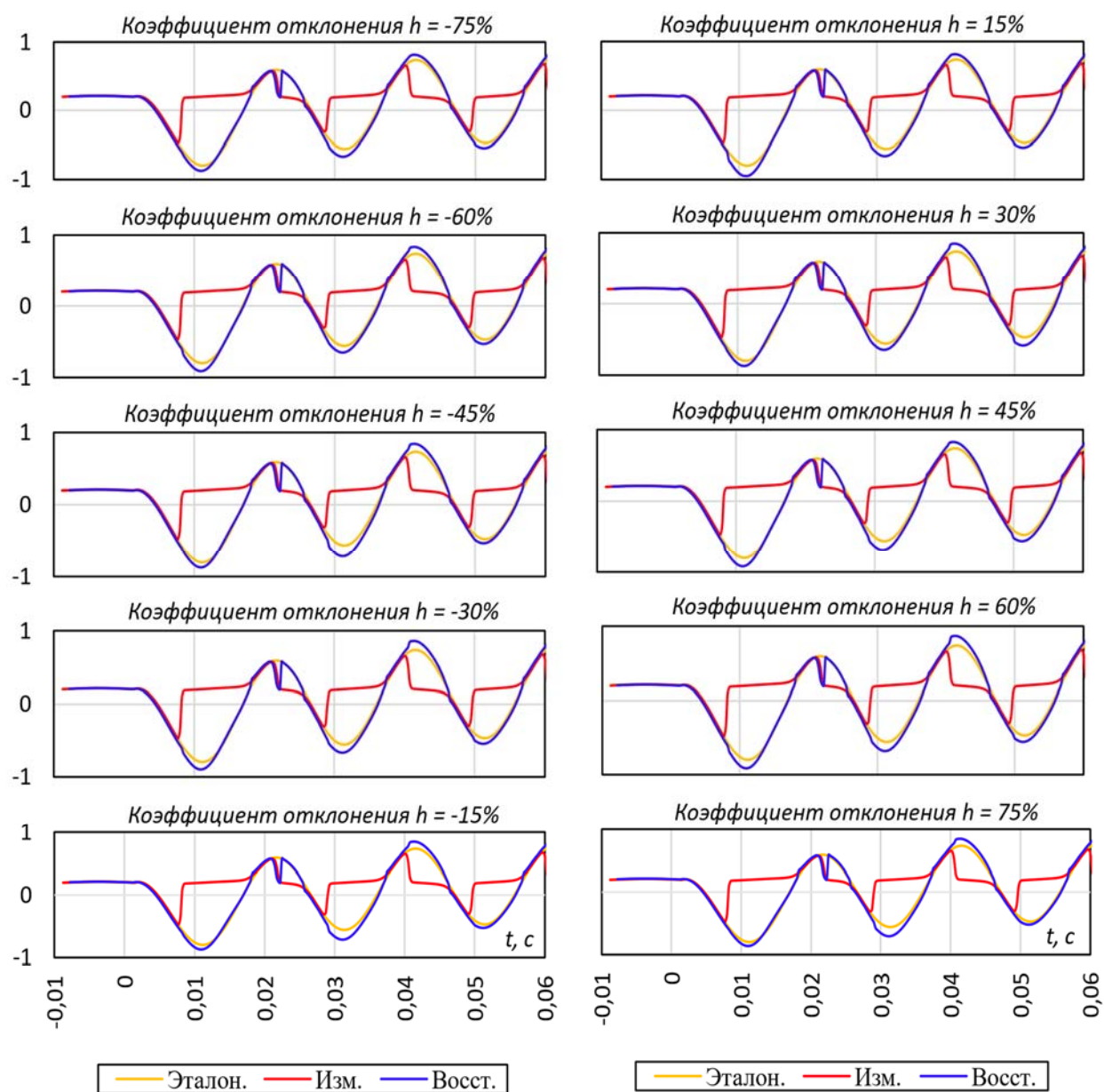


Рис. 39 Восстановление тока по КМ

Результат работы метода КМ в форме максимальной и средней полной, токовой и средней угловой погрешности приведен в таблице 8.

Таблица 8 – Усредненный результат работы метода КМ при изменении h

k	Фаза, °		Усредненные относительно коэффициента h погрешности КМ.				
	φ	$\varphi_{сд}$	δ_φ	$f_{ср.}$	$f_{макс.}$	$\varepsilon_{ср.}$	$\varepsilon_{макс.}$
15	0	0	1	1	2	7	8
		30	1	1	3	7	9
		90	0,2	2	4	6	9
	90	0	0,2	1	3	7	10
		30	1	2	3	8	10
		60	1	2	5	8	11
		90	1	1	2	7	9
	180	0	1	2	3	7	8
		30	1	1	3	7	9
		90	0,4	2	4	6	9
30	0	0	3	4	4	8	8
		30	3	4	6	9	11
		60	3	3	5	10	13
		90	2	4	7	10	13
	90	0	2	4	6	10	13
		30	3	5	7	9	11
		60	3	3	5	8	9
		90	3	4	4	8	9
	180	0	3	4	4	8	8
		30	3	4	6	9	10
		60	3	4	5	10	13
		90	2	3	5	9	12
40	0	0	4	11	12	18	18
		30	4	13	16	16	19
		60	4	9	14	18	20
		90	3	12	17	18	20
	90	0	2	11	16	17	19
		30	3	8	12	11	14
		60	4	13	15	15	18
		90	5	12	15	20	21
	180	0	4	11	12	18	18
		30	4	13	16	15	19
		60	4	8	13	18	20
		90	2	11	17	18	20

На рисунке 40 показаны СКО и среднее значение на интервале моделирования тока КЗ полной, токовой и угловой погрешности, метода КМ. Из гистограммы полной погрешности на этом рисунке видно, что отклонение кривой намагничивания от эталонной не оказывает существенного влияния на результат работы метода. Например, в первом вычислительном эксперименте наибольшая полная погрешность метода КМ среди всех 34 экспериментов

составила 18%, в настоящем вычислительном эксперименте эта погрешность составляет 20%. Из этой гистограммы также заметно, что точность метода КМ обратно пропорциональна уровню насыщения ТТ. Это происходит по следующим трем причинам: 1) в первой части метода КМ для оценки остаточной индукции используется экстраполяция, точность которой снижается в результате глубокого насыщения; 2) детектор насыщения вносит свою погрешность, в результате чего погрешность оценки коэффициентов модели тока для экстраполяции растет; 3) при восстановлении тока начало искаженного участка соответствует «колену» кривой намагничивания (наибольшая область, в которой магнитная индукция принимает случайные значения).

На гистограмме токовой погрешности и СКО метода КМ на рисунке 40 повторяется та же картина, что и на гистограмме полной погрешности.

Как видно из гистограммы фазовой погрешности рисунка 40, метод КМ является более робастным относительно этого параметра. Фазовая погрешность метода в проведенных 34 экспериментах не превышает 5%. Как упоминалась ранее, это вызвано непосредственным использованием измеренных значений тока при восстановлении.

4.6. Вычислительный эксперимент №5. Проверка чувствительности метода КМ к остаточной индукции

Стоит отметить, что модель ТТ на основе теории Jiles-Atherton имеет недостаток – разрыв магнитной индукции в условиях насыщения. Для демонстрации сказанного на графике (а) рисунка 41 показаны кривые эталонного и измеренного токов, а на графике (b) – соответствующее этим токам изменение магнитной индукции.

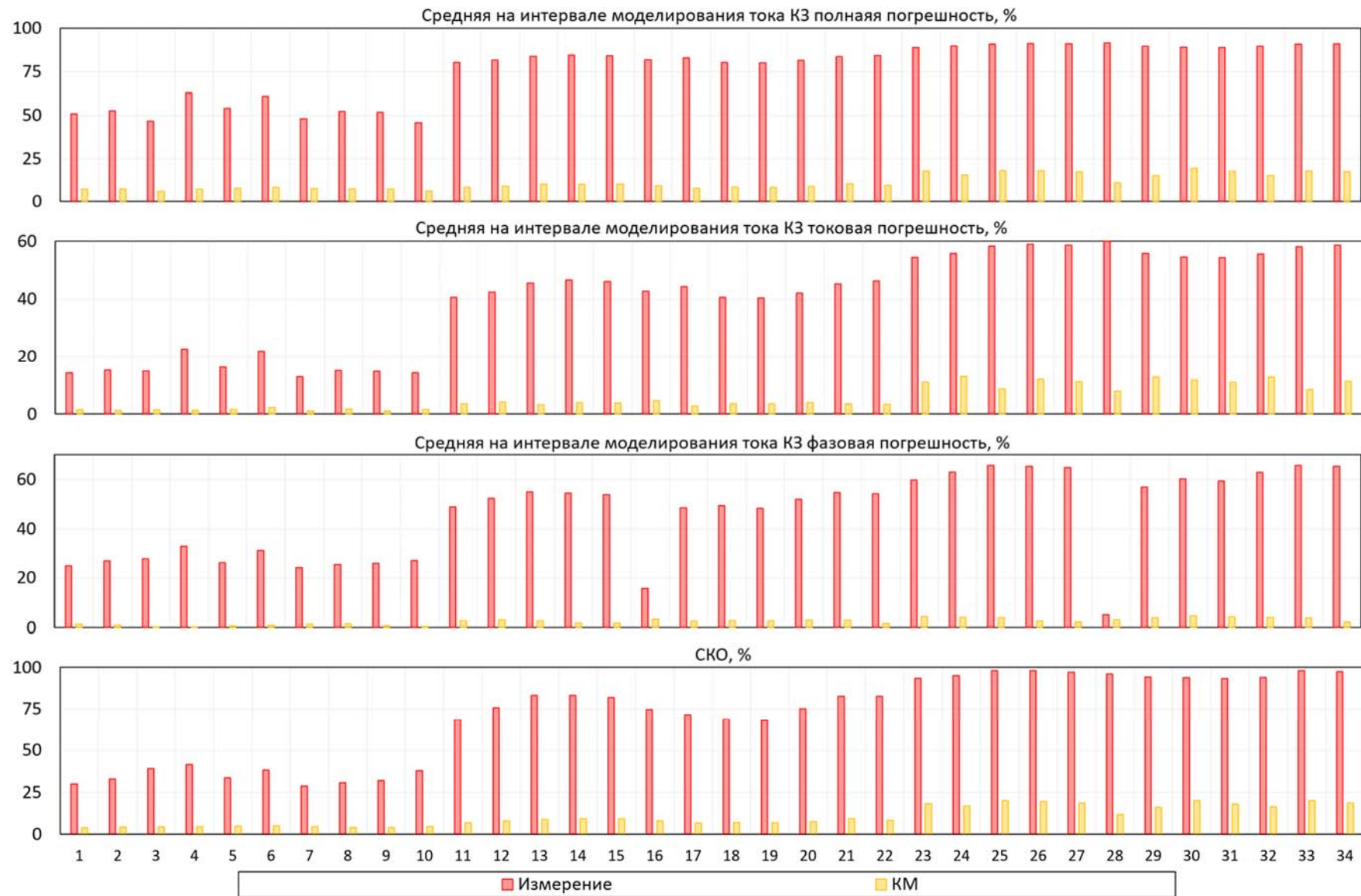


Рис. 40 Погрешности КМ при отклонении кривой намагничивания от эталонной

Из графика индукции на Рис. 41 видно, что модель ТТ на основе Jiles-Atherton в случае насыщения ТТ, соответствующего отрицательному полупериоду тока, имеет разрыв. Из графика (b) на Рис. 41 нетрудно заметить, что этот разрыв происходит при изменении индукции от положительного полупериода к отрицательному. Этому соответствует возникновение искажения тока на отрицательном полупериоде, график (a). Что касается возникновения искажения тока в положительном полупериоде, то магнитная индукция изменяется плавно и достигает участка насыщения без разрыва. Касательно разрыва индукции авторы этой модели в [100] говорят следующее: «Следует отметить, что могут быть получены некоторые процессы, не соответствующие физике процесса ТТ, когда магнитное поле уменьшается на конце петли (вершина петли) и $M_{irr} < M_{an}$ в первом квадранте или $M_{irr} > M_{an}$ в третьем квадранте. В этом случае прямое решение <необратимой намагниченности M_{irr} > приводит к отрицательной дифференциальной восприимчивости при уменьшении поля». Сказанное показано красной линией на Рис. 42 Как утверждают авторы, это происходит из-за второго слагаемого в числителе дифференциального уравнения, описывающего гистерезис в системе (2). Это слагаемое описывает поведение изменения необратимой намагниченности M_{irr} .

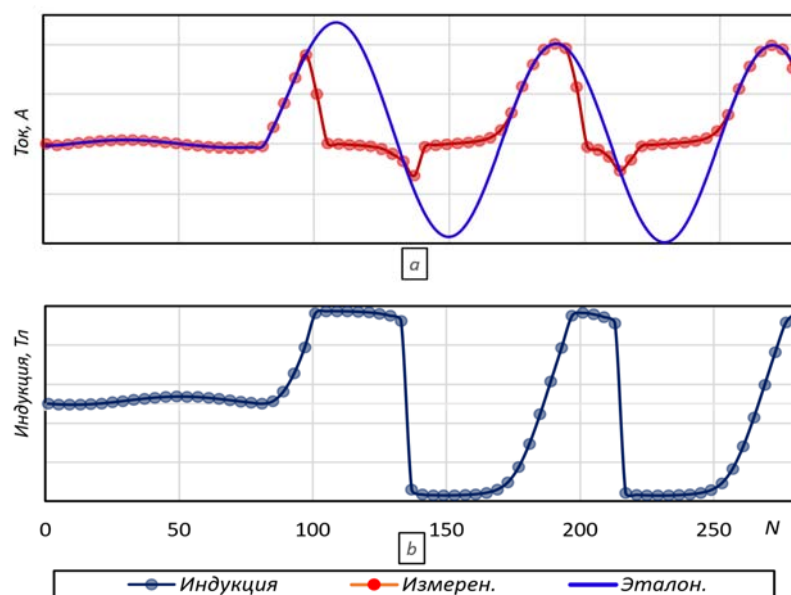


Рис. 41 Кривые токов и индукции

Момент разрыва в магнитной индукции оказывает существенное негативное влияние на результат работы комбинированного метода. Из-за наличия разрыва индукции в магнитной цепи ТТ, смоделированной на основе модели Jiles-Atherton, возникает необходимость определения индукции насыщения λ_s в каждом полупериоде для ее применения в комбинированном методе. Это оказывает влияние на временную эффективность метода, так как на каждом полупериоде для поиска λ_s используется итерационная процедура.

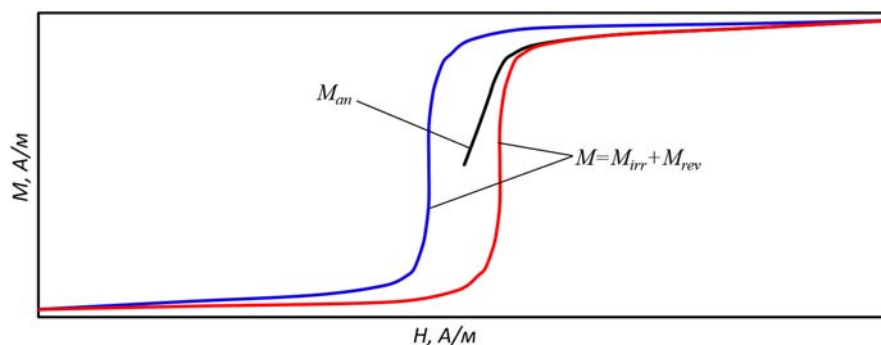


Рис. 42 Петля гистерезиса на основе теории Jiles-Atherton

4.7. Вычислительный эксперимент №6. Проверка чувствительности метода КМ к изменению нагрузки ТТ

В рамках настоящего эксперимента проводились расчеты с изменением уровня нагрузки ТТ и апериодической составляющей тока КЗ с помощью использование программно-аппаратного комплекса реального времени (ПАК РВ). Условия проведения экспериментов, тестовая модель, в которой информационный обмен производится в соответствии со стандартом IEC 61850, и результат работы метода КМ в форме полной, токовой и угловой погрешности более подробно приведены в приложении Б.

4.8. Вычислительный эксперимент №7. Сопоставительный анализ быстродействия методов КМ и ВМНК

В ходе настоящего эксперимента было проанализировано быстродействие методов КМ и ВМНК. Результаты проведенных экспериментов показаны на рисунке 43.

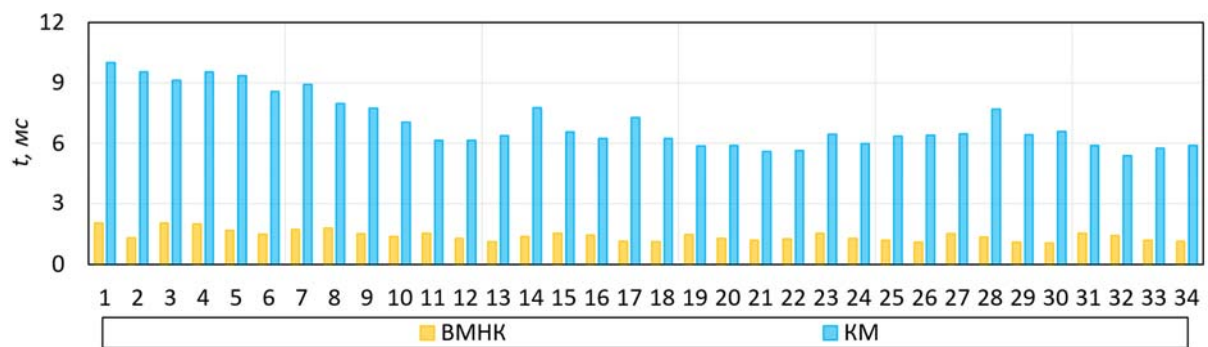


Рис. 43 Быстродействие методов КМ и ВМНК

Из гистограммы на рисунке 43 видно, что метод ВМНК по быстродействию в 4-5 раз превосходит метод КМ. Относительно большая задержка в методе КМ вызвана поиском начальной индукции оптимизационными методами нулевого порядка (без использования взятия производной от функции). Из этого рисунка также можно заметить, что время работы, как ВМНК, так и КМ, по мере возрастания номера эксперимента снижается. 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.

Выводы по главе 4:

1. Результаты проведенных экспериментов показывают, что методы КМ и ВМНК способны восстановить ток ТТ в условиях насыщения его магнитопровода. Установлено, что среднее значение полной погрешности методов КМ и ВМНК в условиях отсутствия белого шума в измерениях не превышает 18% и 16% соответственно. Как показывают результаты экспериментов, наличие шума в измерениях не оказывает сильного влияния на точность методов. Средняя на интервале моделирования КЗ полная погрешность метода КМ при зашумлении измерений не превышала 16,4%, а ВМНК – 13,4%. Выявлено, что изменение скорости затухания апериодической составляющей тока КЗ T_l также не оказывает влияния на работу методов. Среднее значение полной погрешности метода КМ при $T_l = 0,1$ с не превысило

15%, а ВМНК – 11,3%. Погрешность метода ВМНК в форме средней полной погрешности в проведенных экспериментах в 1,23 раза ниже погрешности метода КМ. Несмотря на это метод КМ является более робастным относительно уровня насыщения ТТ.

2. Результат проверки устойчивости метода КМ по отношению к отклонению кривой намагничивания ТТ показывает, что метод имеет высокую робастность к этим отклонениям, характерным для реальных условий. Показано, что при изменении коэффициента заданной аналитическим путем кривой намагничивания ТТ в диапазоне $\pm 75\%$ среднее значение полной погрешности метода КМ не превысило 20%.

3. Проведена проверка метода КМ к остаточной индукции магнитопровода ТТ путем учета особенности модели ТТ на основе теории Les-Atherton. В результате выявлено, что характеристики метода за счет поиска начальной индукции итерационной процедурой являются инвариантным относительно наличия остаточной намагниченности магнитопровода ТТ.

4. В результате вычислительных экспериментов для проверки быстродействия методов установлено, что среднее время работы метода ВМНК составляет 1,42 мс и он работает быстрее в 4-5 раз, чем метод КМ.

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. В результате анализа нормативно-технической литературы был сделан вывод, что ТТ, установленные в ЕЭС России, в подавляющем большинстве случаев имеют конструкцию с замкнутым магнитопроводом, они подвержены риску насыщения, в результате чего их погрешность может превысить предельно допустимое значение. Показана статистика аварий в ЕЭС России, вызванных насыщением ТТ. Установлено и расчетами подтверждено, что основными факторами, вызывающими быстрое насыщение ТТ, являются остаточная индукция ТТ и апериодическая составляющая тока КЗ. В результате анализа литературы по теме компенсации погрешности ТТ в первой главе установлено, что решение задачи, как правило, производится в два этапа - детекция возникновения насыщения и восстановление тока. 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 намагниченности магнитопровода погрешность может резко увеличиться.
2. Во второй главе проанализированы методы детекции момента возникновения насыщения ТТ и выявлено, что методы детекции насыщения, работающие на основе численного дифференцирования имеют высокую чувствительность к наличию шума в измерениях, а методы детекции насыщения, работающие на основе статического анализа данных не способны определить область возникновения насыщения ТТ. Был разработан метод детекции момента возникновения насыщения на основе статистического анализа данных, в котором недостатки существующих методов сведены к минимуму. Как показали результаты экспериментов, разработанный метод детекции

имеет высокую устойчивость к белому шуму в измеренном токе и остаточной индукции в магнитопроводе ТТ. Также, как показывают результаты проведенных численных экспериментов, разработанный метод детекции не привязан к форме кривой искаженного тока. Разработан метод численного дифференцирования, на основе которого выделяется граница нормального и аварийного режимов работы ТТ, предварительно рассчитывается амплитуда периодической составляющей тока нормального/переходного режимов, а также их фаза.

3. В третьей главе предложен модифицированный способ восстановления тока на основе метода наименьших квадратов с учетом введения весовых коэффициентов, которые позволяют повысить надежность метода к плохим измерениям. Предложен способ выбора весовых коэффициентов при возникновении КЗ с большой долей апериодической составляющей и низкой скоростью затухания, вызывающего глубокое насыщение ТТ. Также на основе комбинации методов прогнозирования и использования кривой намагничивания предложена модификация комбинированного метода восстановления тока, в которой оценка остаточной магнитной индукции производится путем решения оптимизационной задачи. Показано преимущество поиска индукции насыщения над поиском начальной индукции.
4. Проведены численные эксперименты, позволяющие оценить устойчивость модифицированных методов восстановления тока к различным степеням насыщения ТТ и остаточной индукции. Как показали результаты вычислительных экспериментов, введенные весовые коэффициенты в методе наименьших квадратов позволяют повысить устойчивость метода, когда в режиме КЗ, вызывающего насыщение ТТ, начало переходного процесса (начало интервала правильной трансформации) в измерениях отличается от конца переходного процесса, расположенного в конце интервала правильной трансформации. Также в экспериментах было учтено отклонение

параметров используемой для восстановления тока кривой намагничивания ТТ от эталонной. Эксперименты показали, что комбинированный метод обладает высокой устойчивостью к флуктуациям параметров кривой намагничивания и остаточной индукции. Установлено, что по быстродействию взвешенный метод наименьших квадратов опережает комбинированного метода в пять раз.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в анализе работоспособности предложенных в рамках работы методов в реальных условиях. Представляет интерес снижение количества итераций при решении оптимизационной задачи для оценки начальной индукции в магнитопроводе ТТ. Необходимо исследовать возможность решения задачи восстановления тока без использования методов детекции насыщения ТТ. Прикладное значение представляет повышение устойчивости комбинированного метода к гармоническим составляющим измеренного тока. Решение указанных вопросов позволит повысить робастность алгоритмов восстановления тока не только при насыщении ТТ, но и при появлении второй гармоники в измеренном токе из-за броска тока намагничивания сливового трансформатора.

В конце автор выражает большую признательность и благодарит научного руководителя Паздерина Андрея Владимировича за правильное направление и тайм-менеджмент при обучении в аспирантуре, за поддержку и научное руководство. Автор признателен своим научным консультантам – Мурзину Павлу Валерьевичу и Тащилину Валерию Александровичу – за коррекцию в части стилистики написания научного текста и за консультирование в области управления большими потоками данных. Также автор благодарен Тавлинцеву Александру С., Семененко Сергею Сергеевичу, Апросину Константину и Соколову Игорю за многочисленные консультации в вопросах математики и за интересные вопросы, которые помогали

погружаться в тему исследования. Автор выражает свою благодарность Осиповой Елене Владиленовне за редакторскую работу.

Также автор выражает признательность отцу и матери за проявление большого интереса к работе и поддержку. Автор признателен своей семье – жене Оише и детям Мухамаду и Фотиме за проявление терпения и понимание.

Автор благодарен своим братьям – Одинаеву Бободжону и Одинаеву Хуршеду – за поддержку.

Список терминов и сокращений

ВМНК	– взвешенный метод наименьших квадратов
ДЗШ	– дифференциальная защита шин
ЕЭС	– единая энергетическая система
ИНС	– искусственные нейронные сети
ИПТ	– интервал правильной трансформации
КЗ	– короткое замыкание
КМ	– комбинированный метод
КМИ	– контроль магнитной индукции
МНК	– метод наименьших квадратов
ОЭС	– объединённая энергосистема
ПАК РВ	– программно-аппаратный комплекс реального времени
ПК	– программный комплекс
РЗА	– релейная защита и автоматика
СКО	– среднеквадратическое отклонение
СЛАУ	– система линейных алгебраических уравнений
ТТ	– трансформаторы тока

Список литературы

1. Королев Е.П., Лимберзон Э.М. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. М: Энергия, 1980, 208 с.
2. Раскулов Р.Ф. Погрешности ТТ. Влияние токов короткого замыкания // Новости электротехники. – 2005. – №2 (32). – С.114-16.
3. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. М: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
4. Jorge Cardenas. CT Requirements for GE Multilin Relays. GE Grid Automation. 2016.
5. Анализ неселективных действий дифференциальных защит сборных шин при внешних однофазных коротких замыканиях с насыщением трансформатора тока в неповрежденной фазе / С.Л. Кужеков, А.А. Дегтярев, Н.А. Дони, А.А. Шурупов, А.А. Петров, И.А. Кошельников // Релейная защита. Научно-практическое издание. 2019. С. 28–36.
6. F. das Guerra Fernandes Guerra and W. Santos Mota, "Current transformer model," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 22, no. 1, pp. 187–194, 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2006.887092.
7. Александр А.В. Влияние быстрого насыщения трансформаторов тока на работу РЗ // Молодой ученый. Технические науки. Т. 16, № 358, С. 73-74. 2021.
8. Ziegler G. Digital Differential Protection. Belo Horizonte, 2005.
9. Романюк Ф.А., Тишечкин А.А., Румянцев В.Ю., Новаш И.В., Бобко Н.Н., Глинский Е.В. Влияние насыщения трансформаторов тока на работу токовых защит / Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2010. № 1. С. 5-9
10. A. Hargrave, M. J. Thompson and B. Neilman, "Beyond the knee point: A practical guide to CT saturation," 2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE), 2018, pp. 1-23, doi: 10.1109/CPRE.2018.8349779.
11. Раскулов Р.Ф., Эткинд Л. Л. Влияние воздействующих факторов на метрологические характеристики ТТ и ТН с литой эпоксидной изоляцией/ Метрология электрических измерений в электроэнергетике.: Доклады науч.-техн. семинаров и конф. 1998-2001 гг. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС.–2001.– С. 317-327.
12. Раскулов Р.Ф., Смирнов А.С. Влияние температуры окружающего воздуха на погрешности измерительных трансформаторов/ Метрология электрических измерений в электроэнергетике.: Доклады третьей науч.-практ. конференции. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС.–2003.– Доклад 22.–С.1-23.
13. Раскулов Р.Ф., Смирнов А.С. Влияние коэффициента мощности вторичной нагрузки на погрешности измерительных трансформаторов/

- Метрология электрических измерений в электроэнергетике.: Доклады третьей науч. практ. конференции. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС.– 2003.– Доклад 23.– С.1–21.
- 14.Раскулов Р.Ф. Влияние вторичной нагрузки на погрешности трансформаторов тока// Электрические станции.– 2003.–№7. – С. 43-45.
 - 15.Кужеков С.Л., Синельников В.Я. Защита шин электростанции и подстанции. М: Энегтоатомиздат, 1983. Р. 184.
 - 16.РД 153-34.0-35.301-2002 Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения. – ОАО «Фирма ОРГРЭС» и ОАО «Институт Энергосетьпроект».
 - 17.Manivasagam R., Vigneshwaran P. Saturation analysis on current transformer / International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2018. Vol. 118, № 18. P. 2169 – 2176.
 - 18.Anders J. B. A Simple Vector Generalization of the Jiles-Atherton Model of Hysteresis / IEEE transactions on magnetics. 1996. Vol. 32, № 5. P. 4213-4215.
 - 19.Juhani T. A Simple Scalar Model for Magnetic Hysteresis / IEEE Transactions on magnetics. 1998. Vol 34, № 4.
 - 20.Pop N.C., Caltun O.F. Jiles–Atherton Magnetic Hysteresis Parameters Identification / ACTA Physica A. 2011. Vol. 120, №3. P. 491- 496.
 - 21.U. D. Annakkage [et al.] A CT Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis / IEEE Transactions on Power Delivery. 2000. Vol. 15, No 1, – P. 57–61.
 - 22.L. Shun-Tsai., H. Sy-Ruen., C. Hung-Wei., H. Ting-Yen. Current Transformer Module Basing the Jiles-Atherton Hysteresis Model in EMTP/ATP Simulation.
 - 23.Rohan J. L. Representation of magnetization curves over a wide region using a non-integer power series / Int. J. Elec. Enging Educ. 1988. Vol. 25. P. 335-340.
 - 24.Король Е.Г. Анализ методов моделирования магнитных характеристик электромагнитов для компенсации магнитного поля электрооборудования / Электротехника и Электромеханика. 2007. – №2.
 - 25.Бессонов Л. А. Электрические цепи со сталью. М: Государственное энергетическое издательство, 1948. 345 с.
 - 26.Новаш И. В., Румянцев Ю. В. Упрощенная модель трехфазной группы тт в системе динамического моделирования / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. Заведений и энерг. Объединений СНГ. 2015. №5. С. 23-38.

- 27.Новаш И. В., Румянцев Ю. В. Расчет модели трехфазного ТТ из библиотеки Matlab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. Заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. №1. С. 12-24.
- 28.Новаш И. В. Программно-информационное обеспечение комплексов для функциональных испытаний цифровых токовых защит электроустановок в системе динамического моделирования Matlab-Simulink / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк, Ю. В. Румянцев, В. Ю. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. Заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. №4. С. 291-308.
- 29.Берёзкин Е. Д. Усовершенствованный алгоритм расчета переходного вторичного тока трансформатора тока / Е. Д. Берёзкин, Н. А. Дони, И. А. Ермолкин, Т. С. Просвирякова, А. Д. Рыбалкин, А. А. Шурупов // Сборник трудов НПП «ЭКРА»: Цифровая электротехника: проблемы и достижения. №6. С. 21-30.
- 30.Fallahi A., Ramezani N., Ahmadi I. Current Transformers' Saturation Detection and Compensation Based on Instantaneous Flux Density Calculations / AUTOMATIKA. 2016. Vol. 57, №4. P. 1070–1078.
- 31.Khorashadi-Zadeh H., Sanaye-Pasand M. Correction of Saturated Current Transformers Secondary Current Using ANNs / IEEE Transactions on power delivery. 2006. Vol. 21, №1.
- 32.D. C. Jiles and D. L. Atherton. "Theory of ferromagnetic hysteresis," Journal of magnetism and magnetic materials., vol. 61, no. 6, pp. 48–60, 1986, doi: 10.1063/1.333582.
- 33.Трансформаторы тока : учеб. пособие / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель, И.М. Сирота, Б.С. Стогний. СПб.: Энергоатомиздат, 1989. 416 с.
- 34.E. Stano, "The Method to Determine the Turns Ratio Correction of the Inductive Current Transformer," Energies, vol. 14, 2021, doi: doi.org/10.3390/en14248602.
- 35.Бачурин Н. И. Трансформаторы тока : учеб. пособие / Н. И. Бачурин. – Москва: Энергия, 1964 – 376 с.
- 36.H. Dashti, M. Sanaye-Pasand, and M. Davarpanah, "Current transformer saturation detectors for busbar differential protection," Proc. Univ. Power Eng. Conf., no. 1, pp. 338–343, 2007, doi: 10.1109/UPEC.
- 37.G. Lin, Q. Song, D. Zhang, F. Pan, and L. Wang, "A hybrid method for current transformer saturation detection and compensation in smart grid," in The 2017 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2017), 2017, pp. 369–374.

38. M. Hossain, I. Leevongwat, and P. Rastgoufard, "A Current Transformer (CT) Saturation Detection Method for Bus Differential Protection," *Clemson Univ. Power Syst. Conf. PSC 2018*, no. M, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/PSC.2018.8664064.
39. R. Abd Allah, S. Moussa, E. H. Shehab-Eldin, and M. N. G. Hamed, "Advanced detection and compensation scheme for current transformers saturation," *Proc. 11th Int. Middle East Power Syst. Conf. MEPCON'2006*, vol. 2, pp. 481–486, 2006.
40. S. Biswal and M. Biswal, "Detection of current transformer saturation phenomenon for secured operation of smart power network," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 175, no. May, p. 105926, 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.105926.
41. G. L. Macieira and A. L. M. Coelho, "Evaluation of numerical time overcurrent relay performance for current transformer saturation compensation methods," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 149, pp. 55–64, 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.04.005.
42. L. Yang, J. Zhao, P. A. Crossley, and K. Li, "A current transformer saturation detection algorithm for use in current differential protection," *Proc. - Int. Conf. Electr. Control Eng. ICECE 2010*, vol. 3, no. 3, pp. 3142–3146, 2010, doi: 10.1109/iCECE.2010.767.
43. B. M. Schettino, C. A. Duque, and P. M. Silveira, "Current-Transformer Saturation Detection Using Savitzky-Golay Filter," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 3, pp. 1400–1401, 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2521327.
44. N. G. Chothani and B. R. Bhalja, "New algorithm for current transformer saturation detection and compensation based on derivatives of secondary currents and Newton's backward difference formulae," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 5, pp. 841–850, 2014, doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0324.
45. H. M. Roudsari, "A New Scheme for Detection and Compensation of Current-Transformer A New Scheme for Detection and Compensation of Current-Transformer Saturation," no. July, 2018.
46. N. G. Chothani and V. Sharma, "A new method for CT saturation detection using secondary current envelope detector," *2015 Int. Conf. Recent Dev. Control. Autom. Power Eng. RDCAPE 2015*, pp. 1–6, 2015, doi: 10.1109/RDCAPE.2015.7281359.
47. J. Herlender, J. Iżykowski, and K. Solak, "Compensation of the current transformer saturation effects for transmission line fault location with impedance-differential relay," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 182, no. May 2019, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106223.

48. D. Behi, M. Allahbakhshi, A. Bagheri, and M. Tajdinian, "A new statistical-based algorithm for CT saturation detection utilizing residual-based similarity index," 2017 25th Iran. Conf. Electr. Eng. ICEE 2017, pp. 1072–1077, 2017, doi: 10.1109/IranianCEE.2017.7985200.
49. A. A. A. Etumi and F. J. Anayi, "The application of correlation technique in detecting internal and external faults in three-phase transformer and saturation of current transformer," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 31, no. 5, pp. 2131–2139, 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2572608.
50. T. Zheng, T. Huang, Y. Ma, Z. Zhang, and L. Liu, "Histogram-Based Method to Avoid Maloperation of Transformer Differential Protection Due to Current-Transformer Saturation under External Faults," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 33, no. 2, pp. 610–619, 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2017.2712806.
51. C. Hong, L. Haifeng, J. Hui, P. Jianchun, and H. Chun, "A scheme for detection and assessment of current transformer saturation," Proc. - 9th Int. Conf. Meas. Technol. Mechatronics Autom. ICMTMA 2017, pp. 90–93, 2017, doi: 10.1109/ICMTMA.2017.0029.
52. S. Bahari, T. Hasani, and H. Sevedi, "A New Stabilizing Method of Differential Protection Against Current Transformer Saturation Using Current Derivatives," 2020 14th Int. Conf. Prot. Autom. Power Syst. IPAPS 2020, pp. 33–38, 2019, doi: 10.1109/IPAPS49326.2019.9069379.
53. Кужеков С.Л. Обеспечение правильной работы микропроцессорных устройств дифференциальной защиты при насыщении трансформаторов тока [Электронный ресурс] / С. Л. Кужеков. // Известия вузов Электромеханика. – 2009. – №4. – С. 12-18. – Режим доступа: <https://ezproxy.urfu.ru:3054/item.asp?id=13079398>.
54. Кужеков С. Л. О способах уменьшения влияния погрешностей ТТ в переходных режимах на работу релейной защиты электроэнергетических систем [Электронный ресурс] / С. Л. Кужеков. // Современные направления развития систем РЗА энергосистем. – 2009. – С. 99-104.
55. Дегтярев А. А. Автоматизированный контроль состояния трансформаторов тока высокого и сверхвысокого напряжения : автореф. дис. Канд. Техн. 02.14.02 / А. А. Дегтярев; Южно-Российский гос. техн. ун-т. – Новочеркасск, 2011. – 16 с.
56. Кужеков С.Л. О восстановлении периодической составляющей первичного тока ТТ в переходном режиме [Электронный ресурс] / С. Л. Кужеков., А. А. Дегтярёв. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика – 2011. – №3. – С. 29-31. – Режим доступа: <https://ezproxy.urfu.ru:3054/item.asp?id=16457973>.

57. Kang Y. C. Development and hardware implementation of a compensating algorithm for the secondary current of current transformers [Electronic source] / Y. C. Kang, S. H. Kang, J. K. Park, A. T. Johns, R. K. Aggarwal // IEEE Proc. – Electr. Power appl. – 1996. – №143 – P. 41-49.
58. Kang Y. C. An algorithm for compensating secondary current of current transformers [Electronic source] / Y. C. Kang, J. K. Park, S. H. Kang, A. T. Johns, R. K. Aggarwal // IEEE Transactions power delivery. – 1997. – №12 – P. 116–122.
59. Locci N. and Muscas C. A digital compensation method for improving current transformer accuracy [Electronic source] / N. Locci and C. Muscas // IEEE Trans. Power Delivery, 2000. Vol 15, no 4, pp. 1104-1109.
60. Locci N. and Muscas C. Hysteresis and Eddy Currents Compensation in Current Transformers [Electronic source] / N. Locci and C. Muscas // IEEE Trans. Power Delivery, 2001. Vol 16, no 2, pp. 154-159.
61. Jiuping P. An efficient compensation algorithm for CT saturation effects [Electronic source] / IEEE Transactions on power delivery. – 2004. – №19 – P. 1623-1628.
62. Farhad H., Mohammad H. P. Compensation of CT Distorted Secondary Current Waveform in Online Conditions // IEEE Transactions on power delivery, vol. 31, no. 2, 2016.
63. F. Li, Y. Li and R.K. Aggarwal. Combined wavelet transform and regression technique for secondary current compensation of current transformers. Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm. Distrib., vol. 149, no. 4, pp. 497–503, July 2002.
64. Рыбалкин А. Д. Прогнозирование тока КЗ при насыщении ТТ [Электронный ресурс] / А. Д. Рыбалкин., А. А. Шурупов., И. А. Ермолкин. // Цифровая электротехника: проблемы и достижения. – 2016. – № 5. – С. 55-65. – Режим доступа: <https://ezproxy.urfu.ru:3054/item.asp?id=30489960>.
65. Wiszniewski A. Correction of current transformer transient performers [Electronic source] / A. Wiszniewski, W. Rebizant, L. Schiel // IEEE Transactions power delivery. – 2008. – №23 – P. 624–632.
66. S. Das, G. Bandyopadhyay, and P. Syam, “A solution to CT saturation by Gregory Newton’s backward interpolation,” Int. J. Emerg. Electr. Power Syst., vol. 12, no. 6, 2011, doi: 10.2202/1553-779X.2839.
67. Атнишкин А. Б. Коррекция вторичного тока при насыщении измерительных трансформаторов. [Электронный ресурс] / А. Б. Атнишкин – Режим доступа: <https://relematika.ru/images/news/Koppeктор%20тока.pdf>

68. Атнишкин А. Б. Адаптивные модификации алгоритма дифференциальной защиты трансформатора : автореф. дис. канд. техн. : 05.14.02 / А. Б. Атнишкин; Нижегородский гос. техн. ун-т. – Чебоксары, 2019. – 24 с.
69. Y. V. Rumiantsev and F. A. Romaniuk, “An Artificial Neural Network Developed in MATLAB-Simulink for Reconstruction a Distorted Secondary Current Waveform. Part 1,” *Energ. Proc. CIS High. Educ. institutions power Eng. Assoc.*, vol. 64, no. 6, pp. 479–491, 2021, doi: 10.21122/1029-7448-2021-64-6-479-491.
70. S. Key, S. H. Kang, N. H. Lee, and S. R. Nam, “Bayesian Deep Neural Network to Compensate for Current Transformer Saturation,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 154731–154739, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3127542.
71. Saha M.M., Izykowski J., Lukowicz M., Rosolowski E. Application of ANN methods for instrument transformer correction in transmission line protection // *Developments in Power System Protection, Conference Publication. IEE*, 2001, no. 479, pp. 303–306. DOI: 10.1049/cp:20010160.
72. Yu D.C., Cummins J.C., Wang Z., Hong-J.Y., Kojovic L.A., David S. Neural network for current transformer saturation correction // *In Proc. IEEE Transmis. Distrib. Conf. New Orleans, LA, 1999*. P. 441–446. DOI: 10.1109/TDC.1999.755390.
73. Yu D.C., Cummins J.C., Wang Z., Hong-J.Y., Kojovic L.A. Correction of current transformer distorted secondary currents due to saturation using artificial neural networks // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2001. Vol. 16, no. 2, pp. 189–194. DOI: 10.1109/61.915481.
74. Khorashadi-Zadeh H., Sanaye-Pasand M. Correction of saturated current transformers secondary current using ANNs // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2006. Vol. 21, no. 1, pp. 73–79. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.858799.
75. Baoming G., de Almeida A.T., Ferreira Fernando J. T.E. Estimation of primary current in saturated current transformer using flexible neural network // *Trans. Inst. Meas. Control.* 2006. Vol. 28, no. 1, pp. 81–91. DOI: 10.1191/0142331206tm164oa.
76. Cummins J.C., Yu D.C., Kojovic L.A. Simplified artificial neural network structure with the current transformer saturation detector provides a good estimate of primary currents // *the Power Eng. Soc. Sum. Meeting, Seattle. WA, USA, 2000*, pp. 1373–1378. DOI: 10.1109/PESS.2000.868725.
77. Erenturk K. ANFIS-based compensation algorithm for current- transformer saturation effects // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2009. Vol. 24, no. 1, pp. 195–201. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.2005882.

78. Shi D.Y., Buse J., Wu Q.H., Jiang L. Fast compensation of current transformer saturation // IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur. ISGT Eur. 2010, pp. 1–7. DOI: 10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638931.
79. Shi D.Y., Buse J., Wu Q.H., Guo C. X. Current transformer saturation compensation based on a partial nonlinear model // Electr. Power Syst. Res. 2013. Vol. 97, pp. 34–40. DOI: 10.1016/j.epsr.2012.11.019.
80. Kang Y. Ch. Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT [Electronic source] / Y. Ch. Kang, J. L. Ui, H. K. Sang, P. Crossley // IEEE Transactions power delivery. – 2004. – №19 – P. 1642–1649.
81. Kang Y.C. Compensating algorithm suitable for use with measurement-type current transformers for Protection [Electronic source] / Y.C. Kang, U.J. Lim and S.H. Kang // IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. – 2005. Vol. 152, №6 – P. 880- 890.
82. Hajipour E., Vakilian M., Sanaye-Pasand M. Current Transformer Saturation Compensation for Transformer Differential Relays // IEEE Trans. Power Deliv. 2015. Vol. 30, no. 5, pp. 2293–2302. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2411736.
83. Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, and Д. В. Зиновьев, “Мониторинг процессов в электрической системе. Ч. 1. Преобразование, селекция и фильтрация,” ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, no. 10, pp. 2–10, 2006.
84. Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, and Д. В. Зиновьев, “Мониторинг процессов в электрической системе. Ч. 2. Цифровая обработка осциллограмм токов короткого замыкания,” ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, no. 11, pp. 2–10, 2006.
85. Odinaev, I., Pazderin, A. V., Murzin, P. V., Tashchilin V. A., Samoylenko V. O., Ghoziev B. Detection of the initial region of the current transformer core saturation // 19th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'21), Almeria (Spain), 2021. Vol. 19. pp. 477-482. DOI: 10.24084/repqj19.322.
86. Паздерин А.В. Мурзин П.В., Одинаев И.Н., Бобокалонов Ф.З. Направления исследований для повышения достоверности информации цифровой подстанции // Электротехнические системы и комплексы. 2019. Вып. 45. №4. С. 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-4-11.
87. Одинаев И.Н., Мурзин П.В., Паздерин А.В., Тащилин В.А., Шукало А. Анализ математических методов снижения погрешности Трансформатора тока в режиме насыщения // Электротехнические системы и комплексы. 2020. Вып. 47. №4. С. 11–18. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18.

88. Odinaev, I., Gulakhmadov, A., Murzin, P., Tavlintsev, A., Semenenko, S., Kokorin, E., Safaraliev, M., Chen, X. Comparison of Mathematical Methods for Compensating a Current Signal under Current Transformers Saturation Conditions. *Sensors* 2021, 21, 7273. <https://doi.org/10.3390/s21217273>.
89. Z. Trifunov, L. Zenku, and T. Jusufi-Zenku, "Application of Newton's Backward Interpolation Using Wolfram Mathematica," *Int. J. Math. Trends Technol.*, vol. 67, no. 2, pp. 53–56, 2021, doi: 10.14445/22315373/ijmtt-v67i2p508.
90. K. Bekir and A. Vehbi Olgac, "Performance Analysis of Various Activation Functions in Generalized MLP Architectures of Neural Networks," *Int. J. Artif. Intell. Expert Syst.*, vol. 1, no. 4, pp. 111–122, 2011.
91. C. Lv et al., "Levenberg-marquardt backpropagation training of multilayer neural networks for state estimation of a safety-critical cyber-physical system," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 14, no. 8, pp. 3436–3446, 2018, doi: 10.1109/TII.2017.2777460.
92. L. Kaufman. A variable projection method for solving separable nonlinear least squares problems. *BIT Numerical Mathematics*, 15(1), pp. 49–57, 1975. doi:10.1007/bf01932995.
93. G. Gene; P. Victor. Separable nonlinear least squares: the variable projection method and its applications. *Inverse Problems*, 19(2), pp.1–26, 2003. doi:10.1088/0266-5611/19/2/201.
94. Záplata F., Kasal M. Using the Goertzel algorithm as a filter // 2014 24th Int. Conf. Radioelektronika, RADIOELEKTRONIKA 2014 - Proc. 2014. № 3. P. 14–16.
95. Y. C. Kang, S. H. Kang, and P. A. Crossley, "An algorithm for detecting CT saturation using the secondary current third-difference function" *IEEE Bologna PowerTech Conf.*, pp. 1642–1649, 2004. Bologna, Italy.
96. R. W. Schafer, "What Is a Savitzky-Golay Filter? [Lecture Notes]," no. July, pp. 111–117, 2011.
97. S. Beryozkina, M. Senyuk, A. Berdin, A. Dmitrieva, S. Dmitriev and P. Erokhin, "The Accelerate Estimation Method of Power System Parameters in Static and Dynamic Processes," *IEEE Access.*, vol. 10, no. 1, pp. 61522–61529, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3181196.
98. И.В. Бычков, В.И. Зоркальцев, А.В. Казазаева. Весовые коэффициенты в методе взвешенных наименьших квадратов. *Сибирский журнал вычислительной математики.*, том. 18, №3, ст.275-288. 2015.
99. Ф. Гилл, Н. Мюррей, and М. Райт, *Практическая оптимизация: Пер. с англ.* - М.: Мир. 1985.

100. D. C. Jiles, J. B. Thoeke, and M. K. Devine, "Numerical Determination of Hysteresis Parameters for the Modeling of Magnetic Properties Using the Theory of Ferromagnetic Hysteresis," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 28, no. 1, pp. 27–35, 1992, doi: 10.1109/20.119813.
101. F. Kamalov, A. Nazir, M. Safaraliev, A. K. Cherukuri and R. Zgheib, "Comparative analysis of activation functions in neural networks," 2021 28th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECS53924.2021.9665646.

Список рисунков

1	Влияние остаточной индукции на погрешности ТТ	13
2	Влияние T_I на погрешности ТТ	13
3	Влияние вторичной нагрузки на погрешности ТТ	14
4	Систематизация методов компенсации погрешности ТТ	18
5	Зависимость $\mu_a=f(\lambda)$ и $\lambda=f(H)$	19
6	Определение начальной фазы тока	24
7	Искусственное расширение ИПТ	25
8	Модель нейрона	27
9	Топология ИНС	28
10	Процедура расчета намагничивающего тока	31
11	Кривые токов, эксперимент №1	34
12	Кривые токов, эксперимент №2	37
13	Кривые токов, эксперимент №3	39
14	Кривые токов, эксперимент №4	41
15	Средняя на интервале моделирования тока КЗ токовая (а) и угловая (b) погрешности методов восстановления	47
16	Работа ИНС при отклонении входных данных от обучающей выборки	48
17	Графическая интерпретация метода [51]	54
18	Эталонный и измеренный токи при нормальной работы ТТ (а) и в условиях насыщения (с); магнитная индукция при нормальной работы ТТ (b) и в условиях насыщения (d)	56
19	Кривая намагничивания ТТ	57
20	Детекция насыщения ТТ	58
21	Структурная схема детекция насыщения ТТ	61
22	Схема моделируемой сети	62
23	Токи и детекция насыщения при варьировании φ_{A0} и начальной индукции λ_0	63
24	Иллюстрация индексов весовых коэффициентов	69
25	Структура алгоритма ВМНК с процедурой формирования вектора измерений В и матриц Н и W	71
26	Неправильное определение намагничивающего тока	73

27	Графическая интерпретация момента насыщения.....	75
28	Изменение индукции на кривой намагничивания	78
29	Структурная схема алгоритма восстановления тока на основе метода КМ.....	79
30	Тестовая модель ТТ в ПК Matlab/Simulink	80
31	Пример кривой эталонного тока ТТ при $k = 15$, $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi_{сд} = 0^\circ$	82
32	Пример кривой эталонного тока ТТ при $k = 15$, $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi_{сд} = 60^\circ$	82
33	Результат работы ВМНК и КМ в мгновенной форме при вариации k , φ и $\varphi_{сд}$...	84
34	Погрешности методов КМ и ВМНК при отсутствии шума в измерениях, интервал моделирования КЗ – 0,06 с	88
35	Погрешности методов КМ и ВМНК при наличии шума в измерениях, интервал моделирования КЗ – 0,06 с	91
36	Результат работы КМ и ВМНК в мгновенной форме токов при $T_l = 0,1$ с	92
37	Результат работы методов КМ и ВМНК в форме полной, токовой и угловой погрешности при $T_l = 0,1$ с	93
38	Демонстрация отклонения кривых намагничиваний.....	95
39	Восстановление тока по КМ.....	96
40	Погрешности КМ при отклонении кривой намагничивания от эталонной.....	99
41	Кривые токов и индукции.....	100
42	Петля гистерезиса на основе теории Jiles-Atherton.....	101
43	Быстродействие методов КМ и ВМНК	102

Список таблиц

1	Предельно допустимые погрешности ТТ согласно ПНС-283-2018	12
2	Сравнительная таблица методов восстановления тока в режиме насыщения ТТ при определении действующего значения токов по М1	45
3	Сравнительная таблица методов восстановления тока в режиме насыщения при определении угла и действующего значения токов по М2.....	45
4	Достоинства и недостатки методов восстановления тока.....	48
5	Результат работы КМ и ВМНК при отсутствии шума в измерениях	85
6	Результат КМ и ВМНК при зашумлении измеренных значений тока.....	89
7	Результат работы КМ и ВМНК зашумлении измеренных	93
8	Усредненный результат работы метода КМ при изменении h	97

Приложение А

Обозначение констант и их типовые значения

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Активное сопротивление вторичной обмотки	R_2	0,48 Ом
Активный шунт для учета потерь в магнитопроводе	$R_{ш}$	1 ТОМ
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки	x_2	0 Ом
Коэффициент взаимного влияния доменов	α	0,0003
Коэффициент гибкости доменов	c	0,08
Коэффициент масштабирования трения	β	0,96
Коэффициент трения доменов	j	0,0004
Намагниченность насыщения	M_s	$1,7 \cdot 10^6$
Порог упрощенного учета намагниченности	g	600
Параметры кривой намагничивания	a_1 a_2 a_3 b	2550 3150 15000 2
Средняя длина магнитопровода	l	90 см
Сечение сердечника магнитопровода	s	19,1 см ²
Число витков вторичной обмотки	w_2	239 вит.
Число витков первичной обмотки	w_1	2 вит.

Приложение Б

Б1. Тестовая модель для проведения испытаний с помощью использования ПАК РВ

Были проведены испытания для проверки работоспособности метода КМ с помощью использования ПАК РВ. Для проведения испытаний с использованием ПАК РВ была разработана специальная модель, которая передавала кривые тока и напряжения по протоколу IEC 61850-9-2 устройству РЗА Т-100. Структура модели приведена на рисунке Б 1.

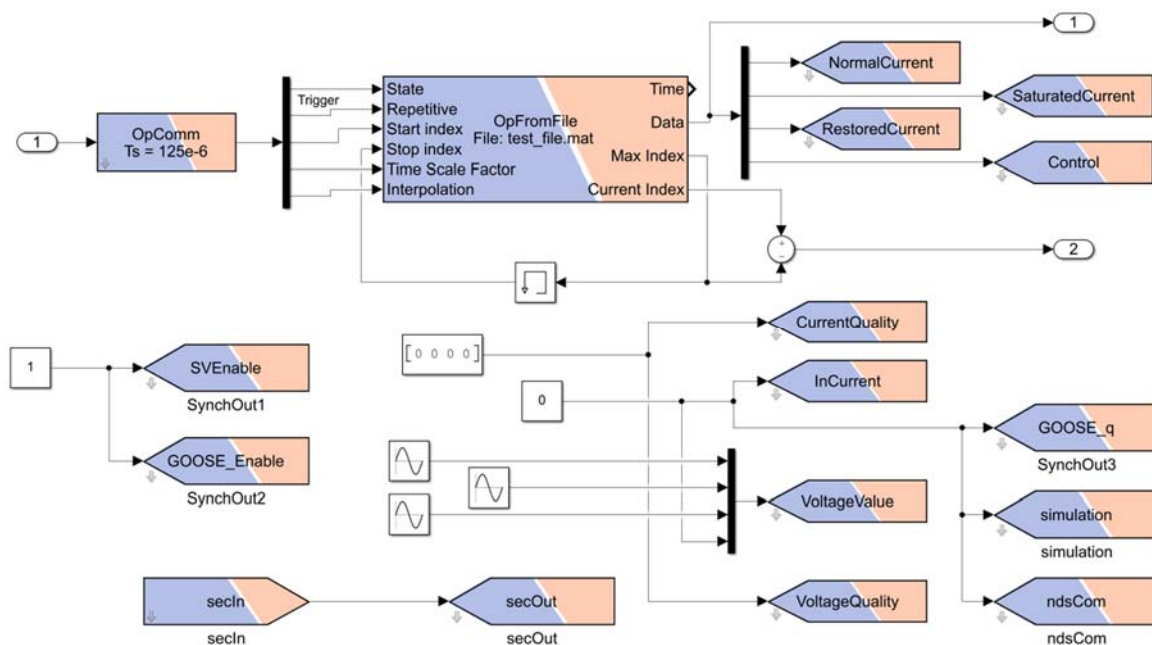


Рисунок Б 1 Схема главной подсистемы модели для ПАК РВ

Б2. Проверка чувствительности метода КМ к величине нагрузки вторичной цепи ТТ

В первой части испытаний проверяется устойчивость метода КМ к изменению активной нагрузки ТТ. Выполняется набор опытов для разных значений нагрузки вторичных цепей трансформатора тока. Для кратностей тока 15, 30, 45 выполняется восстановление сигнала при изменении фазы возникновения короткого замыкания в диапазоне от 0 до 180 градусов с шагом 30 градусов и изменение смещения фазы периодической составляющей от 0 до 90 градусов с шагом 15 градусов. Значение вторичной нагрузки задается чисто активным сопротивлением и принимает значения от 60% до 120% с шагом в 10%. Результат работы метода представлен на рисунках Рисунок Б 2 – Б 6.

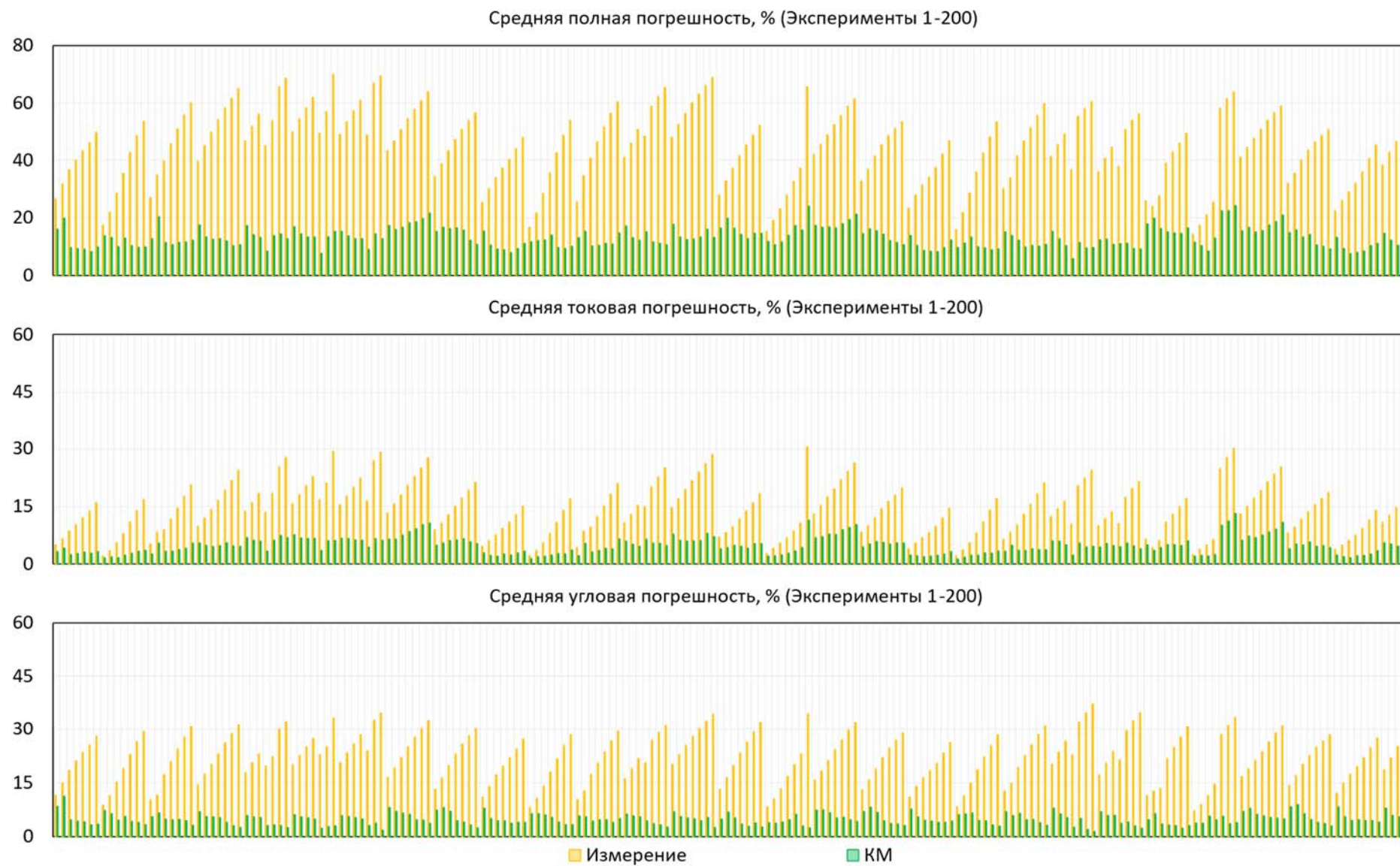


Рисунок Б 2 Результат работы метода КМ при вариации нагрузки ТТ, эксперименты 1-200



Рисунок Б 3 Результат работы метода КМ при вариации нагрузки ТТ, эксперименты 201-400



Рисунок Б 4 Результат работы метода КМ при вариации нагрузки ТТ, эксперименты 401-600

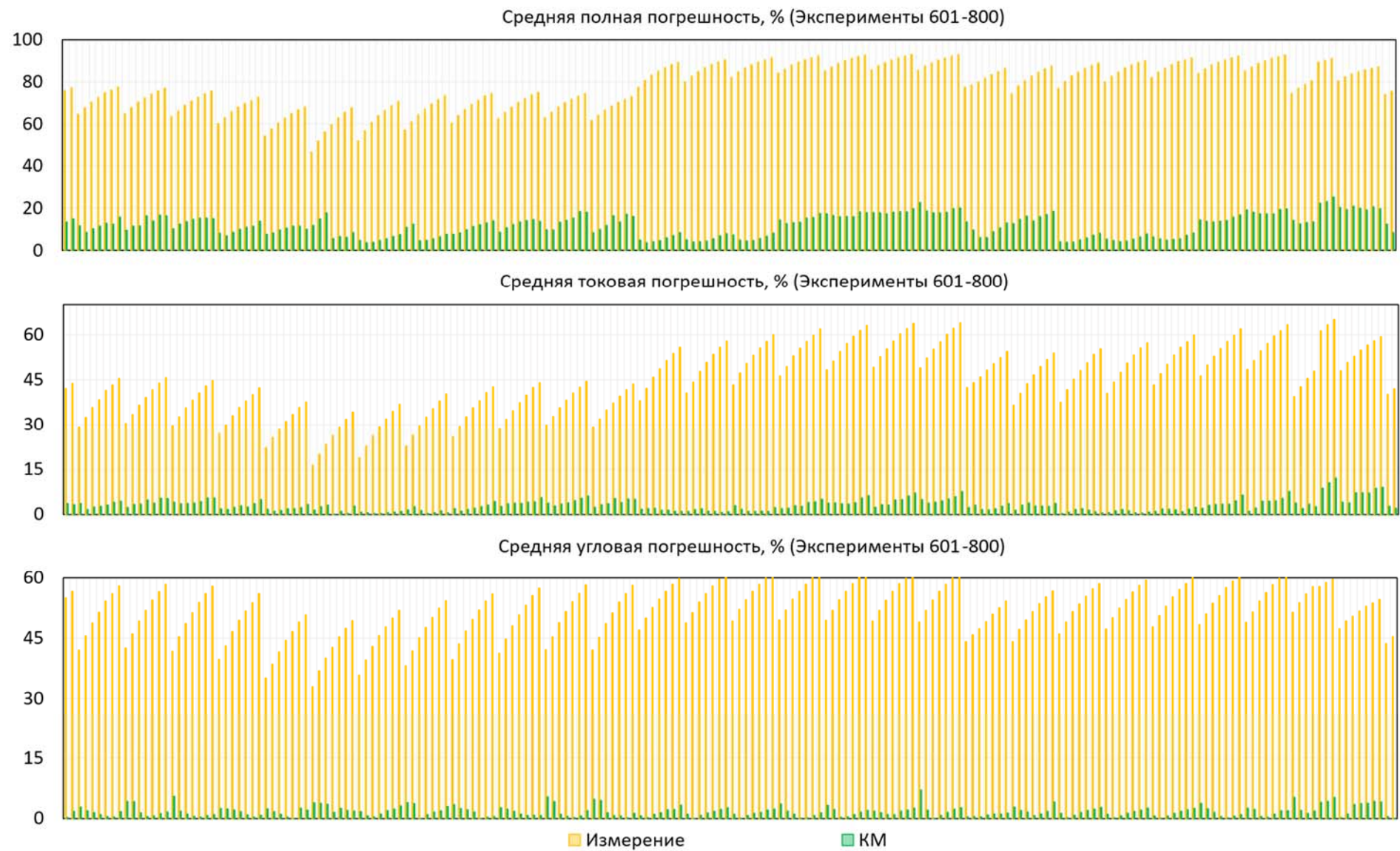


Рисунок Б 5 Результат работы метода КМ при вариации нагрузки ТТ, эксперименты 601-800



Рисунок Б 6 Результат работы метода КМ при вариации нагрузки ТТ, эксперименты 801-1029

Б3. Проверка чувствительности метода КМ к апериодической составляющей тока КЗ

Для набора амплитуд силы тока выполняется моделирование вторичного тока, за счет разной амплитуды достигается разная степень насыщения измерительного трансформатора и, соответственно, степени искажения кривой вторичного тока. При этом также варьируется фаза возникновения тока короткого замыкания и смещение фазы периодической составляющей относительно исходного состояния.

Анализ проводится для кратностей тока 15, 30 45. При этом угол возникновения короткого замыкания изменяется в диапазоне от 0 до 180 градусов с шагом 10 градусов. Смещение фазы периодической составляющей изменяется в диапазоне с 0 до 90 градусов с шагом 5 градусов. Результат работы метода приведен на рисунках Рисунок Б 7 – Б 11.

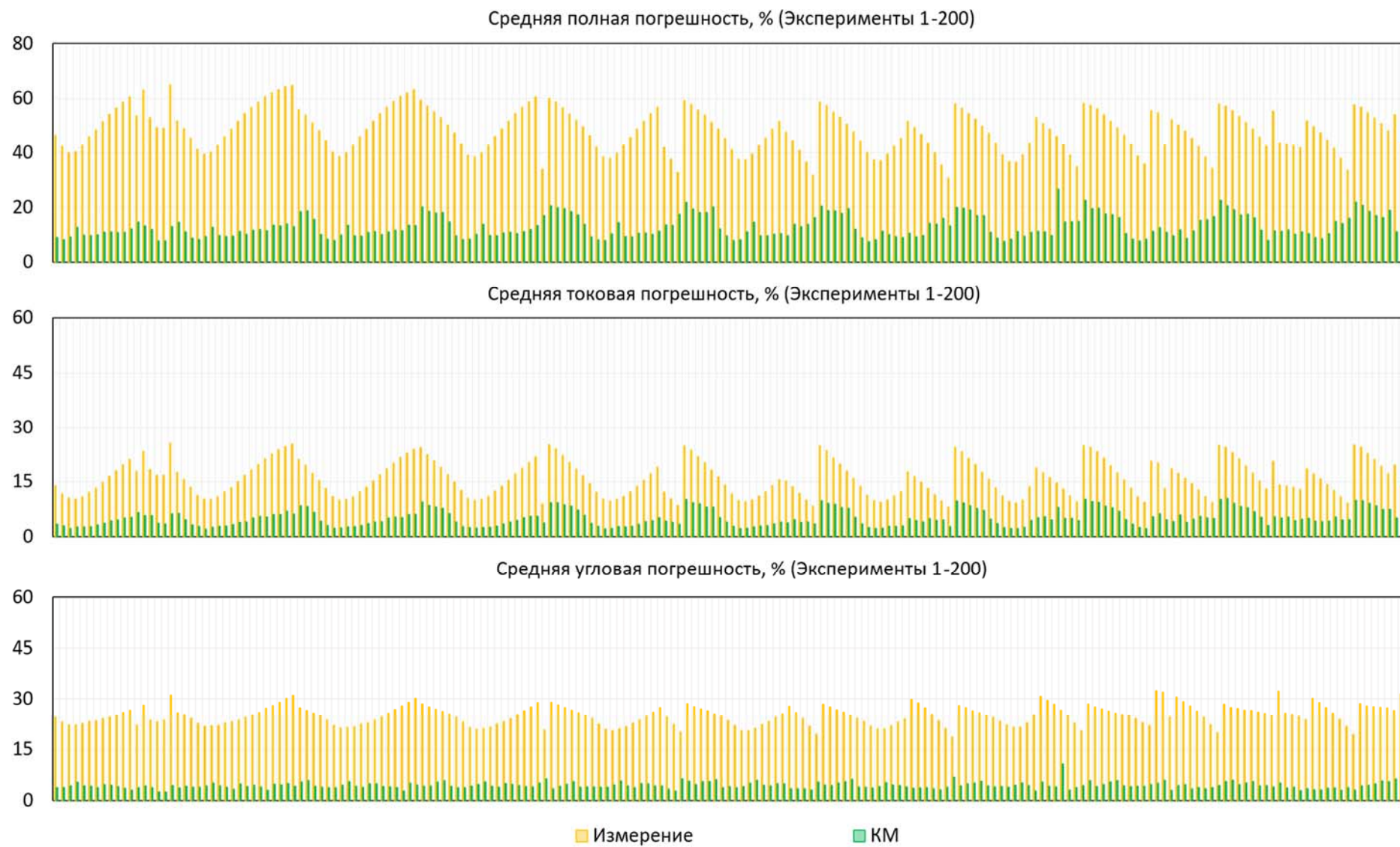


Рисунок Б 7 Результат работы метода КМ при вариации аperiodической составляющей тока КЗ, эксперименты 1-200



Рисунок Б 8 Результат работы метода КМ при вариации аperiodической составляющей тока КЗ, эксперименты 201-400



Рисунок Б 9 Результат работы метода КМ при вариации аperiodической составляющей тока КЗ, эксперименты 401-600



Рисунок Б 10 Результат работы метода КМ при вариации аperiodической составляющей тока КЗ, эксперименты 601-800

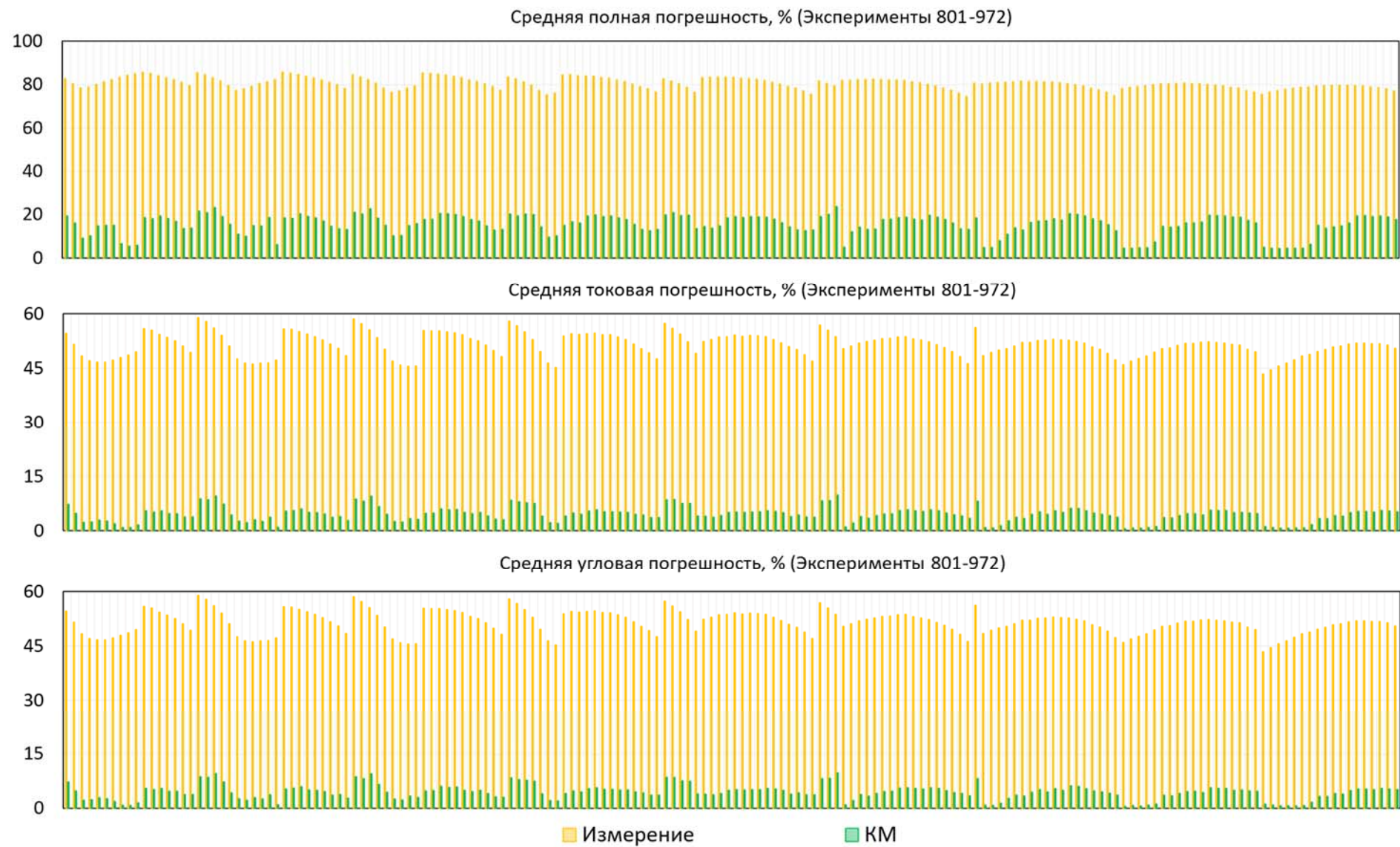


Рисунок Б 11 Результат работы метода КМ при вариации апериодической составляющей тока КЗ, эксперименты 801-972