



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ



Материалы молодежной секции
II Всероссийской научно-технической
конференции

«НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ
И АВТОМАТИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

г. Чебоксары, 14-16 апреля 2026 г.

Инновационный электротехнический кластер Чувашской Республики
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Материалы молодежной секции
II Всероссийской научно-технической конференции
«Новые технологии в релейной защите и автоматизации
энергетических систем»

Чебоксары
2026

УДК 621.311-52+621.316.925](063)
ББК 27-051я43
С56

Редакционная коллегия:

В.И. Антонов, доктор технических наук (гл. редактор)
М.И. Александрова, кандидат технических наук (зам. гл. редактора)
Е.Н. Кадышев, доктор экономических наук
В.Г. Ковалев, кандидат технических наук

С56 **Современные** тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики: материалы молодежной секции II Всероссийской науч.-техн. конф. «Новые технологии в релейной защите и автоматизации энергетических систем»; Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова. – Чебоксары, 2026. – 126 с.

ISBN 978-5-7677-4040-6

Представлены доклады научно-технической конференции молодых специалистов, состоявшейся в рамках РЗА-Форума – 2026. Обсуждаются результаты научных исследований в области совершенствования алгоритмов релейной защиты и автоматики энергосистем, технологий цифровой обработки сигналов, векторных измерений и методов искусственного интеллекта в релейной защите. Рассматриваются научные и практические вопросы применения цифровых двойников в системах релейной защиты и автоматики, а также общие и концептуальные вопросы организации систем релейной защиты.

Для преподавателей, аспирантов, магистрантов, инженерно-технического персонала предприятий и энергосистем, студентов старших курсов энергетических специальностей вузов.

УДК 621.311-52+621.316.925](063)
ББК 27-051я43
© Чувашский госуниверситет
им. И.Н. Ульянова, 2026

ISBN 978-5-7677-4040-6

Программный комитет конференции

1. **Антонов Владислав Иванович** – Председатель программного комитета, д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», ООО НПП «ЭКРА»
2. **Александрова Марина Ивановна** – Заместитель Председателя программного комитета, канд. техн. наук, ООО «ЭКРА ИТ», ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»
3. **Булычев Александр Витальевич**, д-р техн. наук, ООО «НПП «Бреслер»
4. **Волошин Александр Александрович**, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
5. **Дони Николай Анатольевич**, канд. техн. наук, ООО НПП «ЭКРА»
6. **Ефремов Валерий Александрович**, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», ООО «Релематика»
7. **Илюшин Павел Владимирович**, д-р техн. наук, Институт энергетических исследований Российской Академии Наук
8. **Кадышев Евгений Николаевич**, д-р экон. наук, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»
9. **Ковалев Владимир Геннадьевич**, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»
10. **Козлов Владимир Николаевич**, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», ООО «НПП «Бреслер»
11. **Куликов Александр Леонидович**, д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»
12. **Лачугин Владимир Фёдорович**, д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
13. **Лямец Юрий Яковлевич**, д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», ООО «Релематика»
14. **Мокеев Алексей Владимирович**, д-р техн. наук, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», ООО «ИЦ «Энергосервис»
15. **Нагай Владимир Иванович**, д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»
16. **Назарычев Александр Николаевич**, д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», вице-президент АЭН РФ
17. **Наумов Владимир Александрович**, канд. техн. наук, ООО НПП «ЭКРА», ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»
18. **Никитин Константин Иванович**, д-р техн. наук, ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет»
19. **Паздерин Андрей Владимирович**, д-р техн. наук, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
20. **Подшивалин Андрей Николаевич**, д-р техн. наук, АО «ВНИИР», ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»
21. **Попов Максим Георгиевич**, д-р техн. наук, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
22. **Солдатов Александр Вячеславович**, канд. техн. наук, ООО НПП «ЭКРА», ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»
23. **Шуин Владимир Александрович**, д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО

Уважаемые коллеги!

В Светлую седмицу Воскресения Христова город Чебоксары – Релеград на Волге – с радостью встречает своих гостей на РЗА-Форуме «Новые технологии в релейной защите и автоматизации энергетических систем» – 2026. По сложившейся доброй традиции в рамках форума действует конференция «Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики» молодежной секции, призвавшая молодых исследователей научных школ России с докладами о своих достижениях.

Научные интересы молодых ученых поражают своим разнообразием, современностью тем исследований и тщательностью разработок. Отрадно, что молодежь не пасует перед сложностью задач и умело использует преимущества молодого ума при внедрении цифровых технологий в системах релейной защиты и автоматизации энергосистем. Им подвластно всё – от тонкостей искусственного интеллекта до сложных технологий киберпространства высокоавтоматизированных подстанций.

Чувашской земле не впервой испытывать исключительное чувство первородства. Здесь проходило босоное детство третьего космонавта Андрияна Николаева, обретали крылья революционные открытия офтальмолога академика Святослава Федорова и становился Релеград – центр релестроения России. Чувашская Республика ценит безграничный энтузиазм молодых релейщиков, верит в их научное будущее и поддерживает в них огонь благородных устремлений созидателя.

Мы уверены, что пребывание молодого ученого в рамках форума на Чувашской земле прибавит ему уверенности в будущих победах и сохранит в нем тепло дружеской атмосферы форума и приятные впечатления от достопримечательностей города Чебоксары и доброжелательных жителей.

С наилучшими пожеланиями,
Антонов В.И., Председатель программного комитета конференции, д-р техн. наук
Александрова М.И., Заместитель Председателя программного комитета конференции, канд. техн. наук

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЭНЕРГОСИСТЕМ

РАЗРАБОТКА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КЛАРК

Куликов А.Л., Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. E-mail: inventor61@mail.ru

Старшов И.С., Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. E-mail: ivanstarsh@yandex.ru

***Аннотация:** В работе анализируется применимость преобразования Кларк для защиты от опасных дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю. Предлагается способ объединения фазных токов в комплексный показатель, позволяющий реализовать многомерный пусковой орган релейной защиты, реагирующий на мгновенные значения тока переходного процесса. Проведена оценка свойств полученной защиты, показавшая перспективность её использования.*

***Ключевые слова:** изолированная нейтраль, преобразование Кларк, однофазное замыкание на землю, дуговое перемежающееся однофазное замыкание на землю*

Введение

Сети с изолированной нейтралью 6-10 кВ получили массовое применение в энергосистеме России. Их ключевым достоинством является сохранение электроснабжения потребителей при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ). ОЗЗ составляет 90% от общего числа электрических повреждений и может стать первопричиной аварий. Не смотря на большое количество работ, посвящённых защите от ОЗЗ, сохраняется проблема недостаточной селективности и чувствительности применяемых решений при дуговых перемежающихся ОЗЗ.

В статье для решения проблемы, предлагается использовать пусковой орган релейной защиты, использующий мгновенные

значения фазных токов, которые объединяются в единый параметр с применением преобразования Кларк.

Способ расчёта контролируемых релейной защитой параметров

Для системы трёхфазных дискретных токов $ia(n)$, $ib(n)$, $ic(n)$ задаются расчётные соотношения комплексных амплитуд прямого и обратного вращения для преобразования Кларк по формулам:

$$\underline{A} = \frac{-j \cdot \sqrt{6}}{6} (ia(n) + ib(n) + ic(n)) \quad (1)$$

$$\underline{B} = \frac{\sqrt{2}}{4} (ib(n) - ic(n)) + \frac{j\sqrt{6}}{12} (2ia(n) - ib(n) - ic(n)) \quad (2)$$

где \underline{A} – комплексное значение вектора вращения прямой последовательности; \underline{B} – комплексное значение вектора вращения обратной последовательности.

Способ получения расчётных соотношений подробно описан в статье [1].

Схема пускового органа релейной защиты

Разработанный орган защиты использует зависимости нескольких параметров, получаемых из выражений (1) и (2). Схема пускового органа представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Упрощенная схема пускового органа

Схема защиты состоит из следующих элементов:

блок преобразования Кларк получает на вход мгновенные значения токов, производит вычисления по выражениям (1) и (2). Результаты поступают в блок, определяющий максимальное

значение с последующей задержкой на период. Это позволяет обеспечить длительное срабатывание защиты при бросках тока характерных для быстро протекающего переходного процесса во время дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю;

блок сравнения с уставкой позволяет задать параметры срабатывания защиты.

Определение параметров срабатывания релейной защиты

Для оценки возможных параметров срабатывания, использовалась имитационная модель кабельной сети 10 кВ, реализованная в SimPowerSystems и Simulink [2]. Было проведено моделирование различных видов ОЗЗ во всех возможных для сети режимах работы. Полученная статистика представлена в виде графика зависимости (рис. 2) величины мнимой составляющей вектора \underline{A} от величины мнимой составляющей вектора \underline{B} .

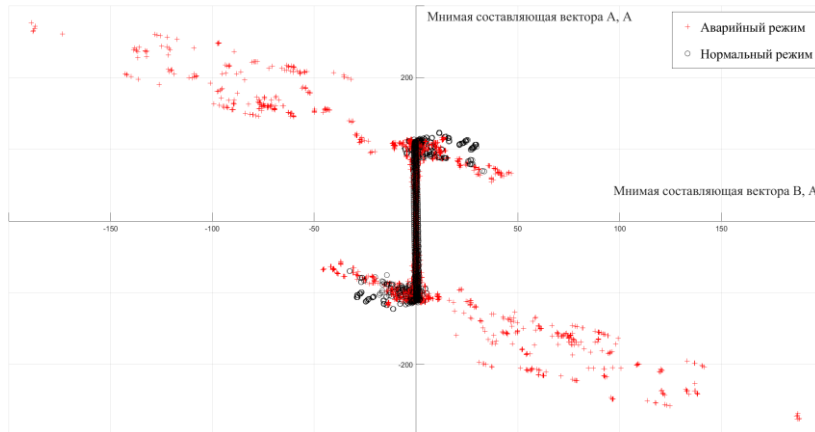


Рис. 2. График зависимости величины мнимой составляющей вектора \underline{A} от величины мнимой составляющей вектора \underline{B}

Оценку чувствительности многопараметрического пускового органа можно провести согласно методике, предложенной [3]. Чем меньше процент отношения величины

области неопределённости (область, где происходит пересечения нормального и аварийного режима) к области нормальных режимов, тем чувствительнее полученный орган.

Отношение площадей в процентном выражении составило 29%, что меньше, чем у аналогичного пускового органа, использующего токи нулевой последовательности на 13% [3]. А значит, изучаемый показатель обладает большей чувствительностью.

Заключение

Предложен многопараметрический алгоритм защиты, использующий мгновенные значения фазных токов, объединённых с использованием преобразования Кларк.

Разработанный алгоритм показал большую чувствительность по сравнению с ТЗНП и может быть применён как дополнительный информационный признак в составе многопараметрической релейной защиты от однофазных замыканий на землю (на основе реализации алгоритма может быть получен дополнительный информационный признак).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов А.Л., Севостьянов А.А., Ильюшин П.В. Оценка искажений напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий // ЭЛЕКТРИЧЕСТВО. – 2024 – №5. – С. 32-48.
2. Шуин В.А., Кутумов Ю.Д., Кузьмина Н.В., и др. Моделирование кабельных линий напряжением 6–10 кВ при расчетах переходных процессов при замыканиях на землю // Вестник ИГЭУ. – 2021. – №5. – С. 30-40.
3. Куликов А.Л., Старшов И.С. Исследование диагностических параметров режима однофазных замыканий на землю в электросетях 10 кВ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ, 2025. – Т.27 – №4. – С.42-55.

Авторы:

Куликов Александр Леонидович, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, В 1992 г. окончил Военную инженерную радиотехническую академию ПВО им. Л.А. Говорова. В 2007 г. в ИГЭУ им. В.И. Ленина защитил докторскую диссертацию на тему

«Дистанционное определение мест повреждений высоковольтных линий электропередачи средствами цифровой обработки сигналов».
e-mail: inventor61@mail.ru.

Старшов Иван Сергеевич, аспирант кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, В 2025 г. Окончил НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Институт Электроэнергетики (ИНЭЛ), степень магистр. e-mail: ivanstarsh@yandex.ru.

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ АДАПТИВНЫХ УСТАВОК ДЛЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Ефремов В.А., ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», ООО «Релематика», Чебоксары, Россия. E-mail: efremov_va@relematika.ru.

Ефремов Е.А., ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», ООО «Релематика», Чебоксары, Россия. E-mail: efremov_ea@relematika.ru.

Исмукوف Г.Н., ООО «Релематика», Чебоксары, Россия. E-mail: ismukov_gn@relematika.ru.

***Аннотация:** В работе предложена методика формирования адаптивных уставок для токовой отсечки линии электропередачи при междуфазных коротких замыканиях. Формирование адаптивных уставок выполняется в темпе процесса короткого замыкания на основе оценки текущих параметров питающих систем. На примере имитационной модели линии электропередачи в режиме междуфазного короткого замыкания продемонстрировано увеличение зоны действия и чувствительности токовой отсечки с адаптивной уставкой.*

***Ключевые слова:** максимальная токовая защита, токовая отсечка, адаптивные уставки, зона действия, объектные параметры, имитационная модель*

Введение

Одним из существенных недостатков релейной защиты (РЗ) с одной подведённой величиной является значительный разброс зоны срабатывания в зависимости от текущих параметров питающих систем. Так, ток срабатывания токовой отсечки (ТО)

линии электропередачи (ЛЭП) выбирается по условию отстройки от максимального тока трёхфазного короткого замыкания (КЗ) в конце линии [1], в то время как фактический ток для текущей схемно-режимной ситуации может быть значительно меньше. В результате зона действия ТО также снижается.

Для повышения чувствительности и увеличения зоны действия ТО при выявлении режимов междуфазных КЗ в [2] предлагается использовать уставку, рассчитанную заранее по условию отстройки от тока междуфазного КЗ в конце линии. При таком подходе уставка является фиксированной и определяется максимальным режимом работы сети.

Целью настоящей работы является повышение чувствительности и увеличение зоны действия ТО при междуфазных КЗ за счёт формирования адаптивной уставки, учитывающей не только вид повреждения, но и текущий режим работы сети.

Информационные аспекты определения тока междуфазного КЗ

Согласно информационной теории РЗ режим наблюдаемого объекта определяется m -мерным вектором объектных параметров $\mathbf{x} \in G$, где G – область определения объектных параметров или объектная область [3]. С помощью имитационной модели наблюдаемого объекта осуществляется преобразование вектора объектных параметров $\mathbf{x} \in G$ в вектор наблюдаемых величин в пространстве наблюдения, трансформируемый модулями РЗ в вектор замеров в уставочном пространстве [4].

Для имитационной модели ЛЭП, представленной на рис. 1, вектор объектных параметров в режиме междуфазного металлического КЗ $\mathbf{x}_f \in G$ имеет вид (удельное сопротивление линии $\underline{Z}_1^0 = R_1^0 + jX_1^0$ является неизменным параметром, поэтому не показано):

$$\mathbf{x}_f = [Z_{s1}, Z_{r1}, \varphi_{s1}, \varphi_{r1}, \lambda_s, \lambda_r, \delta, x_f]^T, \quad (1)$$

где $Z_{s1} = \text{mod}(\underline{Z}_{s1}) \in [Z_{s1\min}; Z_{s1\max}]$ и $Z_{r1} = \text{mod}(\underline{Z}_{r1}) \in [Z_{r1\min}; Z_{r1\max}]$ –

величины сопротивлений систем по прямой последовательности; $\varphi_{s1} = \arg(Z_{s1}) \in [\varphi_{s1\min}; \varphi_{s1\max}]$ и $\varphi_{r1} = \arg(Z_{r1}) \in [\varphi_{r1\min}; \varphi_{r1\max}]$ – углы сопротивлений систем по прямой последовательности; $\lambda_s = E_s / U_{\text{ном}} \in [\lambda_{s\min}; \lambda_{s\max}]$ и $\lambda_r = E_r / U_{\text{ном}} \in [\lambda_{r\min}; \lambda_{r\max}]$ – отношения величин электродвижущих сил (ЭДС) систем по прямой последовательности к номинальному напряжению линии; $\delta = \arg(\underline{E}_s / \underline{E}_r) \in [\delta_{\min}; \delta_{\max}]$ – угол передачи; $x_f \in [0; l]$ – расстояние до места КЗ.

Величина тока КЗ при повреждении в любой точке линии является функцией всех указанных объектных параметров:

$$\mathbf{I}_{\text{кз}}^{(2)} = \begin{bmatrix} I_v^{(2)} \\ I_{v-1}^{(2)} \\ I_{v+1}^{(2)} \end{bmatrix} = F(\mathbf{x}_f), \quad (2)$$

где F – оператор прямого преобразования вектора объектных параметров в вектор замеров действующих значений принуждённой составляющей фазных токов или, другими словами, имитационная модель; v – индекс особой фазы.

Методика формирования адаптивных уставок ТО

Для выбора уставки ТО по типовой методике, предложенной в [2], требуется определить максимум функции (2) при $x_f = l$. Вектор объектных параметров при междуфазном КЗ в конце линии $\mathbf{x}_l \in G_1$ имеет вид:

$$\mathbf{x}_l = [Z_{s1}, Z_{r1}, \varphi_{s1}, \varphi_{r1}, \lambda_s, \lambda_r, \delta, l]^T. \quad (3)$$

Тогда уставка для токовых измерительных органов, реагирующих на фазные величины, определяется по формуле:

$$I_{\text{уст}(1)}^I = K_{\text{отс}} \cdot \max_{\mathbf{x}_l \in G_1} (F(\mathbf{x}_l)), \quad (4)$$

где $K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки.

В настоящей работе предложен способ повышения чувствительности ТО за счёт оценки параметров прилегающих систем, уточнения области G_1 и расчёта адаптивной уставки (4) в

темпе процесса непосредственно в алгоритме РЗ. Оценка параметров систем включает следующие действия:

1. Выполняется измерение текущих (аварийных) и предшествующих электрических величин в месте установки защиты: $I_{s1}^{TK}, I_{s2}^{TK}, U_{s1}^{TK}, U_{s2}^{TK}$ и $I_{s1}^{ПД}, I_{s2}^{ПД}, U_{s1}^{ПД}, U_{s2}^{ПД}$.

2. Вычисляются аварийные составляющие электрических величин: $I_{s1}^{AB} = I_{s1}^{TK} - I_{s1}^{ПД}, I_{s2}^{AB} = I_{s2}^{TK} - I_{s2}^{ПД}$ и $U_{s1}^{AB} = U_{s1}^{TK} - U_{s1}^{ПД}, U_{s2}^{AB} = U_{s2}^{TK} - U_{s2}^{ПД}$.

3. Из модели чисто аварийного режима вычисляются эквивалентные сопротивления системы «за спиной»: $Z_{s1изм} = Z_{s1изм} \cdot \exp(j\varphi_{s1изм}) = Z_{s2изм} = U_{s2}^{AB} / I_{s2}^{AB}$.

4. Из модели предшествующего режима вычисляется ЭДС системы «за спиной»: $E_{sизм} = U_{s1}^{ПД} + I_{s1}^{ПД} \cdot Z_{s1изм}$ и уточняется диапазон возможных значений ЭДС удалённой системы:

$$E_{rуточн} = U_{s1}^{ПД} - I_{s1}^{ПД} \cdot (Z_{r1}^0 \cdot l + Z_{r1}), \quad \text{где} \quad Z_{r1} = Z_{r1} \cdot \exp(j\varphi_{r1}),$$

$$Z_{r1} \in [Z_{r1min}; Z_{r1max}], \quad \varphi_{r1} \in [\varphi_{r1min}; \varphi_{r1max}].$$

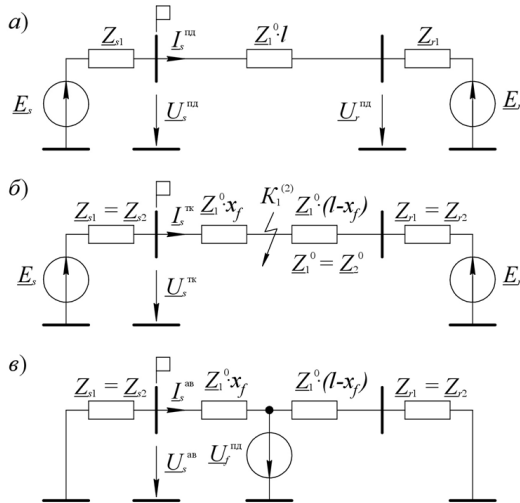


Рис. 1. Имитационная модель линии электропередачи: а – в предшествующем режиме, б – в режиме КЗ, в – в чисто аварийном режиме

При подстановке в (3) рассчитанных параметров системы «за спиной» объектная область сужается. Обозначим новую область G_2 , а вектор объектных параметров $\mathbf{x}_{\text{ИЗМ1}}$. Для $\mathbf{x}_{\text{ИЗМ1}} \in G_2$, $G_2 \subset G_1$ имеем:

$$\mathbf{x}_{\text{ИЗМ1}} = [Z_{s\text{ИЗМ}}, Z_{r1}, \varphi_{s\text{ИЗМ}}, \varphi_{r1}, \lambda_{s\text{ИЗМ}}, \lambda_r, \delta, l]^T. \quad (5)$$

В таком случае адаптивная уставка определяется по формуле:

$$I_{\text{уст}(2)}^I = K_{\text{отс}} \cdot \max_{\mathbf{x}_{\text{ИЗМ1}} \in G_2} (F(\mathbf{x}_{\text{ИЗМ1}})). \quad (6)$$

Поиск максимального значения тока в (6) предполагает перебор всех возможных значений вектора $\mathbf{x}_{\text{ИЗМ1}}$. Для ускорения процесса расчёта предлагается использовать известные оптимизационные алгоритмы, например [5].

Дополнительное уточнение диапазона возможных значений ЭДС удалённой системы приводит к дополнительному сужению объектной области. Аналогично для $\mathbf{x}_{\text{ИЗМ2}} \in G_3$, $G_3 \subset G_2$ имеем:

$$\mathbf{x}_{\text{ИЗМ2}} = [Z_{s\text{ИЗМ}}, Z_{r1}, \varphi_{s\text{ИЗМ}}, \varphi_{r1}, \lambda_{s\text{ИЗМ}}, \lambda_{r\text{УТОЧН}}, \delta_{\text{УТОЧН}}, l]^T, \quad (7)$$

где $\lambda_{r\text{УТОЧН}} \in [\lambda_{r\text{УТОЧН.Мин}}; \lambda_{r\text{УТОЧН.Мак}}]$ и $\delta_{\text{УТОЧН}} \in [\delta_{\text{УТОЧН.Мин}}; \delta_{\text{УТОЧН.Мак}}]$ – уточнённые диапазоны ЭДС удалённой системы в текущем режиме.

Адаптивная уставка при известных параметрах системы «за спиной» и уточнённом диапазоне возможных значений ЭДС удалённой системы определяется по формуле:

$$I_{\text{уст}(3)}^I = K_{\text{отс}} \cdot \max_{\mathbf{x}_{\text{ИЗМ2}} \in G_3} (F(\mathbf{x}_{\text{ИЗМ2}})). \quad (8)$$

Пример применения адаптивной уставки

Рассмотрен пример выполнения ТО одиночной ЛЭП, соответствующей схеме на рис. 1, параметры которой представлены в табл. 1. Уставка порога срабатывания ТО рассчитывается на основе классической методики (4) и двух предложенных методик (6) и (8).

Таблица 1

Параметры защищаемого объекта

Параметр	Обозначение	Значение
Номинальное напряжение, кВ	$U_{\text{ном}}$	$110/\sqrt{3}$
Удельное сопротивление линии, Ом/км	Z_l^0	$0,1+j0,4$
Длина линии, км	l	100
Угол передачи, °	δ	-30...30
Величина сопротивления систем, Ом	$Z_{s1} = \text{mod}(Z_{s1}),$ $Z_{r1} = \text{mod}(Z_{r1})$	10...20
Угол сопротивления систем, °	$\varphi_{s1} = \text{arg}(Z_{s1}),$ $\varphi_{r1} = \text{arg}(Z_{r1})$	80...90
Отношение величин ЭДС систем к номинальному напряжению линии, о.е.	$\lambda_s = E_s/U_{\text{ном}},$ $\lambda_r = E_r/U_{\text{ном}}$	0,98...1,02
Расстояние до места повреждения, км	x_f	0...100

На рис. 2 представлены зависимости минимального и максимального тока междуфазного КЗ от расстояния до места повреждения. Получено ожидаемое уточнение уставок ТО по предлагаемым методикам: $I_{\text{уст}(3)}^1 < I_{\text{уст}(2)}^1 < I_{\text{уст}(1)}^1$.

Кривые №1 и №2 соответствуют вектору объектных параметров \mathbf{x} из всей области параметров G_1 , кривые №3 и №4 – вектору $\mathbf{x}_{\text{изм1}}$ из уточнённой подобласти $G_2 \subset G_1$, кривая №5 – вектору $\mathbf{x}_{\text{изм2}}$ из уточнённой подобласти $G_3 \subset G_2$. Из рис. 2 видно, что при сужении области объектных параметров сужается диапазон возможных значений фактического тока КЗ в текущем режиме, что позволяет снизить уставку ТО и увеличить гарантированную зону действия с L_{min1} до L_{min2} в случае использования G_2 и до L_{min3} в случае использования G_3 .

На рис. 3 представлены три объектные характеристики распознаваемости повреждения в зависимости от переходного сопротивления R_f . Кривая №1 соответствует использованию области G_1 , кривая №2 – области G_2 , кривая №3 – области G_3 . Рис. 3 демонстрирует повышение чувствительности ТО при сужении области объектных параметров по предложенным методикам.

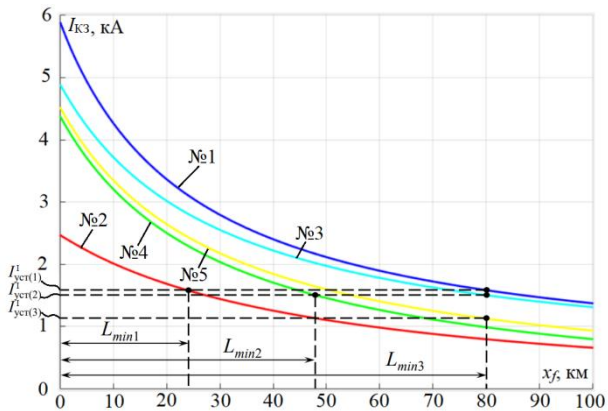


Рис. 2. Зависимости тока КЗ от расстояния до места повреждения, полученные при сужении области объектных параметров

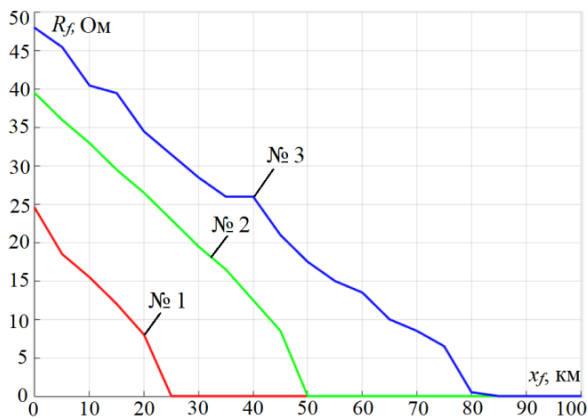


Рис. 3. Объектные характеристики распознаваемости повреждения на ЛЭП, полученные при сужении области объектных параметров

Заключение

В работе предложена методика очувствления ТО за счёт уточнения параметров питающих систем и применения имитационной модели непосредственно в алгоритме РЗ. В общем случае методика обеспечивает увеличение зоны действия и чувствительности ТО. Результаты имитационного моделирования подтвердили эффективность предлагаемой методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.

2. Романюк Ф.А., Тишечкин А.А., Булойчик Е.В. Определение вида повреждения на линиях распределительных сетей в объеме функций микропроцессорных токовых защит // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2011. – № 4. – С. 5-10.

3. Граничные задачи в информационной теории релейной защиты / Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Романов Ю.В. [и др.] // Электротехника. – 2011. – № 1. – С. 13-18.

4. Подшивалин А.Н. Метод информационного анализа и его приложение к определению места повреждения и дистанционной защите линий электропередачи: специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Подшивалин Андрей Николаевич. – Чебоксары, 2005. – 181 с.

5. Баравинский Д.А., Минеева Т.А. Применение метода градиентного спуска в решении задач оптимизации // Тенденции развития науки и образования. – 2021. – № 74-2. – С. 61-66.

Авторы:

Ефремов Валерий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры ТОЭ и РЗА ЧГУ им. И.Н. Ульянова, советник по применению продукции ООО «Релематика». В 1981 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова по специальности «Электроснабжение». В 1993 г. защитил кандидатскую диссертацию в Ленинградском политехническом институте на тему «Адаптивный дистанционный принцип в защите линий электропередачи». E-mail: efremov_va@relematika.ru.

Ефремов Елисей Александрович, аспирант кафедры ТОЭ и РЗА ЧГУ им. И.Н. Ульянова, инженер-исследователь 3 категории ООО «Релематика», в 2024 г. закончил Кубанский Государственный Технологический Университет по специальности «Электротехнические комплексы и электроэнергетические системы». E-mail: efremov_ea@relematika.ru.

Исмуков Григорий Николаевич, кандидат технических наук, ведущий инженер-исследователь ООО «Релематика». В 2012 г. окончил магистратуру ЧГУ им. И.Н. Ульянова, кафедра ТОЭ и РЗА. В 2024 г. защитил кандидатскую диссертацию в ЧГУ им. И.Н. Ульянова

на тему: «Исследование и реализация пассивного и активного волнового определения места повреждения линии электропередачи». E-mail: istukov_gn@releematika.ru.

ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ СИСТЕМОЙ ВОЛНОВОГО ОМП

Сарычев Д.В., К(П)ФУ институт физики, Казань, Россия. E-mail: dmitriy.sarychev@t-a-e.ru.

Хузяшев Р.Г., КГЭУ ЭСИС, Казань, Россия. E-mail: 142892@mail.ru.

Аннотация: исследуются погрешности определения амплитуды напряжений установившегося аварийного режима, зарегистрированных бюджетной системой "СКАТ-ВОМП" [1] на ЛЭП 10 кВ с помощью спектрального анализа. Показано, что погрешность мала, и система способна отличить установившийся аварийный режим от аварийного режима с успешным АПВ. Показано, что аргументы напряжений являются более устойчивыми в аварийном режиме, чем их амплитуды.

Ключевые слова: переходный процесс, погрешность измерения, аварийный режим, напряжение нулевой последовательности.

Объект исследования

Источником экспериментальных данных служит система «СКАТ ВОМП» регистрирует два типа сигналов: высокочастотную (ВЧ) составляющую, предназначенную для определения места повреждения (ОМП), и низкочастотную (НЧ) составляющую, используемую для идентификации аварийного режима при возникновении повреждения на линии. Регистрация производилась на линии Лукойл, представленной на рисунке 1.

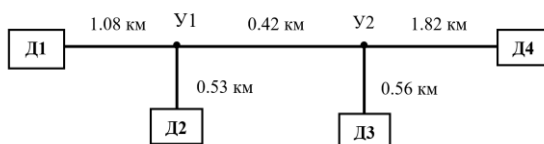


Рис. 1. Схема фидера 8 с установленными 4 датчиками системы «СКАТ-ВОМП»

Для анализа НЧ сигналов регистрируются 8 периодов основной частоты с интервалом, разделённых на два временных сегмента: первый (4 периода напряжений) фиксируется сразу после срабатывания пускового алгоритма датчика, второй (также 4 периода) – через семь секунд, что обусловлено необходимостью завершения цикла автоматического повторного включения (АПВ) линии.

Результаты измерения

Для анализа спектрального состава сигнала формируется канал нулевой последовательности как сумма мгновенных значений трёхфазных каналов. В качестве исходных данных используется второй сегмент осциллограмм, соответствующий установившемуся режиму работы линии после завершения цикла АПВ. Спектральный анализ полученного сигнала выполняется методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). С целью повышения детализации произведена группировка данных по временному признаку на три подгруппы. Результаты для частоты 50 Гц представлены на рис. 2.1, для частоты 550 Гц – на рис. 2.2.

Из рисунков 2.1 и 2.2 следует, что амплитуда U_0 на 50 Гц убывает с удалением датчика от подстанции, а на 550 Гц контраст между режимами выражен слабее; при этом не все датчики регистрируют события синхронно. Из рисунка 2.3 видно, что максимум U_0 приходится на датчик Д2 для подгруппы #2 и на датчик Д1 для остальных подгрупп.

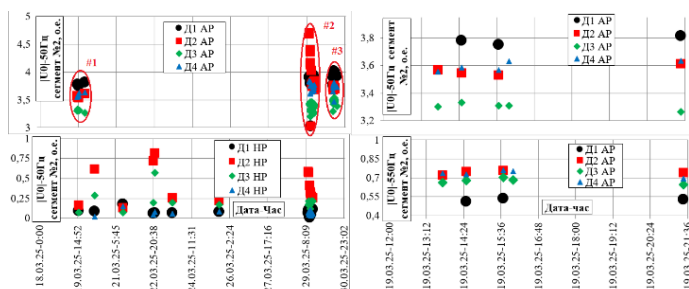


Рис. 2.1. Распределение U_0 : слева – весь период наблюдений на частоте 50 Гц, справа – подгруппа #1

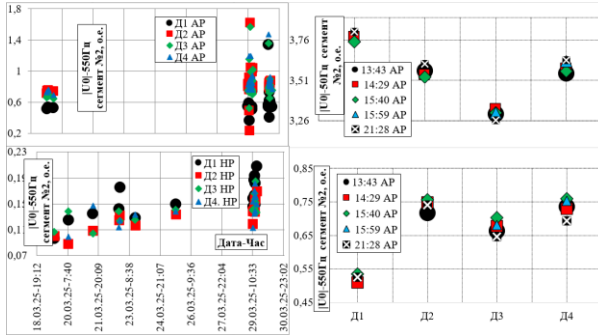


Рис. 2.2. Распределение U_0 слева – весь период наблюдений на частоте 550 Гц, справа – подгруппа #1 распределение амплитуд по датчикам

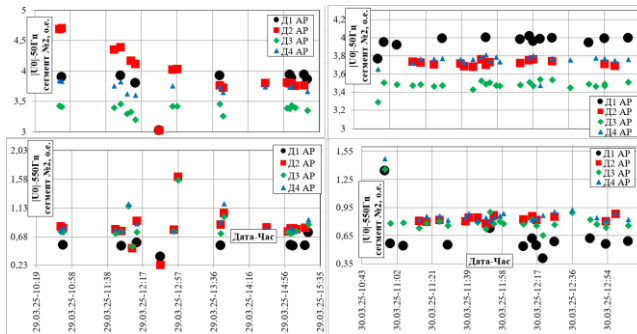


Рис. 2.3. Распределение U_0 для подгрупп #2 (слева) и #3 (справа)

Согласно рис. 2.3, амплитуда U_0 в аварийном режиме убывает от «Д2» к «Д3» и значительно превышает значения нормального режима. На частоте 550 Гц (рис. 2.4) распределение U_0 имеет обратный характер, а контраст между режимами выражен слабее.

Заключение

На основании полученных результатов сформулированы следующие гипотезы:

Спектральный анализ U_0 на частоте 50 Гц позволяет классифицировать события на аварийный и нормальный режимы.

Амплитуда U_0 на частоте 50 Гц убывает по мере удаления датчика от подстанции, при этом максимум фиксируется на ближайшем к источнику питания датчике Д1.

На частоте 550 Гц распределение U_0 имеет обратный характер: минимум амплитуды приходится на Д1, а контраст между режимами выражен слабее, чем на 50 Гц.

Напряжение нулевой последовательности на частоте 550 Гц изменяется несинхронно относительно составляющей 50 Гц, что проявляется в различии их распределений по датчикам.

В ходе обзора литературы не было обнаружено работ, посвящённых исследованию распределения симметричных составляющих в сетях среднего класса напряжения. Ранее подобные исследования проводились на основе косвенных измерений интеллектуальными датчиками на стороне 0,4 кВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система СКАТ-ВОМП [Электронный ресурс]. — URL: <https://app.skatenergy.ru/> (дата обращения: 21.02.2026).

Авторы:

Сарычев Дмитрий Валерьевич, К(П)ФУ институт физики, Казань, Россия. E-mail: dmitriy.sarychev@t-a-e.ru.

Хузяшев Рустэм Газизович, КГЭУ ЭСИС, Казань, Россия. E-mail: 142892@mail.ru.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ЛИНИЯХ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

Куликов А.Л., Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. E-mail: inventor61@mail.ru

Илларионов Р.И., Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. E-mail: illarionov.roma123@yandex.ru

Аннотация: В статье исследуется влияние различных факторов на точность существующих и разработанного псевдо-дальномерного метода определения места повреждения для линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше, имеющих ответвления. На основе результатов моделирования в среде Matlab/Simulink выявлены наиболее критичные факторы, вызывающие существенное увеличение

погрешности ОМП. Эффективность предложенного подхода подтверждена результатами вычислительных модельных экспериментов.

Ключевые слова: *определение места повреждения, псевдо-дальномерный метод, ЛЭП с ответвлениями, многосторонние измерения, избыточность, влияющие факторы.*

Введение

Линии электропередачи 110 кВ и выше с ответвлениями широко распространены. Точность определения места повреждения (ОМП) на таких линиях напрямую влияет на продолжительность послеаварийного восстановления и надежность электроснабжения.

Классические алгоритмы ОМП с односторонними и двухсторонними измерениями, реализованные в специальных устройствах ОМП ЛЭП, регистраторах аварийных событий, терминалах релейной защиты [1-3], в сетях с ответвлениями имеют низкую точность. При наличии измерений на ответвлениях учет этих данных позволяет повысить точность ОМП.

Авторами ранее был предложен метод ОМП для линий с ответвлениями, показавший высокую точность в идеальных условиях, но его чувствительность к влияющим факторам не исследована.

Необходимо провести сравнительный анализ влияния факторов на точность разработанного метода и методов, предложенных другими авторами.

Исследуемые методы

Для сравнения с разработанным псевдо-дальномерным методом в модельные эксперименты были включены многосторонние методы из зарубежной литературы. В таблице 1 представлена краткая характеристика для каждого метода.

Для методов 1-4, 6 и 7 применяется один из известных алгоритмов определения поврежденного ответвления [2, 7-10].

Таблица 1

Краткая характеристика методов

№	Наименование метода	Ист-к
1	Метод через симметричные составляющие нулевой или обратной последовательности	[1]
2	Метод, использующий U и I поврежденной фазы и ток нулевой последовательности, помноженный на коэффициент распределения тока	[1]
3	Метод, использующий модель с распределенными параметрами линии	[3]
4	Метод, использующий для расчетов только аварийные I и U прямой и обратной последовательностей, а также длину ЛЭП	[4]
5	Метод на основе обобщенного преобразования Кларка для получения составных I и U , не зависящий от типа КЗ	[5]
6*	Итерационный метод, основанный на разнице напряжений с концов поврежденного ответвления, дополненный алгоритмом оптимизации Нелдера-Мида	[6]
7*	Навигационный метод, использующий избыточность измерений для повышения точности и компенсации влияющих факторов	–
* разработанные алгоритмы		

При наличии дополнительных вариантов использования метода в скобках добавляется пояснение:

- Расчет по составляющим прямой – (1), обратной – (2) или нулевой (0) последовательности;
- Расчет по модели с сосредоточенными – (с) или распределенными параметрами – (р).

Создание модели

Для проведения модельных экспериментов в программном комплексе MATLAB/Simulink была реализована модель ЛЭП с КЗ на участке C_1-T (рис. 1).

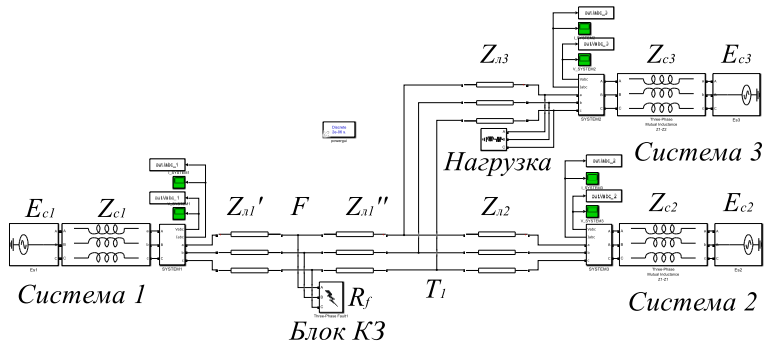


Рис. 1. Модель ЛЭП с ответвлением

На схеме (рис. 1) отображены основные параметры ЛЭП с одним ответвлением. Источники питания на концах ЛЭП моделируются комплексными электродвижущими силами E_{c1} , E_{c2} , E_{c3} и соответствующими им комплексными сопротивлениями систем Z_{c1} , Z_{c2} , Z_{c3} . Параметры самой линии выражены через комплексные сопротивления: участок магистрали до точки КЗ обозначен как $Z'_{л1}$, а после неё – как $Z''_{л1}$. Сопротивления остальных участков представлены величинами $Z_{л2}$ и $Z_{л3}$. Специальными точками F и T обозначены, соответственно, место возникновения КЗ и узел разветвления-линии. Сопротивление в месте повреждения учтено как переходное сопротивление R_F .

Исследуемые факторы

Для проверки устойчивости разработанного метода исследовались такие факторы, как удаленность точки короткого замыкания от ПС, влияние угла сдвига между ЭДС систем, погрешности учета сопротивлений систем на удаленных концах, отклонение погонных параметров ЛЭП, переходное сопротивление в точке короткого замыкания (КЗ), длина ЛЭП, величина нагрузки, режим заземления нейтрали трансформаторов.

Каждому методу, при моделировании влияющих факторов, присвоена оценка по 5-бальной шкале. Рейтинг показывает среднюю по каждому фактору оценку метода по точности и устойчивости. Результаты оценивались отдельно для несимметричных КЗ и для трехфазного КЗ и сведены в табл. 2 – 3.

Система оценивания:

- 5 баллов – ошибка < 2%;
- 4 баллов – ошибка 2-5%;
- 3 баллов – ошибка 5-10%;
- 2 баллов – ошибка 10-20%;
- 1 баллов – ошибка > 20%;

Таблица 2

Рейтинг методов при несимметричных КЗ

Место	№ метода	Средний балл
1	6(2), 3(2), 7(2p), 7(2c)	5.0
2	5	4.8
3	1(0), 6(1), 3(1), 7(1p), 7(1c)	4.6
4	6(0), 7(0p), 7(0c), 3(0)	4.4

Таблица 3

Рейтинг методов при трехфазном КЗ

Место	№ метода	Средний балл
1	6(1), 3(1), 7(1p)	4.2
2	2, 7(1c)	4.1
3	1(0), 6(0)	4.0
4	3(0), 7(0p), 7(0c)	3.9

Заключение

В результате проведенного моделирования были получены погрешности методов при различных влияющих факторах и выполнено ранжирование методов по точности.

Было выявлено, что при несимметричных КЗ устойчивее себя показывают методы, использующие в расчете обратную последовательность, а при трехфазном КЗ – прямую последовательность.

Самые критичные факторы: отклонение погонных параметров ЛЭП, величина нагрузки и режим заземления нейтрали трансформаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аржанников, Е. А.* Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / *Е. А. Аржанников, В. Ю.*

Лукоянов, М. Ш. Мисриханов; под ред. В. А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.

2. Saha, M. M. Fault Location on Power Networks / M. M. Saha, J. Izykowski, E. Rosolowski. – London: Springer, 2010. – 437 p.

3. Izykowski J. Fault Location on Power transmission line / J. Izykowski. – Springer, 2008. – 221 p.

4. V. Terzija, Z. M. Radojevic, G. Preston. “Flexible synchronized measurement technology-based fault locator,” IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 6, no. 2, pp. 866–873, March 2015.

5. I. Voloh, Z. Zhang. “Fault locator based on line current differential relays synchronized measurements,” in Proc. 2010 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, pp. 1–13.

6. Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Илларионов Р.И. Применение алгоритма Нелдера-Мида для определения места повреждения на воздушных ЛЭП с ответвлениями // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 3. С. 4-18.

7. M. Abe, N. Otsuzuki, T. Emura, M. Takeuchi. "Development of a new fault location system for multi-terminal single transmission lines," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 10, no. 1, pp. 159–168, Jan. 1995

8. R.K. Aggarwal, A.T. Johns, The development of a new high speed 3-terminal line protection scheme, *IEEE Trans. Power Delivry*, PWRD-1 (I) (1986) 1255134.

9. Y.Q. Xia, A.K. David, K.K. Li. High-resistance faults on a multi-terminal line: analysis, simulated studies and an adaptive distance relaying scheme, *IEEE Trans. Power Delivry*, 9 (I) (1994) 4922500.

10. Козлов В.Н., Павлов А.О., Бычков Ю.В. Способ определения места повреждения на многоконцевой линии электропередачи с многосторонним питанием // Патент России № 1234567. Оpubл. 20.10.2012.

Авторы:

Илларионов Роман Игоревич, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант, illarionov.roma123@yandex.ru

Куликов Александр Леонидович, сведения об авторе приведены на стр. 8.

**ПРИМЕНЕНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ ЗАЩИТ
В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЯХ 6-35 КВ**

Вертогузов Д.А., Россия, г. Москва, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». E-mail: s@ndman.ru.

Лачугин В.Ф., Россия, г. Москва, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». E-mail: lachugin_vf@ntc-power.ru

***Ключевые слова:** логическая защита, интеллектуальные сет, источники инверторного включения.*

Введение

В настоящее время в распределительных сетях 6–35 кВ все чаще происходит «цифровизация», преследующая цели повышения наблюдаемости и управляемости электрооборудования. Несмотря на внедрение систем мониторинга и диагностики, более современных алгоритмов сетевой автоматики и использования реклоузеров, требования к устройства релейной защиты и автоматике (УРЗА) и типовые решения по организации комплекса РЗА не изменились со времен, когда данные технические новшества отсутствовали или имели локальный характер.

Одним из направлений развития комплекса РЗА таких сетей является применение защит с абсолютной селективностью. Для дифференциальных защит должны выполняться требования по быстродействию каналов связи, их пропускной способности, а также по быстродействию УРЗА. Более простым решением, позволяющим организовать надежную защиту любого типа оборудования, может стать логическая защита (ЛЗ), оперирующая дискретными сигналами пуска защит по концам защищаемого объекта.

Логические защиты шин, трансформаторов и линий

Логическая селективность в отечественной практике в основном применяется при организации логической защиты шин (ЛЗШ) и направленной ЛЗШ (НЛЗШ). Также существуют технические решения по логической защите трансформаторов (ЛЗТ) и линий (ЛЗЛ). В УРЗА также встречается отдельная функция логической селективности, позволяющая реализовать описанные защиты без ограничений. В ряде статей указываются недостатки ЛЗШ и НЛЗШ [1, 2, 3], связанные с реализацией на объектах электроэнергетики без цифровых каналов связи и недостатком исследований логической селективности.

Быстродействие ЛЗ состоит из времени пуска защит по

концам защищаемого участка и выдержки времени в 100–200 мс. Выдержка времени ЛЗ учитывает время замыкания контактов УРЗА и промежуточных реле, а в случае ЛЗЛ – передачу сигнала. Для избавления от выдержки времени можно применять два типа сигналов, блокирующего и разрешающего (БС и РС), совместно. Источником сигналов являются УРЗА по концам защищаемого объекта, а ЛЗ оказывается надежно заблокировано до тех пор, пока не будут получены РС всех смежных защит. Время передачи сигналов при применении цифровых каналов связи составляет значения меньше 20 мс.

Одной из проблем НЛЗШ является зависимость от трансформатора напряжения (ТН) [1]. В связи с этим, требуется рассмотрение пусковых органов (ПО), работающих исключительно по току. Могут быть рассмотрены ПО фазного тока (ПО $I_{\text{мин}}$) и отношения тока обратной последовательности (ОП) к току прямой (ПО I_2/I_1). При возникновении близкого трехфазного КЗ токи со стороны нагрузки будут стремиться к нулю, при возникновении близкого двухфазного КЗ – будут протекать практически равные токи ОП и ПП. Для ЛЗШ и ЛЗТ при наличии на секциях электродвигателей (ЭД) и синхронных генераторов (СГ) может быть рекомендовано применение аварийных составляющих тока, отстроенных от нагрузочного режима.

Для предлагаемых ПО могут быть предложены типовые уставки в о.е., не требующих расчетов. Для ЛЗ также рекомендуется применение отдельных измерительных органов (ИО), расчет которых отличается от максимальной токовой защиты (МТЗ). Такое загромождение должно исключать срабатывание ЛЗШ и ЛЗТ при внешних КЗ и наличии ЭД и СГ и любую ЛЗ – при значительных емкостных токах [2]. При невозможности обеспечения достаточной чувствительности применение ИО фазного тока (ИОТ Ф) может быть предусмотрен ИО тока ОП (ИОТ ОП).

Типовое решение по отключению КЗ только со стороны энергосистемы приводит к продлению существования КЗ при наличии его подпитки от ЭД и СГ [3]. Для всех типов ЛЗ рекомендуется применение отключающих сигналов, по факту получения которых УРЗА со всех сторон защищаемого объекта

будут отключаться. Такое решение ускоряет действие автоматики ввода резерва (АВР), что положительно влияет на качество и надежность электроснабжения.

Применение комбинированных сигналов в ЛЗ, а также использование дополнительных ПО позволяет также использовать данную защиту при наличии источников инверторного включения (ИИВ). Как отмечается в [4], классическая направленная высокочастотная защита (НВЧЗ) не может работать для линий, питающих станции с ИИВ. В качестве решения данной проблемы предлагается применение двух типов сигналов и ПО напряжения. Это же применимо и к ЛЗ, для которых дополнительно требуется использовать ПО минимального напряжения (ПО U_{\min}) и ПО напряжения ОП (ПО U_2). Применение этих ПО не отменяет применение ПО тока, которые могут подхватывать срабатывание.

Заключение

Применение логических защит является перспективным направлением для будущих интеллектуальных сетей, однако, до сих пор остаются нерешёнными вопросы быстродействия, надежности и конфигурации таких защит. Эти вопросы связаны прежде всего с малым интересом к данному виду защит, с ограничениями объектов электроэнергетики без цифровых каналов связи и недостаточным уровнем теоретических оснований. Широкое применение ЛЗ могут найти прежде всего для оборудования, не защищенного дифференциальными защитами, или в качестве второй основной защиты, прежде всего для линий, трансформаторов и шин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников А. А. Исследование возможности применения направленной логической защиты шин 6-10 кВ на подстанциях с распределенными источниками энергии / А. А. Колесников, А. Л. Куликов, И. С. Старшов // Релейная защита и автоматизация. – 2025. – № 2(59). – С. 10–17.
2. Анализ причин ложной работы логических защит шин в сетях 20 кВ при росте емкостных токов / Д. А. Григорьев, Ю. П. Гусев,

К. В. Колесникова, Н. Н. Смотров, Г. Ч. Чо // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 3(44). – С. 8-15.

3. Гильманов Т. Т. Анализ применения логической схемы защиты шин распределительных устройств 6(10) кВ на нефтеперекачивающих станциях / Т. Т. Гильманов, Р. Ф. Гилязов, В. А. Шабанов // Электротехнические комплексы и системы, Уфа, 29 октября 2015 года / Исагилов Ф. Р. (отв. редактор). – Уфа: ГОУ ВПО "Уфимский государственный авиационный технический университет", 2015. – С. 38–42.

4. Особенности выполнения защит линий при наличии ветровых электростанций / В. А. Ефремов, А. В. Ефремов, М. Ю. Петрушков, Е. В. Широкина // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности : Материалы III Международной научно-технической конференции, Чебоксары, 14–16 ноября 2019 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2019. – С. 193-199.

Авторы:

Вертогузов Даниил Александрович, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», аспирант, закончил магистратуру Института электроэнергетики в 2024 года, s@ndman.ru.

Лачугин Владимир Федорович, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», профессор каф. Релейной защиты и автоматики, получил степень доктора технических наук по тематике «Релейная защита объектов электроэнергетических систем, основанная на использовании волновых методов», Lachugin_VF@ntc-power.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОГРАНИЧЕННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ТТ В РЕЖИМАХ РАЗЛИЧНЫХ КЗ

Малякшина М.В., ЧГУ им. И. Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», Чебоксары, Россия. E-mail: maliakshina_mv@ekra.ru.

Золотов А.А., ООО «ЭКРА ИТ», Чебоксары, Россия. E-mail: zolotov_aa@ekra.ru.

Антонов В.И., ЧГУ им. И. Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия. E-mail: antonov_vi@ekra.ru.

Солдатов А.В., ЧГУ им. И. Н. Ульянова, ООО НПП

«ЭКРА», Чебоксары, Россия. E-mail: soldatov_av@ekra.ru.

***Аннотация:** В докладе рассматривается влияние насыщения трансформаторов тока на работу ограниченной дифференциальной защиты силового трансформатора. Выполнен анализ работы защиты при внешних коротких замыканиях различных видов.*

***Ключевые слова:** ограниченная дифференциальная защита, насыщение трансформаторов тока, короткое замыкание, погрешность трансформатора тока*

Введение

Ограниченная дифференциальная защита трансформатора предназначена для отключения коротких замыканий, связанных с землей. Хотя данная защита применяется в практике релейной защиты, но должного количества исследований, посвященных анализу работы, не получила. Особый интерес представляет функционирование защиты при насыщении трансформаторов тока (ТТ).

Целью настоящей работы является исследование влияния насыщения ТТ на работу ограниченной дифференциальной защиты силового трансформатора при внешних видах КЗ.

Принцип действия ограниченной дифференциальной защиты заключается в сравнении расчетного значения дифференциального тока защищаемого трансформатора с током срабатывания. Дифференциальный ток определяется как разность расчетного значения тока нулевой последовательности обмоток высшего напряжения и тока ТТ, установленный в заземленной нейтрали трансформатора (1). Ток срабатывания определяется в соответствии с тормозной характеристикой.

Дифференциальный ток нулевой последовательности определяется как:

$$I_{\text{диф},0} = 3I_0 - I_N, \quad (1)$$

где $3I_0 = I_A + I_B + I_C$ – векторная сумма токов фаз, I_N – ток в нейтрали трансформатора

При исследовании влияния насыщения ТТ на ограниченную дифференциальную взята типовая модель системы. Для схемы на рис. 1 были рассчитаны токи внешнего короткого замыкания различных видов.

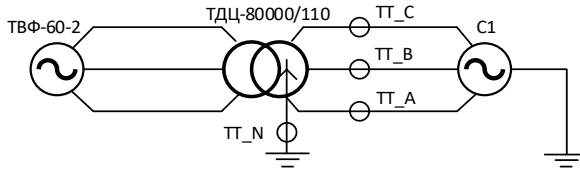


Рис. 1. Схема исследуемой сети

Расчет уставок произведен по рекомендациям [3].

Ток срабатывания на начальном участке срабатывания $I_{ср}$ рассчитывается для номинального режима работы защищаемого трансформатора.

Сначала рассчитывается первичный базисный ток

$$I_{баз(п)} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{80000}{\sqrt{3} \cdot 110} = 419,89 \text{ А.}$$

Затем определяется ток небаланса номинального режима:

$$I_{НБ(ном)} = (\varepsilon_* + \Delta f_{выр})I_{баз(п)} = 50,38 \text{ А,}$$

где $\varepsilon_* = 0,1$ – относительное значение полной погрешности ТТ в режиме, соответствующем установившемуся КЗ [2]; относительная погрешность выравнивания токов сторон $\Delta f_{выр} = 0,02$.

Тогда ток срабатывания в абсолютных величинах будет определяться как:

$$I_{ср0} = k_{отс}I_{НБ(ном)} = 1,2 \cdot 50,38 = 60,46 \text{ А,}$$

$k_{отс} = 1,2$ – коэффициент отстройки.

Тогда в относительных единицах получим:

$$I_{ср} = \frac{I_{ср0}}{I_{баз(п)}} = \frac{60,46}{419,89} = 0,144 \text{ о. е.} < 0,3 \text{ о. е.}$$

$$I_{ср} = 0,3 \text{ о. е.}$$

Коэффициент торможения определяется отношением тока небаланса к току торможения. Для определения коэффициента k_T сначала рассчитывается максимальный ток небаланса. Он зависит от величины максимального сквозного тока $I_{скв(макс)}$.

$$I_{НБ(макс)} = (k_{АП}\varepsilon_* + \Delta f_{выр})I_{скв(макс)}$$

где $k_{АП} = 2,5$ – коэффициент, учитывающий наличие

апериодической составляющей тока;

Максимальный сквозной ток равен максимальному току внешнего короткого замыкания:

$$I_{\text{скв(max)}} = I_{\text{вн.кз.(max)}}$$

Затем определяется ток торможения в режиме протекания максимального сквозного тока:

$$I_T = \max\{I_A, I_B, I_C\}$$

Тогда коэффициент торможения на наклонном участке характеристики торможения:

$$k_T = \frac{k_{\text{отс}} I_{\text{НБ(max)}}}{I_T} = 0,324 \text{ о. е.}$$

Сквозные токи, протекающие в режиме внешнего короткого замыкания, могут привести к насыщению трансформатора тока. В этих условиях насыщение ТТ характеризуется комплексным коэффициентом \underline{k} , зависящим от погрешности ТТ:

$$\underline{k} = (1 - f)\angle\delta,$$

где f – токовая погрешность по основной гармонике; δ – угловая погрешность

Зависимость угловой погрешности δ от токовой погрешности по основной гармонике в переходном режиме представлена на рис. 2.

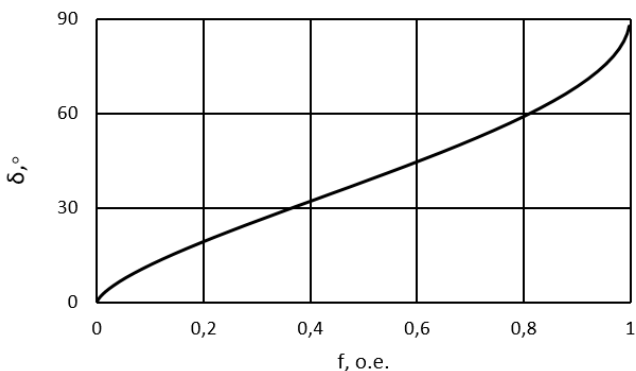


Рис. 2. График зависимости угловой погрешности δ от токовой погрешности f

Для моделирования насыщения ТТ в фазе А используем

комплексный коэффициент \underline{k} , тогда дифференциальный и тормозной токи рассчитываются по формуле:

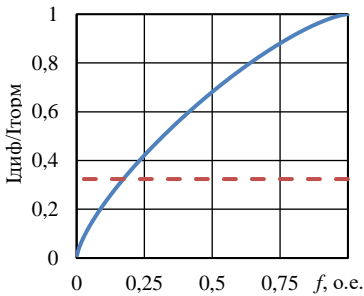
$$I_{\text{диф}} = |\underline{k}_A \dot{I}_A + \underline{k}_B \dot{I}_B + \underline{k}_C \dot{I}_C - \underline{k}_N \dot{I}_N|,$$

$$I_{\text{торм}} = \max\{|\underline{k}_A| I_A, |\underline{k}_B| I_B, |\underline{k}_C| I_C\},$$

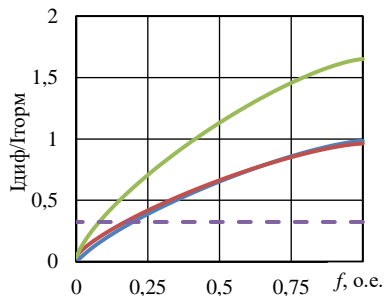
где $\underline{k}_A = f(f_i)$, $\underline{k}_B = 1$, $\underline{k}_C = 1$, $\underline{k}_N = 1$

Аналогично для насыщения в других фазах и нейтрали.

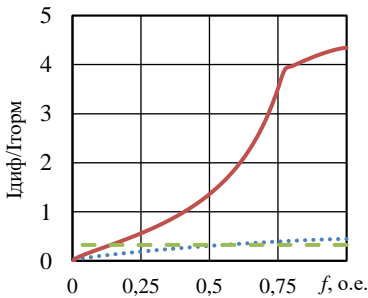
На рис. 3 приведены графики зависимости отношения дифференциального тока к тормозному от токовой погрешности f при внешних КЗ.



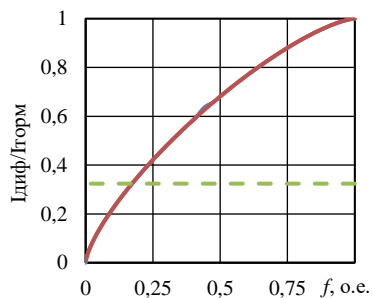
а) трехфазное КЗ



б) двухфазное КЗ на землю



в) однофазное КЗ



г) двухфазное

Рис. 3. Графики зависимости отношения дифференциального тока к тормозному от токовой погрешности f при внешних КЗ: сплошной линией обозначены годограф при насыщении фаз; точками — годограф при насыщении нейтрали; пунктирной линией — граница срабатывания защиты

Из рассмотренных наиболее опасными с являются режимы, сопровождающиеся появлением токов нулевой последовательности – однофазные и двухфазные КЗ на землю. В этом случае насыщение ТТ, установленного в нейтрали может приводить к срабатыванию при токовой погрешности менее чем 10 % .

При трехфазном и двухфазном КЗ на стороне ВН ток нулевой последовательности отсутствует. В идеальных условиях дифференциальный ток равен 0. Насыщение в одной из поврежденных фаз приводит к срабатыванию защиты при токовой погрешности 20 %.

Насыщение трансформатора тока может приводить к значительным искажениям вторичных токов, что требует тщательного выбора уставок защиты для предотвращения ложных срабатываний. Необходимо учитывать возможные режимы насыщения ТТ при выборе уставок и применять дополнительные меры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чернобровов Н. В., Семенов В. А.* 1. Релейная защита энергетических систем, Москва, Энергоатомиздат. – 1998.

2. *Малякшина М.В.* Исследование ограниченной дифференциальной защиты трансформатора // "Энергия Арктики-2025": Сборник материалов Международной научно-технической конференции 17–19 декабря 2025 г. - Архангельск: КИРА, 2026. - С. 80-82.

3. НПП «ЭКРА» Цифровые защиты генераторов, трансформаторов и блоков генератор-трансформатор электростанций (техническое описание) – 2004.

4. *Степанова Д.А., Иванов Н.Г., Солдатов А.В.* «Характеристики точности трансформаторов тока в установившемся и переходном режимах» // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2022. – С. 31–38.

Авторы:

Малякшина Мария Владимировна, студент Высшей инженерной школы ЧГУ им. И. Н. Ульянова, техник департамента

автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». E-mail: maliakshina_mv@ekra.ru.

Золотов Александр Артурович, инженер-исследователь 2 категории департамента научного сопровождения продукции ООО «ЭКРА ИТ». E-mail: zolotov_aa@ekra.ru.

Антонов Владислав Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ЧГУ им. И.Н. Ульянова, главный научный сотрудник департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». E-mail: antonov_vi@ekra.ru.

Солдатов Александр Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Фёдорова ЧГУ им. И.Н. Ульянова, заместитель директора департамента по научному сопровождению продукции ООО НПП «ЭКРА». E-mail: soldatov_av@ekra.ru.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Егоров Г.В., ЧГУ, ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия. E-mail: egorov_gv@relematika.ru.

Кочетов И.Д., ЧГУ, ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия. E-mail: kochetov_id@relematika.ru.

Лямец Ю.Я., ЧГУ, ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия. E-mail: yu.ya.liamets@gmail.com.

Иванов С.В., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия. E-mail: ivanov_sv@relematika.ru.

Афанасьев А.А., ЧГУ, г. Чебоксары, Россия. E-mail: afan39@mail.ru.

Григорьев И.Г., ЧГУ, ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия. E-mail: grigorev_ig@relematika.ru.

***Аннотация:** В статье рассматривается задача распознавания внутренних повреждений синхронного генератора на основе метода двухмодельной идентификации повреждений. Разработана имитационная модель генератора, позволяющая моделировать режимы внутренних коротких замыканий в обмотках статора, и предложен подход распознавания таких повреждений в синхронном генераторе.*

Ключевые слова: модель поврежденного генератора, метод двухмодельной идентификации повреждений.

Введение

Обеспечение надёжной и селективной работы релейной защиты синхронных генераторов является одной из ключевых задач при эксплуатации электроэнергетического оборудования. Внутренние повреждения в обмотках статора относятся к наиболее опасным аварийным режимам, поскольку характеризуются быстрым развитием, значительными тепловыми и электродинамическими воздействиями. В этих условиях особое значение приобретает задача оперативного и достоверного распознавания повреждений.

Применяемые в настоящее время методы релейной защиты в ряде случаев не обеспечивают требуемой точности при анализе переходных процессов и изменении режимных параметров генератора. Это обуславливает необходимость применения модельно-ориентированных подходов, основанных на математическом описании генератора и методах идентификации его состояния.

Целью данной работы является разработка подхода к распознаванию внутренних повреждений синхронного генератора на основе метода двухмодельной идентификации.

Модель синхронного генератора

Математическое моделирование синхронного генератора в задачах релейной защиты направлено на воспроизведение электромагнитных процессов, определяющих поведение машины в нормальных и аварийных режимах. В основе модели лежит описание магнитного поля в воздушном зазоре, где происходит основное взаимодействие магнитодвижущих сил обмоток статора и ротора.

В рамках принятого подхода воздушный зазор генератора рассматривается как немагнитная область, представленная в виде бесконечной полосы с гладкими границами [1]. При допущении о высокой магнитной проницаемости сердечников задача расчёта магнитного поля сводится к решению краевой задачи для магнитного потенциала. Такое представление позволяет получить аналитические выражения для распределения

магнитной индукции в зазоре с учётом гармонического состава магнитодвижущих сил обмоток.

На основе полученного распределения магнитного поля определяются потокосцепления обмоток, после чего определяется собственная и взаимные индуктивности. Собственная индуктивность будет равна

$$L_{ij} = \Psi_{ij \max} / i, \quad (1)$$

где $\Psi_{ij \max}$ – максимальное потокосцепление обмотки; i – ток, протекаемый в обмотке.

Тогда собственная индуктивность фазы А для $v=2k-1$ -гармоники будет равна

$$L_{AA \max}^v = \frac{4\sqrt{2}\mu_0 l_\delta w_A^2 k_{wv} ch(v\alpha y)}{\pi p v sh(v\alpha\delta)}$$

где μ_0 – магнитная постоянная; w_A – число витков обмотки; $\alpha = \pi/\tau$; τ – полюсное деление; δ – ширина полосы; y – положение при котором достигается максимальное значение потокосцепления, $y=0,5\delta$. Таким образом, были параметры синхронного генератора необходимые для построения математической модели синхронного генератора.

Математическая модель генератора формируется в виде системы уравнений электрического равновесия, описывающей взаимосвязь токов, напряжений и потокосцеплений обмоток в переходных режимах.

Моделирование внутренних повреждений, в частности коротких замыканий в обмотке статора, осуществляется путём введения дополнительных электрических контуров, соответствующих дефектным участкам. Для каждого такого контура записывается уравнение электрического равновесия:

$$u = Ri + \frac{d\Psi}{dt}.$$

Появление дефектного контура приводит к изменению магнитного поля и структуры индуктивных связей, что вызывает перераспределение токов между элементами электрической машины.

Идентификация повреждения в синхронном генераторе

В рамках проведённого исследования разработана имитационная модель синхронного генератора, параметры которой соответствуют гидрогенератору Саяно-Шушенской ГЭС СВФ 1285/275-42У4. Модель позволяет воспроизводить электромагнитные процессы в различных режимах работы, включая внутренние короткие замыкания.

Распознавание повреждений осуществлялось на основе метода двухмодельной идентификации, предполагающего разделение режимов работы генератора на нормальный и локальный [2]. Метод позволяет с помощью модели генератора определить внутренне повреждение в обмотках статора генератора.

Вывод

В работе разработан подход к распознаванию внутренних повреждений синхронного генератора на основе метода двухмодельной идентификации. Показано, что использование измерений токов и напряжений с выводов генератора и со стороны нейтрали в сочетании с математической моделью генератора позволяет определить внутреннее короткое замыкание. Полученные результаты подтверждают эффективность применения модельно-ориентированных методов в задачах релейной защиты синхронных генераторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев А.А.* Метод разделения переменных в аналитических расчетах электрических машин. – Ч.: Изд-во Чуваш. ун-та, 2022. – 278 с.
2. *Кочетов И.Д.* Эквивалентные генераторы энергообъектов как индикаторы повреждений при двустороннем и одностороннем наблюдении : диссертация ... кандидата технических наук : 2.4.3. / Кочетов Иван Дмитриевич;— Ч., 2023. — 144 с. : ил..

Авторы:

Егоров Георгий Витальевич, инженер-исследователь 3 категории ООО «Релематика», магистрант 2 курса ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: egorov_gv@relematika.ru.

Кочетов Иван Дмитриевич, кандидат технических наук, ведущий инженер-исследователь ООО «Релематика», старший

преподаватель кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 2022 г. окончил электроэнергетический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 2023 г. защитил в Новосибирском государственном техническом университете кандидатскую диссертацию на тему «Эквивалентные генераторы энергообъектов как индикаторы повреждений при двустороннем и одностороннем наблюдении». E-mail: kochetov_id@relematika.ru.

Лямец Юрий Яковлевич, доктор технических наук, советник по научной работе ООО «Релематика», профессор кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 1962 г. окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института (НПИ). В 1994 г. защитил во ВНИИЭ докторскую диссертацию на тему «Адаптивные реле: теория и приложение к задачам релейной защиты и автоматики электрических систем». E-mail: yu.ya.liamets@gmail.com.

Иванов Сергей Владимирович, кандидат технических наук, ведущий эксперт ООО «Релематика». В 2005 г. защитил в Чувашском государственном университете им. И.Н. Ульянова кандидатскую диссертацию на тему «Информационный анализ линий электропередачи и способов их защиты». E-mail: ivanov_sv@relematika.ru.

Афанасьев Александр Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики и управления в технических системах Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 1991 г. защитил в Московском энергетическом институте докторскую диссертацию на тему «Совместная работа синхронной машины со статическим преобразователем частоты : теория и приложения» E-mail: afan39@mail.ru.

Григорьев Илья Геннадьевич, техник-исследователь ООО «Релематика», студент 3 курса ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: grigorev_ig@relematika.ru

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ЧАСТОТЫ СЕТИ ДЛЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ПРИЛОЖЕНИЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Степанов А.А., ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»,
ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail:
stepanov_aa@ekra.ru.

***Аннотация:** Погрешность и недостаточное быстродействие в способах определения частоты электрической сети могут стать причиной неправильного функционирования алгоритмов быстродействующих приложений РЗА. В настоящей работе предлагается новый способ определения частоты электрической сети, обеспечивающий повышение точности и улучшение быстродействия.*

***Ключевые слова:** частота сети, повышение точности, быстродействующие приложения релейной защиты и автоматики*

Введение

Существующие способы определения частоты электрической сети могут включать в себя составляющие погрешности в силу разных причин, например, вследствие интерполяции или недостаточной отстройки от влияния шумов. Также некоторые способы имеют инертность или длительный собственный переходный процесс, что вместе с погрешностью создают условия для возникновения сбоев в работе быстродействующих приложений РЗА.

Обеспечение надежной работы быстродействующих приложений РЗА в этих условиях требует применения специальных алгоритмов обработки входных сигналов. В настоящей работе рассмотрен новый способ определения частоты электрической сети, обеспечивающий предотвращение неправильного функционирования быстродействующих алгоритмов РЗА благодаря созданию оптимальных условий для определения частоты и упрощению реализации способа.

Способы определения частоты

Среди известных способов определения частоты электрической сети можно выделить способ, использующий измерения периода электрического сигнала по моментам перехода кривой через нуль [1]. Этому способу свойственна методическая погрешность, вызванная недостатками интерполяции, а также он не отстроен от влияния высших гармоник.

Точность оценки частоты может быть повышена в способах, основанных на использовании линейных операторов с частотнозависимыми характеристиками [2]. Данный способ имеет повышенную инертность, и, кроме того, любое скачкообразное изменение входного сигнала будет вызывать собственный переходный процесс в линейных операторах продолжительностью 3,5 периода основной гармоники, внося в оценку частоты сети значительную погрешность.

Быстродействие определения частоты повышается в способе, основанном на использовании ортогональных составляющих [3]. Но и он имеет длительный собственный переходный процесс, в результате которого достоверные оценки ортогональных составляющих появятся лишь по прошествии периода опорного сигнала.

Лучшим быстродействием обладает способ определения частоты электрической сети по угловому расстоянию между отсчетами основной гармоники [4]. К сожалению, неоптимальность амплитудно-частотной характеристики на исходной частоте дискретизации приводит к тому, что каждый фильтр каскада понижает отношение сигнал/шум входного сигнала следующего фильтра, в итоге ухудшая условия оценки частоты электрической сети.

Автором был разработан новый алгоритм определения частоты электрической сети, базой для которого послужил способ определения частоты электрической сети по угловому расстоянию между отсчетами основной гармоники. Использование оптимальной частоты дискретизации и единого коэффициента для настройки каскада заграждающих фильтров кратных гармоник обеспечивает повышение точности и

быстродействие определения частоты.

Сравнение способов определения частоты

Для подтверждения преимуществ разработанного алгоритма на рис. 1 представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) для заграждающих фильтров в базовом способе и в разработанном алгоритме.

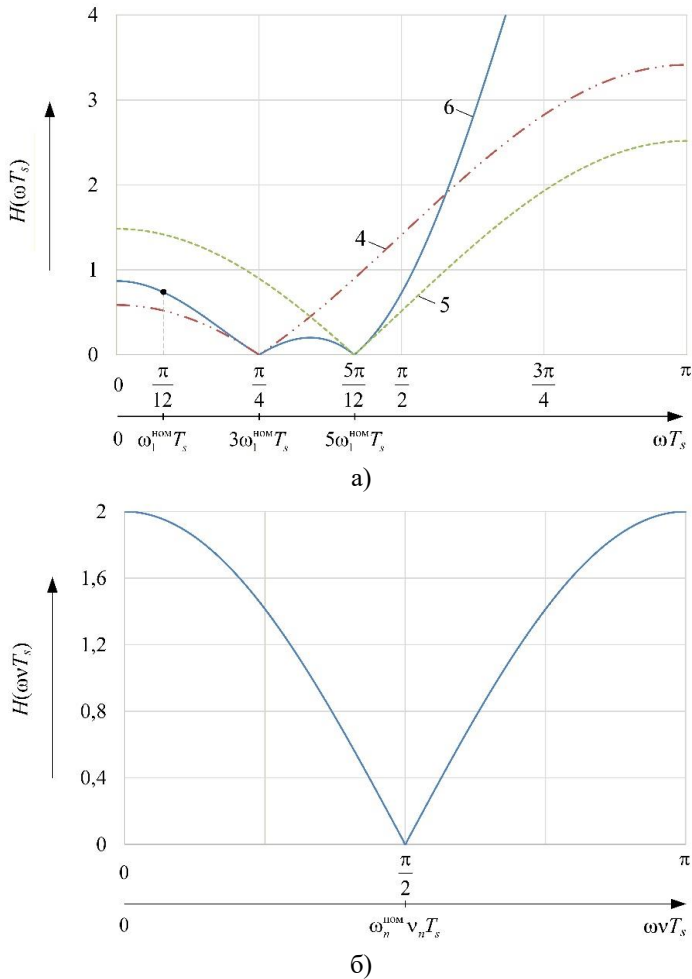


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики заграждающих фильтров: а) в базовом способе; б) в разработанном алгоритме

Из рис. 1а видно, что при использовании во всех заграждающих фильтрах одинакового интервала дискретизации каждый заграждающий фильтр каскада понижает отношение сигнал/шум, ухудшая в итоге условия оценки частоты сети. Коэффициент передачи для первой гармоники в данном случае меньше единицы, что означает подавление первой гармоники каскадом из заграждающих фильтров третьей и пятой гармоник.

Использование нового алгоритма позволяет создать оптимальные условия для определения частоты электрической сети и упростить реализацию способа за счет настройки всех заграждающих фильтров единым коэффициентом, в результате получая одинаковую АЧХ для всех заграждающих фильтров (рис. 1б).

Заключение

1. Обеспечение надежной работы быстродействующих приложений РЗА требует повышения точности и быстродействия в алгоритмах определения частоты электрической сети.

2. Новый алгоритм определения частоты превосходит известные алгоритмы, обеспечивая повышенную точность и быстродействие за счет создания оптимальных условий и упрощения способа реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка частоты сети в цифровых системах РЗА по переходу через нуль: характеристики точности / *Н. Г. Иванов, А. В. Солдатов, В. А. Наумов, В. И. Антонов* // Релейная защита и автоматизация. – 2013. – № 4(13). – С. 22-25.

2. T. Sezi, "A new method for measuring power system frequency," 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference (Cat. No. 99CH36333), New Orleans, LA, USA, 1999, pp. 400-405 vol.1, doi: 10.1109/TDC.1999.755385.

3. *Антонов, В. И.* Оценка частоты электрической сети: теоретические основы и практические алгоритмы / *В. И. Антонов, В. А. Наумов, В. М. Шевцов* // Цифровая электротехника: проблемы и достижения : Сборник научных статей. Том I. – Чебоксары : Рекламно-издательский центр «Содействие развитию релейной защиты, автоматики и управления в электроэнергетике», 2012. – С. 20-38.

4. Патент № 2110804 С1 Российская Федерация, МПК G01R 23/165, H01H 83/22, H02J 3/24. способ определения частоты электрической сети : № 95100250/09 : заявл. 10.01.1995 : опубл. 10.05.1998 / В. И. Антонов, А. А. Ильин, В. М. Шевцов ; заявитель Чувашский государственный университет.

Автор:

Степанов Антон Александрович, техник группы разработки интеллектуальных электронных устройств сектора научного сопровождения продукции департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», бакалавр факультета энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и профилю «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: stepanov_aa@ekra.ru.

ФИЛЬТР ОРТОГОНАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ С ГЕТЕРОГЕННОЙ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СТРУКТУРОЙ

Егорова М.А., ЧГУ им. И. Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», Чебоксары, Россия. E-mail: egorova_ma@ekra.ru.

Убасева М.В., ЧГУ им. И. Н. Ульянова, ООО «ЭКРА ИТ», Чебоксары, Россия. E-mail: ubaseva_mv@ekra.ru.

Антонов В.И., ЧГУ им. И. Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия. E-mail: antonov_vi@ekra.ru.

Солдатов А.В., ЧГУ им. И. Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», Чебоксары, Россия. E-mail: soldatov_av@ekra.ru.

Петров В.С., ЧГУ им. И. Н. Ульянова, ООО «ЭКРА ИТ», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия. E-mail: petrov_vs@ekra.ru.

Аннотация: В докладе рассматривается метод цифровой обработки сигналов, основанный на применении фильтра ортогональных составляющих с гетерогенной распределённой структурой. Суть метода заключается в раздельной настройке адаптивной и неадаптивной частей фильтра. Предложенный подход позволяет динамически настраивать параметры фильтра под текущий состав сигнала на коротком окне наблюдения.

Ключевые слова: фильтр ортогональных составляющих, адаптивный фильтр с гетерогенной распределённой структурой

Введение

Классический фильтр ортогональных составляющих, например, известный фильтр Фурье, требует фиксированного окна наблюдения, что ограничивает быстродействие защит. Кроме того, его эффективность снижается при наличии в сигнале затухающих апериодической составляющей и высших гармоник.

Поскольку размерность модели и вид слагаемых аварийного процесса априори неизвестны, а сам сигнал искажен шумом, то достоверное распознавание сигнала требует применения специализированных методов, адаптированных к условиям структурной неопределенности сигнала.

Целью данной работы является разработка фильтра ортогональных составляющих, обладающего способностью распознать сигнал на сокращённом окне наблюдения. Мы отдаём предпочтение фильтрам с гетерогенной распределённой структурой.

Фильтр ортогональных составляющих

Определение ортогональных составляющих в классическом фильтре Фурье осуществляется следующим образом [1]:

$$\begin{cases} \hat{c}(k) = \frac{2}{N} \sum_{i=k-N+1}^k x(i) \cos(i\omega_b T_s), \\ -\hat{s}(k) = \frac{2}{N} \sum_{i=k-N+1}^k x(i) \sin(i\omega_b T_s), \end{cases}$$

где $x(i)$ – входной сигнал, ω_b – базисная угловая частота, T_s – период дискретизации, N – число отсчетов в окне наблюдения.

Классический фильтр Фурье чувствителен к отклонениям частоты сети и наличию в сигнале апериодической составляющей [2].

Классический адаптивный фильтр как модель сигнала

В этом случае модель может быть представлена как [3]

$$a_0 \hat{x}(k) = -\mathbf{a}^T \mathbf{x}(k-1),$$

где

$$\mathbf{a} = [a_M, a_{M-1}, \dots, a_1]^T \in R^M$$

и

$$\mathbf{x}(k-1) = [x(k-M), x(k-M+1), \dots, x(k-1)]^T \in R^M$$

векторы коэффициентов модели и наблюдаемых отсчётов сигнала соответственно. Коэффициент a_0 произволен, обычно $a_0 = 1$.

Невязка прогноза $e(k) = a_0 x(k) - a_0 \hat{x}(k)$ минимизируется в процессе адаптации. В классическом подходе увеличение порядка модели M с целью повышения точности требует повышения вычислительных ресурсов и расширения окна наблюдения. Переход к гетерогенной распределенной структуре позволяет преодолеть указанные ограничения.

Адаптивный фильтр с гетерогенной распределённой структурой

Под гетерогенностью предлагаемой структуры фильтра понимается разнородность её составных частей, различающихся как по алгоритму функционирования, так и по способу настройки. Фильтр ортогональных составляющих C_1 реализует неадаптивное преобразование на основе текущих оценок квадратурных коэффициентов \hat{c}, \hat{s} , тогда как фильтр остаточного сигнала F_r является адаптивной моделью; коэффициенты всех фильтров пересчитываются на каждой итерации. Такое сочетание разнотипных блоков в рамках единой структуры позволяет использовать преимущества неадаптивных моделей при сохранении гибкости адаптивных алгоритмов (рис. 1) [4].

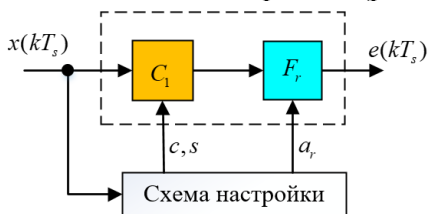


Рис. 1. Фильтр с гетерогенной распределенной структурой. Гетерогенность структуре придаёт неадаптивность фильтра ортогональных составляющих C_1 и адаптивность фильтра остаточного сигнала F_r .

Схема настройки фильтра является двухканальной (рис. 2). В одном канале происходит настройка фильтра остаточного сигнала F_r , в другом – настройка стандартного фильтра

ортогональных составляющих c, s .

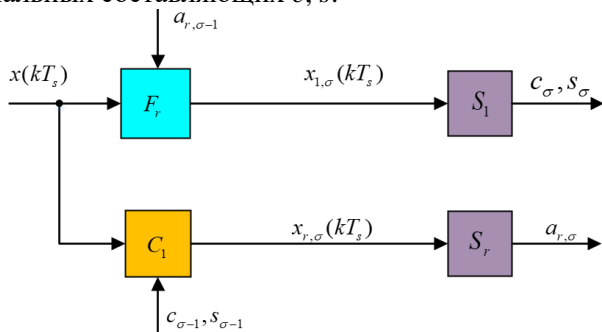


Рис. 2. Схема настройки адаптивного фильтра с распределённой структурой: C_1 – фильтр ортогональных составляющих, F_r – фильтр остаточного сигнала, S_1 – блок настройки стандартного фильтра компонентов, S_r – блок настройки фильтра остаточного сигнала, σ – этап настройки

Качество настройки адаптивных фильтров контролируют по уровню целевой функции $E(\sigma)$, которую задают, например, в виде абсолютного значения разности евклидовых норм векторов коэффициентов адаптивного фильтра на текущей σ и предыдущей $(\sigma-1)$ итерациях настройки:

$$E(\sigma) = \left| \sqrt{\sum_{m=1}^M (a_m^\sigma)^2} - \sqrt{\sum_{m=1}^M (a_m^{\sigma-1})^2} \right|.$$

Полагают, что достигнут необходимый уровень качества настройки, если значение целевой функции $E(\sigma)$ не превышает заданного порога $E_{th} > 0$:

$$E(\sigma) \leq E_{th}.$$

При необходимости по виду корней характеристического уравнения настроенного адаптивного фильтра F_r судят о слагаемых электрической величины.

Заключение

В работе предложен фильтр ортогональных составляющих с гетерогенной распределенной структурой, особенностью которого является разделение фильтра на адаптивную и неадаптивную части, настраиваемые в двухканальной схеме.

Показано, что распределенная структура позволяет оптимально дополнять фильтр ортогональных составляющих основной гармонике моделью других составляющих в виде фильтра остаточного сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов В.И., Наумов В.А., Иванов Н.Г., Солдатов А.В., Фомин А.И. Общие начала теории фильтров ортогональных составляющих // Релейная защита и автоматизация. 2016. №1(22).С. 17–26.

2. Егорова М.А. Сравнительный анализ дистанционных защит на основе мгновенных и действующих величин // "Энергия Арктики-2025": Сборник материалов Международной научно-технической конференции 17–19 декабря 2025 г. - Архангельск: КИРА, 2026. - С. 80-82.

3. Антонов В. И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике / В. И. Антонов. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2018. – 334 с.

4. Воробьев Е.С., Убасева М.В., Антонов В.И., Иванов Н.Г., Солдатов А.В. Адаптивные модели с распределённой структурой для распознавания входных сигналов быстродействующих приложений релейной защиты // Электротехника. 2023. №8.С. 3–9.

Авторы:

Егорова Мария Алексеевна, студент Высшей инженерной школы ЧГУ им. И. Н. Ульянова, техник департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». E-mail: egorova_ma@ekra.ru.

Убасева Мария Витальевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретических основ электротехники релейной защиты и автоматики ЧГУ им. И.Н. Ульянова, инженер-программист I категории департамента научного сопровождения продукции ООО «ЭКРА ИТ». E-mail: ubaseva_mv@ekra.ru.

Антонов Владислав Иванович, сведения об авторе приведены на стр. 35.

Солдатов Александр Вячеславович, сведения об авторе приведены на стр. 35.

Петров Владимир Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ЧГУ им. И.Н. Ульянова, руководитель группы департамента научного сопровождения продукции ООО «ЭКРА ИТ». E-mail: petrov_vs@ekra.ru.

ТЕХНОЛОГИИ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В СИСТЕМАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ ТРАНСФОРМАТОР С СИНХРОНИЗИРОВАННЫМИ ВЕКТОРНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ

Андреев П.И., ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия. E-mail: p.andreev@ens.ru.

Ульянов Д.Н., ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия, E-mail: d.ulyanov@ens.ru.

Мокеев А.В., Северный (Арктический) федеральный университет, ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Архангельск, Россия. E-mail: a.mokeev@narfu.ru.

***Аннотация:** В докладе рассматриваются особенности разработки комбинированных цифровых измерительных трансформаторов. Анализируются требования, предъявляемые к аналоговому и цифровому тракту, включая нормативные требования к системе измерений. Обсуждаются возможности применения синхронизированных векторных измерений для передачи данных.*

***Ключевые слова:** первичные измерительные преобразователи, комбинированные цифровые измерительные трансформаторы, синхронизированные векторные измерения (СВИ), восстановление сигнала*

Введение

Современная тенденция на интеллектуализацию распределительных устройств часто требует компактных измерительных решений. Развитие микроэлектронной техники позволяет ведущим производителям создавать комбинированные измерительные трансформаторы тока и напряжения с цифровым интерфейсом. В данной статье рассматривается вопрос проектирования современного комбинированного трансформатора тока и напряжения с возможностью передачи синхронизированных векторных измерений.

Проблематика построения комбинированных трансформаторов

При проектировании и последующей разработке немаловажен выбор первичного измерительного преобразователя. В настоящее время для измерения тока чаще всего используются трансформаторы тока на магнитном сердечнике. Однако, обеспечение линейности измерений в широком диапазоне труднодостижимо, так как они подвержены эффектам насыщения сердечника и гистерезиса. Более перспективным решением является катушка Роговского. Ее использование сопряжено с необходимостью восстановления сигнала (выходной сигнал с катушки пропорционален первой производной от первичного тока). Альтернативой катушкам для измерения тока являются датчики Холла и феррозонды. Существуют варианты как с применением концентрирующих магнитных сердечников (магнитоводов), так и без них (coreless). Характеристики систем на сердечнике улучшаются за счет применения компенсации намагниченности сердечника (zero-flux системы). Основной проблемой конструкций с сердечником является поведение датчиков в режиме насыщения сердечника, а без сердечника – влияние внешних наводок.

Для измерения напряжения используются резистивные делители напряжения. Преимущества их в том, что они могут измерять постоянное напряжение. При этом нижнее плечо делителя склонно к перегреву и требует охлаждения. Существуют более надежные технологии построения резистивных делителей на стеклокерамике, но такие технологии сложны в производстве. Более безопасными считаются емкостные делители напряжения. Их недостатком является слабость к импульсам напряжения и невозможность измерения постоянного напряжения. Существует много вариаций резистивно-емкостных делителей (RC-, CR-, RCR-делители и др.), которые могут превосходить, например по частотной полосе измерения, резистивный или емкостной делитель. Однако, требование к компактности решения и необходимость согласования сопротивлений делителя с измерительной цепью чаще всего приводит к активным делителям напряжения с

использованием операционных усилителей или транзисторов.

Также в процессе разработки необходимо учитывать такие факторы как: температурная нестабильность измерений, внешние наводки, влияние напряжения на ток или тока на напряжение. Методы борьбы с этими факторами включают в себя различные методы экранирования, компаундирования, использования материалов с малыми коэффициентами температурного расширения-сжатия, температурная коррекция.

Стандарты для измерительных трансформаторов

Требования к измерительным трансформаторам описаны в серии международных стандартов IEC 61869 (ГОСТ Р МЭК 61869). Серия стандартов представляет из себя «матрешку» и применяется последовательно в зависимости от используемых измерительных трансформаторов. Концептуально эта серия стандартов, определяет все виды измерительных трансформаторов, в том числе и с цифровым выходом (IEC 61869-9).

Если говорить о маломощных трансформаторах, то для них ситуация обстоит следующим образом. Вторая редакция общих требований (IEC 61869-1:2023) заменила часть стандарта IEC 61869-6, которая включала общие требования для маломощных трансформаторов. Для маломощных пассивных трансформаторов тока и напряжения разработаны части 61869-10 и 61869-11 соответственно. Однако, для маломощных активных трансформаторов на момент написания статьи необходимых для них частей стандарта нет. Предполагаются к введению следующие части: IEC 61869-7 (напряжение), IEC 61869-8 (ток) и IEC 61869-12 (комбинированные). Так как эти части еще не разработаны, то формально продолжают действовать части старого стандарта для активных трансформаторов (IEC 60044-7, IEC 60044-8). При разработке в данное время можно ориентироваться на общие требования IEC 61869-1:2023 и требования для пассивных трансформаторов 61869-10 или 61869-11.

Обеспечение точности выходных потоков

Точность цифрового SV-потока зависит не только от

первичного преобразователя, но и от оцифровки аналогового сигнала с антиалиасинговыми фильтрами. Требования к полосе частот и антиалиасинговому фильтру даны в ИЕС 61869-1 [1]. Стандарт вводит обязательный для маломощных трансформаторов расширенный класс точности WB0 (до 13 гармоники) и опциональные WB1-WB4 для частот до 500 кГц, а также регламентирует измерения частот около 1 Гц для учета апериодической составляющей.

Параметры фильтра подбираются исходя из частоты дискретизации, номинальной частоты сети, класса точности и расширенного класса точности. Их совокупность определяет границы, в которые необходимо вписать частотную характеристику фильтра. Для антиалиасингового фильтра необходимо, чтобы обеспечивался необходимый уровень ослабления сигналов для частотного диапазона выше частоты, вычисляемой как [1]:

$$f_{guard} = f_s - f_r, \quad (1)$$

где f_s – частота дискретизации, f_r – номинальная частота сети.

По стандарту [1] чем выше класс точности, тем сильнее должен быть уровень затухания на этой частоте. Например, для номинальных классов точности 1 и 0,5, необходимый уровень затухания – 20 дБ, а для 0,1 уже 34 дБ.

Реализация аналогового антиалиасингового фильтра при низких частотах дискретизации (например, 4800 Гц) сложна: фильтр сильно ослабляет гармоники, влияет на фазовый сдвиг 50 Гц и снижает температурную стабильность, требуя специализированных компонентов. Повышение частоты дискретизации упрощает задачу фильтрации, но увеличивает нагрузку на сеть. Оптимальным решением может стать увеличение частоты дискретизации АЦП (сверхдискретизация) с использованием цифровых фильтров. Пример измерительного тракта с цифровым фильтром представлен на рис. 1.

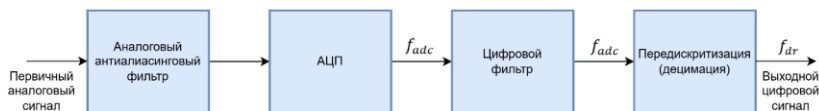


Рис. 1. Схема измерительного тракта

При высокой частоте выборок АЦП частота среза аналогового антиалиасингового фильтра низкого порядка может быть смещена в область более высоких частот, обеспечивая качественные характеристики в рабочем диапазоне. Последующая цифровая фильтрация (фильтр низких частот) определяет частоту среза на гармониках, гарантируя стабильность и повторяемость измерений. Последующая передискретизация или децимация снижает нагрузку на сеть и регулирует частоту выходного цифрового сигнала до стандартных частот SV-потока согласно IEC 61869-9 [2].

Синхронизированные векторные измерения

Цифровые трансформаторы позволяют реализовать также выдачу СВИ потока. Поток СВИ (SP-поток) – это поток синхровекторов, синхронизированных по времени измерений в виде амплитуды и угла синусоидального сигнала. Формирование и выдача синхровекторов подразумевает выделение из оцифрованного сигнала фазы и амплитуды первой гармоники с помощью цифровой фильтрации сигнала. Таким образом, применение цифрового фильтра низких частот и передискретизация сигнала, которая была нужна для выдачи SV-потоков в данном случае не нужна. Работа происходит с выборками, полученными непосредственно после АЦП. Такой подход можно считать альтернативным к описанным ранее. Так как расчет векторов выполняется в самом измерительном трансформаторе с некоторым усреднением, то частота выдаваемого SP-потока может быть меньше [3], чем у SV. Такой способ позволяет еще больше уменьшить нагрузку на сеть за счет снижения выборок на один период промышленной частоты.

Заключение

Цифровые измерительные комбинированные трансформаторы с маломощными первичными преобразователями позволяют реализовывать более компактные решения при автоматизации подстанций. Они позволяют получить высокую точность в широких диапазонах измерения тока и напряжения. Наличие интеллектуального устройства в цифровом измерительном трансформаторе позволяет

реализовывать методы обработки сигнала внутри устройства, что дает возможность выбора выходных цифровых потоков, делает измерительные трансформаторы более универсальными и позволяет адаптировать их под нужную задачу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC 61869-1:2023 ED2. Instrument transformers - Part 1: General requirements, 2023.

2. IEC 61869-9:2016. Instrument transformers - Part 9: Digital interface for instrument transformers, 2016.

3. *Ульянов Д. Н., Пискунов С.А., Мартынов А.Н., Мокеев. А.В.* Разработка и опыт внедрения устройств сопряжения с шиной процесса // Энергия единой сети. – 2024. – №. 5-6 (75). – С. 42.

Авторы:

Андреев Павел Игоревич, аспирант кафедры электроэнергетики и электротехники Северного (Арктического) федерального университета, инженер-программист отдела разработки микропроцессорных устройств ООО «Инженерный центр «Энергосервис». В 2017 получил степень бакалавра по специальности «Мехатроника и робототехника». В 2024 году получил степень магистра по направлению "Электроника и наноэлектроника" в Санкт-Петербургском Политехническом Университете (СПбПУ), e-mail: p.andreev@ens.ru.

Ульянов Дмитрий Николаевич, аспирант кафедры электроэнергетики и электротехники Северного (Арктического) федерального университета. Заместитель генерального директора ООО «Инженерный центр «Энергосервис». В 1998 г. окончил Архангельский государственный технический университет (в настоящее время САФУ), специальность «Электроснабжение промышленных предприятий», направление подготовки «Электротехнические системы и комплексы», e-mail: d.ulyanov@ens.ru.

Мокеев Алексей Владимирович, Северный (Арктический) федеральный университет, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника». ООО «Инженерный центр «Энергосервис», заместитель генерального директора. Получил диплом инженера-электрика в 1981 году, Ленинградский политехнический институт (ныне СПбГПУ), электромеханический факультет. В 2011 году защитил докторскую диссертацию «Методы и алгоритмы обработки

сигналов в интеллектуальных электронных устройствах энергосистем различного функционального назначения» в СПбГПУ, e-mail: a.mokeev@narfu.ru.

ПРИМЕНЕНИЕ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПОДСТАНЦИЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Мартынов А.Н., ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия. E-mail: amartynov@ens.ru.

Мокеев А.В., ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия. E-mail: a.mokeev@ens.ru

***Аннотация:** В статье рассматривается использование технологии синхронизированных векторных измерений в автоматизации подстанций среднего напряжения на основе комбинированных трансформаторов тока и напряжения. Показаны преимущества использования СВИ для повышения точности мониторинга и совершенствования функций объектовой релейной защиты и автоматики*

***Ключевые слова:** синхронизированные векторные измерения, цифровой комбинированный измерительный трансформатор, МЭК 61850, шина процесса*

Введение

В настоящее время технология синхронизированных векторных измерений (СВИ) применяется на объектах магистральных сетей и генерации, однако её использование в распределительных сетях остается ограниченным, что обусловлено техническими и экономическими ограничениями. Развитие современных измерительных устройств, в частности комбинированных трансформаторов тока и напряжения [1], создает возможности для расширения области применения СВИ, в том числе в качестве замены SV-потокам.

Использование СВИ для РЗА

Применение СВИ для задач релейной защиты и автоматики

не является принципиально новой идеей. В методику испытаний функций СВИ из стандарта [2] начиная с редакции 2011 года включены требования по точности измерений в динамических режимах для класса Р, ориентированного на реализацию функций защиты. В различных публикациях [3] также неоднократно отмечаются преимущества использования СВИ в контексте задач защиты на уровне объекта.

Вместе с тем применение СВИ в соответствии с [2] на базе существующих устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ) для нужд РЗА сопряжено с рядом принципиальных ограничений:

– Требования по быстродействию и частоте передачи, предъявляемые к классу Р, сравнительно невысокие и в настоящее время недостаточны для реализации многих алгоритмов защит и автоматики. В частности, в [3] указывается, что использование СВИ на практике возможно только для резервирования основных защит из-за низкой скорости реакции и нерегламентированных погрешностей в переходных режимах.

– Передача данных по стандартным IP-протоколам TCP/UDP приводит к дополнительным задержкам, что негативно влияет на общее быстродействие системы.

– Эффективная реализация возможностей СВИ требует применения первичных измерительных преобразователей тока и напряжения, обеспечивающих нормированные метрологические характеристики как в нормальном, так и в аварийных режимах.

Описанные ограничения в настоящее время могут быть преодолены в комбинированных трансформаторах тока и напряжения с цифровым выходом, использующих отличные от традиционных трансформаторов методы измерений, такие как катушка Роговского, оптические преобразователи, емкостные и резистивные делители напряжения. Цифровые измерительные трансформаторы, спроектированные в соответствии с актуальными требованиями группы стандартов IEC 61869, имеют широкий частотный и амплитудный диапазон измерений, поддерживают синхронизацию по протоколу точного времени PTP и обладают достаточной вычислительной мощностью для расчета СВИ.

Использование комбинированных измерительных

трансформаторов открывает возможность построения систем РЗА для подстанций среднего напряжения на новых принципах – с более низкой стоимостью и повышенной надежностью по сравнению с традиционной реализацией шины процесса [4]. При этом для сетей среднего напряжения СВИ позволяют обеспечить большинства типовых функций защиты. Дополнительно синхронизированные векторные измерения могут быть эффективно использованы для задач автоматике, мониторинга и диагностики оборудования [4]. Также большим плюсом комбинированных трансформаторов является совмещение функций измерения тока и напряжения в одном устройстве. С одной стороны, это позволяет улучшить метрологические характеристики при расчете углов и мощностей, с другой – не требует организации отдельной ячейки ТН и трансляции значений напряжения в общую шину.

Преимущества СВИ по сравнению с SV-потоками

Возникает закономерный вопрос: в чем заключается целесообразность применения СВИ при наличии технологии шины процесса с SV-потоками, обеспечивающих передачу первичных мгновенных значений, содержащих всю необходимую информацию? Зарубежный опыт многолетней эксплуатации цифровых подстанций среднего напряжения в целом положительно оценивает концепцию шины процесса, отмечая сопоставимую с аналоговыми микропроцессорными устройствами РЗА надежность, а также снижение эксплуатационных затрат [5].

Вместе с тем указанные преимущества во многом компенсируются более высокими капитальными затратами и требованиями к квалификации обслуживающего персонала [5]. Кроме того, внедрение шины процесса в сетях среднего напряжения не обеспечивает принципиального прироста эффективности, поскольку требования к алгоритмам защиты и их быстродействию в данном классе напряжения во многих случаях сравнительно невысоки. Даже в схемах с повышенными требованиями к надежности электроснабжения, включая кольцевые топологии питания ответственных потребителей, применение полноценной цифровой архитектуры не всегда

является экономически обоснованным [6].

Использование комбинированных трансформаторов тока и напряжения, формирующих синхронизированные векторные измерения вместо SV-потоков, позволяет существенно упростить архитектуру локальной сети подстанции и кратно снизить требования к вычислительным ресурсам устройств РЗА [4]. Такой подход с одной стороны обеспечивает возможность практического использования преимуществ цифровых технологий без больших капитальных затрат уже в настоящее время, а с другой — формирует основу для последующего перехода к полноценной шине процесса с SV-потоками без необходимости модернизации первичного оборудования по мере снижения стоимости и повышения доступности сетевой инфраструктуры. При этом для выполнения специфических функций, требующих полноценных SV-потоков (например, коммерческий учет электроэнергии), остается возможность подключения соответствующих устройств напрямую к цифровому выходу измерительного трансформатора.

Применение цифровых трансформаторов с СВИ

На рисунке 1 приведен один из вариантов структурной схемы РЗА на базе комбинированных трансформаторов тока и напряжения с поддержкой СВИ. Здесь применяется три комбинированных трансформатора ЕСІТ, устройства релейной защиты и автоматики ENBC, многофункциональное измерительное устройство ESM-SV.

Трансформаторы ЕСІТ публикуют цифровые потоки в формате SV для счетчика ESM-SV, а также производят вычисление СВИ, используя специализированные быстродействующие алгоритмы [1], и передают данные в формате потоков СВИ (SP-потоки), представляющих собой модификацию стандартных SV-потоков, но содержащих не мгновенные значения, а составляющие вектора в виде угла и амплитуды основной гармоники [1]. SP-потоки обрабатываются устройством ENBC и позволяют реализовать большинство типовых функций защиты и автоматики, включая токовые, дистанционные и дифференциальные алгоритмы [4].

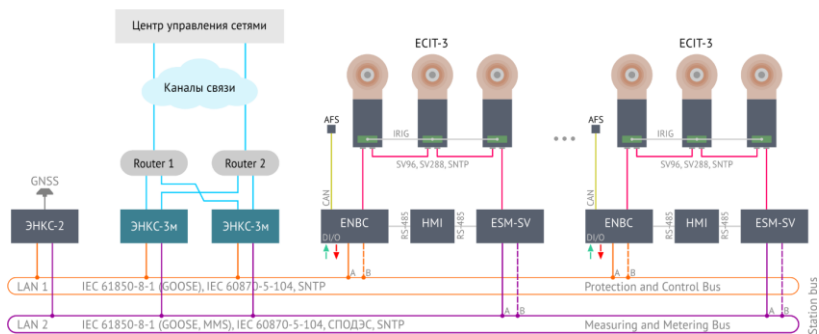


Рис. 1. Схема организации систем РЗА и учета с применением СВИ и SV

В зависимости от требований к системе, эта схема может быть упрощена за счет исключения отдельных устройств РЗА и учета электроэнергии – эти функции могут быть перенесены непосредственно в измерительный трансформатор [4]. Также схема может быть адаптирована для использования с централизованными или кластерными РЗА.

Заключение

Технология СВИ имеет потенциал применения в распределительных сетях среднего напряжения при использовании современных комбинированных измерительных трансформаторов, непосредственно формирующих СВИ.

Переход к передаче данных в виде SP-потоков позволяет снизить требования к локальной сети и вычислительным ресурсам РЗА, а также уменьшить задержки передачи данных по сравнению с традиционными решениями на основе УСВИ.

По сравнению с шиной процесса на основе SV-потоков подход с СВИ обеспечивает сопоставимую функциональность для задач РЗА при меньших капитальных затратах, что делает его экономически целесообразным для сетей среднего напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ульянов Д.Н., Мокеев А.В, Пискунов С.А., Андреев П.И. Цифровые комбинированные трансформаторы тока и напряжения с поддержкой синхронизированных векторных измерений // Релейная защита и автоматизация. №3 – 2025.

2. IEEE/IEC 60255-118-1-2018 - Measuring relays and protection equipment - Part 118-1: Synchrophasor for power systems – Measurements.

3. Use of Synchrophasor Measurements in Protective Relay Applications / IEEE Power & Energy Society Power System Relaying and Control Committee (PSRC). — 2013.

4. Ульянов Д.Н., Андреев П.И., Мартынов А.Н., Пискунов С.А., Плакидин Р.С., Сеитов П.В., Мокеев А.В. Автоматизация понизительных подстанций при использовании цифровых комбинированных трансформаторов тока и напряжения// Релейная защита и автоматизация. №1 – 2026, С. 32-45.

5. Karol Majer, Vaclav Prokop, Martin Celko. Smart medium voltage switchgear with LPITs and IEC 61850 – experiences after 10 years and the next evolution // IET Conference Proceedings Volume 2025, Issue 14.

6. Loukkalahti M., Majer K., Valtari J. 'Experiences on the Kalasatama Digital substation'. PAC World EU, Athens, Greece, June 2024, pp. 1-9.

Авторы:

Мартынов Андрей Николаевич, аспирант 1го курса САФУ, направление подготовки электротехнические системы и комплексы, ведущий инженер отдела технической поддержки ООО «Инженерный центр «Энергосервис», В 2014 г. окончил САФУ, специальность «Электроснабжение промышленных предприятий», amartunov@ens.ru.

Мокеев Алексей Владимирович, сведения об авторе приведены на стр. 54.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СИНХРОВЕКТОРА ОПТИМАЛЬНЫМ НЕАДАПТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ

Федотов Д.А., ООО НПП «ЭКРА», ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, Россия.
E-mail: fedotov_da@ekra.ru.

Антонов В.И., ООО НПП «ЭКРА», ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, Россия.
E-mail: antonov_vi@ekra.ru.

Дони Н.А., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.
E-mail: doni_na@ekra.ru.

Бычков А.В., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.
E-mail: bychkov_av@ekra.ru.

Аннотация: Рассмотрены особенности применения оптимального неадаптивного фильтра ортогональных составляющих в устройствах синхронизированных векторных измерений. Генеральное свойство ортогональных составляющих гармоника устанавливает возможность представления гармоника в ортогональном базисе сигналов любой базисной частоты. Принцип оптимальной оценки ортогональных составляющих, составляющий основу большинства фильтров устройств синхронизированных векторных измерений, в том числе и классического фильтра Фурье, исходит из положения, что оценки ортогональных составляющих неизменны на всем окне оценивания, что входит в противоречие с генеральным свойством. Это противоречие является причиной появления в оценках ортогональных составляющих колебаний суммарной частоты, приводя в итоге к ухудшению точности измерения синхровекторов. В работе предлагаются модифицированные условия оптимальности оценки ортогональных составляющих, предусматривающие специальный оператор заграждения составляющей суммарной частоты в самом критерии оптимальности. Требуемую стандартом точность измерения синхровекторов во всем диапазоне нормируемых частот (45...55 Гц) удастся обеспечить уже оператором заграждения 4-го порядка.

Ключевые слова: оптимальные оценки ортогональных составляющих, синхронизированные векторные измерения.

Введение

Технология синхронизированных векторных измерений (СВИ) поддерживает измерение действующего значения $X = X_m / \sqrt{2}$ и фазы ψ гармонической электрической величины, представленной отсчетами

$$x(k) = X_m \cos(\omega k T_s + \psi),$$

в момент смены секунды всемирного координированного времени (Coordinated Universal Time – UTC). Промежуточные моменты измерения синхровектора между секундами UTC обеспечиваются самим устройством синхронизированных векторных измерений (УСВИ).

Отметим, что сам принцип измерения синхровектора имеет присущие ему методологические особенности.

Особенности теории измерения синхровектора

Первая особенность принципа измерения синхровектора связана с генеральным свойством ортогональных составляющих, подразумевающим возможность представления гармоник в ортогональном базисе гармонических сигналов любой частоты ω_b [1]:

$$x(k) = X_m \cos[(\omega_b + h\omega_b)kT_s + \psi] = c(k) \cos(\omega_b kT_s) - s(k) \sin(\omega_b kT_s), \quad (1)$$

в релейной защите сигналы

$$c(k) = X_m \cos(h\omega_b kT_s + \psi), \quad (2)$$

$$s(k) = X_m \sin(h\omega_b kT_s + \psi) \quad (3)$$

получили название ортогональных составляющих.

Как известно, при любой базисной частоте ω_b ортогональные составляющие $c(k)$ и $s(k)$, определяющие амплитуду

$$X_m(k) = \sqrt{c^2(k) + s^2(k)} = X_m \quad (4)$$

и фазу

$$\psi(k) = \arctg \frac{s(k)}{c(k)} = \psi + h\omega_b kT_s, \quad (5)$$

изменяются во времени гармонически с разностной частотой $h\omega_b$.

Непосредственно из (5) следует, что аргумент $\psi(k)$ синхровектора

$$\underline{X}(k) = X e^{j\psi(k)}$$

теоретически будет разным в каждый дискретный момент $t_k = kT_s$, изменяясь линейно во времени со скоростью $h\omega_b$ [2].

Особенность реализации принципа измерения

Следующая особенность технологии измерения синхровектора заключается в самой постановке задачи оценки ортогональных составляющих (2) и (3).

На первый взгляд модель сигнала

$$\hat{x}(k) = \hat{c}(k) \cos(\omega_b k T_s) - \hat{s}(k) \sin(\omega_b k T_s) \quad (6)$$

в точности согласована с генеральным свойством ортогональных составляющих $c(k)$ и $s(k)$ гармоники (1). Но дело в том, что оценки ортогональных составляющих $\hat{c}(k)$ и $\hat{s}(k)$ модели (6), определяемые для текущего момента времени k , принимаются неизменными на всем окне оценивания. При согласованности частот гармоники и ортогонального базиса ортогональные составляющие (2) и (3) не меняются во времени, и поэтому принятое предположение о неизменности их оценок полностью верно и дает теоретически правильное решение. Но при девиации частоты, когда $h\omega_b \neq 0$, это предположение создает условие для появления методической погрешности в оценке ортогональных составляющих.

Например, при оценивании ортогональных составляющих модели (6) методом наименьших квадратов, как, например, в классическом фильтре Фурье, принятое предположение приводит к появлению в них колебаний суммарной частоты $(2+h)\omega_b$.

Поскольку задача оценивания ортогональных составляющих в этом случае формулируется как задача оптимизации критерия

$$E(k) = \min_{\hat{c}(k), \hat{s}(k)} \sum_{i=k-(L-1)}^k e^2(i), \quad (7)$$

то причину появления суммарной гармоники нужно искать в структуре системы нормальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial E(k)}{\partial c} = -2 \sum_{i=k-(L-1)}^k e(i) \cos(i\omega_b T_s) = 0, \\ \frac{\partial E(k)}{\partial s} = 2 \sum_{i=k-(L-1)}^k e(i) \sin(i\omega_b T_s) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

На деле, это свойство системы (8) следует непосредственно из предположения о постоянстве оценок $\hat{c}(k)$ и $\hat{s}(k)$ на окне оценивания, и при девиации частоты она проявляет себя в классическом фильтре Фурье как побочный эффект корреляции

входного сигнала с соответствующим сигналом ортогонального базиса.

Этот эффект присутствует в ортогональных составляющих

$$\hat{c}(k) = H_{\Delta} X_m \cos(h\omega_b kT_s + \psi + \varphi_{\Delta}) + H_{\Sigma} X_m \cos[(2+h)\omega_b kT_s + \psi + \varphi_{\Sigma}], \quad (9)$$

$$\hat{s}(k) = H_{\Delta} X_m \sin(h\omega_b kT_s + \psi + \varphi_{\Delta}) - H_{\Sigma} X_m \sin[(2+h)\omega_b kT_s + \psi + \varphi_{\Sigma}] \quad (10)$$

в виде побочной составляющей суммарной частоты $(2+h)\omega_b$, неполное ограждение которой оператором суммирования (фильтром скользящего среднего – ФСС) приводит к появлению в оценках амплитуды (4) и фазы (5) составляющих уже двойной частоты входного сигнала $2(h+1)\omega_b$; здесь H_{Δ} , H_{Σ} и φ_{Δ} , φ_{Σ} – коэффициенты передачи амплитуд и сдвиги фаз, вносимые оператором суммирования в составляющие разностной и суммарной частот соответственно.

В предельном случае, когда влияние суммарной составляющей исключено, получим следующие оценки амплитуды

$$\hat{X}_m(k) = H_{\Delta} X_m \quad (11)$$

и фазы

$$\hat{\psi}(k) = \psi(k) + \varphi_{\Delta}, \quad (12)$$

имеющие смещение, зависящее в каждом случае от частотной характеристики ФСС на разностной частоте.

При известной частоте сигнала погрешности в оценках амплитуды (11) и фазы (12), вызванные частотной характеристикой ФСС, могут быть устранены путем коррекции оценок [3], но значительное влияние на точность измерения синхровектора составляющей суммарной частоты остается даже после работы ФСС (рис. 1) [3, 4].

В частности, при нормируемом стандартом [5] максимальном отклонении частоты гармоники от номинального значения на 5 Гц ошибка измерения фазы достигает 3° , что значительно превышает нормируемое значение $0,1^{\circ}$ (рис. 2).

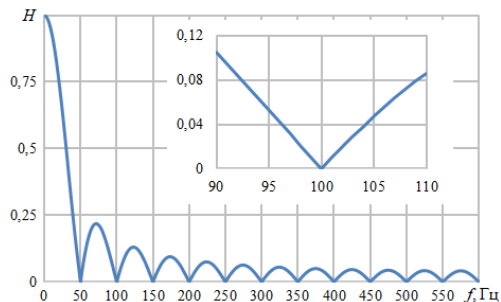


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика фильтра скользящего среднего полнопериодного окна данных при частоте дискретизации 1200 Гц

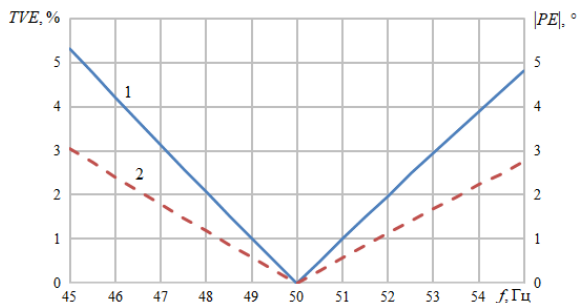


Рис. 2. Максимальные значения полной векторной погрешности измерения TVE (кривая 1) и абсолютной погрешности измерения фазы PE (кривая 2) синхровекторов гармоник с частотами в диапазоне 45...55 Гц классическим фильтром Фурье

Усиление заградительных свойств оптимального фильтра

Проблема недостаточного заграждения составляющей суммарной частоты оператором суммирования может быть решена путем внедрения в оптимальный фильтр специального заграждающего оператора $P_n\{\cdot\}$, переформулируя критерий оптимизации (7)

$$W(k) = \min_{\hat{c}^{(k)}, \hat{s}^{(k)}} \sum_{i=k-(L-1)}^k P_n\{e^2(i)\}.$$

В качестве иллюстрации возможностей нашего предложения

в работе используется оператор заграждения

$$P_4 \{e^2(k)\} = e^2(k) - 2[\cos(596,903T_s) + \cos(659,73T_s)] [e^2(k-1) + e^2(k-3)] + \\ + 2[1 + 2\cos(596,903T_s)\cos(659,73T_s)] e^2(k-2) + e^2(k-4),$$

представляющий собой каскадно соединенные канонические фильтры заграждения составляющих частот 95 и 105 Гц.

Выражения для оценок ортогональных составляющих

$$\hat{c}(k) = H_\Delta H_{P\Delta} X_m \cos(h\omega_b k T_s + \psi + \varphi_\Delta + \varphi_{P\Delta}) + \\ + H_\Sigma H_{P\Sigma} X_m \cos[(2+h)\omega_b k T_s + \psi + \varphi_\Sigma + \varphi_{P\Sigma}], \\ \hat{s}(k) = H_\Delta H_{P\Delta} X_m \sin(h\omega_b k T_s + \psi + \varphi_\Delta + \varphi_{P\Delta}) - \\ - H_\Sigma H_{P\Sigma} X_m \sin[(2+h)\omega_b k T_s + \psi + \varphi_\Sigma + \varphi_{P\Sigma}]$$

по сравнению с оценками классического фильтра Фурье (9) и (10) учитывают усиление заграждения составляющей суммарной частоты оператором $P_n\{\cdot\}$; здесь $H_{P\Delta}$, $H_{P\Sigma}$ и $\varphi_{P\Delta}$, $\varphi_{P\Sigma}$ – коэффициенты передачи амплитуд и сдвиги фаз, вносимые заграждающим оператором в составляющие разностной и суммарной частот соответственно.

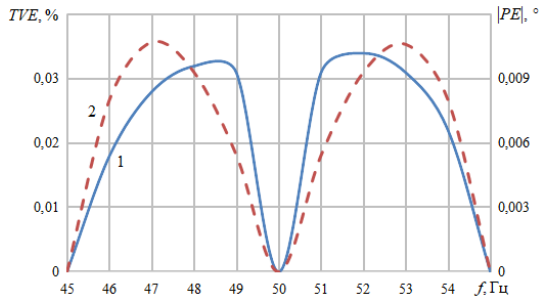


Рис. 3 – Максимальные значения полной векторной погрешности измерения TVE (кривая 1) и абсолютной погрешности измерения фазы PE (кривая 2) синхровекторов гармоник с частотами в диапазоне 45...55 Гц классическим фильтром Фурье с каскадно соединенными каноническими фильтрами заграждения составляющих частот 95 и 105 Гц

Применение оператора $P_n\{\cdot\}$ обеспечивает требуемую

точность измерения параметров синхровектора (рис. 3): абсолютное значение погрешности измерения фазы (PE) снижается до $0,011^\circ$ (при допустимом значении $0,1^\circ$), а полная векторная погрешность измерения (TVE) – величина, учитывающая одновременно ошибку модуля и фазы синхровектора – до $0,034\%$ (при допустимом значении 1%).

Заключение

Практически все варианты реализации фильтра Фурье следуют генеральному свойству ортогональных составляющих гармоники и основаны на их оптимальной оценке. В силу особенности принципа оценки полагается, что оценки ортогональных составляющих неизменны на всем окне оценивания, что входит в противоречие с генеральным свойством. Это противоречие проявляется в появлении в оценках ортогональных составляющих составляющей суммарной частоты, приводя к превышению погрешностями измерений нормируемых стандартом значений как по полной векторной погрешности измерения TVE , так и по погрешности измерения фазы PE .

В работе предлагается переформулировать условия оптимальности оценки ортогональных составляющих, предусматривая специальный оператор заграждения составляющей суммарной частоты в самом критерии оптимальности.

Новый фильтр удовлетворяет требованиям стандарта по точности измерения синхровекторов во всем диапазоне нормируемых стандартом частот ($45...55$ Гц): абсолютное значение PE достигает $0,011^\circ$ (при допустимом значении $0,1^\circ$), а TVE – $0,034\%$ (при допустимом значении 1%).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов В.И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – 334 с.
2. Федотов Д.А., Антонов В.И., Дони Н.А., Мокеев А.В., Бычков А.В., Дмитренко А.М. Особенности тестирования устройств

синхронизированных векторных измерений в асинхронном режиме энергосистемы // *Электротехника*. – 2025. – № 8. – С. 42-49.

3. *Федотов Д.А., Бычков А.В., Дони Н.А., Дмитриев О.В.* Обеспечение точности измерения синхровектора в устройстве синхронизированных векторных измерений Р-класса // *Вестник Чувашского университета*. – 2024. – № 2. – С. 160-170.

4. *Ульянов Д.Н., Мокеев А.В., Пискунов С.А., Андреев П.И.* Цифровые комбинированные трансформаторы тока и напряжения с поддержкой синхронизированных векторных измерений / // *Релейная защита и автоматизация*. – 2025. – № 3 (60). – С. 12-21.

5. *ГОСТ Р 59365-2021*. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Система мониторинга переходных режимов. Устройства синхронизированных векторных измерений. Нормы и требования.

Авторы:

Федотов Дмитрий Алексеевич, аспирант кафедры ТОЭ и РЗА ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», инженер департамента систем РЗА ООО НПП «ЭКРА». В 2022 году окончил Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. E-mail: fedotov_da@ekra.ru.

Антонов Владислав Иванович, сведения об авторе приведены на стр. 35.

Дони Николай Анатольевич, директор по науке, директор департамента систем РЗА ООО НПП «ЭКРА», кандидат технических наук, старший научный сотрудник. В 1969 году окончил Новочеркасский политехнический институт. В 1981 году защитил диссертацию «Исследование и разработка высокочастотной защиты линий сверхвысокого напряжения». E-mail: doni_na@ekra.ru.

Бычков Анатолий Владимирович, руководитель группы научного сопровождения продукции департамента систем РЗА ООО НПП «ЭКРА», кандидат технических наук. В 2007 году окончил Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. В 2022 году защитил диссертацию «Система активного дистанционного виброконтроля электрооборудования на основе цифровой обработки ультразвуковых сигналов». E-mail: bychkov_av@ekra.ru.

МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ НАСТРОЙКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Бондаренко Н.А., АО «Россети Научно-технический центр», Москва, Россия. E-mail: nickolaaa@inbox.ru

Кибовский Г.Е., НИУ «МЭИ», Москва, Россия. E-mail: kibgr@yandex.ru

***Аннотация:** Синхронный генератор представляет собой нелинейный динамический объект, функционирующий в условиях переменной нагрузки и внешних возмущений. Фиксированные коэффициенты регулятора не обеспечивают оптимальное качество регулирования во всём диапазоне режимов. В работе дается обзор применения методов искусственного интеллекта в задачах настройки автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов при различных схемно-режимных ситуациях.*

***Ключевые слова:** автоматический регулятор, нестационарные условия работы, адаптивная настройка, искусственный интеллект*

Введение

Автоматический регулятор возбуждения (АРВ) является ключевым элементом системы управления синхронного генератора и предназначен для поддержания заданного уровня напряжения на его выводах за счёт регулирования тока возбуждения. Качество работы АРВ напрямую влияет на устойчивость энергосистемы, демпфирование электромеханических колебаний и надёжность электроснабжения [1, 2].

В промышленной практике традиционно применяются ПИД-регуляторы, параметры которых определяются эмпирическими или частотно-временными методами. Однако синхронный генератор представляет собой нелинейный динамический объект, функционирующий в условиях переменной нагрузки и внешних возмущений. Фиксированные

коэффициенты регулятора не обеспечивают оптимальное качество регулирования во всём диапазоне режимов [2, 3]. В условиях усложнения структуры энергосистем и роста требований к быстродействию актуальной становится задача разработки адаптивных методов настройки АРВ.

Перспективным направлением является применение методов искусственного интеллекта (ИИ), позволяющих учитывать нелинейность объекта, неопределённость параметров и изменимость режимов работы.

Обзор методов ИИ для настройки АРВ

1. Искусственные нейронные сети

Использование нейронных сетей позволяет аппроксимировать нелинейные зависимости между параметрами состояния генератора и управляющим воздействием. В задачах АРВ они могут формировать сигнал возбуждения или выполнять идентификацию параметров объекта. Основным достоинством данного метода является способность к обучению на экспериментальных данных и высокая точность аппроксимации.

Настройка регуляторов с использованием нейронных сетей имеет ряд недостатков, такие как: необходимость формирования обучающей выборки, вычислительная сложность и ограниченная интерпретируемость результатов [3].

2. Нечеткая логика

Нечеткие регуляторы строятся на основе лингвистических правил типа «если – то» и позволяют учитывать экспертные знания без точной математической модели генератора. Они обеспечивают устойчивость к неопределённостям и нелинейностям объекта управления [4].

Ожидаемым преимуществом данного метода настройки регулятора является сокращение времени стабилизации напряжения по сравнению с классическим ПИД-регулятором [4].

Основными ограничениями являются необходимость настройки функций принадлежности и базы правил, а также отсутствие автоматической адаптации без дополнительных алгоритмов оптимизации.

3. Нейро-нечеткие системы (ANFIS)

Архитектура ANFIS представляет собой нейронную сеть,

объединяющую преимущества нейронных сетей и нечеткой логики. Параметры нечеткой системы настраиваются автоматически в процессе обучения. Это позволяет повысить адаптивность и улучшить переходные характеристики системы управления [5, 6].

Недостатком является усложнение структуры регулятора и рост вычислительных затрат, что требует тщательной валидации перед промышленным внедрением [5].

Реальный опыт применения

Современные исследования демонстрируют эффективность гибридных подходов. Например, применение нечеткого регулятора с оптимизацией параметров методом роя частиц позволяет улучшить показатели времени установления и уменьшить перерегулирование при различных уровнях нагрузки [6].

Адаптивные нечеткие ПИД-регуляторы реализуют самонастройку коэффициентов в процессе работы генератора, что повышает робастность системы к изменению режима [7].

Нейро-нечеткие системы (ANFIS) используются как самостоятельные регуляторы возбуждения и показывают улучшение динамических характеристик по сравнению с классическими ПИД-регуляторами [8].

Практическая проверка интеллектуальных алгоритмов выполняется с применением цифровых симуляторов энергосистем в реальном времени (RTDS), что позволяет моделировать аварийные возмущения и проводить сертификационные испытания настроек [1].

Для практического применения наиболее перспективен гибридный подход, заключающийся в сохранении классической структуры АРВ как основного регулятора и использовании методов ИИ для адаптивного параметрирования.

Архитектура гибридной системы адаптивной настройки АРВ представлена на рис. 1.



Рис. 1. Архитектура гибридной системы АВР

Заключение

Применение методов искусственного интеллекта в задачах настройки автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов является перспективным направлением развития систем возбуждения. Интеллектуальные методы обеспечивают повышение адаптивности, улучшение динамических характеристик и устойчивости по сравнению с традиционными решениями.

Наиболее эффективными являются гибридные системы, сочетающие классические структуры регуляторов с алгоритмами обучения или оптимизации. При этом для промышленного внедрения требуется дальнейшая формализация критериев устойчивости, снижение вычислительной сложности и стандартизация процедур испытаний.

Развитие цифровых моделей энергосистем и технологий интеллектуального управления открывает возможности для создания адаптивных и робастных систем возбуждения нового поколения, способных обеспечить надёжную работу синхронных генераторов при различных схемно-режимных ситуациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Канафеев Р.И., Журнов А.Д., Климова Т.Г.* Оптимальная настройка автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов // Проблемы энергетики. – 2016. – №11–12. – С. 77–84.

2. *Аскаргов А.Б., Андреев М.В., Чикишев Е.М., Суворов А.А., Рудник В.Е.* Современные направления развития систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов электростанций // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – №39. – С. 54–74.

3. *Memon A.P., Uqaili M.A., Memon Z.A., Tanwani N.K.* Suitable Feedforward Artificial Neural Network Automatic Voltage Regulator for Excitation Control System // Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering. – 2014. – Vol. 2, No. 2. – P. 45–51.

4. *Shouran M., Alenezi M.* Automatic Voltage Regulator Betterment Based on a New Fuzzy FOPI+FOPD Tuned by TLBO // Fractal and Fractional. – 2025. – Vol. 9. – No. 21.

5. *Алиев А.* Гибридная нейро-нечеткая система АВР для устойчивости энергосистемы // Экономика и социум. – 2025. – №6(133). – С. 1166–1170.

6. *Lawal M.J., Hussein S.U., Saka B., Abubakar S.U., Attah I.S.* Intelligent Fuzzy-Based Automatic Voltage Regulator with Hybrid Optimization Learning Method // Scientific African. – 2023. – Vol. 19. – e01573.

7. *Седойкин Д.Н., Юрганов А.А.* Эффективность адаптивного АВР на основе нечеткого аппроксиматора при работе синхронного генератора в сложной энергосистеме // Наука. – 2018. – №2. – С. 30–34.

8. *Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В.* Применение интеллектуальных технологий управления генераторными установками в системах электроснабжения нетяговых потребителей // Материалы научной конференции. – Братск. – 2020. – С. 368–372.

Авторы:

Бондаренко Николай Александрович, АО «Россети Научно-технический центр», специалист отдела ПА, 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (каф. РЗАиАЭ), НИУ «МЭИ», 2021-2025 гг., nickolaaa@inbox.ru.

Кибовский Григорий Евгеньевич, 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (каф. ЭЭС), НИУ «МЭИ», 2021-2025 гг., kibgr@yandex.ru.

АНАЛИЗ АРХИТЕКТУР НЕЙРОСЕТЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Аверьянов С.С., НГТУ, Новосибирск, Россия.

E-mail: sergey.s.averianov@gmail.ru.

Трофимов А.С., НГТУ, Новосибирск, Россия.

E-mail: a.trofimov@corp.nstu.ru

***Аннотация:** Исследование посвящено применению нейросетей (1D-CNN, ResNet) для идентификации пусковых режимов электродвигателей с целью временной блокировки максимальной токовой защиты. Это позволяет повысить её чувствительность, отказавшись от грубой отстройки от пусковых токов. Авторы анализируют встроенную и серверную архитектуры, подтверждая эффективность, но отмечают проблему интерпретируемости как барьер внедрения.*

***Ключевые слова:** релейная защита, нейронные сети, 1D CNN, классификация переходных процессов, МЭК 61850, пуск электродвигателя*

Введение

Цифровизация электроэнергетики, внедрение стандарта МЭК 61850 позволяют накапливать данные мгновенных значений токов и напряжений. Это создает основу для применения методов машинного обучения и нейронных сетей в релейной защите для улучшения ее характеристик. В частности, одной из актуальных задач является повышение чувствительности максимальной токовой защиты с помощью интеллектуального блокирующего органа, который работает на основании классификации переходных процессов. Однако несмотря на большое количество исследований в данной области [1-4], демонстрирующих потенциал методов нейросетевой классификации переходных процессов, большинство работ не освещают предполагаемую архитектуру обмена информацией между терминалом и алгоритмом классификации.

В статье решаются задачи анализа встроенной и серверной архитектур реализации классификатора на основе нейронной сети, разработанного с помощью 1D-CNN и ResNet соответственно. Оценивается вычислительная сложность,

временные задержки.

Материалы и методы

Исходные данные получены путем имитационного моделирования в среде PowerFactory. Рассматривался фрагмент сети с несколькими асинхронными двигателями, активной и нелинейной нагрузкой. Выборка мгновенных значений токов и напряжений составлена на основе множества реализации нормальных режимов, пусков двигателей и коротких замыканий. Амплитуды коротких замыканий сопоставимы с пусковыми токами. Частота дискретизации составила 4 кГц, что соответствует 80 отсчетов на период 50 Гц. Для анализа выборки использовался метод скользящего окна с длительностью 20 мс. Предложены два варианта реализации.

Встроенная архитектура, где нейросеть выполняется в терминале РЗА. В качестве примера микроконтроллера терминала рассмотрен ARM Cortex-M4. С учетом ограничений вычислительных ресурсов выбрана модель одномерной сверточной нейронной сети 1D-CNN с тремя сверточными слоями (16, 32, 32 фильтра, ядро 3) и двумя полносвязными слоями. С целью снижения вычислительной нагрузки было реализовано квантование весов INT8. Время вывода результата классификации составило менее 1 мс, а загрузка процессора не более 20%.

Серверная архитектура позволяет использовать более мощную модель ResNet, способную выявлять сложные нелинейные зависимости. Сеть размещается на выделенном сервере, путём подписки на SV-поток и возвращает блокирующий сигнал на терминал защиты посредством GOOSE-сообщения. Полная задержка цикла оценивается в 23-27 мс, что меньше выдержки времени максимальной токовой защиты. Подразумевается, что защита срабатывает по сниженной уставке, но при получении сигнала блокировки до истечения выдержки времени отключение не происходит.

Результаты

Общая точность классификации для встроенной модели составила 98,3%. Матрица ошибок (рис.1) показывает отсутствие

взаимных ошибок между классами «Пуск» и «КЗ» - ни одно КЗ не будет ошибочно идентифицировано как пуск.

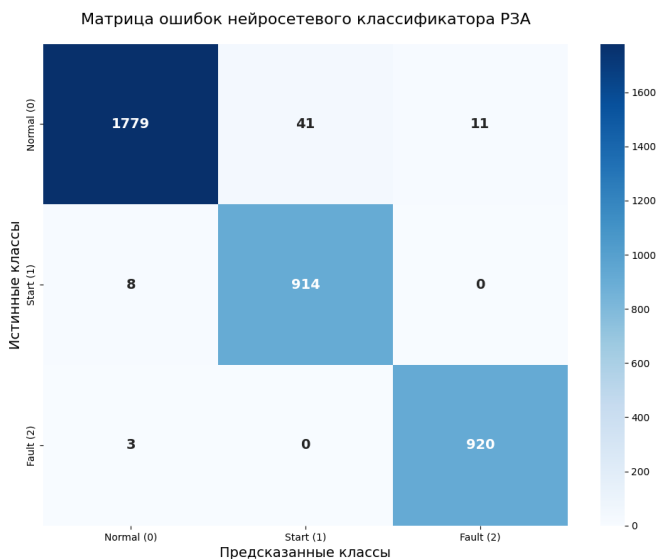


Рис. 1. Матрица ошибок встроенной архитектуры

Точность серверной модели составила 98,33 %. Критическая ошибка «Пуск→КЗ» также отсутствует, зафиксировано лишь 3 случая ошибочной классификации КЗ как нормального режима.

Заключение

Разработанный нейросетевой алгоритм классификации переходных процессов (норма, пуск, КЗ) может эффективно работать как в составе терминала РЗА (встроенная 1D-CNN), так и в серверном варианте на базе МЭЖ 61850. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку субцикловых моделей (окно <5 мс) для токовых отсечек, анализ методов интерпретации решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов А. Л. Применение нейросетевых алгоритмов при распознавании витковых замыканий в силовых трансформаторах / А. Л. Куликов, А. А. Лоскутов, А. Н. Совина // Материалы XII

Международной научно-технической конференции: в 2 ч. Ч. I. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева, 2022. – С. [187-190 с.]. – 272 с. – ISBN 978-5-502-01590-5. – УДК 621.31.

2. *Баширов М. Г.* Разработка учебно-исследовательского комплекса «Искусственный интеллект в системах управления, защиты и автоматики электрических сетей» / *М. Г. Баширов, Р. Г. Вильданов, Е. А. Исаев, А. А. Сабирьянова, Д. В. Фокин* // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2024. – Т. 17, № 9. – С. 91–99. – DOI: 10.32603/2071-8985-2024-17-9-91-99

3. *Степанова, Д. А.* Фундаментальные основы глубокого обучения в релейной защите / *Д. А. Степанова, В. А. Наумов, В. И. Антонов* // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности : материалы III Международной научно-технической конференции, Чебоксары, 2019 г. – Чебоксары, 2019. – С. 594-600.

4. *Kulikov A.* Relay Protection and Automation Algorithms of Electrical Networks Based on Simulation and Machine Learning Methods [Алгоритмы релейной защиты и автоматики электрических сетей на основе моделирования и методов машинного обучения] / *A. Kulikov, A. Loskutov, D. Bezduzhnyy* // Energies. – 2022. – Т. 15, № 18. – С. 6525. – DOI: 10.3390/en15186525

Авторы:

Аверьянов Сергей Сергеевич, НГТУ, аспирант, окончил НГТУ в 2023 году по специальности «Релейная защита» на факультете электрических станций, *sergey.s.averianov@gmail.ru*.

Трофимов Андрей Сергеевич, НГТУ, доцент кафедры «Электрических станций», окончил НГТУ в 2004 году по специальности «Автоматика энергетических систем», в 2010 присвоена ученая степень к.т.н. Тема кандидатской диссертации «Разработка методов и средств повышения надёжности релейной защиты электроэнергетических систем», *a.trofimov@corp.nstu.ru*.

КЛАССИФИКАЦИЯ ВНУТРЕННИХ И ВНЕШНИХ КЗ НА ЛЭП, ОТХОДЯЩИХ ОТ ВЭС, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕКУРРЕНТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Полыгалин И.С., ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. E-mail: *polygalin2003@yandex.ru*

Климова Т.Г., ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва,

Россия. E-mail: KlimovaTG@mpei.ru

Добрягина О.А., ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва,
Россия. E-mail: DobriaginaOA@mpei.ru

Максимов Р.С., ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва,
Россия. E-mail: maksimow.roma2018@yandex.ru

Романов Д.А., ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия.
E-mail: romanovda.nti@yandex.ru

***Аннотация:** В настоящее время активно внедряются объекты ВИЭ, в следствии чего надежность традиционных защиты ЛЭП снижается из-за особенностей протекания переходных процессов при возникновении внешних возмущений. Для таких энергосистем предлагается использовать рекуррентные нейронные сети (RNN) в качестве интеллектуальных алгоритмов классификации внутренних и внешних КЗ, на линия отходящих от ВЭС.*

***Ключевые слова:** рекуррентные нейронные сети, релейная защита, селективность, короткие замыкания, возобновляемые источники энергии.*

Введение

В электроэнергетических системах (ЭЭС) с высокой долей ветровых (ВЭС) и солнечных (СЭС) электростанций условия работы устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) существенно изменяются из-за применения генераторных установок с инвертором (ГУИ). Ограничение токов короткого замыкания (КЗ) со стороны ГУИ и изменение формы сигналов токов и напряжений снижают информативность традиционных признаков, используемых в классических алгоритмах РЗА. Вследствие этого возрастает вероятность ошибок при классификации внутренних и внешних КЗ на защищаемой линии.

Целью работы является разработка модели рекуррентной нейронной сети (RNN) для классификации аварийных режимов по временным рядам токов и напряжений, обеспечивающей высокую точность распознавания и возможность применения в режиме реального времени.

Подготовка набора обучающих данных

Исходные данные для обучения и тестирования моделей RNN сформированы на основе математической модели

энергосистемы, реализованной в программно-аппаратном комплексе реального времени (ПАК РВ) RTDS. Схемы включает подстанцию с присоединением ветроэнергетических установок (ВЭУ) типа 4 с суммарной установленной мощностью 150 МВт, силовые трансформаторы и линии электропередачи с энергосистемой (рисунок 1).

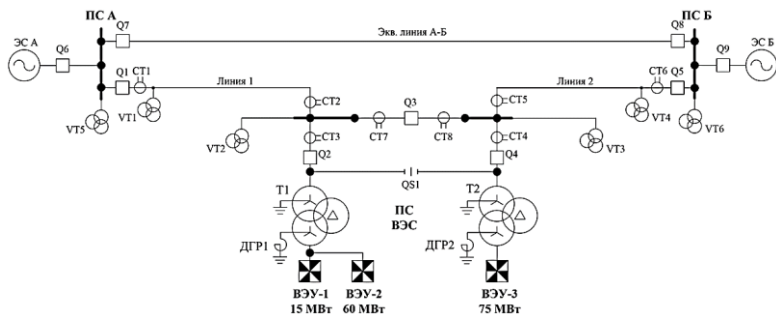


Рис. 1. Исследуемая электрическая сеть

При формировании набора данных варьировались тип КЗ, положение точки КЗ, момент возникновения аварии, а также режим генерации, что позволило учесть изменение структуры аварийных сигналов в различных режимах работы сети. Регистрация осциллограмм выполнялась с частотой дискретизации 4000 Гц по фазным токам с обеих сторон защищаемой линии и фазным напряжениям подстанций. Экспорт данных производился в формате COMTRADE [1] с последующим преобразованием файлов в CSV для предобработки и обучения моделей. В результате сформирован набор из 600 осциллограмм, включающий 300 внутренних и 300 внешних коротких замыканий. Каждая осциллограмма состояла из предаварийного и аварийного режимов, что обеспечивало фиксацию динамики переходного процесса.

Выбор архитектуры и обучение моделей

В работе исследованы архитектуры рекуррентных нейронных сетей SimpleRNN, LSTM, GRU и Bidirectional LSTM. Обучение выполнялось в среде TensorFlow/Keras с использованием оптимизатора Adam, функции потерь

categorical_crossentropy, регуляризации Dropout и механизма ранней остановки по валидационной ошибке.

Для подачи данных на вход нейронных сетей применялось оконное представление сигналов длиной 50 отсчётов, что соответствует 12,5 мс при выбранной частоте дискретизации. Предобработка включала нормализацию признаков и кодирование целевых классов, а разбиение выборки на обучающую, валидационную и тестовую части выполнялось в соотношении 70/15/15 по полученным осциллограммам. Такой подход исключал попадание фрагментов одного и того же переходного процесса одновременно в разные части выборки и обеспечивал корректную оценку обобщающей способности моделей.

Сравнение результатов показало, что наилучшие показатели обеспечивает архитектура LSTM. Для данной модели получены значения точности accuracy=99,92%, потеря loss=0,0051, macro-F1=0,9990 и ROC-AUC=1,000. Дополнительная оценка по регрессионным метрикам показала RMSE=0,0047, R²=0,996 и MAE=0,0010, что соответствует минимальному отклонению вероятностных предсказаний от истинной разметки классов.

Практическая применимость алгоритма для задач релейной защиты оценивалась по времени инференса. Первичное тестирование в стандартной среде TensorFlow показало время обработки порядка 90-110 мс для LSTM-модели, что не удовлетворяет требованиям быстродействия микропроцессорных терминалов защиты. После оптимизации и конвертации модели в формат TensorFlow Lite время определения типа КЗ снизилось до 9,2 мс без ухудшения точности классификации. Полученный результат показывает возможность использования обученной модели в составе быстродействующих интеллектуальных алгоритмов РЗА.

Заключение

Разработанная модель LSTM-сети обеспечивает классификацию внутренних и внешних КЗ на линиях электропередачи, подключённых к ВЭС, с высокой точностью и требуемым быстродействием. По совокупности метрик качества и времени обработки архитектура LSTM превосходит остальные

исследованные рекуррентные модели. Полученные результаты подтверждают возможность применения предложенного подхода в составе интеллектуальных алгоритмов цифровой РЗА и автоматизированного анализа аварийных осциллограмм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEEE Std C37.111-2013 (IEC 60255-24:2013). Measuring relays and protection equipment. Part 24: Common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems. – IEEE/IEC dual logo standard. – New York: IEEE, 2013.

Авторы:

Полыгалин Иван Сергеевич, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», магистрант 2 курса кафедры РЗАЭ, polygalin2003@yandex.ru

Климова Татьяна Георгиевна, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кандидат технических наук, доцент кафедры РЗАЭ, KlimovaTG@tpei.ru

Добрягина Ольга Александровна, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кандидат технических наук, доцент кафедры РЗАЭ, DobriaginaOA@tpei.ru

Максимов Роман Сергеевич, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», старший преподаватель кафедры РЗАЭ, maksimow.roma2018@yandex.ru

Романов Дмитрий Алексеевич, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», магистрант 2 курса кафедры РЗАЭ, romanovda.nti@yandex.ru

РАЗРАБОТКА СПОСОБА РАСПОЗНАВАНИЯ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ 6-10 КВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Галанин И.А., ОА «Радиус Автоматика», г. Иваново, Россия. E-mail: galanin@rza.ru

Шадрикова Т.Ю., ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Россия. E-mail: rza@rza.ispu.ru

Аннотация: Разработан способ распознавания разновидностей

однофазных замыканий на землю (устойчивых, дуговых перемежающихся, кратковременных самоустраняющихся ОЗЗ) в кабельных сетях 6–10 кВ на основе искусственной нейронной сети. Предложенный алгоритм использует параметры переходного процесса для распознавания ОЗЗ. Показана эффективность использования нейронной сети для задач релейной защиты.

Ключевые слова: *однофазные замыкания на землю, кабельная сеть, нейронная сеть, распределительные сети*

Введение

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) — наиболее распространённый вид повреждений в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью (до 90% от общего числе электрических повреждений) [1, 2]. Различают следующие разновидности ОЗЗ: устойчивые (могут приводить к локальным перегревам изоляции кабеля, ее деградации и переходу замыкания на землю в междуфазное КЗ), дуговые перемежающиеся (наиболее опасные перенапряжениями на неповрежденных фазах во всей электрически связанной сети), дуговые прерывистые (опасные термическим действием длительно тока ОЗЗ при его длительном протекании) и кратковременные самоустраняющиеся ОЗЗ (относительно безопасные, их своевременная фиксация необходима для диагностирования состояния изоляции) [3 - 5]. Селективная защита от ОЗЗ должна распознавать разновидности ОЗЗ, чтобы в зависимости от степени их опасности действовать на сигнал, отключение или на запоминание числа пробоев изоляции.

Традиционные принципы выполнения защиты и локации ОЗЗ (на основе составляющей основной частоты 50 Гц тока нулевой последовательности $3i_0$, на основе высших гармоник тока $3i_0$, импульсные направленные защиты на основе электрических величин переходного процесса при ОЗЗ) не обладают способностью распознавать различные виды замыканий на землю [1-3]. Перспективным инструментом для разработки способа распознавания разновидностей ОЗЗ является применение искусственных нейронных сетей (ИНС).

Автоматизированная модель электрической сети 6–10 кВ для обучения и тестирования ИНС

Для разработки способа распознавания разновидностей ОЗЗ на основе ИНС разработана автоматизированная имитационная модель кабельной сети 6–10 кВ с изолированной нейтралью с варьируемыми параметрами в среде Simulink программного комплекса Matlab. Модель сети по рис. 1 включает в себя трехфазную питающую систему 6–10 кВ, от шин которой отходит поврежденное присоединение, состоящее из 2 участков кабельной линии (КЛ) (до и после места ОЗЗ) на основе Т-образной схемы замещения и трехфазной симметричной нагрузки, а также эквивалентную внешнюю сеть с суммарным емкостным током сети I_{CX} . Параметры схемы замещения КЛ рассчитаны по скорости распространения электромагнитной волны в контуре нулевой последовательности [5].

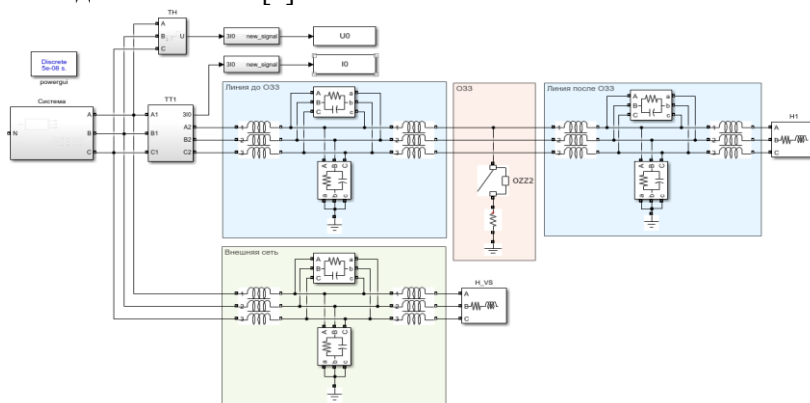


Рис. 1. Схема исследуемой сети в среде Simulink Matlab

Для измерения электрических параметров в схеме сети по рис. 1 используется модель кабельного трансформатора тока (ТТНП) и трансформатора напряжения нулевой последовательности (ТННП). Вторичные токи ТТНП и напряжение ТННП подаются на вход модели аналогового тракта микропроцессорного терминала с частотой дискретизации 8000 Гц (принята как в большинстве терминалов релейной защиты).

Искусственные нейронные сети для распознавания разновидностей ОЗЗ

Для разработки способа распознавания разновидностей ОЗЗ в рассматриваемых сетях выбрана комбинация полносвязной нейронной сети прямого распространения (MLP) и рекуррентной нейронной сети с длительной краткосрочной памятью Long Short-Term Memory (LSTM). ИНС архитектуры LSTM эффективно анализирует временные ряды, выделяет долгосрочные зависимости, подавляет шум и адаптируется к изменяющимся условиям [6, 7]. LSTM позволяет в реальном времени классифицировать все виды ОЗЗ для предупреждающей диагностики и выбора способа действия защиты. MLP на основе модулей нормализованных сигналов тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$ в скользящем окне рассчитывает значение одного входного параметра для LSTM сети. LSTM в онлайн режиме, то есть каждый раз при поступлении нового отсчета тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$, классифицирует текущий режим: без замыкания на землю, устойчивые, дуговые перемежающиеся, дуговые прерывистые, кратковременные самоустраивающиеся ОЗЗ. LSTM рекуррентная нейронная сеть имеет 32 скрытых состояния, на основе которых и значения MLP в онлайн режиме классифицирует режим и новые значения скрытых состояний.

Перед подачей в ИНС сигналы нормализовались таким образом, чтобы их значения находились в диапазоне от 0 до 1. Это позволяет алгоритму распознавания не зависеть от колебаний напряжения и суммарного емкостного тока сети. Для нормализации сигнала тока определялось максимальное значение тока $3i_0$ при первом пробое; все последующие отсчеты тока делятся на удвоенное значение первого максимума. Для нормализации сигнала напряжения $3u_0$ все значения делятся на максимальное мгновенное значение измерительного канала.

На вход полносвязной ИНС подаются нормализованные сигналы тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$ за один период промышленной частоты 50 Гц, 160 отчетов каждого сигнала.

Для получения обучающей выборки ИНС варьировались следующие параметры модели электрической сети: ток трехфазного КЗ на шинах системы (от 5 до 10 кА), номинальное

напряжение сети (6 и 10 кВ), суммарный емкостный ток сети ($I_{с\sum}=7-30$ А), параметры КЛ (сечение – 120 мм² и 240 мм²; длина – 200 м – 5 км), удаленность ОЗЗ от шин (от 10% до 90% км), разновидность ОЗЗ. Полученный набор данных разделен на обучающую (80%) и валидационную (20%) выборки для тестирования во время обучения.

В процессе обучения оценивались показатели точности на обучающем и валидационном наборе данных:

- категориальная перекрестная энтропия *loss*, которая измеряет разницу между вероятностным распределением, предсказанным моделью, и истинным распределением меток;
- точность *acc*.

Показатели точности на обучающем и валидационном наборе данных в конце обучения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Показатели качества в конце обучения

Набор данных	<i>Loss, o.e.</i>	<i>Acc, %</i>
Обучающий	0,2657	89,80
Валидационный	0,2262	91,28

Из таблицы 1 видно, что категориальная перекрестная энтропия имеет низкое значение, что говорит о высоком уровне уверенности алгоритма о прогнозируемом классе. Точность распознавания составляет порядка 90% как на обучающей наборе, так и на валидационном, что говорит о хорошей способности алгоритма справляться с неизвестными данными.

Заключение

Разработана и обучена ИНС для распознавания разновидностей ОЗЗ – устойчивых, дуговых перемежающиеся, дуговых прерывистых и кратковременных самоустраниющихся в кабельных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью. Расчет на валидационном наборе данных переобучения ИНС не выявил. На основе обученной ИНС разработан способ распознавания ОЗЗ в кабельных распределительных сетях 6-10 кВ для выбора способа действия защиты от данного вида повреждений в зависимости от степени их опасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 3(33).

2. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс». – 2001. – 104 с.

3. Savelev V.A., Filatova G.A., Shadrikova T.Yu., Tyutikov V.V., Shuin V.A. Determining remote ground fault location in a 6- to 10-kV cable line using its models // Russian Electrical Engineering. – 2023. – Т. 94. – № 1. – С. 62–70.

4. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.

5. Шуин В.А., Кутумов Ю.Д., Кузьмина Н.В., Шадрикова Т.Ю. Выбор параметров моделей воздушных линий для расчетов переходных процессов при замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 5. – С. 5–17.

6. Minh N. Q. Fault classification and localization in power transmission line based on machine learning and combined CNN-LSTM models / N. Q. Minh [и др.] // Energy Reports. – 2024. – Vol. 12. – P. 5610–5623. – DOI: 10.1016/j.egyр.2024.04.078.

7. Yang C. Fault Detection and Classification of Power Lines Based on Bayes–LSTM–Attention / C. Yang [и др.] // Energies. – 2025. – Vol. 18, № 24. – P. 6483. – DOI: 10.3390/en18246483.

Авторы:

Галанин Иван Александрович, АО «РадиусАвтоматика», инженер, аспирант электроэнергетического факультета ИГЭУ, galanin@rza.ru.

Шадрикова Татьяна Юрьевна, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами ИГЭУ, rza@rza.ispu.ru

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В СИСТЕМАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МОБИЛЬНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ СЛОЖНЫХ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Пестряев Д.А., ООО «НПП «Динамика», Чебоксары, Россия. E-mail: pestryaev.da@gmail.com.

Шалимов А.С., ООО «НПП «Динамика», Чебоксары, Россия. E-mail: shalimov-alex@rambler.ru.

***Аннотация:** В докладе представлен мобильный программно-аппаратный комплекс (ПАК) реального времени на базе устройств РЕТОМ-51/61/71 и ПО «Цифровой двойник энергосистемы» (ЦДЭС). Описаны структура и функции ПАК для анализа устройств РЗА, верификации параметров срабатывания и оценки поведения защит в режимах, близких к аварийным.*

***Ключевые слова:** мобильный комплекс, цифровой двойник, испытательные устройства*

Введение

Предмет исследования работы – диагностика и испытания устройств РЗА в условиях усложнения режимов работы энергосистем. Общепринятые методы проверки, основанные на подаче испытательными комплексами идеализированных синусоидальных сигналов, позволяют оценить соответствие устройств паспортным данным, но не учитывают влияние электромагнитных переходных процессов: насыщения трансформаторов тока и воздействия высших гармоник. В указанных режимах поведение микропроцессорных терминалов может отличаться от ожидаемого вследствие особенностей алгоритмов цифровой обработки сигналов в устройствах РЗА различных производителей. Развитие технологий цифрового моделирования на базе ПО «Цифровой двойник энергосистемы» создает условия для генерации реалистичных тестовых воздействий. В статье решаются задачи разработки архитектуры

мобильного программно-аппаратного комплекса на базе РЕТОМ-51/61/71 и ЦДЭС, описания методики испытаний, демонстрации подходов к верификации параметров срабатывания и выявления особенностей работы защит в условиях, приближенных к реальным аварийным режимам.

Архитектура мобильного ПАК реального времени

Аппаратная основа мобильного ПАК представлена испытательными комплексами РЕТОМ-51/61/71. Указанные приборы ориентированы на тестирование сложных устройств РЗА, включая оборудование цифровых подстанций [1]. Их функциональные возможности обеспечивают воспроизведение осциллограмм аварийных процессов, сформированных в среде ЦДЭС.

Программное обеспечение (ПО) ЦДЭС представляет собой специализированный комплекс на базе персонального компьютера или сервера для моделирования энергосистем произвольной конфигурации. Библиотека моделей ЦДЭС включает трансформаторы тока с учетом насыщения, линии электропередачи, выключатели, силовые трансформаторы и другие элементы первичного оборудования. Комплекс обеспечивает расчет электромагнитных и электромеханических переходных процессов, позволяя воспроизводить различные аварийные режимы. Результаты моделирования экспортируются в формат COMTRADE для последующего использования в испытательных комплексах [2].

Функциональные возможности комплекса

Испытания проводятся в два этапа. На первом этапе в среде ЦДЭС выполняется моделирование энергосистемы для создания аварийного режима, соответствующего условиям эксплуатации проверяемого устройства РЗА.

Сформированный файл осциллограмм в формате COMTRADE, содержащий мгновенные значения токов и напряжений, передается в испытательный комплекс (рис. 1).

дает команду на отключение, выключатель не срабатывает, и одновременно запускается УРОВ, который формирует команду на отключение смежного выключателя. Фиксация временных интервалов позволяет оценить правильность настройки выдержек времени и отсутствие лишних срабатываний.

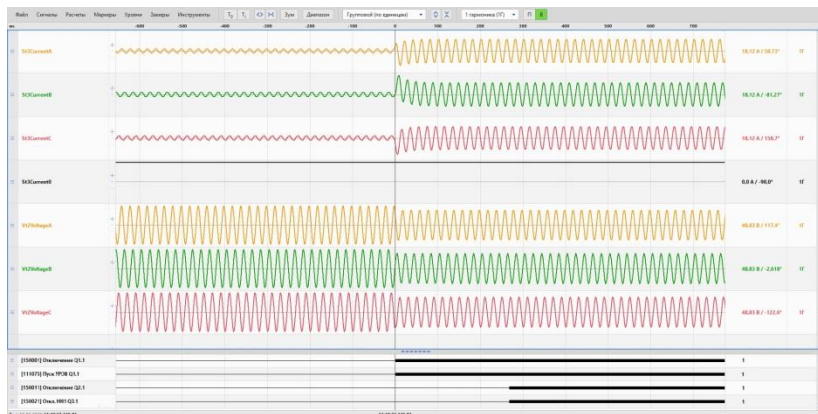


Рис. 2. Осциллограмма аварийного процесса

Выявленные в ходе испытаний несоответствия, такие как нарушение селективности, чувствительности и быстродействия, служат основанием для корректировки уставок и логики работы защит.

По завершении тестовых воздействий система в автоматическом режиме генерирует протокол, содержащий перечень проведенных опытов. Пример результатов, включающий значения токов и напряжений, зафиксированное время срабатывания и итоговое заключение о соответствии параметров заданным уставкам. Предусмотрена возможность использования как стандартных шаблонов, так и настраиваемых пользовательских форм.

Заключение

Архитектура мобильного ПАК обеспечивает моделирование аварийных режимов в ЦДЭС, экспорт осциллограмм в формат COMTRADE и их воспроизведение через приборы РЕТОМ-51/61/71 на проверяемые терминалы РЗА. Комплекс позволяет

верифицировать параметры срабатывания путем подачи граничных сигналов, выявлять особенности функционирования алгоритмов защиты в условиях насыщения трансформаторов тока и наличия высших гармоник, а также оценивать селективность при взаимодействии нескольких устройств. Дальнейшие исследования направлены на расширение библиотеки тестовых сценариев ЦДЭС и автоматизацию обработки результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплекс программно-технический измерительный РЕТОМ-71. Руководство по эксплуатации БРГА.441323.035 РЭ. Редакция 22.12.22. Чебоксары, 2022.

2. Волошин А.А., Волошин Е.А., Лебедев А.А., Лебедева Н.С. Архитектура программного-аппаратного комплекса «Цифровой двойник энергосистемы» // Электрические станции. 2023. № 10(1107). С. 37–41.

Авторы:

Пестряев Денис Алексеевич, ООО «НПП «Динамика», инженер-исследователь / ЧГУ им И.Н. Ульянова, аспирант, инженер-исследователь, в 2024 г. окончил факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И. Н. Ульянова, pestryaev.da@gmail.com.

Шалимов Александр Станиславович, ООО «НПП «Динамика», начальник отдела релейной защиты и автоматики, в 2005 г. окончил электротехнический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова, в 2022 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Совершенствование методов и технических средств проверки и настройки релейной защиты», shalimov-as@retom.ru.

ПРОБЛЕМЫ СОСТАВЛЕНИЯ ФИЗИЧНОЙ МОДЕЛИ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА

Самусик К.А., НТЦ ЕЭС, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: samusik-ka@ntcees.ru.

Синянский И.В., НТЦ ЕЭС, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: sinyanskiy-iv@ntcees.ru.

Попов С.О., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: popov_so@spbstu.ru.

Аннотация: При эксплуатации токовых релейных защит в последнее время все больше внимания уделяется проблеме насыщения трансформаторов тока при больших токах КЗ. В работе предложено решение этой проблемы за счет создания модели Прейзаха, способной с высокой степенью точности воспроизводить переходные процессы в ТТ в различных режимах работы, демонстрируется возможность повышения достоверности модели за счет учета вихревых токов в магнитопроводе ТТ, а также решение обратной задачи: воспроизведение первичного сигнала ТТ по вторичному.

Ключевые слова: трансформатор тока, цифровая модель, модель Прейзаха

Введение

Трансформаторы тока с замкнутым магнитным сердечником могут насыщаться при коротких замыканиях, что может приводить к некорректной работе релейной защиты. Создание и применение достоверной цифровой модели трансформатора тока позволяет воспроизвести переходные процессы при коротком замыкании и проверить работу защит до введения их в эксплуатацию. Для воспроизведения процесса насыщения трансформатора тока необходимо корректно моделировать процесс гистерезиса при переходном процессе. Большинство из существующих моделей способны воспроизвести эффект остаточной намагниченности и корректно работают на главной петле гистерезиса, однако при моделировании частных петель происходит нарушение правил Маделунга, что говорит о нефизичности их поведения. Модель Прейзаха более корректно отображает поведение гистерезисной петли, поскольку моделирует непосредственно поведение доменов сердечника, а не аналитически аппроксимирует движение кривой намагничивания.

Создание и апробирование модели Прейзаха

Теоретическое описание

Теория Прейзаха [3,4] рассматривает магнитный сердечник трансформатора как совокупность диполей (рис. 1), имеющих два дискретных состояния (1 и -1 по оси B), принимающих свое значение при достижении одного из значений по оси H (h_1 и h_2) в зависимости от направления изменения величины H .

Посредством распределения данных параметров между диполями возможно описать поведение магнитного сердечника с гистерезисом как функции напряженности магнитного поля [1]:

$$B(t) = \iint_S \mu(h_1, h_2) \gamma(h_1, h_2, H(t)) dh_1 dh_2, \quad (1)$$

где:

$\mu(h_1, h_2)$ – функция распределения диполей;

$\gamma(h_1, h_2, H(t))$ – характеристика гистерезиса одного диполя;

S – площадь треугольника Преязаха.

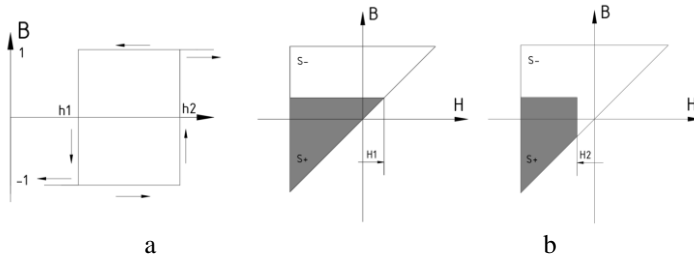


Рис. 1. Характеристика Гистерона (а); Принцип изменения преязахова пространства (b)

Преязахово пространство можно разбить на два участка: $S+$, где домены положительные, и $S-$, где они отрицательные.

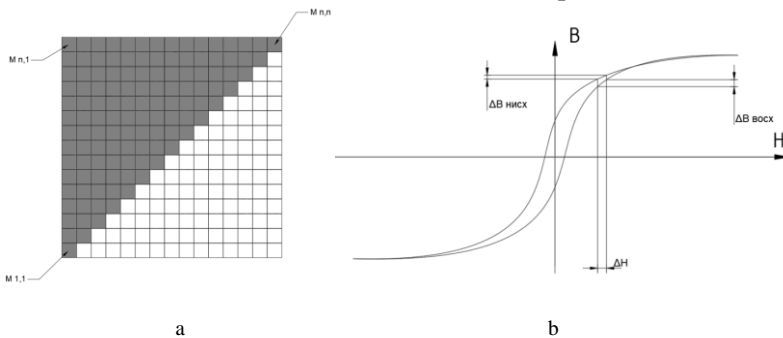


Рис. 2. Заполнение матрицы (а); Петля гистерезиса (b)

В модели ТТ треугольник Преязаха реализуется через матрицу, в которой ненулевые значения заполняют ячейки, удовлетворяющие условию:

$$M(c, r) \neq 0 \text{ if } c \geq r,$$

где c и r – колонка и столбец соответственно (рис. 2).

Матрица заполняется из условия $\Delta H = const$ и условия [5,6]:

$$\begin{cases} \Delta B_{\text{восх}}(r) = \sum_{c=r}^n M(c, r); \\ \Delta B_{\text{нисх}}(c) = \sum_{r=c}^n M(c, r). \end{cases} \quad (2)$$

Создание модели

В качестве аппроксимирующей гистерезисную петлю кривой была выбрана аппроксимация Пономарева [7], представляющая из себя арктангенсоиду:

$$B = \frac{2}{\pi} \cdot B_s \cdot \text{atan} \left[\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{H \pm H_{cs}}{H_s} \right) \right] \quad (3)$$

где:

B_s – индукция насыщения;

H_{cs} – коэрцитивная сила по предельному циклу.

Для заполнения матрицы используется аппроксимированная петля гистерезиса. Матрица «обучается» в итеративном цикле путем корректировки ошибки между теоретической главной петлей гистерезиса и высчитанной в данном цикле. По каждому элементу ищется разность между приращением ΔB и суммой всех элементов строки (для $\Delta B_{\text{восх}}$) или столбца (для $\Delta B_{\text{нисх}}$) до тех пор, пока не будет выполнено условие $\max(M_{adj}(c, r) - M(c, r)) < \varepsilon$:

$$M_{adj}(c, r) = M(c, r) + \frac{\Delta B_{\text{восх}}(c) - \sum_{k=1}^c B(c, k)}{c} \quad (4)$$

$$M(c, r) = M_{adj}(c, r) \quad (5)$$

$$M_{adj}(c, r) = M(c, r) + \frac{\Delta B_{\text{нисх}}(r) - \sum_{k=r}^n B(k, r)}{n - r + 1} \quad (6)$$

$$M(c, r) = M_{adj}(c, r) \quad (7)$$

В случае получения $M(c, r) < 0$ необходимо обнулить значение.

Для вышеописанной петли гистерезиса получена матрица, представленная на рис. 3.

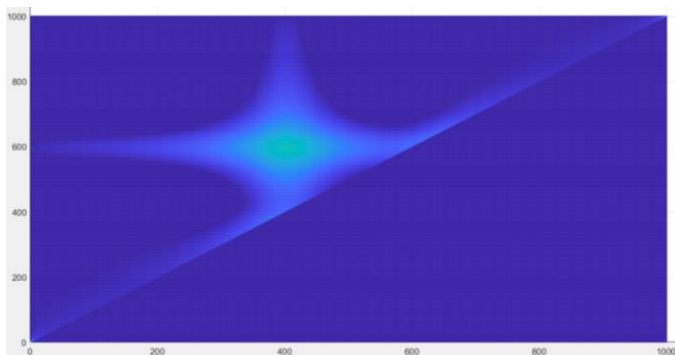


Рис. 3. Треугольник Пре́йзаха, воспроизводящий поведение магнитного сердечника ТТ

Отпробирование модели

Была создана модель ТТ с усредненными характеристиками для демонстрации работоспособности модели. Значения первичного тока и гистерезисной петли приведены на рис. 4.

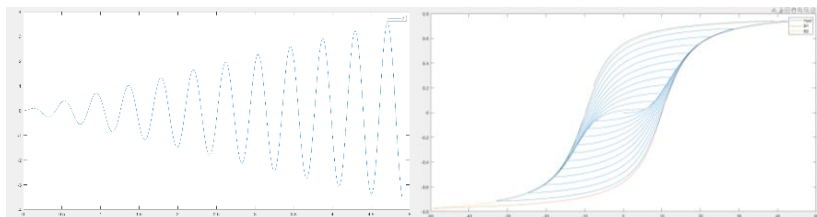


Рис. 4. Первичный ток и значения В и Н

Верификация модели

Опыт холостого хода (ХХ)

Для получения данных о сердечнике конкретного ТТ проводится опыт ХХ с использованием схемы, приведенной на рис. 5.

На схеме снимается опыт ХХ и высчитываются магнитная индукция и напряженность магнитного поля (рис. 6).

Самая широкая гистерезисная петля, полученная в опыте, выбирается в качестве главной, нормируется по условию $\Delta H = const$ и используется для формирования треугольника Пре́йзаха.

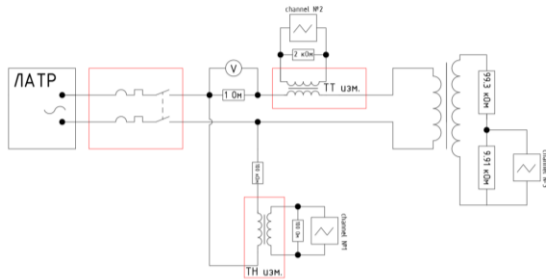


Рис. 5. Схема испытательного стенда для верификации ТТ.

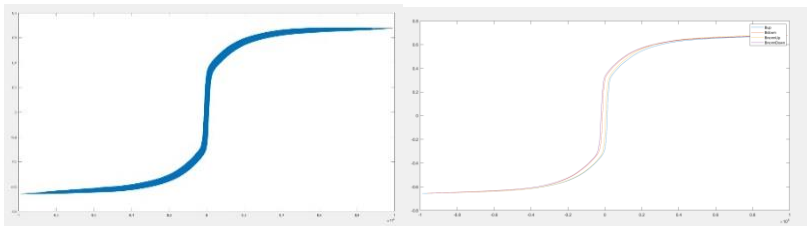


Рис. 6. Экспериментальная и нормированная петли гистерезиса

Запуск модели

Для проверки модели были заданы характеристики ТТ, с которого снимались данные, после чего подан несинусоидальный сигнал, такой же как на реальный ТТ, после чего вторичный ток был сравнен с реальным, снятым с ТТ (рис. 7).

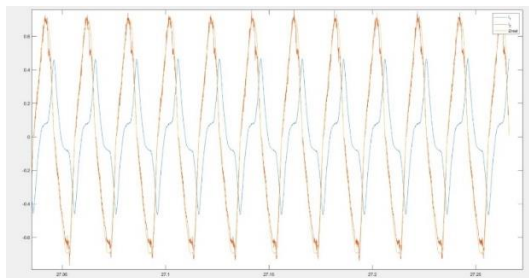


Рис. 7. Первичный ток (синий), вторичный реальный (желтый) и теоретический (оранжевый)

Несмотря на небольшую зашумленность сигнала, снятого с АЦП, вторичные токи совпали почти полностью, что говорит о качественной работе модели ТТ.

Восстановление сигнала.

Поменяв несколько переменных в системе уравнений, можно решить обратную задачу – найти первичный сигнал по вторичному (рис. 8).

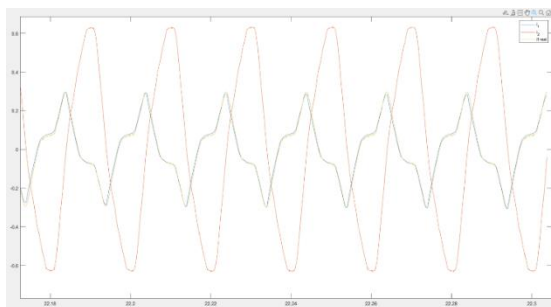


Рис. 8. Воспроизведение первичного тока

Учет вихревых токов в модели.

При увеличении частоты сигнала возникает «неприятный» эффект, «раздувающий» петлю гистерезиса и обязательный к учету в модели для полного воспроизведения поведения ТТ. Он объясняется вихревыми токами, возникающими в сердечнике в переменном магнитном поле и создающим встречную индукцию, пропорциональную dB .

Доработав систему уравнений, покажем, как вихревые токи могут изменять гистерезис.

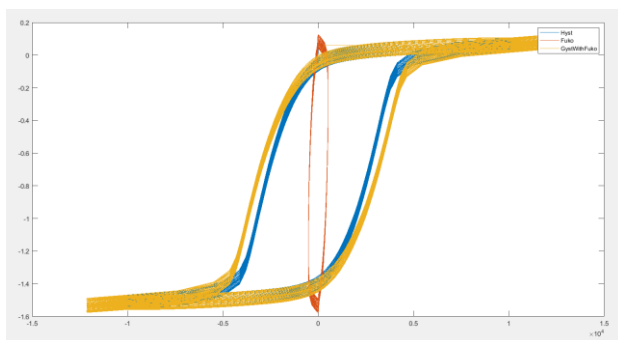


Рис. 9. Гистерезис с учетом вихревых токов

На частоте 50 Гц эффект, вызванный вихревыми токами может оказаться значительным (рис. 10).

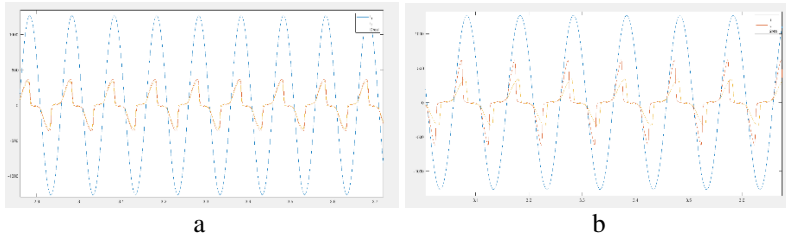


Рис. 10. Сравнение сигнала с учетом вихревых токов (а) и без учета (b)

Заключение

Полученная модель способна достоверно воспроизводить переходные процессы и, являясь достаточно гибкой, решать обратную задачу (восстановление сигнала). Кроме того, возможно учитывать влияние вихревых токов, появляющихся с ростом частоты. Небольшая сложность алгоритма (примерно $O(n)$, где n – размер матрицы Пре́йзаха пространства) позволяет запустить данную модель на микроконтроллере в режиме реального времени. Восстановление сигнала из насыщенного состояния в исходный в режиме реального времени с дальнейшей выдачей на вход устройств релейной защиты позволило бы значительно увеличить чувствительность их работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Preisach F., *Fur Z. Phys.* 94, 277 (1935).
2. Eichler Ja., Novák M., Košek M. Differences between Preisach Model and Experiment for Soft Ferromagnetic Materials, Effect of Instrument Accuracy. IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM), 2017.
3. Андреев М. В., Спица М. В., Кивец А. В. Математическая модель магнитного гистерезиса, базирующаяся на теории Пре́йзаха //iPolytech Journal. – 2018. – Т. 22. – №. 8 (139). – С. 104-113.
4. Wawrzata P. Application of a Preisach hysteresis model to the evaluation of PMN-PT ceramics properties //Archives of metallurgy and materials. – 2013.
5. Матюк В. Ф., Осипов А. А. Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса. Часть I. Анализ моделей //Неразрушающий контроль и диагностика. – 2011. – №. 2.

Авторы:

Самусик Константин Александрович, НТЦ ЕЭС, старший специалист, Автоматика энергетических систем, *samusikka@ntcees.ru*.

Синянский Иван Владимирович, НТЦ ЕЭС, Автоматика энергетических систем, кандидат технических наук, *sinyanskiy-iv@ntcees.ru*.

Попов Станислав Олегович, СПбПУ, доцент кафедры "Релейная защита и автоматизация энергосистем", Автоматика энергетических систем, кандидат технических наук, *popov_so@spbstu.ru*.

ОБЩИЕ И КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

ПРОГРАММНАЯ СРЕДА КОНФИГУРИРОВАНИЯ ТЕРМИНАЛА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Ильин С.А., ООО «ЭКРА ИТ», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия. E-mail: *ilyin_sa@ekra.ru*.

Бычкова И.Ю., ООО «ЭКРА ИТ», г. Чебоксары, Россия. E-mail: *bychkova_iy@ekra.ru*.

Аннотация: в работе представлены принципы и идеи построения конфигурации терминала релейной защиты и автоматики в специализированной программной среде. Раскрывается общая концепция формирования аппаратной и программной частей конфигурации терминала при поддержке стандарта МЭК 61131-3.

Ключевые слова: программная среда, программное обеспечение, конфигурация, МЭК 61131-3.

Введение

Наращивание функциональности и многозадачности устройств релейной защиты и автоматики повышает требования к организации вычислительной среды терминала. В связи с этим процесс конфигурирования терминала РЗА носит комплексный многоэтапный характер. Поэтому создание конфигурации терминала, формирующей его функциональное назначение, без

специальных программных средств представить практически невозможно.

Далее рассматривается программная среда конфигурирования терминалов РЗА, предназначенная для автоматизации всех этапов создания конфигурации и глубокой поддержки процессов отладки и симуляции.

Программная среда конфигурирования

Проприетарное программное обеспечение «Конфигуратор PILOT» (далее конфигуратор PILOT), разработанное и внедренное в ООО НПП «ЭКРА», представляет собой программную среду с развитым инструментарием для работы над созданием и модифицированием конфигурации терминала РЗА.

Терминал РЗА в конфигураторе PILOT представляется в виде своего виртуального образа, отображаемого множеством программных модулей – элементами, составляющими его конфигурацию. Созданный в конфигураторе образ устанавливает связи и обеспечивает обмен данными между различными частями конфигурации. Конфигуратор создает в образе терминала две взаимосвязанные области – области аппаратной и программной частей. На рис. 1 проиллюстрировано взаимодействие между аппаратной и программной частями конфигурации.

В основе формирования области аппаратной части лежит разработка целевой платформы, представляющей собой описание вычислительного ядра аппаратной части терминала РЗА: указывается тип вычислительного элемента и задается целевая архитектура, например, ARMv7 или .NET. Это обеспечивает взаимодействие с областями памяти вычислительного ядра, использование его системных функций и драйверов при формировании программной части конфигурации. Отображение процесса взаимодействия данных физических входов и выходов в области программной части достигается за счет конфигурирования аппаратных блоков, определяющего места их размещения в кассете и параметры каналов входа или выхода.

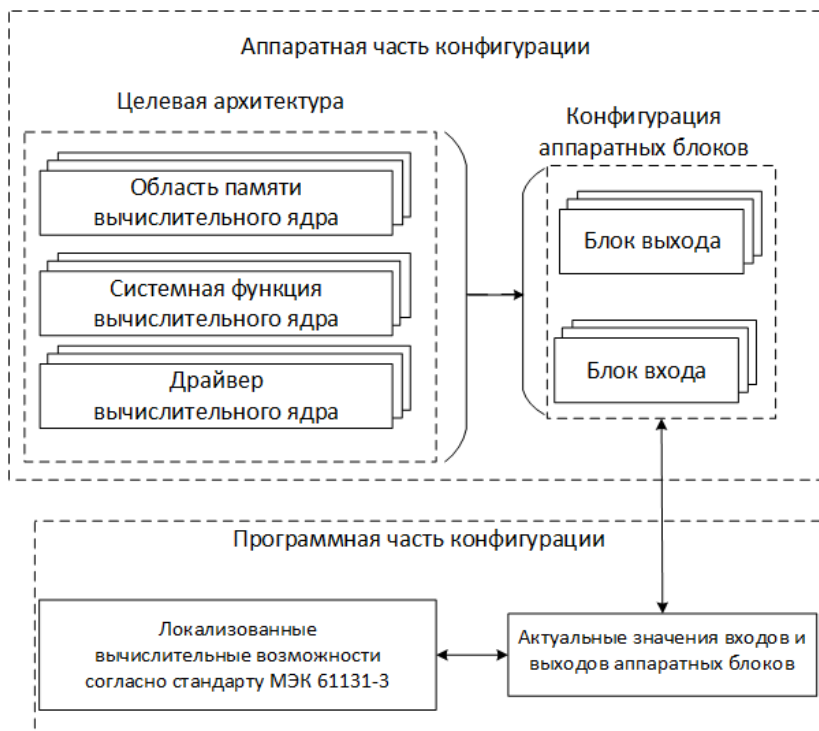


Рис. 1. Взаимодействие аппаратной и программной частей конфигурации

Формирование области программной части конфигурации следует принципам стандарта МЭК 61131-3 [1]. Согласно парадигме стандарта, конфигурация терминала представляет собой локализацию вычислительных возможностей целевой платформы вычислительного ядра в терминах синтаксиса и семантики языков программирования стандарта МЭК 61131-3.

Тесную связь между аппаратной и программной частями конфигурации обеспечивает виртуальный образ терминала, формируемый конфигуратором. Как следствие, конфигуратор обретает гибкость при реализации алгоритмов функции РЗА. Этому способствует интегрированность компилятора в программную среду конфигуратора, создающая ее независимость от аппаратной архитектуры вычислительного

ядра. Наряду с этим развитый инструментарий валидации конфигурации и симуляции работы функций РЗА обеспечивает корректное ее формирование и выполнение возложенных функций.

Инструментарий конфигулятора PILOT рассчитан на конфигурирование множества терминалов РЗА одновременно. С этой целью предусматривается возможность сохранения компонентов конфигурации в библиотеках, обеспечивая тем самым их непосредственный доступ во всех виртуальных образах терминала РЗА. Наряду с этим, предоставляемый функционал для создания пользовательских библиотек поддерживает работу над конфигурацией специалистов разных направлений.

Заключение

Программное обеспечение «Конфигуратор PILOT» представляет собой программную среду конфигурирования терминала РЗА, обеспечивающую независимость конфигурации от аппаратной архитектуры. Принятый подход позволяет масштабировать конфигурации терминалов с помощью пользовательских библиотек. Кроме того, следование концепции стандарта МЭК 61131-3 создает благоприятные условия для модификации конфигурации и наращивания ее функциональности при возрастании потенциала вычислительного ядра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ГОСТ Р МЭК 61131-3-2016*. Контроллеры программируемые. Часть 3. Языки программирования. Москва: Стандартинформ, 2016. – 230с.
2. *Ильин С.А., Бычкова И.Ю.*, Конфигуратор современных цифровых устройств релейной защиты и автоматики // Сборник материалов международной научно-технической конференции «Энергия Арктики 2025» (в печати).

Авторы:

Ильин Сергей Александрович, Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, магистрант, в 2024 году окончил бакалавриат факультета энергетики и электротехники Чувашского

государственного университета имени И.Н. Ульянова, ilyin_sa@ekra.ru.

Бычкова Ирина Юрьевна, ООО «ЭКРА ИТ», ведущий инженер-программист по разработке и сопровождению программного обеспечения. В 2011 году окончила магистратуру по направлению «Системный анализ и управление проектно-технологических решений» Государственного университета "Дубна". В 2022 году получила ученую степень кандидата технических наук по специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды. bychkova_iy@ekra.ru.

ПРОГРАММНАЯ СРЕДА ДЛЯ РАСЧЁТА УРОВНЯ ЧЁТНЫХ ГАРМОНИК ПРИ ДВОЙНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ В ОБМОТКЕ РОТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Иванова К.А., ООО НПП «ЭКРА», ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова», Высшая инженерная школа, г. Чебоксары, Россия. E-mail: ivanova_ka@ekra.ru.

Александрова М.И., ООО «ЭКРА ИТ», ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова», г. Чебоксары, Россия. E-mail: aleksandrova_mi@ekra.ru.

Аннотация: Витковые замыкания в обмотке ротора являются распространённой неисправностью генератора. Существует несколько принципов защиты ротора. Первый из них основан на измерении субгармонических токов. Второй принцип основан на измерении чётных гармоник напряжения на статоре. Определение уровня чётных гармоник с помощью ручного расчёта – долгий и трудоёмкий процесс. В связи с этим нами была разработана программная среда для расчёта уровня чётных гармоник в обмотке ротора.

Ключевые слова: защита ротора, витковые замыкания, нормальный режим, аварийный режим, чётные гармоники.

Введение

Принцип защиты от двойных и витковых замыканий в роторе синхронного генератора, основанный на измерении чётных гармоник в напряжении статора, обладает тем достоинством, что не требует установки в генераторе

дополнительных устройств. Основу принципа составляет свойство магнитного поля статора, которое при витковом или двойном замыкании на корпус теряет симметрию, формируя в ЭДС генератора чётные гармоники.

Целью настоящей работы является создание программной среды для расчётов магнитной индукции в нормальном и аварийном режиме работы генератора с целью математического обеспечения разработки и настройки защиты ротора от витковых и двойных замыканий на основе контроля чётных гармоник.

Структура программной среды

Программная среда (рис. 1). интегрирует в себя базу данных о существующих генераторах с возможностью внесения в неё данных о новых генераторах через программный интерфейс. Пользователь формирует план эксперимента в блоке формирования задачи. Блок расчёта, пользуясь данными базы генератора, и в согласии с планом эксперимента, выполняет все необходимые расчёты в рамках предусмотренного математического обеспечения. Полученные результаты обрабатываются в графической среде визуализации.

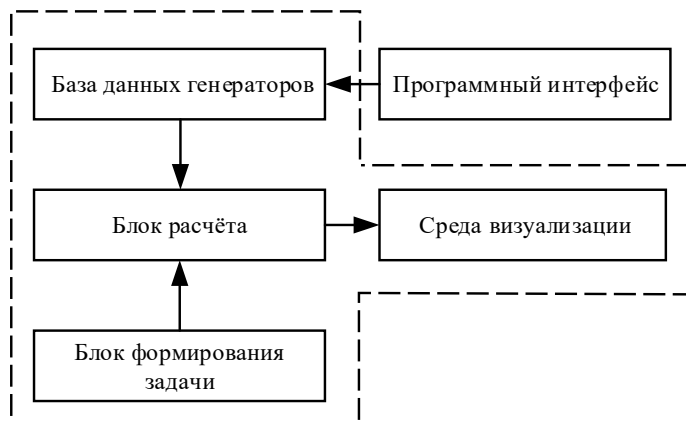


Рис. 1. Основные модули программной среды

Математическое обеспечение программной среды

Вращающееся со скоростью $v = 2\pi f$ синусоидальное

магнитное поле индуцирует в каждом проводнике витка ЭДС с амплитудой:

$$E_m = Blv = 2fBl\tau,$$

где B – амплитуда индукции основной гармоники поля в зазоре (индекс m для обозначения амплитуды здесь и далее опущен), l – расчётная активная длина машины, f – частота гармоники, τ – полюсное деление.

Группу катушек, имеющих одинаковое число витков и лежащих в соседних пазах, соединённых последовательно и принадлежащих одной фазе называют катушечной группой. Действующее значение ЭДС высшей гармоники E катушечной группы фазы определяется по формуле:

$$E = 2\sqrt{2}fwk_{об}k_cBl\tau,$$

где $k_{об} = k_p k_y$ – обмоточный коэффициент, k_p – коэффициент распределения обмотки, k_y – коэффициент укорочения шага обмотки, k_c – коэффициент скоса, w – число витков катушки обмотки [1].

Расчет магнитной индукции в нормальном и аварийном режимах работы

Распределение магнитной индукции ротора в нормальном режиме имеет форму трапеции, симметричной относительно оси абсцисс (рис. 2). Индукция магнитного поля в зазоре, создаваемая обмоткой возбуждения, представляет собой сумму индукций каждого её витка. Распределение индукции вдоль статора графически можно представить, как суперпозицию аналогичных распределений магнитного поля каждого витка обмотки возбуждения [2].

В нормальном режиме при неповреждённой обмотке возбуждения чётные гармоники практически отсутствуют, а выражение для магнитной индукции основной гармоники будет следующим:

$$B_1 = \frac{4B}{\pi\zeta} \sin\zeta,$$

где $\zeta = \frac{1-m}{2}\pi$ – длина дуги окружности ротора, покрытая зубцами.

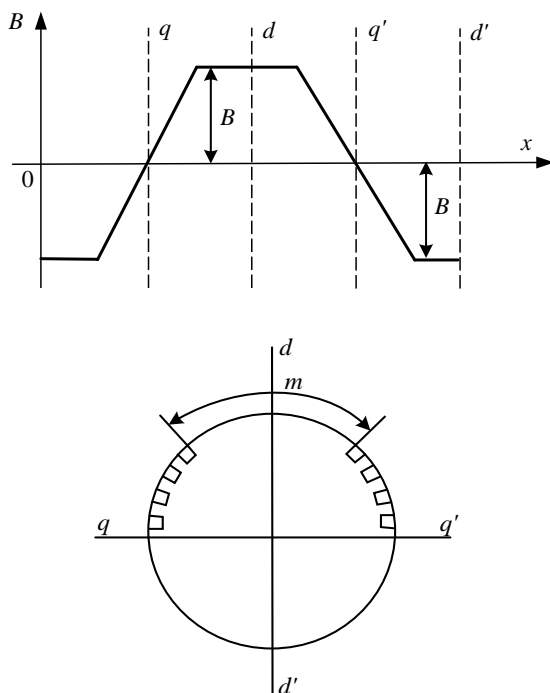


Рис.2. Магнитная индукция двухполюсной машины для нормального режима работы, сопоставленная с разверткой обмоток ротора

Чётные гармоники появляются в ЭДС генератора при витковых и двойных замыканиях обмотки ротора синхронного генератора. Влияние замкнутых витков в обмотке ротора синхронного генератора можно представить, как наложение магнитного поля нормального и дополнительного режима, что соответствует нарушению симметрии магнитного поля и изменению параметров работы генератора [3].

Расчётный прямоугольник плотности потока дополнительного режима вычитается из нормальной кривой плотности потока (рис. 3). Это создаёт несимметрию кривой магнитной индукции относительно оси абсцисс (рис. 4). Очевидно, что чем больше число замкнутых витков ротора, то тем больше высота вычитаемого прямоугольника.

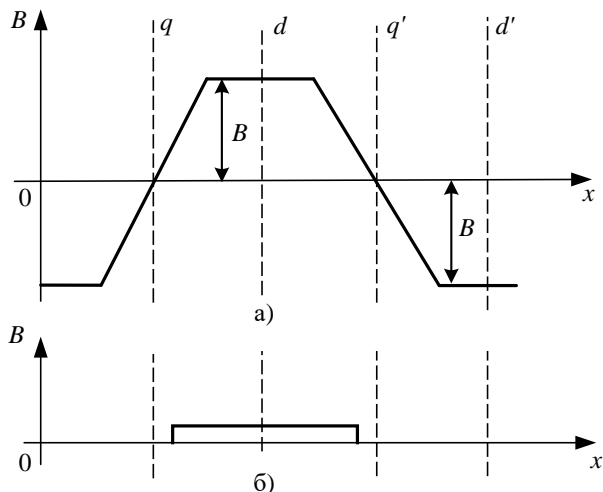


Рис.3. Кривая магнитной индукции нормального режима (а) и расчётная кривая плотности потока роторной обмотки дополнительного режима (б)

Ширина прямоугольника зависит от расположения замкнутых витков относительно главного зубца ротора. При замыкании вблизи главного зубца ширина минимальна, а при замыкании вблизи оси q ширина максимальна.

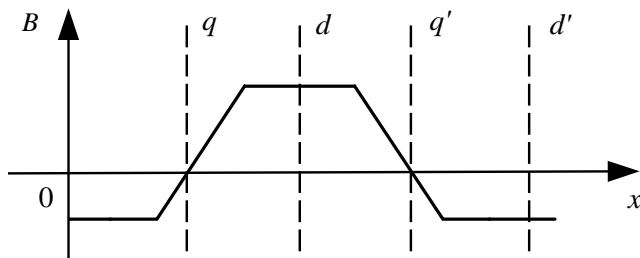


Рис.4. Кривая магнитной индукции при витковом замыкании со стороны главного зубца

Вращение магнитного поля ротора трансформирует кривую распределения магнитной индукции в пространственных координатах в кривую распределения во времени $x \rightarrow t$. Так как

при замыканиях в роторе кривая несимметрична относительно оси абсцисс, то в разложении в ряд Фурье появляются чётные гармоники. Выражение для второй гармоники магнитной индукции при замыкании вблизи главного зубца определяется по формуле:

$$B_2 = \frac{B}{\pi} \frac{1}{2\zeta} [\cos(2\gamma\zeta + m\pi) - \sin m\pi],$$

где m – ширина главного зубца; z – коэффициент, определяющий интервал нарастания (спада) кривой магнитной индукции [4].

Зависимость отношения ЭДС второй гармоники к первой гармонике в нормальном режиме определяется формулой:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{K_2 B_2}{K_1 B_1},$$

где $K_v = 2\sqrt{2}f_v w l_v k_{обv} k_{cv}$ – коэффициент усиления v -й гармоники [1, 2].

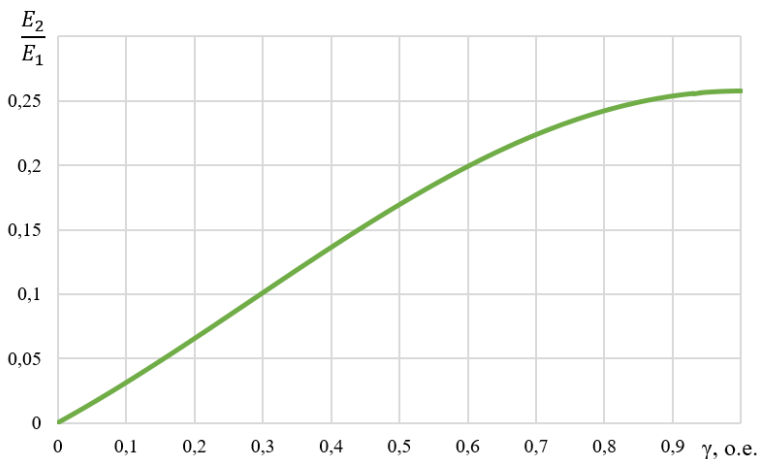


Рис. 5. Зависимость отношения ЭДС второй E_2 и первой E_1 гармоник от числа замкнутых витков γ .

Заключение

Программная среда позволяет рассчитать относительный уровень ЭДС второй гармоники и создаёт удобный сервис при разработке защиты ротора от витковых и двойных замыканий.

Успеху программной среды способствует наличие базы данных генераторов и её развитое математическое обеспечение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Вольдек. А.И.* Общие вопросы теории машин переменного тока. – 2-е изд. – Ленинград: Энергия, 1974. – С. 385 – 402.

2. *Shi Shiwen.* An analysis of rotor double point ground faults // Electric Machines and Power Systems. – 1998. – №26. – С.141 – 154.

3. *Иванов Н.Г., Глазырин А.В., Кудряшова М.Н., Степанова Д.А.* Методы обнаружения витковых замыканий в обмотке ротора синхронного генератора. // Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики – Чебоксары: Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, 2021. – С. 18 – 25. – ISBN 978-5-7677-3248-7

4. *Иванова К.А.* Исследование защиты ротора от витковых и двойных замыканий на основе контроля чётных гармоник в напряжении статора // «Энергия Арктики – 2025». - Архангельск: Издательство «КИРА», 2025. - С. 83-87.

Авторы:

Иванова Карина Анатольевна, студент Высшей инженерной школы ЧГУ им. И. Н. Ульянова, техник департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». E-mail: ivanova_ka@ekra.ru.

Александрова Марина Ивановна, канд. технических наук, старший преподаватель ЧГУ им. И.Н. Ульянова, инженер-исследователь 2 кат. департамента научного сопровождения продукции ООО «ЭКРА ИТ». E-mail: aleksandrova_mi@ekra.ru.

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО ТОКА

Степанов С.В., ООО «НПП Бреслер», г. Чебоксары, Россия.
E-mail: stepanov_sv@bresler.ru

***Аннотация:** В статье рассматриваются нетрадиционные методы построения источников питания для цепей релейной защиты и автоматики (РЗА) на подстанциях. Особое внимание уделяется системам, использующим конденсаторы в качестве накопителей энергии. Анализируются режимы работы выпрямителей на емкостную*

нагрузку, принципы форсированного заряда конденсаторов от трансформаторов тока (ТТ) при коротких замыканиях, а также схемы умножения напряжения.

Ключевые слова: *оперативный ток, конденсаторный накопитель, релейная защита, БПЗТ, выпрямитель, умножитель напряжения, трансформаторы тока*

Введение: Проблематика оперативного тока на упрощенных подстанциях

Традиционным и наиболее надежным источником оперативного тока на подстанциях являются аккумуляторные батареи (АБ), работающие в буферном режиме с зарядными устройствами. Однако высокая стоимость АБ, необходимость их обслуживания и специальные требования к помещениям заставляют искать альтернативы для подстанций напряжением 6–35/0,4 кВ [1].

Одним из таких решений является использование энергии самого аварийного режима — тока короткого замыкания (КЗ). В момент КЗ напряжение на шинах собственных нужд может резко упасть, что делает бесполезными обычные блоки питания, подключенные к трансформаторам напряжения. Здесь на помощь приходят токовые блоки питания с конденсаторными накопителями (БПЗТ).

Заряд конденсаторов от трансформаторов тока

Принцип действия таких устройств основан на использовании вторичных цепей трансформаторов тока (ТТ). В момент возникновения КЗ в первичной цепи, во вторичной обмотке ТТ протекает ток, пропорциональный току КЗ.

Математическая модель заряда:

Процесс накопления энергии описывается фундаментальным соотношением:

$$It = CU, \quad (1)$$

где I — ток во вторичной цепи ТТ (А), C — емкость накопительного конденсатора (Ф), U — напряжение, до которого заряжается конденсатор (В), t — время заряда (с).

Напряжение холостого хода промежуточных трансформаторов в блоке БПЗТ выбирается заведомо большим,

чем номинальное напряжение конденсаторной батареи. Это обеспечивает форсированный (ускоренный) заряд.

Схемотехнические особенности реализации:

Для того чтобы блок питания не влиял на работу основных защит в нормальном режиме, применяется схема дешунтирования.

1. В нормальном режиме блок БПЗТ зашунтирован (закорочен) контактами реле.

2. При срабатывании защиты контакты размыкаются, включая блок в цепь ТТ.

3. Ток КЗ проходит через выпрямительный мост и заряжает конденсаторный банк.

4. Для предотвращения пробоя конденсатора используется тиристорный ограничитель напряжения. При достижении порога (например, 360 В) тиристор открывается и шунтирует вторичную обмотку промежуточного трансформатора, прекращая заряд.

Особенности работы выпрямителя с емкостной нагрузкой

В классических блоках питания, питающихся от трансформаторов напряжения (или сети), конденсатор часто используется как сглаживающий фильтр. Однако его наличие кардинально меняет режим работы выпрямителя.

Физика процесса:

Диоды открываются не на всем протяжении полупериода, а только в узких интервалах, когда напряжение вторичной обмотки трансформатора превышает напряжение на конденсаторе. В этот короткий момент диод пропускает кратковременный импульс тока большой амплитуды (часто во много раз превышающий ток нагрузки), подзаряжая конденсатор.

В остальное время нагрузка питается исключительно за счет энергии, запасенной в конденсаторе.

Инженерные последствия:

Такой режим требует тщательного выбора диодов и сечения проводов трансформатора, так как они должны выдерживать эти пиковые токи. Кроме того, наблюдается сильная зависимость выходного напряжения от тока нагрузки: чем больше ток, тем быстрее разряжается конденсатор и тем больше угол отсечки.

Умножители напряжения на конденсаторах

В случаях, когда для работы привода коммутационного аппарата или испытательной установки требуется высокое постоянное напряжение, а мощный высоковольтный трансформатор отсутствует, применяются схемы умножения.

Принцип каскадного накопления:

Умножители строятся по диодно-конденсаторным каскадам (схема Латура, Делона-Гренашера и др.). Суть работы заключается в том, что конденсаторы заряжаются от разных полувольт напряжения, а затем, будучи включенными последовательно по отношению к нагрузке, суммируют свои напряжения.

Симметричный удвоитель: Два конденсатора заряжаются в противофазе. На выходе получаем напряжение, равное удвоенной амплитуде входного ($2\sqrt{2}U_2$).

Каскадный умножитель (n ступеней): Позволяет получить напряжение на последнем конденсаторе, приближающееся к $2\sqrt{2}U_2n$.

Таблица 1

Сравнительная характеристика решений

Параметр	Блок питания с зарядом от токов КЗ	Выпрямитель с С-фильтром	Умножитель напряжения
Первичный источник	Трансформаторы тока	Трансформатор напряжения / Сеть	Трансформатор напряжения
Режим работы	Форсированный (аварийный)	Непрерывный (нормальный)	Непрерывный / Импульсный
Функция конденсатора	Накопление энергии для РЗА	Сглаживание пульсаций	Повышение напряжения
Ключевая особенность	Независимость от провалов напряжения на шинах	Высокие импульсные токи через диоды	Высокое выходное напряжение при низковольтном входе

Заключение

Использование конденсаторов в системах оперативного тока не ограничивается простой фильтрацией. На подстанциях малого и среднего класса напряжения блоки питания с зарядом от токов КЗ (БПЗТ) позволяют организовать надежное аварийное питание цепей защиты, утилизируя энергию самой аварии.

Понимание физики работы выпрямителей на емкостную нагрузку критически важно для проектирования надежных блоков питания собственных нужд, а схемы умножения напряжения открывают возможность создания компактных высоковольтных источников для специальных применений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.
2. *Гельман М.В., Добровольский С.П.* Источники питания систем релейной защиты и автоматики. // М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. *Найвельт Г.С.*, Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник – М.: Радио и связь, 1985.

Автор:

Степанов Сергей Владимирович, ООО НПП «Бреслер», инженер, окончил магистратуру ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова» факультета радиоэлектроники и автоматики в 2021 году, stepanovsergey21r@gmail.com.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА С УЧЕТОМ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

**Михайлова Е.Н., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.
E-mail: mihailova_en@ekra.ru**

Аннотация: определение параметров трансформаторов тока с учетом переходных режимов коротких замыканий является критически важным для обеспечения корректной работы устройств релейной защиты. Существующие методики расчета отличаются высокой сложностью или недостаточной точностью: одни требуют

трудоемкого определения наилучшего угла включения для каждого участка кривой, а другие используют грубые упрощения, приводящие к значительному завышению требований к ТТ на начальном интервале времени.

Ключевые слова: *трансформатор тока, релейная защита, переходный режим, короткое замыкание, параметры ТТ*

Введение

Современные быстродействующие устройства релейной защиты (УРЗ) предъявляют повышенные требования к трансформаторам тока (ТТ), особенно в переходных режимах коротких замыканий (КЗ) с наличием аperiodической составляющей. Определение параметров ТТ является ключевой задачей при выборе и проверке оборудования, однако существующие методики расчета обладают существенными недостатками.

Особую актуальность проблема приобретает применительно к защитам производства ООО НПП «ЭКРА», где значения минимально необходимого времени достоверного измерения тока t_{pz} указываются для разных значений начальной фазы θ в зависимости от временного диапазона. Это требует разработки адаптированной методики, которая, с одной стороны, учитывала бы эту специфику для сохранения точности, а с другой – была достаточно простой для практического применения инженерами.

Материалы и методы

1. Полная методика по IEC TR 61869-100 с разделением кривой на три участка и учетом наилучшего угла включения θ_{max}

2. Упрощенный подход с использованием огибающей кривой при $\theta = 0$. Первый подход обеспечивает высокую точность, но требует громоздких вычислений. Второй подход прост в применении, но приводит к завышению значений коэффициента переходного режима $K_{п,р}(t_{pz})$ на 500% и более для малых t_{pz} (<10 мс).

Предлагаемая методика

Разработана модифицированная методика со следующими упрощениями:

- Конец первого участка фиксируется при $t_{p3} = 14$ мс.
- Для участков 2 и 3 используется $\theta = 0$.
- Применяются упрощенные выражения для разных классов ТТ.

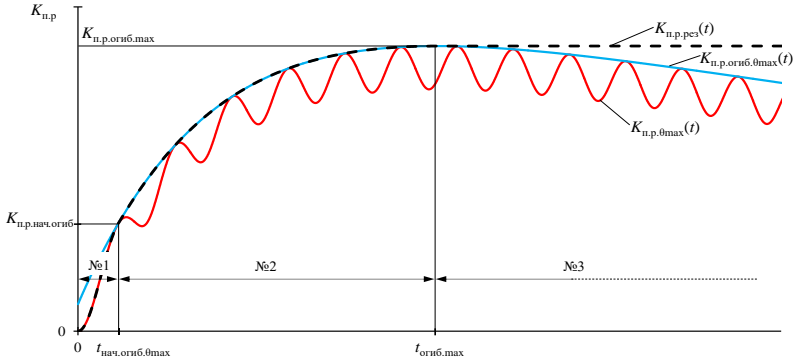


Рис. 2 Три характерных участка кривой

- $K_{п.р.θmax}(t)$ – кривая коэффициента переходного режима, соответствующая наихудшему значению угла θ в каждый момент времени (кривая красного цвета);
- $K_{п.р.огиб.θmax}(t)$ – огибающая кривой $K_{п.р.θmax}(t)$ (кривая синего цвета);
- $t_{нач.огиб.θmax}$ – момент времени, когда кривая $K_{п.р.θmax}(t)$ впервые касается своей огибающей $K_{п.р.огиб.θmax}(t)$;
- $K_{п.р.нач.огиб}$ – значение кривой $K_{п.р.θmax}(t)$ в момент времени $t_{нач.огиб.θmax}$;
- $t_{огиб.θmax}$ – момент времени, когда огибающая $K_{п.р.огиб.θmax}(t)$ достигает максимального значения;
- $K_{п.р.огиб.θmax}$ – максимум огибающей $K_{п.р.огиб.θmax}(t)$ коэффициента переходного режима;
- $K_{п.р.рез}(t)$ – результирующий коэффициент переходного режима, соответствует значениям $K_{п.р.}(t_{p3})$

Алгоритм расчета разделен на три участка, которые показаны на рис. 1:

Участок 1 ($t_{p3} \leq 0,014$ с):

$$Y(t_{p3}) = \omega T_s - e^{-t_{p3}/T_s} (\omega T_s \cos(\omega t_{p3}) - \sin(\omega t_{p3}));$$

$$X(t_{p3}) = \frac{1}{T_a - T_s} \left[T_a (1 + \omega^2 T_s^2) e^{-\left(\frac{t_{p3}}{T_s} - \frac{t_{p3}}{T_a}\right)} - T_s (1 + \omega^2 T_s T_a) \right] - e^{-t_{p3}/T_s} [\cos(\omega t_{p3}) + \omega T_s \sin(\omega t_{p3})];$$

$$\theta_{max}(t_{p3}) = \arctg \left(\frac{Y(t_{p3})}{X(t_{p3})} \right).$$

Для ТТ с немагнитным зазором:

$$K_{п.п}(t_{п3}) = \omega T_s \left[\frac{e^{-t_{п3}/T_s}}{T_p - T_s} \cdot \left(\cos(\theta_{\max}) \cdot T_a e^{-t_{п3}/T_s - t_{п3}/T_a} + \frac{\omega T_s \sin(\theta_{\max})(T_a - T_s) - T_s \cos(\theta_{\max})(1 + \omega^2 T_s T_a)}{1 + \omega^2 T_s^2} \right) - \frac{\omega T_s \sin(\omega t_{п3} + \theta_{\max}) + \cos(\omega t_{п3} + \theta_{\max})}{1 + \omega^2 T_s^2} \right]$$

Для ТТ классов 5Р и 10Р:

$$K_{п.п}(t_{п3}) = \sin(\alpha) \cdot \cos(\theta_{\max}) \cdot e^{-\frac{t_{п3}}{T_a}} + \cos(\alpha) \cdot \cos(\theta_{\max}) \cdot \omega \cdot T_a \left(1 - e^{-\frac{t_{п3}}{T_a}} \right) - \sin(\omega \cdot t_{п3} + \alpha + \theta_{\max}) + \cos(\alpha) \cdot \sin(\theta_{\max})$$

Участок 2 ($0,014 < t_{п3} < t_{огиб.маx}$):

Для ТТ классом 5Р и 10Р

$$K_{п.п}(t_{п3}) = \omega \cdot T_a \left(1 - e^{-\frac{t_{п3}}{T_a}} \right) + 1$$

Для ТТ с немагнитным зазором

$$K_{п.п.огиб}(t_{п3}) = \frac{\omega \cdot T_s \cdot T_a}{T_a - T_s} \cdot \left(e^{-\frac{t_{п3}}{T_a}} - e^{-\frac{t_{п3}}{T_s}} \right) + 1$$

Участок 3 ($t_{огиб.маx} \leq t_{п3}$):

Для ТТ с немагнитным зазором

$$K_{п.п.огиб.маx} = \omega T_a \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^{\frac{T_a}{T_s - T_a}} + 1$$

С учетом каждого участка рассчитывается Кном.

$$K_{НОМ} = \frac{K_{п.п}(t_{п3})}{1 - K_r} \cdot \frac{I_{КЗ} \cdot z_{2\Sigma}}{I_{1.НОМ} \cdot z_{2\SigmaНОМ}}$$

Заключение

Проведено сравнение предложенной методики с существующими подходами. Результаты расчетов показали, что использование упрощенного подхода ($\theta=0$) приводит к завышению требований к ТТ на 6-500% для малых $t_{п3}$, в то время как предлагаемая методика обеспечивает погрешность не более 5,7%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC TR 61869-100:2017. Instrument Transformers. Part 100 Guidance for Application of Current Transformers in Power System Protection.

2. ГОСТ Р 58669-2019. «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях». Введен в действие в РФ с 1 января 2020 г. – (<https://docs.cntd.ru>)

3. Дегтярев, А. А., Кужеков, С. Л., Дони, Н. А. Об определении требований к трансформаторам тока для релейной защиты в переходных режимах короткого замыкания / А. А. Дегтярев, С. Л. Кужеков, Н. А. Дони // Известия вузов. Электромеханика. — 2023. — №4. — С. 48-57.

4. ООО НПП «ЭКРА». Шкафы РЗА серий ШЭ2607, ШЭ2710. Методические указания по проверке и выбору трансформаторов тока. ЭКРА.650323.085Д. [Электронный ресурс] // ООО НПП "ЭКРА" : [сайт]. — URL: <https://ekra.ru>

Автор:

Михайлова Елена Николаевна, техник группы научного сопровождения продукции департамента подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА», бакалавр факультета энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова по профилю «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». E-mail: mihailova_en@ekra.ru

РАЗРАБОТКА ПРАВИЛ МНОГОУРОВНЕВОЙ ВАЛИДАЦИИ SCL-КОНФИГУРАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЦПС

Смирнов Д.Н., ООО «Релематика», г. Чебоксары, Россия.
E-mail: smirnovdema2172@mail.ru

***Аннотация:** В докладе рассматривается проблема обеспечения целостности и корректности SCL-конфигураций на цифровых подстанциях. В работе представлен подход к разработке иерархической системы правил многоуровневой валидации. Анализируются уровни валидации. Особое внимание уделяется написанию правил семантической автоматической проверки данных*

SCL. Приводятся примеры реализованных правил и оценивается влияние предложенной методики на повышение надежности и отказоустойчивости ЦПС.

Ключевые слова: *Цифровая подстанция (ЦПС), SCL, МЭК 61850, валидация, надежность, управление конфигурациями*

Введение

Современная цифровая подстанция (ЦПС) представляет собой сложную систему, ядром которой является стандарт МЭК 61850. Проектирование, пусконаладка и эксплуатация ЦПС неразрывно связаны с файлами конфигурации языка SCL. Ошибка, допущенная на этапе описания конфигурации, приводит к некорректной работе устройств РЗА, АСУ ТП и, как следствие, снижает надежность энергоснабжения. В работе представлена концепция разработки правил многоуровневой валидации SCL-конфигурации как инструмента минимизации рисков и обеспечения надежности ЦПС на этапах жизненного цикла.

Проблематика: *недостаточность синтаксического контроля*

Традиционная проверка SCL-файлов с помощью XSD-схем является первым, но недостаточным этапом. XSD проверяет лишь синтаксис: наличие обязательных тегов и атрибутов, соответствие структуры XML-документа заявленным правилам. Однако XSD бессильна в вопросах семантики. Она не проверит, соответствует ли класс данных (CDC) логическому узлу, существуют ли ссылающиеся друг на друга элементы в разных разделах файла (DataTypeTemplates и IED), соблюдены ли корпоративные требования конкретной энергокомпании.

Опыт пуско-наладочных работ без предварительной валидации SCD-файла, показывает, что «неочевидность цифровых коммуникаций» требует автоматизации проверок. Без глубокой валидации ошибки переходят из проекта в готовую подстанцию, обнаруживаясь уже на этапе функциональных испытаний, когда их исправление требует значительных временных и трудовых затрат.

Концепция многоуровневой валидации

Для повышения надежности конфигурирования ЦПС

предлагается внедрение системы многоуровневой валидации. Эта система должна базироваться на машинно-интерпретируемых правилах и охватывать следующие уровни:

Уровень 1. Синтаксический контроль (XSD).

Уровень 2. Семантическая валидация (NSD).

Уровень 3. Проверка целостности и взаимосвязей. Контроль связей между разделами SCL-файла. Если предыдущие уровни отвечали на вопрос «корректен ли файл с точки зрения стандарта?», то данный уровень отвечает на вопрос «соответствует ли этот файл нашим внутренним стандартам качества и эксплуатационным требованиям?». Это набор правил, специфичных для конкретного проекта или компании, который охватывает не только синтаксис, но и физические параметры цифровых сигналов.

Переходя от общих принципов к конкретике, рассмотрим три ключевых аспекта такой валидации, касающихся основных протоколов ЦПС – MMS, GOOSE и SV.

Валидация настроек MMS-отчётов. Для обеспечения предсказуемой нагрузки на шину подстанции и серверы верхнего уровня важно контролировать параметры передачи измерений. Формальное правило должно гарантировать, что:

«При использовании класса точности, апертура отчёта устанавливается на класс точности хуже в классах точности до 1 включительно. При классе точности 1 апертура устанавливается на 1% от номинального значения» [1].

Валидация адресации GOOSE-сообщений. При масштабировании ЦПС количество логических связей растёт, и стандартных диапазонов многоадресной рассылки может не хватить. Чтобы избежать коллизий и сохранить детерминизм системы, правило валидации должно проверять:

«Если количество GOOSE-сообщений превышает 512 в рамках одного объекта, допускается расширение диапазона MAC-адресов. При этом второй байт (справа) для сообщений класса I всегда должен быть чётным числом, а для сообщений класса II – всегда нечётным. Основные и дополнительные диапазоны распределяются следующим образом:

01:0C:CD:01:00:00 – 01:0C:CD:01:00:FF – основной диапазон для сообщений класса I;

01:0C:CD:01:01:00 – 01:0C:CD:01:01:FF – основной диапазон для сообщений класса II;

01:0C:CD:01:02:00 – 01:0C:CD:01:02:FF – дополнительный диапазон для сообщений класса I и т.д.;

01:0C:CD:01:03:00 – 01:0C:CD:01:03:FF – дополнительный диапазон для сообщений класса II и т.д. [1].»

Валидация параметров оцифровки SV-потоков. «Если количество SV-потоков превышает 512 в рамках одного объекта, то допускается расширение приведенного диапазона MAC-адресов назначения в пределах двух младших байтов адреса, таким образом, что второй байт (справа) для сообщений классов IIP и 2IP всегда должен быть чётным числом, а для сообщений классов 1И и 2И – всегда нечётным числом, следующим образом:

1) 01:0C:CD:04:00:00– 01:0C:CD:04:00:FF – основной диапазон для сообщений классов IIP и 2IP;

2) 01:0C:CD:04:01:00– 01:0C:CD:04:01:FF – основной диапазон для сообщений классов 1И и 2И;

3) 01:0C:CD:04:02:00– 01:0C:CD:04:02:FF – дополнительный диапазон для сообщений классов IIP и 2IP и т.д.;

4) 01:0C:CD:04:03:00– 01:0C:CD:04:03:FF – дополнительный диапазон для сообщений классов 1И и 2И и т.д.» [1].

Автоматизация проверки этих параметров позволяет исключить ошибки конфигурирования, которые могут проявиться только в аварийных режимах, и гарантирует корректную работу устройств РЗА, измерительных преобразователей и систем учёта.

Преимущества для надежности ЦПС

Внедрение многоуровневой валидации на основе формальных правил дает следующие преимущества:

- Раннее обнаружение ошибок.
- Исключение человеческого фактора.
- Единая техническая политика.
- Повышение качества пусконаладки.
- Сокращение времени ввода в эксплуатацию.

Заключение

Разработка и внедрение правил многоуровневой валидации

SCL-конфигурации – это не просто техническое усовершенствование процесса проектирования, а важный шаг на пути к надежным и интеллектуальным цифровым подстанциям. Движение в этом направлении поддерживается развитием стандартов и появлением доступных программных инструментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Профиль МЭК 61850 ПАО «ФСК ЕЭС». Технические требования к интеллектуальным электронным устройствам (IED) и программно-аппаратным комплексам (ПАК) для цифровых подстанций. – М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2020.
2. СТО 56947007-25.040.40.173-2018. Цифровые подстанции. Методические указания по проектированию систем автоматизации и управления на основе стандарта МЭК 61850. – М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2018. – 112 с.

Автор:

Смирнов Дмитрий Николаевич, ООО «Релематика», инженер-проектировщик, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ФЭиЭТ, smirnovdema2172@mail.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Программный комитет конференции.....	3
Вступительное слово	4
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЭНЕРГОСИСТЕМ	5
Куликов А.Л., Старшов И.С. (Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород) <i>Разработка быстродействующей релейной защиты от однофазных замыканий на землю с использованием преобразования Кларк</i>	<i>5</i>
Ефремов В.А., Ефремов Е.А., Исмуков Г.Н. (ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО «Релематика», г. Чебоксары) <i>Методика формирования адаптивных уставок для максимальной токовой защиты при несимметричных коротких замыканиях.....</i>	<i>9</i>
Сарычев Д.В., Хузяшев Р.Г. (К(П)ФУ, КГЭУ, г. Казань) <i>Погрешность определения параметров напряжения промышленной частоты системой волнового ОМП</i>	<i>17</i>
Куликов А.Л., Илларионов Р.И. (Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород) <i>Сравнительный анализ методов определения мест повреждения на линиях с ответвлениями</i>	<i>20</i>
Вертогузов Д.А., Лачугин В.Ф. (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва) <i>Применение логических защит в интеллектуальных сетях 6-35 кВ</i>	<i>25</i>
Маякшина М.В., Золотов А.А., Антонов В.И., Солдатов А.В. (ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», ООО «ЭКРА ИТ», г. Чебоксары) <i>Исследование работы ограниченной дифференциальной защиты трансформатора с учетом насыщения чувствительных ТТ в режимах различных КЗ</i>	<i>29</i>
Егоров Г.В., Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я., Иванов С.В., Афанасьев А.А., Григорьев И.Г. (ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО «Релематика», г. Чебоксары) <i>Информационные задачи распознавания повреждений синхронного генератора</i>	<i>35</i>
ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ	40

Степанов А.А. (ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары)

Повышение точности оценки частоты сети для быстродействующих приложений релейной защиты и автоматики 40

Егорова М.А., Убасева М.В., Антонов В.И., Солдатов А.В., Петров В.С. (ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», ООО «ЭКРА ИТ», г. Чебоксары)

Фильтр ортогональных составляющих с гетерогенной распределённой структурой..... 44

ТЕХНОЛОГИИ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В СИСТЕМАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ 49

Андреев П.И., Ульянов Д.Н., Мокеев А.В. (ООО «ИЦ «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет, г. Архангельск)

Цифровой измерительный комбинированный трансформатор с синхронизированными векторными измерениями 49

Мартынов А.Н., Мокеев А.В. (ООО «ИЦ «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет, г. Архангельск)

Применение синхронизированных векторных измерений для автоматизации подстанций среднего напряжения 55

Федотов Д.А., Антонов В.И., Дони Н.А., Бычков А.В. (ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары)

Обеспечение точности измерения синхровектора оптимальным неадаптивным фильтром..... 60

МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ 69

Бондаренко Н.А., Кибовский Г.Е. (АО «Россети Научно-технический центр», НИУ «МЭИ», г. Москва)

Применение методов искусственного интеллекта для настройки автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов 69

Аверьянов С.С., Трофимов А.С. (НГТУ, г. Новосибирск)

Анализ архитектур нейросетевого классификатора переходных процессов для релейной защиты..... 74

Полыгалин И.С., Климова Т.Г., Добрягина О.А., Максимов Р.С., Романов Д.А. (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва) <i>Классификация внутренних и внешних КЗ на ЛЭП, отходящих от ВЭС, с использованием рекуррентных нейронных сетей</i>	77
Галанин И.А., Шадрикова Т.Ю. (ОА «Радиус Автоматика», ИГЭУ, г. Иваново) <i>Разработка способа распознавания однофазного замыкания на землю в кабельной сети 6-10 кВ на основе нейронной сети</i>	81
ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В СИСТЕМАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ	87
Пестряев Д.А., Шалимов А.С. (ООО «НПП «Динамика», г. Чебоксары) <i>Совместное применение мобильных испытательных комплексов и цифрового двойника энергосистемы для проверки сложных устройств релейной защиты и автоматики</i>	87
Самусик К.А., Синянский И.В., Попов С.О. (НТЦ ЕЭС, СПбПУ, г. Санкт-Петербург) <i>Проблемы составления физической модели трансформатора тока</i>	91
ОБЩИЕ И КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ	99
Ильин С.А., Бычкова И.Ю. (ООО «ЭКРА ИТ», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары) <i>Программная среда конфигурирования терминала релейной защиты и автоматики</i>	99
Иванова К.А., Александрова М.И. (ООО НПП «ЭКРА», ООО «ЭКРА ИТ», ЧГУ имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары) <i>Программная среда для расчёта уровня чётных гармоник при двойных замыканиях в обмотке ротора синхронного генератора</i>	103
Степанов С.В. (ООО «НПП Бреслер», г. Чебоксары) <i>Специализированные источники питания на основе конденсаторов для систем оперативного тока</i>	109
Михайлова Е.Н. (ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары) <i>Методы определения параметров трансформаторов тока с учетом переходных режимов коротких замыканий</i>	113
Смирнов Д.Н. (ООО «Релематика», г. Чебоксары) <i>Разработка правил многоуровневой валидации SCL-конфигурации для повышения надежности ЦПС</i>	117

Научное издание

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ
СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ**

Материалы молодежной секции II Всероссийской научно-технической конференции «Новые технологии в релейной защите и автоматизации энергетических систем»

*Материалы публикуются в авторской редакции.
Ответственность за достоверность цитат, имен, названий
и иных сведений, а также за соблюдение законов
об интеллектуальной собственности несут авторы*

Отв. за выпуск *М.И. Александрова*

Согласно Закону № 436-ФЗ от 29 декабря 2010 года
данная продукция не подлежит маркировке

Подписано в печать 02.04.2026. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 7,32. Уч.-изд. л. 7,30. Тираж 300 экз. Заказ № 495.

Отпечатано в соответствии с представленным оригиналом-макетом
в типографии Чувашского университета
428015 Чебоксары, Московский просп., 15



RZA-FORUM.RU

ОРГАНИЗАТОРЫ



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

ГЕНЕРАЛЬНЫЕ ПАРТНЕРЫ



ПАРТНЕРЫ



БАНК-ПАРТНЕР



ПАРТНЕР
ДЕЛОВОЙ ПРОГРАММЫ



ОФИЦИАЛЬНЫЕ МЕДИАПАРТНЕРЫ



ISBN 978-5-7677-4040-6



9 785767 740406