

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»
«Академия электротехнических наук Чувашской Республики»

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ЭНЕРГЕТИКИ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

**Материалы
III Международной научно-технической
конференции**

Чебоксары
2019

УДК 621.3(06)
ББК 31я43
П78

Редакционная коллегия:

В.Г. Ковалев, канд. техн. наук, профессор (гл. редактор);
Г.С. Нудельман, канд. техн. наук, профессор;
В.А. Щедрин, канд. техн. наук, профессор (зам. гл. редактора);
В.В. Афанасьев, д-р техн. наук, профессор;
Ю.М. Миронов, д-р техн. наук, профессор;
Г.П. Свинцов, д-р техн. наук, профессор;
А.А. Ильин, канд. техн. наук, доцент;
О.А. Онисова, канд. техн. наук, доцент

*Печатается по решению Научно-технического совета
Чувашского государственного университета*

П78 Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – 618 с.

ISBN 978-5-7677-2998-2

Представлены статьи и доклады третьей Международной научно-технической конференции, проведенной совместно с «Академией электротехнических наук Чувашской Республики», в которых приводятся и обсуждаются результаты актуальных научных исследований в области энергетики, электротехники и энергоэффективности, а также рассматриваются вопросы подготовки инженерных кадров.

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

ISBN 978-5-7677-2998-2

УДК 621.3(06)
ББК 31я43

© Издательство
Чувашского университета, 2019

Лямец Юрий Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры ТОЭ и РЗА ЧГУ, председатель НТС ООО «Релематика». Окончил в 1962 г. энергетический факультет Новочеркасского политехнического института. 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.

Мартынов Михаил Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер-исследователь ООО «Релематика». Окончил в 2011 г. энергетический факультет ЧГУ. В 2014 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование и разработка обучаемых модулей микропроцессорных защит линий электропередачи». E-mail: marupov_mv@relematika.ru.

Маслов Александр Николаевич, аспирант ЧГУ по направлению «Электроэнергетика и электротехника», инженер-исследователь, ООО «Релематика». E-mail: maslov_an@relematika.ru.

ОЦЕНКА МОМЕНТА КОММУТАЦИИ ШУНТИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ТОКА

Александрова М.И., Наумов В.А., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.

Антонов В.И., Иванов Н.Г., ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Аннотация. Предлагается новый подход к решению задачи определения реального момента замыкания электрической цепи в устройствах управляемой коммутации, основанный на адаптивном структурном анализе тока переходного режима. Исследуются метрологические характеристики предложенного метода. Результаты исследований подтверждают возможность повышения точности оценки фактического момента включения шунтирующего реактора без повышения частоты дискретизации тракта АЦП.

Ключевые слова: управляемая коммутация, успешность управляемой коммутации, структурный анализ тока.

Введение

Управляемая коммутация силового электрооборудования имеет целью предотвращение нарушений работы сети и повре-

ждения оборудования путем ослабления переходных процессов. Снижение интенсивности переходных процессов достигается надлежащим выбором момента коммутации с учетом режима работы коммутируемого электрооборудования [1].

Успешность функционирования устройств управляемой коммутации достигается благодаря мониторингу параметров процесса коммутации и внесению, при необходимости, соответствующих корректирующих поправок в расчетное время действия выключателя. В связи с этим важной задачей является оценивание момента осуществленной коммутации.

Высокая точность выбора момента коммутации обеспечивается мониторингом параметров процесса коммутации. В современных устройствах управляемой коммутации для этой цели используются цепи сигналов обратной связи с высокой частотой опроса (порядка 10 кГц) [2]. Это обстоятельство сопряжено с усложнением реализации функции управляемой коммутации в устройствах автоматики, имеющих, как правило, невысокую частоту дискретизации. В связи с этим существует задача определения реального момента коммутации без увеличения частоты дискретизации тракта АЦП.

В настоящей работе предлагается новый способ определения реального момента коммутации на основе адаптивного структурного анализа тока переходного режима в шунтирующем реакторе.

Структурный анализ тока при включении шунтирующего реактора

Известно, что отношение начального значения свободной составляющей к амплитуде принужденной составляющей тока реактора зависит от фазы питающего напряжения [3]

$$\frac{I_0}{I_1} = -\cos \psi. \quad (1)$$

Поскольку оптимальность включения реактора предполагает отсутствие свободной составляющей в токе, то согласно (1) оптимальным будет включение выключателя в моменты, соответствующие фазам напряжения $\psi = \pi/2$ или $\psi = 3\pi/2$. Обычно в качестве уставки принимается угол [3]

$$\psi_{set} = \pi / 2.$$

Идея предлагаемого метода определения фактической фазы включения ψ заключается в использовании зависимости (1), при этом начальное значение свободной составляющей тока реактора I_0 берется со знаком. Точность метода зависит от точности оценки отношения начального значения свободной и амплитуды принужденной составляющих. Высокую точность может обеспечить метод структурного анализа [4, 5].

Инструментом распознавания структуры сигнала в адаптивном структурном анализе является цифровая структурная модель [6]

$$a_0 \hat{x}(k) = - \sum_{m=1}^M a_m x(k-m), \quad k \geq M, \quad (2)$$

где $a_0 \hat{x}(k)$ – взвешенная с коэффициентом a_0 оценка текущего отсчета сигнала $x(k)$, a_m – искомые коэффициенты модели, $M \geq 3$ – порядок структурной модели. Коэффициент a_0 выбирается произвольным, обычно $a_0 = 1$.

Корни характеристического полинома

$$P_M(\underline{\zeta}) = - \sum_{m=0}^M a_m \underline{\zeta}^{-m},$$

структурной модели (2) определяют частоты ω_i и коэффициенты затухания α_i слагаемых сигнала

$$(\alpha_i + j\omega_i)T_s = \ln \underline{\zeta}_i.$$

Здесь T_s – интервал дискретизации.

Комплексные амплитуды слагаемых сигнала определяют из компонентной модели сигнала, формируемой из элементов эффективного ядра структурной модели. В нашем случае модель будет следующей:

$$\hat{x}(k) = c \cos(k\omega T_s) + s \sin(k\omega T_s) + I_0 e^{-k\alpha T_s}, \quad (3)$$

где I_0 – начальное значение аperiodической составляющей, c и s – косинусная и синусная ортогональные составляющие сигнала соответственно. По результатам настройки компонентной модели (3) определяются амплитуда принужденной составляющей как

$$I_1 = \sqrt{c^2 + s^2}$$

и начальное значение аperiodической составляющей I_0 .

Фактическая фаза коммутации шунтирующего реактора оценивается согласно (1):

$$\hat{\psi} = \arccos\left(-\frac{I_0}{I_1}\right). \quad (4)$$

Исследование метрологических характеристик метода

Емкость и активное сопротивление реактора изменяют параметры переходного процесса при коммутации, искажая связь между уровнем аperiodической слагаемой и фазой коммутации (4), лежащей в основе алгоритмической модели метода. Интуитивно ясно, что наибольшее влияние параметров возникает при сочетании минимального значения индуктивности и максимальных значений активного сопротивления и емкости шунтирующего реактора.

Затухание аperiodической слагаемой от момента коммутации до ближайшего момента измерения тока АЦП приводит к тому, что уровень аperiodической составляющей в цифровом сигнале оказывается несколько ниже начального значения аperiodического сигнала в токе. Это приводит к занижению оценки аperiodической слагаемой, что в свою очередь вносит ошибку в оценку фазы коммутации. В этом случае наибольшая ошибка наблюдается в конце интервала дискретизации.

Влияние неучтенных параметров модели реактора и несинхронности процессов дискретизации сигнала и реального момента замыкания электрической цепи на характеристики предложенного метода исследовалось на имитационной модели сети в среде Simulink (рис. 1).

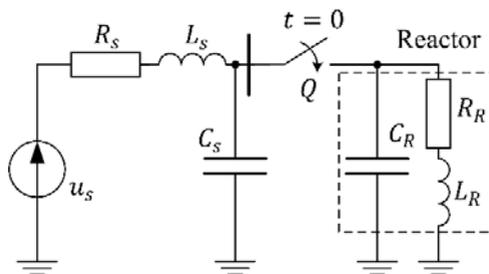


Рис. 1. Схема сети при включении реактора. Параметры схемы:
 $R_R = (0,0017 \div 0,0036)X_R$ Ом; $L_S = 1,4 \div 10,35$ Гн; $C_S = 1,3 \div 4,1$ нФ;
 $R_S = 1,45 \div 10,4$ Ом; $L_S = 0,05$ Гн; $C_S = 10C_R$

Разброс времени включения современных выключателей составляет 2 мс (36°). Поэтому достаточно обеспечить необходимую точность оценки фактической фазы коммутации в $1,8^\circ$ в диапазоне углов включения $90^\circ \pm 36^\circ$.

Зависимость ошибки оценки фазы коммутации от угла включения и различных параметров приведена на рис. 2.

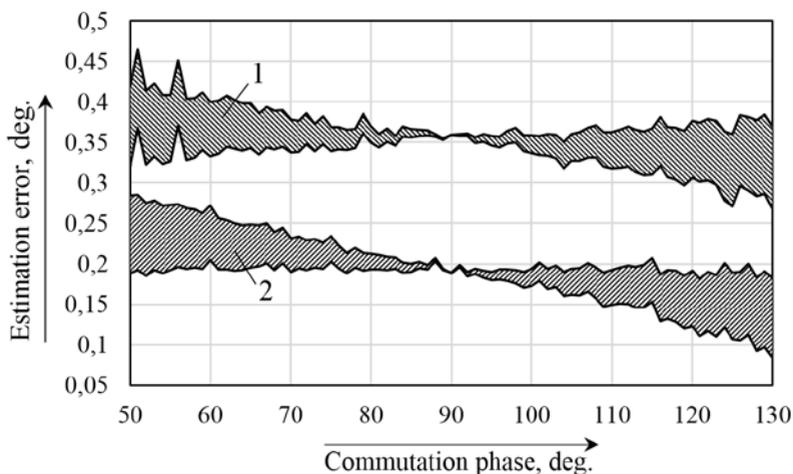


Рис. 2. Области погрешности оценки фазы коммутации в зависимости от угла включения шунтирующего реактора при локализации момента коммутации в пределах интервала дискретизации $T_S = 1/1000$ с: 1 – при максимальных емкостях и активном сопротивлении; 2 – при отсутствии емкостей и минимальном активном сопротивлении

Как и ожидалось, наибольшего значения погрешность оценки фактического момента коммутации достигает при максимальном отличии параметров сети от алгоритмической модели, т.е. при малых индуктивностях и больших значениях активного сопротивления и емкости шунтирующего реактора.

Анализ рисунка показывает, что максимальная погрешность оценки фактического момента коммутации предложенным способом в рабочем диапазоне углов включения от 54° до 126° достаточно мала и не превышает $0,5^\circ$. Погрешность оценки фазы коммутации $\Delta\psi_{\text{затух.}}$, связанная с несинхронностью измерений с реальным моментом замыкания электрической цепи, имеет положительный знак в диапазоне углов включения ψ от 0° до 90° , и отрицательный – в диапазоне от 90° до 180° . Это свойство погрешности полностью объясняется характером зависимости (4).

Заключение

Структурный анализ тока коммутируемого оборудования позволяет реализовать прецизионную оценку фактического момента включения шунтирующего реактора без необходимости увеличения частоты дискретизации. Это открывает возможность реализации функции управляемой коммутации в интеллектуальных электронных устройствах, выполняющих функции РЗА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов Н.Г.* Теоретические основы интеллектуального АПВ протяженных ЛЭП с шунтирующими реакторами / Н.Г. Иванов [и др.] // Электротехника. – 2019. – № 8 – С. 15–21.
2. IEC WG A3.07, «Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers. Planning, Specification and Testing Of Controlled Switching Systems». IEC Technical Brochure No. 264, December 2004, 55 p.
3. *Александрова М.И.* Универсальные принципы управляемой коммутации силового электрооборудования / М.И. Александрова [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 1 (34) – С. 49–54.
4. *Антонов В.И.* Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике / В.И. Антонов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2018. – 334 с.
5. *Антонов В.И.* Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория для инженера / В.И. Антонов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 2 (35) – С. 18–27.

6. Антонов В.И., Ильин А.А., Лазарева Н.М. Адаптивные структурные модели входных сигналов релейной защиты и автоматики// Электротехника. № 1. 2012. С. 52-55.

Авторы:

Александрова Марина Ивановна, инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». В 2018 г. получила степень магистра по направлению «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Автоматика энергосистем» в ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: aleksandrova_mi@ekra.ru.

Наумов Владимир Александрович, заместитель генерального директора – технический директор ООО НПП «ЭКРА». В 2005 г. защитил во ВНИИЭ кандидатскую диссертацию «Анализ и совершенствование продольных дифференциальных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор». E-mail: naumov_va@ekra.ru.

Антонов Владислав Иванович, профессор кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ЧГУ им. И.Н. Ульянова, главный специалист департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». В 2018 г. защитил докторскую диссертацию «Теория и приложения адаптивного структурного анализа сигналов в интеллектуальной электроэнергетике» в ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: antonov_vi@ekra.ru.

Иванов Николай Геннадьевич, руководитель группы разработки интеллектуальных электрических устройств сектора научного сопровождения продукции департамента отдела автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», аспирант Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова по профилю 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы». E-mail: ivanov_ng@ekra.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

I. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯХ	3
<i>Афанасьев В.В., Латин А.В., Орлов В.Н., Туманов Ю.А.</i> Влияние рециркуляции дымовых газов на эмиссию окислов азота котельным агрегатом ТГМЕ-464	3
<i>Орлов В.Н., Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А.</i> Влияние физико-химических факторов на закономерности термораспада древесины	12
<i>Зайцев Ю.В. Мирошниченко А.Ю., Жарницкий В.Я., Андреев Е.В.</i> Основные типы топливных элементов и их особенности.....	22
<i>Бураков И.А. Никитина И.С. Аунг Х.Н., Йе В.А., Ануфриева Е.А., Бураков А.Ю.</i> Оценка применения энерготехнологических заводов на территории Российской Федерации	30
<i>Тарасов В.А., Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасова В.В.</i> Применение цифрового образа процессов в системах отопления для расчета нестационарных режимов.....	37
<i>Болдырева М.К., Чернов С.С.</i> Разработка системы КРІ стратегии теплоснабжения Новосибирска	46
<i>Варганова А.В., Лыгин М.М.</i> Расчет состава топливной смеси для режимных карт котлов	51
<i>Варганова А.В., Панова Е.А., Кушмилль О.Е.</i> Формирование схем заполнения закрытых распределительных устройств в САПР «ЗРУ САД».....	55
<i>Жарницкий В.Я., Андреев Е.В., Мирошниченко А.Ю., Зайцев Ю.В.</i> Энергетические установки на топливных элементах	59
II. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТРАДИЦИОННОЙ И НЕТРАДИЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, В Т.Ч. ВИЭ	66
<i>Жексембиева Н.С., Ербаев Е.Т.</i> Анализ повышения энергетической эффективности установок, использующих ВИЭ.....	66
<i>Щедрин В.А., Рахимов О.С., Тошходжаева М.И.</i> Возможности применения источников распределенной генерации в Республике Таджикистан	72

<i>Кустов А.Н., Зацепина В.И.</i> Возобновляемые источники энергии настоящее и будущее	76
<i>Быков К.В., Лазарева Н.М., Яров В.М.</i> Двухтактные повышающие конверторы с непосредственной связью	81
<i>Фёдоров А-й.О., Солдатов А.В., Петров В.С.</i> Математическая модель асинхронизированного ветрогенератора	86
<i>Иванова В.Р., Гильманова Г.Р.</i> Обоснование проектирования и эксплуатации электротехнических комплексов на основе возобновляемых источников энергии.....	95
<i>Шириев Р.Р., Загидуллина А.Ш.</i> Орбитальная солнечная электростанция.....	98
<i>Федотов А.Ю., Наумов В.А., Антонов В.И.</i> Особенности управления энергоэффективностью солнечных электрических станций	104
<i>Закирова Н.Ж., Истомленников М.А., Павлов П.П.</i> Отдельные проблемные вопросы в электроэнергетике	113
<i>Быковский А.А.</i> Перспективы резонансных систем передачи электрической энергии.....	118
<i>Ушенина А.В., Шульгин Д.А.</i> Синтез полупроводникового соединения $CuAlO_2$	124
<i>Зацепина В.И., Долгов И.В.</i> Система автономного электроснабжения базовой станции.....	128
<i>Садькова Л.А.</i> Современное состояние и перспективы развития нетрадиционной энергетики в Западно-Казахстанской области.....	132
<i>Узенбаева С.А., Шульгин Д.А.</i> Тонкие пленки ZnO легированные алюминием	138

III. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ, РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ..... 144

<i>Воронов П.Л., Доронин А.В., Мясников Е.Ю.</i> Адаптация защиты от потери возбуждения синхронного генератора к режиму повышенного потребления реактивной мощности.....	144
<i>Иванов Н.Г., Антонов В.И., Наумов В.А., Александрова М.И.</i> Анализ алгоритмов предсказания напряжения в паузе цикла интеллектуального АПВ	151

<i>Петряшин А.Е., Петряшин И.Е., Белянин А.А.</i> Анализ перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6-35 кВ	160
<i>Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я., Макашкин Ф.А.</i> Инвариантные параметры поврежденного состояния энергообъекта	164
<i>Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я., Макашкин Ф.А.</i> Информационные свойства пассивной модели наблюдаемого энергообъекта	169
<i>Исмуков Г.Н., Подшивалин А.Н., Чернов А.Ю.</i> Исследование метода активного волнового определения места повреждения трехпроводной линии электропередачи	173
<i>Алексеев В.С., Петров В.С.</i> Исследование условия пуска автоматики фиксации тяжести короткого замыкания	179
<i>Кудряшова М.Н., Антонов В.И., Солдатов А.В., Наумов В.А.</i> Новые методы повышения устойчивости функционирования защит от перемежающихся дуговых замыканий	184
<i>Мартынов М.В., Никонов И.Ю.</i> Основы универсальной методики задания уставок	188
<i>Ефремов В.А., Ефремов А.В., Петрушков М.Ю., Широкина Е.В.</i> Особенности выполнения защит линий при наличии ветровых электростанций	193
<i>Смирнов С.Ю., Онисова О.А.</i> Особенности функционирования дистанционной защиты в сети с ветроэлектростанцией на базе асинхронного генератора двойного питания	200
<i>Андреева Е.А., Марков Н.Ю., Солдатов А.В., Антонов В.И.</i> Оценивание параметров режима цифровой электрической сети при потере наблюдаемости	208
<i>Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я., Маслов А.Н., Мартынов М.В.</i> Оценивание распознающей способности релейной защиты при увеличении числа замеров	214
<i>Александрова М.И., Наумов В.А., Антонов В.И., Иванов Н.Г.</i> Оценка момента коммутации шунтирующего реактора на основе адаптивного структурного анализа тока	221
<i>Чернов В.К., Чумаров С.Г.</i> Применение протоколов синхронизации NTP и RTP для интеллектуальных электронных устройств в энергетике	228
<i>Серебрянников А.В., Серебрянникова В.Н., Самсонов А.И.</i> Принципы уменьшения фазового сдвига между мгновенными аналоговыми и дискретными сигналами и соответствующими значениями в SV-потоке в цифровой подстанции	232

Научное издание

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ЭНЕРГЕТИКИ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

Материалы III Международной научно-технической
конференции

Публикуется в авторской редакции

Отв. за выпуск В.Г. Ковалев

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

Подписано в печать 05.11.2019. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 35,45. Уч.-изд. л. 22,75.
Тираж 300 экз. Заказ № 1327.

Отпечатано в типографии Чувашского университета
428015 Чебоксары, Московский просп., 15