

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

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ПРЕДСКАЗАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ПАУЗЕ ЦИКЛА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АПВ

Иванов Н.Г., Антонов В.И., Чувашский государственный университет, НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.

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

***Аннотация.** Техническое совершенство устройств интеллектуального АПВ в основном обеспечивается методами предсказания напряжения на контактах выключателя. В работе анализируются алгоритмы предсказания напряжений и выбора оптимального момента включения в устройствах интеллектуального АПВ. Результаты анализа показывают, что наиболее перспективен метод предсказания напряжения на основе адаптивного структурного анализа.*

***Ключевые слова:** интеллектуальное автоматическое повторное включение, коммутационные перенапряжения, адаптивный структурный анализ.*

Введение

Протяженные линии электропередачи в паузе цикла автоматического повторного включения сохраняют в фазах значительный остаточный заряд. Повторное включение такой линии сопровождается интенсивным волновым переходным процессом, вызывающим опасные перенапряжения в сети. Уровень возникающих перенапряжений зависит от величины напряжения на контактах выключателя в момент коммутации, и может в 3–5 раз превышать амплитуду наибольшего рабочего напряжения сети [1].

Современным средством борьбы с перенапряжениями при АПВ считается технология управления моментом коммутации [2, 3]. Идея управляемого повторного включения ЛЭП, получившего название интеллектуального АПВ [4, 5], заключается в выборе того момента, когда складываются наилучшие условия для уменьшения интенсивности переходного процесса на ЛЭП после включения. Поскольку команда включения должна подаваться на выключатель с опережением, равным времени его включения, то система управления должна обладать возможностью предсказания как кривых напряжения со стороны шин системы, так и со стороны ЛЭП. Точное предсказание напряжений

является необходимым условием эффективности интеллектуального АПВ.

В связи с этим в докладе анализируются алгоритмы предсказания напряжений и выбора оптимального момента включения в устройствах интеллектуального АПВ.

Оптимальный момент повторного включения

Электрическая сеть со стороны шин системы во время паузы АПВ находится в установившемся режиме. Поэтому напряжение системы легко предсказать с помощью фильтров ортогональных составляющих [6].

В это же время в отключенных фазах происходит колебательный разряд распределенной емкости ЛЭП через индуктивность шунтирующих реакторов. Частота свободных колебаний зависит от степени компенсации зарядной мощности и обычно находится в диапазоне от 30 до 60 Гц [7, 8]. В результате напряжение на контактах выключателя имеет форму биений (Рис. 1).

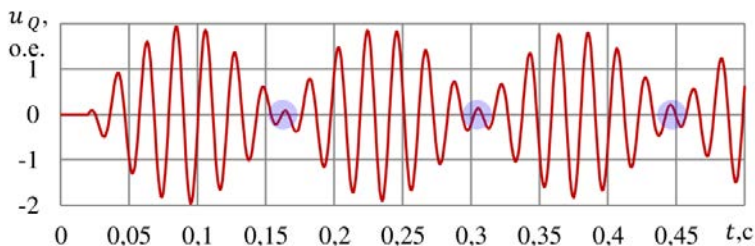


Рис. 1. Кривая напряжения на контактах выключателя u_Q в цикле АПВ компенсированной ЛЭП и оптимальные моменты коммутации (закрашены кругами) при 80% компенсации зарядной мощности

Известны различные стратегии повторного включения. В качестве моментов включения выбирают: точку перехода кривой напряжения на контактах выключателя u_Q через нуль [9], точку, в которой огибающая напряжения u_Q достигает минимума [8, 10], или точку, при которой переход кривой u_Q через нуль находится вблизи минимума огибающей [11]. Единый подход к выбору момента включения до последнего времени не складывался из-за отсутствия строгого теоретического описания процессов при интеллектуальном АПВ. Лишь недавно в работе [4]

механизмы снижения перенапряжений были теоретически обоснованы, и было доказано, что наиболее эффективное смягчение перенапряжений достигается при включении в точке перехода напряжения на контактах выключателя через нуль вблизи минимума его огибающей.

Предсказание напряжений в паузе интеллектуального АПВ

В устройствах интеллектуального АПВ, осуществляющих повторное включение ЛЭП в момент минимума огибающей, предсказывается только огибающая напряжения на контактах выключателя, используя либо шаблон [12], либо измерения периода биений [10]. Поэтому предсказание самых кривых напряжений в этих устройствах не требуется.

Предсказание с помощью шаблона основано на оконной обработке сигнала. На первом окне выполняется измерение напряжения на контактах выключателя и вычисление его огибающей (Рис. 2, а). Затем полученная таким образом огибающая используется в качестве шаблона, с которым сравнивается огибающая второго участка сигнала. Если обнаруживается соответствие между первым и вторым окнами, то уже огибающая второго окна перемещается на 2 окна вправо, и точка минимума его напряжения на новом месте выбирается в качестве точки включения. В случае расхождения между шаблоном и огибающей на втором окне описанный цикл поиска минимума огибающей повторяется.

Размер окна обработки сигнала выбирается заранее на основе данных о ЛЭП, поэтому изменение периода биений, например, из-за регулирования степени компенсации зарядной мощности ЛЭП, приводит к потере работоспособности этого способа. Пример такого случая приведен на Рис. 2, б.

Более совершенным является *способ предсказания, основанный на измерении периода биений напряжения*. В этом случае в качестве предсказываемого момента повторного включения выбирают точку, смещенную на оси времени относительно максимума огибающей на половину периода биений (Рис. 3).

Оба рассмотренных выше способа основаны на предположении о периодическом характере биений напряжения на контактах выключателя. Однако как показывают исследования, в некоторых режимах напряжение со стороны ЛЭП в паузе цикла

трехфазного АПВ содержит две затухающие гармонические составляемые различных частот. В этих режимах огибающая напряжения на контактах выключателя имеет уже не периодический характер, в связи с чем оба способа теряют работоспособность.

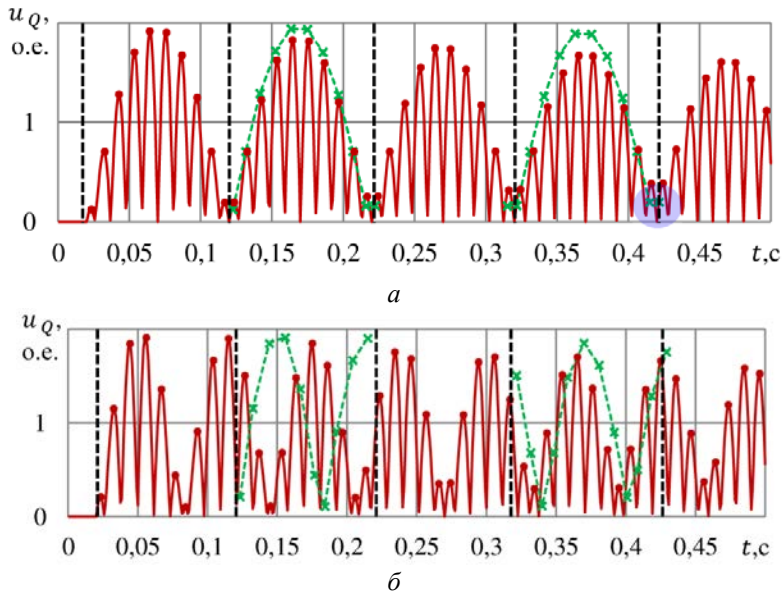


Рис. 2. Предсказание минимума огибающей напряжения u_Q с использованием шаблона огибающей при удачном (а) и неудачном (б) выборе размера окна

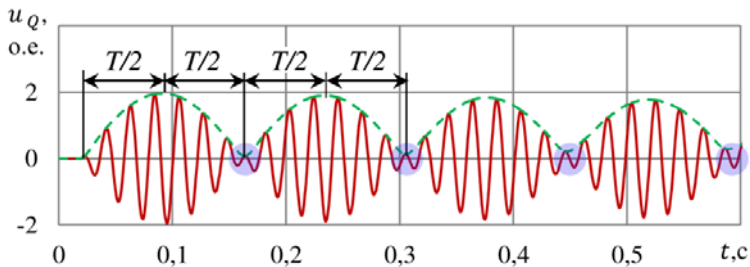


Рис. 3. Предсказание минимума огибающей напряжения на основе оценки периода биений

Наилучшим техническим совершенством обладают *способы предсказания напряжения, основанные на методах адаптивного структурного анализа сигнала* [11, 5]. В этих алгоритмах создается адаптивная структурная модель для экстраполяции кривой напряжения и с помощью нее предсказывается оптимальный момент повторного включения ЛЭП.

Формирование адаптивной модели сигнала осуществляется в два этапа [13]. На первом из них определяется структура сигнала и комплексные частоты его составляющих. Для этого используется структурная модель сигнала

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

где $a_0 \hat{x}(k)$ – взвешенная с коэффициентом a_0 оценка текущего отсчета сигнала $x(k)$, a_m – искомые коэффициенты модели, M – порядок модели. Коэффициент a_0 может быть произвольным, обычно $a_0=1$. Настройка структурной модели осуществляется на заданной выборке из N отсчетов сигнала по критерию наименьших квадратов

$$E(k) = \sum_{l=k-N+1}^k [a_0 x(l) - a_0 \hat{x}(l)]^2 \rightarrow \min. \quad (1)$$

Корни характеристического полинома структурной модели

$$P(z) = \sum_{m=0}^M a_m z^{-m},$$

определяют комплексные частоты слагаемых структурной модели

$$p_i T_s = (\alpha_i + j\omega_i) T_s = \ln z_i,$$

где T_s – интервал дискретизации сигнала. В общем случае часть корней z_i ассоциированы со слагаемыми измеряемого напряжения, а другая часть – с шумом в сигнале. Поэтому для следующего этапа структурного анализа отбираются только те корни, которые согласованы с полезными слагаемыми.

На втором этапе для M_e полезных составляющих входного сигнала составляется компонентная модель

$$\hat{x}(k) = \sum_{m=1}^{M_e} A_m e^{(-\alpha_i + j\omega_i)kT_s}. \quad (2)$$

Комплексные амплитуды слагаемых сигнала A_i определяются путем настройки компонентной модели сигнала, которая, как и в случае структурной модели осуществляется по критерию наименьших квадратов (1).

Ключевое совершенство методов адаптивного структурного анализа заключено в их способности прецизионного предсказания кривой напряжения с произвольным числом слагаемых, отсутствие жестких требований к выбору окна настройки модели и способность предсказания как точек минимума огибающей, так и точек перехода напряжения на контактах выключателя через нуль.

В работах [11, 14] отмечается высокая чувствительность адаптивных моделей к шумам в сигнале. Для преодоления этого недостатка авторы предлагают повышать порядок M структурной модели. На основе результатов вычислительных экспериментов авторы дают рекомендацию принимать порядок модели от 50 до 80. Однако такую рекомендацию нельзя считать достаточно обоснованной и универсальной, поскольку, как известно из теории адаптивных структурных моделей [5], необходимый для успешного распознавания сигнала порядок модели зависит от множества факторов: порядка сигнала (числа корней в Лапласовом изображении сигнала), степени близости комплексных частот слагаемых сигнала, частоты дискретизации и уровня шумов [15]. Для разрешающей способности порядок структурной модели и частота дискретизации должны выбираться таким образом, чтобы минимизировать взаимную конкуренцию между составляющими структурной модели [16, 17]. В рассматриваемой задаче это означает, что выбор параметров структурной модели должен основываться на результатах анализа характеристических параметров сигнала. В работах [11, 14] такой анализ отсутствует, поэтому оптимальные параметры структурной модели нуждаются в уточнении.

Кроме того, нужно обратить внимание на предлагаемое в работах [11, 14] в качестве дополнительного средства повышения разрешающей способности адаптивных моделей метод, использующий настройку моделей с минимальной нормой. В то же время существует множество других методов настройки, обладающие большей устойчивостью к влиянию шумов, напри-

мер, методы, основанные на решении общей задачи МНК [18]. Поэтому следующим шагом на пути совершенствования технологии интеллектуального АПВ является разработка методов настройки, обеспечивающих устойчивость настройки структурных моделей и не требующих значительных вычислительных ресурсов.

Выводы

1. Совершенство устройств интеллектуального АПВ в основном обеспечивается методами предсказания напряжения на контактах выключателя на значительном отрезке времени. Наиболее перспективным инструментом решения этой задачи является адаптивный структурный анализ сигнала.

2. Своеобразие задачи и необходимость высокой точности предсказания кривой напряжения повышают требования к технологии распознавания структуры сигнала, в связи с чем существующие рекомендации к выбору параметров адаптивных моделей сигнала и методов их настройки в устройствах интеллектуального АПВ нуждаются в уточнении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 *Базуткин В.В.* Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов / В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь; Под общ. ред. В.П. Ларионова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

2 *Insulation Coordination for UHV AC Systems // CIGRE TB542, Working Group C4.306. June, 2013.*

3 *Александрова М.И.* Универсальные принципы управляемой коммутации силового электрооборудования / М.И. Александрова [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – №1. – С. 49–54.

4 *Иванов Н.Г.* Теоретические основы интеллектуального АПВ протяженных ЛЭП с шунтирующими реакторами / Н.Г. Иванов, В.А. Наумов, В.И. Антонов, Е.Н. Кадышев // Электротехника, №8, 2019. С. 15–21.

5 *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.

6 *Антонов В.И.* Общие начала теории фильтров ортогональных составляющих / В.И. Антонов [и др.] // Релейная защита и автоматизация, №1, 2016. С. 14–23.

7 *Иванов Н.Г.* Анализ структуры напряжения компенсированной ЛЭП в паузе цикла автоматического повторного включения / Н.Г. Иванов [и др.] // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы 11-й Всерос. науч.-техн. конф., Чебоксары, 2018, с. 249-253.

8 *Беляков Н.Н.* Способ ограничения перенапряжений при повторных включениях линий электропередач / Н.Н. Беляков, В.С. Рашкес // Электричество, №2, 1975. С. 22-28.

9 *Maury E.* Synchronous Closing of 525 and 765 kV Circuit Breakers: A Means of Reducing Switching Surges on Unloaded Lines / Maury E. // CIGRE Report No. 143, 1966.

10 *Mestas P.* Implementation and Performance Evaluation of a Reclosing Method for Shunt Reactor-Compensated Transmission Lines / P. Mestas, M.C. Tavares, A.M. Gloe // IEEE trans. on power deliv. Vol.26, №2. – 2011.

11 *Pilz G.* A Algorithm for Three-Pole Controlled Auto-Reclose of Shunt Compensated Transmission Lines With a Optimization for The Second and Third Pole / G. Pilz [and other] // CIGRE A3-115 Session. - 2004.

12 *Froehlich K.* Controlled closing on shunt compensated transmission lines. Part I and II / K. Froehlich [and other] // IEEE trans. on power deliv. Vol.12, №2. – 1997.

13 *Антонов В.И.* Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория для инженера / В.И. Антонов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – №2. – С. 18–28.

14 *Schegner P.* Analysis of Noisy Voltage Signal with a High Resolution of Frequency for the Closing of Transmission Lines/ P. Schegner, G. Pilz, C. Wallner // 14th PSCC, Sevilla. – 2002.

15 *Антонов В.И.* Обработка сигнала с высокой частотой дискретизации в цифровой релейной защите и автоматики / В.И. Антонов [и др.] // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. трудов НПП «ЭКРА». Выпуск 2. – Чебоксары: РИЦ "СРЗАУ". – 2013. – С.12-21.

16 *Антонов В.И.* Эффективные структурные модели входных сигналов цифровой релейной защиты и автоматики / В.И. Антонов, В.А. Наумов, А.И. Фомин // Электричество. – 2012. – №11. – С.2-8.

17 *Антонов В.И.* Фундаментальные свойства эффективных структурных моделей тока короткого замыкания электрической сети / В.И. Антонов [и др.] // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. трудов НПП «ЭКРА». Выпуск 3. – Чебоксары: РИЦ "СРЗАУ". – 2014. – С.18-29.

18 *Антонов В.И.* Характеристики методов настройки адаптивных структурных моделей аварийных сигналов электрической сети /

В.И. Антонов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – №1. – С. 23–30.

Авторы:

Иванов Николай Геннадьевич, руководитель группы разработки ИЭУ НПП «ЭКРА», аспирант ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Получил степень магистра техники и технологии по направлению «Электроэнергетика и электротехника» в 2013 г. на кафедре ТОО и РЗА электроэнергетического факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: ivanov_ng@ekra.ru.

Антонов Владислав Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры ТОО и РЗА ЧГУ им. И.Н. Ульянова, главный специалист департамента автоматизации энергосистем НПП «ЭКРА». Получил диплом инженера-электрика в 1978 г. на факультете электрификации и автоматизации промышленности ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2018 г. защитил в докторскую диссертацию «Теория и приложения адаптивного структурного анализа сигналов в интеллектуальной электроэнергетике» в ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: antonov_vi@ekra.ru.

Наумов Владимир Александрович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора – технический директор НПП «ЭКРА». Получил диплом инженера в 2001 г., защитил магистерскую диссертацию в 2002 г. на электроэнергетическом факультете ЧГУ им. И.Н. Ульянова. 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.

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.

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

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