ISSN 1810-1909

ВестниК
ЧУВАШСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 1 2020

Электротехника и энергетика

Научный журнал

Основан в марте 1995 г.

Учредитель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, в базы данных ВИНИТИ РАН, Научную электронную библиотеку (elibrary.ru), электронную библиотеку «Cyberleninka», международную справочную систему «Ulrich's International Periodicals Directory», индексируется в базе данных «Российский индекс научного цитирования».

Адрес редакции: 428015, Чебоксары, Московский пр., 15,
тел. (8352) 45-20-96, 58-33-63 (доб. 2030)
e-mail: vestnik210@mail.ru, vestnik@chuvsu.ru
http://www.chuvsu.ru/university/vestnik.htm

ISSN 1810-1909

VestniK
CHUVASHSKOGO UNIVERSITETA

№ 1 2020

Electrical Technology and Power Engineering

Scientific Journal

Since March, 1995

Founder:
Federal State Educational Budgetary Institution
of Higher Education
the Ulyanov Chuvash State University

The journal is included in the list of journals which are regarded as academic publications by the State Commission for Academic Degrees and Titles (VAK), in the Abstract Journal and VINITI databases, Ulrich's International Periodicals Directory, Scientific Electronic Library (elibrary.ru), Cyberleninka Electronic Library. The journal is indexed in Russian Science Citation Index.

Address: 15, Moskovskiy pr., Cheboksary, Chuvash Republic, 428015, Russia
Tel. +7(8352)45-20-96, 58-33-63 (2030)
E-mail: vestnik210@mail.ru, vestnik@chuvsu.ru
http://www.chuvsu.ru/university/vestnik.htm

УДК 621.311.001.57:681.51
ББК 31.278

А.К. АБД ЭЛЬРАХИМ, Д.С. ОБЫЧАЙКО, В.А. ШИХИН

ОЦЕНИВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОЭНЕРГОСИСТЕМЫ В МУЛЬТИАГЕНТНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

Ключевые слова: *мультиагентная система, микроэнергосистема, эффективность микроэнергосистемы, распределенная генерация, возобновляемые источники энергии.*

В статье предлагается подход для решения задачи оценивания эффективности функционирования микроэнергосистемы (microgrid), представленной в виде мультиагентной системы. Предлагаемый в работе подход основан на схеме, разработанной для оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы путём рассмотрения оценки функционирования как микроэнергосистемы в целом, так и отдельных её субъектов (агентов), что позволяет формализовать процесс интеграции разнородных целевых функций в единые критерии по типовым индексам эффективности функционирования микроэнергосистемы: техническим, экономическим и экологическим. Научная новизна данной работы состоит в разработке метода комбинированного оценивания технической, экономической и экологической эффективности функционирования микроэнергосистемы на основе мультиагентного представления, что является основой для решения задачи многокритериальной оптимизации. Алгоритм оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы направлен на решение практических задач проектирования гибридно-генерирующих и экологически безопасных теплоэлектроснабжающих систем в изолированных районах.

Введение. Рассмотрим микроэнергосистему (микрогрид), представляющую собой единое объединение с централизованным управлением разнородных распределенных источников энергии, возобновляемых источников энергии, накопителей энергии и разнотипных потребителей [8, 12].

В настоящее время активно обсуждаются направления развития энергетики в контексте все более широкого внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В таких удаленных регионах, как, например, арктические или островные, внедрение ВИЭ является одним из перспективных и уже отчасти используемых решений проблемы обеспечения бесперебойного энергоснабжения. Однако вопрос повышения эффективности локальных энергосистем, в том числе с ВИЭ, остаётся актуальным. Повышение эффективности связано не только с внедрением новых источников энергии, но и с совершенствованием способов и технологий управления локальными микроэнергосистемами.

Микроэнергосистемы относятся к классу сложных динамических систем, под которыми обычно понимаются системы с наличием разветвленной структуры, перекрестных связей, неопределенности различных типов, нестабильности характеристик элементов, нелинейностей и др. Решение задач управления в подобных системах связано с использованием подходов на основе декомпозиции. В этом смысле мультиагентное представление (MAC-технология) многокомпонентной системы предлагает декомпозицию на основе введения в рассмотрение взаимосвязанных агентов [6, 9].

Особенности локальных микроэнергосистем. Стратегии управления микроэнергосистемой могут существенно и даже концептуально отличаться от стратегий управления традиционными энергосистемами. Основные причины заключаются в следующем [5]:

– стационарные и динамические характеристики субъектов микроэнергосистем существенно отличаются от аналогичных характеристик мощных энергоустановок;

– микроэнергосистемы подвержены значительному дисбалансу из-за наличия однофазных нагрузок и/или нестабильности распределенной генерации;

– значительная часть выработки электроэнергии в микроэнергосистеме может поступать от «неуправляемых» источников (например, ветроэлектрические установки ВЭУ), когда для максимизации выходной мощности возобновляемого источника энергии используется стратегия управления на базе максимальной точки отслеживания мощности (MPPT);

– широко применяемые в микроэнергосистеме накопители энергии могут играть важную роль в реализации управления ею и обеспечения ее устойчивой работы, однако следует учитывать то, что они являются частично-управляемыми и нелинейными источниками;

– субъекты микроэнергосистемы подвержены частым коммутациям и перекоммутациям по условиям обеспечения надежности энергоснабжения и качества электроэнергии;

– в дополнение к выработке и поставке электрической энергии микроэнергосистема, как правило, отвечает за производство и подачу тепла ко всем или части потребителей;

– в рамках микроэнергосистемы предусматриваются более широкие возможности по децентрализации управления передачей и потреблением электроэнергии, однако сохраняется принцип сочетания централизованного и децентрализованного управления;

– существующие погрешности измерений и ошибки при передаче информации по линиям связи являются более чувствительными при решении задач управления в мелкомасштабных локальных системах, каковыми являются микроэнергосистемы;

– в рамках микроэнергосистемы решения, принимаемые для какого-либо субъекта, оказывают, как правило, существенное влияние на управление процессами в её смежных фрагментах.

Таким образом, указанные специфические черты отдельных субъектов и микроэнергосистемы в целом приводят к тому, что данная динамическая система может быть охарактеризована как нелинейная непрерывно-дискретно-событийная система с переменными труднопредсказуемыми параметрами и перекрестными связями. Проведение аналитических исследований таких систем крайне затруднительно и возможно только при существенных упрощениях, которые, как правило, недопустимы по соображениям потери важной информации.

В связи с указанными выше характеристиками подобных систем, относящихся к рассматриваемому классу объектов, задача нахождения эффек-

тивных подходов, применимых для решения задачи многокритериальной оптимизации микроэнергосистем в реальном времени, является актуальной проблемой.

Для целей повышения эффективности функционирования микроэнергосистемы в соответствии с устанавливаемыми применительно к конкретным условиям критериями очевидна необходимость перехода к интеллектуальному автоматизированному управлению, гибко учитывающему множество факторов, разнопланово влияющих на протекающие процессы в единой системе[1] [11].

Мультиагентное представление системы в задачах управления микроэнергосистемой. В последние годы мультиагентная форма представления многокомпонентных динамических систем находит всё большее применение [7, 10], в том числе для исследования микроэнергосистем [4, 9], позволяя создавать иерархические системы управления на основе распределения функций управления между автономными и кооперативными агентами, реализуя такие важные характеристики, как модульность, гибкость, надёжность, реконфигурируемость и т. п. Применение МАС-технологии в приложении к рассмотрению микроэнергосистем позволяет по-новому подойти к решению задачи создания систем с комбинированным централизованным и децентрализованным управлением.

Решение оптимизационных задач, связанных с многоцелевым управлением при наличии противоречивых критериев и неравновесным распределением критериев между разнородными субъектами динамической системы, можно связать с мультиагентным представлением исходной системы и предложить эффективные методы решения по оптимизации её функционирования.

Как известно, решение задач управления в сложных динамических системах, под которыми обычно понимаются системы высокой размерности с наличием разветвлённой структуры с перекрестными связями, неопределённости различных типов, нелинейностей и др., связано с подходами на основе декомпозиции систем такого рода. В этом смысле МАС-технология предлагает именно такую декомпозицию на основе введения в рассмотрение взаимосвязанных агентов. Итак, применение мультиагентных подходов является перспективной технологией для управления и принятия решений в системах, где существуют распределённое управление и неопределённость, связанная с реализуемым каждым агентом законом управления, труднопредсказуемым поведением внешней среды, возможными потерями полной наблюдаемости и управляемости объектами.

Следует отметить, что применение мультиагентного подхода позволяет более полно отразить наличие данных по отдельным субъектам (агентам) системы, что обусловливает возможность получения более обоснованных решений и ведет к повышению эффективности функционирования как системы в целом, так и каждого агента в отдельности.

[1] ГОСТ Р МЭК 62264-1-2014 «Интеграция систем управления предприятием. Часть 1. Модели и терминология». М.: Стандартинформ, 2016.

На рис. 1 приведено формализованное представление агента, принятое в данной работе с учётом основных функциональных черт, присущих агенту: рассуждение, самонастройка, самооптимизация, коммуникабельность, активность.

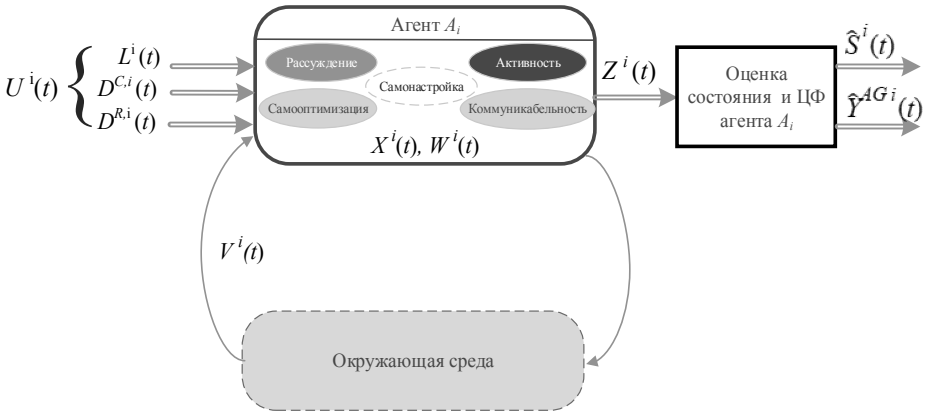


Рис. 1. Формализованное представление агента МАС:
$U^i(t)$ – вектор входных ограничений и уставок, связанный с функциональной чертой «коммуникация», при этом $U^i(t) = [L^i, D^{C,i}, D^{R,i}]^T$, где L – технологические ограничения агента; $D^{C,i}$ – вектор входных команд; $D^{R,i}$ – вектор входных рекомендаций; $Z(t)$ – вектор выходных переменных, характеризующих протекание физических процессов во времени, по которым идентифицируется состояние агента; $S(t)$ – вектор состояний агента, связанный с его функциональной чертой «активность»; Y^{AG} – показатель качества функционирования агента; $X(t)$ – вектор параметров и событийно-изменяющихся констант агента, связанный с его функциональными чертами «самонастройка» (в отношении параметров) и «рассуждение» (в отношении констант); $W(t)$ – вектор внутренних генерируемых управлений агента, связанный с его функциональной чертой «самооптимизация»

На рис. 1. представлен некоторый i-й агент A_i, обладающий набором функциональных черт, описание которых сформулируем в виде определений:

Определение 1. «Коммуникабельность»: под «коммуникабельностью» понимается способность агента взаимодействовать с другими интеллектуальными агентами посредством приема внешних входных команд D^C и внешних рекомендаций D^R с учетом своих технологических ограничений L, а также способность генерировать D^C и D^R либо только D^R, либо ни то, ни другое.

Определение 2. «Активность»: агент должен быть способен реагировать в режиме реального времени в форме изменений своих возможных состояний $S(t, Z(t))$.

Определение 3. «Рассуждение»: агент, чтобы реализовать свои цели, должен быть способен принимать решения по изменению своих констант (событийно изменяющихся) на основе анализа постоянно поступающих новых данных.

Определение 4. «Самонастройка»: под «самонастройкой» понимается способность агента автономно подстроить свои внутренние параметры в связи с происходящими изменениями.

Определение 5. «Самооптимизация»: агент должен быть способен оптимизировать свои ресурсы для повышения эффективности исполнения своих задач Y^{AG}, что ведет к повышению эффективности системы в целом в соответствии с установленными показателями эффективности системы Y^{SYS}.

Определение 6. «Состояние агента»: под «Состоянием агента» S^i будем понимать вектор, описывающий изменяющиеся во времени технические и/или технологические внутренние черты соответствующего агента. Предлагаемый перечень возможных состояний агентов и способы их оценивания представлены в табл. 1.

Таблица 1

Возможные состояния агентов и способы их оценивания

№	Наименование состояния	Тип оценки состояния	Источник исходной информации	Оцениватель
1/2	$S_{1/2}(t)$ (включен/выключен)	детерминированный	выход агента ЦУС ($Z^{ЦУС}$)	не требуется
3/4	$S_{3/4}(t)$ (рабочее состояние/ аварийное состояние)	вероятностный P	выход i-го агента – (Z^i)	ИНС
5/6	$S_{5/6}(t)$ (нарастающий процесс/ убывающий процесс)	временной ряд y_t	выход i-го агента – (Z^i)	ARIMA-модель

Наблюдаемость множества состояний агентов, составляющих микроэнергосистемы, является важным свойством, поскольку не только служит источником представления необходимой критической информации по работоспособности системы, но и существенно влияет на эффективность ее функционирования.

Были выделены три основных компонента, определяющих вектор состояния агентов $S^i(t)$ (см. табл. 1):

1. Детерминированная бинарная составляющая $S^i_{1/2}(t) \triangleq Z_{c,i}^{\text{ЦУС}}$, определяющая базовое состояние агента, т.е. соответствующий агент A_i находится во включенном или выключенном состоянии.

2. Вероятностная составляющая $S^i_{3/4}(t) \triangleq P(a^i \le Z^i \le b^i)$, где a^i, b^i – переделы агента A_i как рабочее (исправное) или аварийное состояние. Для оценивания $S_{3/4}$(t) предлагается использовать искусственную нейронную сеть (ИНС).

3. Составляющая $S^i_{5/6}(t)$ в виде временного ряда $S^i_{5/6}(t) \triangleq ARIMA^i_t = \hat{Z}^i_t$, *ARIMA* – оценка выхода i-го агента на основе ARIMA-модели, описывающей нарастание/убывание значения соответствующего выхода агента A_i. Например, эта составляющая вектора состояний S^i позволяет прогнозировать возможность дисбаланса генерируемой и потребляемой мощностей и, следовательно, дает возможность избежать дефицита активной мощности в микроэнергосистеме. В качестве метода оценивания $S^i_{5/6}(t)$ предлагаем использовать ARIMA-модель «интегрированная модель авторегрессии – скользящего среднего». Модель ARIMA(p, d, q), определяется следующим уравнением:

$$ARIMA_t = \Delta^d x_t = c + \sum_{i=1}^{p} a_i \Delta^d x_{t-i} + \sum_{j=1}^{q} b_j \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где ε_t – стационарный временной ряд; c, a_i, b_j – параметры модели; Δ^d – оператор разности временного ряда порядка d (последовательное взятие d раз разностей первого порядка – сначала от временного ряда, затем от полученных разностей первого порядка, затем от второго порядка и т.д.); p – порядок авторегрессии; q – порядок скользящего среднего.

Среди преимуществ ARIMA моделей можно отметить гибкость, позволяющую модели ARIMA описывать большой спектр характеристик временных рядов [1].

В итоге вектор оценки состояний агента A_i будет иметь вид

$$\hat{S}^i(t) = (\hat{S}^i_{1/2}(t), \hat{S}^i_{3/4}(t), \hat{S}^i_{5/6}(t))^T. \quad (2)$$

Предлагается набор агентов, соответствующих основным субъектам микроэнергосистемы (табл. 2). Однако перечень агентов может быть расширен для более подробного описания или в связи с конкретными специфическими чертами рассматриваемой системы. Например, для наногрид (малая микроэнергосистема) необходимо учитывать инвертеры в качестве отдельного субъекта системы, поскольку они оказывают более значимое влияние на устойчивость и качество процессов [3].

Таблица 2

Формализованные агенты и их функциональность в составе МАС-микроэнергосистемы

Агент, A_i	**Функциональность, F_{ij1}**
1. Центр управления и связи (ЦУС) микроэнергосистемы, агент A_1	$F_{1,1}$ – ответственность за управление микроэнергосистемой; $F_{1,2}$ – отслеживание и планирование режимов распределенных и возобновляемых источников энергии; $F_{1,3}$ – прогнозирование генерируемой мощности соответствующего источника ВИЭ; $F_{1,4}$ – прогнозирование состояния накопителей энергии; $F_{1,5}$ – стабилизация частоты в микроэнергосистеме; $F_{1,6}$ – обеспечение динамической устойчивости микроэнергосистемы
2.Распределительная электросеть (РЭС), включающая подстанцию, агент A_2	$F_{2,1}$ – ответственность за внешнее по отношению к микроэнергосистеме электроснабжение; $F_{2,2}$ – прием излишков электроэнергии от микроэнергосистемы во внешнюю электросеть
3. Распределенные дизель-генераторные установки (ДГУ), агент A_3	$F_{3,1}$ – ответственность за генерируемую мощность соответствующего распределённого генератора или группы генераторов
4. Распределенные газопоршневые установки (ГПУ), агент A_4	$F_{4,1}$ – ответственность за генерируемую мощность соответствующего распределённого генератора или группы генераторов
5. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ): солнечная электростанция (СЭС), агент A_5	$F_{5,1}$ – ответственность за генерацию соответствующей СЭС
6. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ): ветровая электростанция (ВЭС), агент A_6	$F_{6,1}$ – ответственность за генерацию соответствующей ВЭС

Окончание табл. 2

Агент, A_i	**Функциональность, F_{ij1}**
7.Накопители энергии (НЭ), агент A_7	$F_{7,1}$ – участие в покрытии дефицита мощности; $F_{7,2}$ – участие в поглощении избытка мощности; $F_{7,3}$ – участие в регулировании частоты; $F_{7,4}$ – повышение динамической устойчивости микроэнергосистемы
8. Спрос потребителя (ПЭЭ), агент A_8	$F_{8,1}$ – целевое использование электроэнергии
9. Спрос ценозависимого потребителя (ЦЗП), агент A_9	$F_{9,1}$ – целевое использование электроэнергии; $F_{9,2}$ – участие в регулировании мощности
10. База данных реального времени (БДРВ), агент A_{10}	$F_{10,1}$ –сбор, хранение, обмен данными и архивами
11. Система имитационного моделирования (SIM), агент A_{11}	$F_{11,1}$ – моделирование, тестирование режимов функционирования микроэнергосистемы

Формулировка целевых функций. Большинство известных из литературы подходов к решению оптимизационных задач применительно к управлению микроэнергосистемами формулируется в рамках однокритериальной постановки, а именно: на минимизацию общих эксплуатационных затрат или минимизацию потерь, но имеются и формулировки оптимизационных задач в многокритериальной постановке [2, 14]. Однако во всех этих подходах осуществляется сведение многокритериальной задачи к скалярному случаю, включая формальное объединение технических и экономических показателей, что, по мнению большинства специалистов в области создания и эксплуатации микроэнергосистем, недопустимо[1]. Эффективность функционирования микроэнергосистемы не рекомендуется оценивать единым интегрированным показателем и, как минимум, следует подразделять на относительно обособленное рассмотрение технической и экономической эффективности с введением соответствующих целевых показателей и критериев.

Соответственно, особенностью данной работы является то, что с учётом мнения отраслевых экспертов предлагается подход к формулированию оптимизационных задач, связанных с повышением эффективности микроэнергосистемы посредством введения раздельного рассмотрения отдельных групповых показателей эффективности, а только затем производить их свертку. В то же время предложенное в работе мультиагентное представление микроэнергосистемы позволяет перейти к совокупному учёту показателей эффективности как отдельных агентов, так и системы в целом.

На основе критериев эффективности функционирования микроэнергосистемы были сформулированы целевые функции эффективности функционирования микроэнергосистемы.

1. *Качество электроэнергии (КЭ)*. Качество производимой и отпускаемой потребителям электроэнергии является одним из основных критериев

[1] О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателей: постановление Правительства РФ от 19 декабря 2016 г. № 1401 [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс».

при оценке эффективности функционирования любой энергосистемы и регулируется в соответствии с ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», где указаны более 10 показателей, из которых выберем два в качестве целевых функций (без потери общности математической постановки задачи):

– отклонение основной частоты напряжения от номинального $\Delta f = f - f_{nom}$, которое связано прежде всего с дефицитом активной мощности и не должно превышать ±0,2 Гц в течение 95% времени;

– отклонение напряжения ΔU. Величины провалов и перенапряжений связаны с множеством факторов, в том числе с их случайным характером, учесть которые в компактном математическом выражении в общем случае не представляется возможным, но в первую очередь они связаны с соотношением активной и реактивной мощности. Отклонение напряжения в сети определяется на основе сравнения значений напряжения общей шины U^{SYS} и опорного напряжения U_{ref}. Следовательно, $\Delta U = U_{ref} - U^{SYS}$.

2. *Экономический критерий (ЭК).* Экономический критерий Y_2^{SYS} формируется из трёх составляющих: стоимость генерируемой электроэнергии $y_3^{SYS} \triangleq C^{EN}$, цена для потребителя $y_4^{SYS} \triangleq PR$, прибыль владельца микроэнергосистемы $y_5^{SYS} \triangleq REV$.

3. *Надёжность процесса электроснабжения* Y_3^{SYS}. Исследование надёжности сетевых комплексов обосновано в рамках вероятностных категорий. Именно поэтому к настоящему времени накоплен отечественный и зарубежный опыт решения задач по оценке надёжности систем электроэнергетики со следующими тремя категориями, соответствующими международной классификации показателей надежности: CAIDI – индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей (время ремонта); SAIDI – индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей (продолжительность отказа); SAIFI – индекс средней частоты перерывов в электроснабжении потребителей (частота отказов) [13].

4. *Экологичность* Y_4^{SYS}. Экологичность функционирования микроэнергосистемы предлагается ограничить рассмотрением выброса парниковых газов (CO_2, NOX и др.), хотя данные показатели не являются единственными.

Решение задачи оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы предлагается разбить на несколько этапов (рис. 2).

На этапе 1 (см. рис. 2) решается задача выбора таких моделей описания агентов, которые адекватно соответствуют исследуемым целевым функциям (ЦФ) и отвечают ограничениям по точности и информативности:

$$\mathrm{MO}^{\mathrm{A_i}} \begin{matrix} \varepsilon_i \\ \leftrightarrow \\ \Theta_i \end{matrix} \mathrm{y}_j^{SYS}. \qquad (3)$$

На этапе 2 производится синтез имитационной мультиагентной модели исследуемой системы с учетом специфики каждой ЦФ y_j^{SYS}, $j = 1, 10$ из четырех групп критериев.

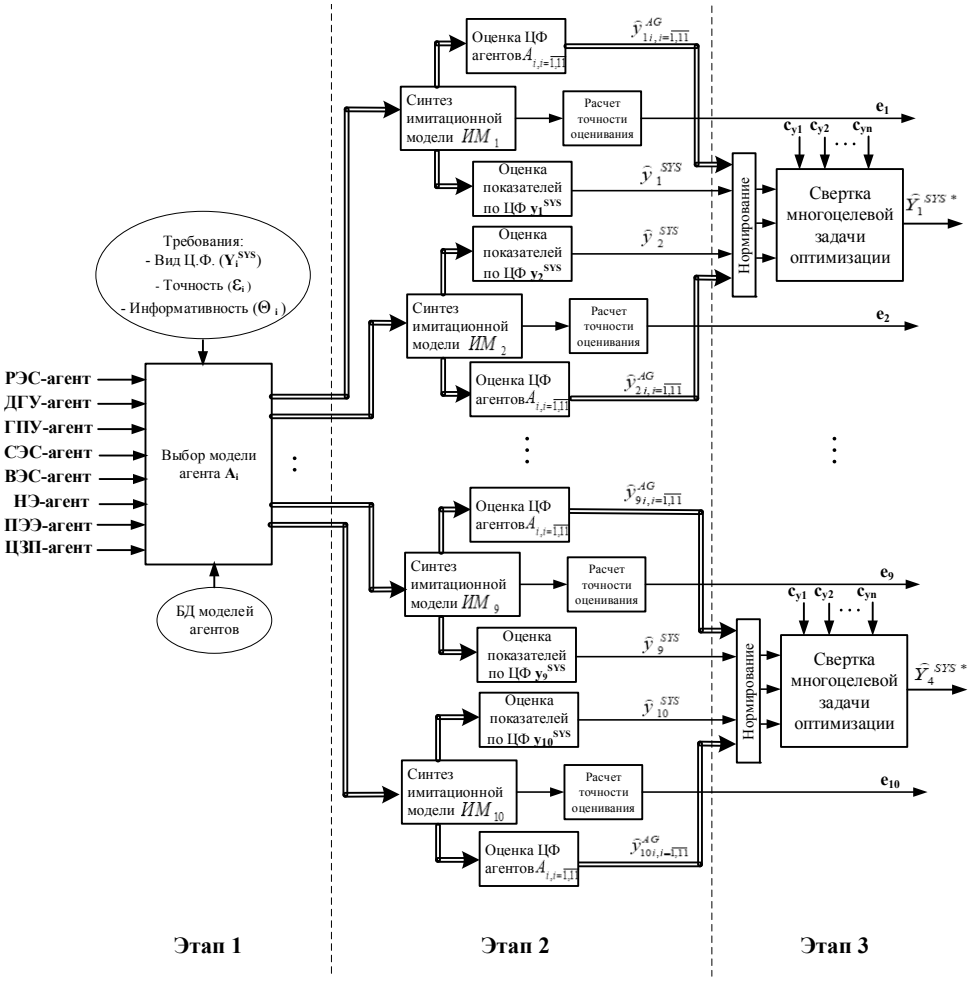


Рис. 2. Решение задачи оценивания эффективности функционирования микроэнергосистемы: РЭС-агент – агент распределительной электрической сети; ДГУ-агент – агент дизель-генераторной установки; ГПУ-агент – агент газопоршневой установки; СЭС-агент – агент солнечной электростанции; ВЭС-агент – агент ветровой электростанции; НЭ-агент – агент накопителей энергии; ПЭЭ-агент – агент спроса потребителя; ЦЗП-агент – агент спроса ценозависимого потребителя; ε_i – точность модели агента A_i; Θ_i – информативность модели агента A_i; e_k – погрешность расчета показателя эффективности целевой функции Y_k^{SYS}; c_{yk} – весовой коэффициент показателя эффективности целевой функции Y_k^{SYS}

Оценка показателей эффективности осуществляется параллельно с расчётом точности оценивания e_j, что является важной выходной информацией. В синтезированной мультиагентной модели описания отдельные агенты функционируют в условиях взаимодействия соответствующих моделируемых общесистемных процессов, что позволяет произвести оценку их собственных ЦФ y_j^{AG} и решать задачи по самооптимизации и самонастройке (см. рис. 1).

Этап 3 соответствует решению задачи получения численной оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы, сочетающей все четы-

ре предложенных общесистемных критерия. По полученным оценкам показателей осуществляется расчёт оценки соответствующих критериев эффективности для системы в целом Y_k^{SYS}, $k = 1, 4$ а также значений индивидуальных показателей эффективности функционирования отдельных агентов y_j^{AG}, указанных выше. Представленная на рис. 2 схема отражает формализованный процесс интеграции разнотипных ЦФ в установленные критерии.

Заключение. Разработано унифицированное представление агента, применимое к микроэнергосистемам, представляющим собой композицию из субъектов, формализуемых в виде непрерывных, дискретных и дискретно-событийных моделей. Сформулированы возможные состояния агентов в рамках микроэнергосистемы и способы их оценивания.

Разработана схема решения задачи оценивания эффективности микроэнергосистемы. Представленная схема позволяет формализовать процесс интеграции разнородных ЦФ в единые критерии по определённым типам, а также произвести оценку эффективности функционирования отдельных агентов в взаимосвязанной системе.

Литература

1. *Дуброва Т.А.* Статистические методы прогнозирования. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 206 с.

2. *Dehghanpour K., Nehrir H.* Real-Time Multiobjective Microgrid Power Management Using Distributed Optimization in an Agent-Based Bargaining Framework. IEEE Trans. Smart Grid., 2017, vol. 9, no. 6, pp. 6318–6327.

3. *Guarderas G., Francés A., Asensi R., Uceda J.* Large-signal black-box behavioral modeling of grid-supporting power converters in AC microgrids. IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2017, pp. 153–158.

4. *Kantamneni A., Brown L., Parker G., Weaver W.* Survey of multi-agent systems for microgrid control. Engineering applications of artificial intelligence, 2015, no. 45, pp. 192–203.

5. *Katiraei F., Iravani R., Hatziargyriou N., Dimeas A.* Microgrids management. IEEE Power Energy Mag., 2008, vol. 6, no. 3, pp. 54–65.

6. *Leitao P., Karnouskos S., Ribeiro L., Lee J., Strasser T.,* Colombo A. Smart Agents in Industrial Cyber-Physical Systems. Proc. of the IEEE, 2016, vol. 5(104), pp. 1086–1101.

7. *Leitao P., Marik V., Vrba P.* Past present and future of industrial agent applications. IEEE Trans. Ind. Inf., 2013, vol. 9, no. 4, pp. 2360–2372.

8. *Marnay C., Chatzivasileiadis S., Abbey C., Iravani R., Joos G., Lombardi P., Mancarella P., Appen J.* Microgrid Evolution Roadmap: International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), 2015, pp. 139–144.

9. *McArthur S., Davidson E., Catterson V., Dimeas A., Hatziargyriou N., Ponci, F., Funabashi T.* Multi-agent systems for power engineering applications. P. 1: Concepts, approaches and technical challenges. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, vol. 22, no. 4, pp. 1753–1759.

10. *Metzger M., Polaków G.* A survey on applications of agent technology in industrial process control. IEEE Trans. Ind. Inf., 2011, vol. 7, no. 4, pp. 570–570.

11. *Minchala-Avila L.I., Garza-Castanon L.E., Vargas-Martınez A., Zhangc Y.* Review of Optimal Control Techniques Applied to the Energy Management and Control of Microgrids. Procedia Computer Science, 2015, vol. 52, pp. 780–787.

12. *Rohbogner G., Hahnel U.J.J., Benoit P., Fey S.* Multi-agent systems' asset for smart grid applications. Computer Science and Information Systems, 2013, vol. 10, iss. 4, pp. 1799–1822.

13. *Shikhin V., Abd Elraheem A., Ren J.,* "Real-Time Control of Microgrid via Multi-Agent Approach. In: Proc. of Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Moscow, 2018, pp. 1–5.

14. *Wang Y., Huang Y., Wang Y., Li F., Zhang Y., Tian C.* Operation Optimization in a Smart Micro-Grid in the Presence of Distributed Generation and Demand Response. Sustainability, 2018, no. 10, pp. 847–872.

АБД ЭЛЬРАХИМ АМИН КАМАЛЬ – аспирант кафедры управления и интеллектуальных технологий, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Россия, Москва (aminkamal90@hotmail.com).

ОБЫЧАЙКО ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ – аспирант кафедры управления и интеллектуальных технологий, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Россия, Москва (d.obychaiko@aamautomatic.ru).

ШИХИН ВЛАДИМИР АНАТОЛЬЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры управления и интеллектуальных технологий, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Россия, Москва (shikhinva@mpei.ru).

A. ABD ELRAHEEM, D. OBYCHAIKO, V. SHIKHIN

EVALUATION OF OPERATIONAL EFFICIENCY OF MICROGRID IN MULTI-AGENT REPRESENTATION

Key words: *multi-agent system, microgrid, microgrid efficiency, distributed generation, renewable energy sources.*

The paper proposes an approach to solving the problem of assessing the operational efficiency of agent-based microgrids. The approach discussed in this paper is based on analyzing microgrid objects as distributed agents forming a multi-agent system (MAS), which enables to evaluate the efficiency of microgrid as a whole, as well as the operational efficiency of each separate agent. The elaborated scheme also gives the possibility to formalize the process of integrating heterogeneous objective functions into certain combined criteria, particularly: technical, economic and environmental ones. The scientific novelty of the paper is the development of the method of combined assessment of technical, economic and ecological efficiency of micro-energy system operation based on multi-agent system, which is the basis for solving the problem of multi-criteria optimization. The construction of the algorithm for evaluating the efficiency of the micro-energy system is carried out in relation to the applications of designing a hybrid-generating and environmentally safe heat-electric supply systems in remote areas.

References

1. Dubrova T.A. *Statisticheskie metody prognozirovaniya* [Statistical methods of forecasting]. Moscow, UNITY-DANA Pyubl., 2003, 206 p.

2. Dehghanpour K., Nehrir H. Real-Time Multiobjective Microgrid Power Management Using Distributed Optimization in an Agent-Based Bargaining Framework. IEEE Trans. Smart Grid., 2017, vol. 9, no. 6, pp. 6318–6327.

3. Guarderas G., Francés A., Asensi R., Uceda J. Large-signal black-box behavioral modeling of grid-supporting power converters in AC microgrids. IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2017, pp. 153–158.

4. Kantamneni A., Brown L., Parker G., Weaver W. Survey of multi-agent systems for microgrid control. Engineering applications of artificial intelligence, 2015, no. 45, pp. 192–203.

5. Katiraei F., Iravani R., Hatziargyriou N., Dimeas A. Microgrids management. IEEE Power Energy Mag., 2008, vol. 6, no. 3, pp. 54–65.

6. Leitao P., Karnouskos S., Ribeiro L., Lee J., Strasser T., Colombo A. Smart Agents in Industrial Cyber-Physical Systems. Proc. of the IEEE, 2016, vol. 5(104), pp. 1086–1101.

7. Leitao P., Marik V., Vrba P. Past present and future of industrial agent applications. IEEE Trans. Ind. Inf., 2013, vol. 9, no. 4, pp. 2360–2372.

8. Marnay C., Chatzivasileiadis S., Abbey C., Iravani R., Joos G., Lombardi P., Mancarella P., Appen J. Microgrid Evolution Roadmap: International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), 2015, pp. 139–144.

9. McArthur S., Davidson E., Catterson V., Dimeas A., Hatziargyriou N., Ponci, F., Funabashi T. Multi-agent systems for power engineering applications. P. 1: Concepts, approaches and technical challenges. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, vol. 22, no. 4, pp. 1753–1759.

10. Metzger M., Polaków G. A survey on applications of agent technology in industrial process control. IEEE Trans. Ind. Inf., 2011, vol. 7, no. 4, pp. 570–570.

11. Minchala-Avila L.I., Garza-Castanon L.E., Vargas-Martınez A., Zhangc Y. Review of Optimal Control Techniques Applied to the Energy Management and Control of Microgrids. Procedia Computer Science, 2015, vol. 52, pp. 780–787.

12. Rohbogner G., Hahnel U.J.J., Benoit P., Fey S. Multi-agent systems' asset for smart grid applications. Computer Science and Information Systems, 2013, vol. 10, iss. 4, pp. 1799–1822.

13. Shikhin V., Abd Elraheem A., Ren J., "Real-Time Control of Microgrid via Multi-Agent Approach. In: Proc. of Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Moscow, 2018, pp. 1–5.

14. Wang Y., Huang Y., Wang Y., Li F., Zhang Y., Tian C. Operation Optimization in a Smart Micro-Grid in the Presence of Distributed Generation and Demand Response. Sustainability, 2018, no. 10, pp. 847–872.

ABD ELRAHEEM AMIN KAMAL – Post-Graduate Student, Department of Control Systems and Intelligent Technologies, Moscow Power Engineering Institute, Russia, Moscow (aminkamal90@hotmail.com).

OBYCHAIKO DMITRY – Post-Graduate Student, Department of Control Systems and Intelligent Technologies, Moscow Power Engineering Institute, Russia, Moscow (d.obychaiko@aamautomatic.ru).

SHIKHIN VLADIMIR – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Control Systems and Intelligent Technologies, Moscow Power Engineering Institute, Russia, Moscow (shikhinva@mpei.ru).

Формат цитирования: *Абд Эльрахим А.К., Обычайко Д.С., Шихин В.А.* Оценивание эффективности функционирования микроэнергосистемы в мультиагентном представлении // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 5–16.

УДК 621.316.722.076.12
ББК 3261.8

М.Н. АТАМАНОВ, Н.М. ДРЕЙ, А.Г. ЗИГАНШИН, Г.М. МИХЕЕВ

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ И АНАЛИЗ РАБОТЫ ПАССИВНОГО ФИЛЬТРА ГАРМОНИК

Ключевые слова: *система электроснабжения, компенсация реактивной мощности, высшие гармоники, пассивный фильтр гармоник, резонансная частота, L–C звено.*

Выполнен обзор компенсирующих устройств, применяемых в системах электроснабжения промышленных предприятий. Рассмотрены достоинства и недостатки каждого типа компенсации реактивной мощности. Разновидностью рассматриваемых энергетических установок являются фильтрокомпенсирующие устройства: пассивные и активные фильтры гармоник, а также гибридные фильтрокомпенсирующие устройства, получаемые сочетанием первых двух. Для предприятий малой мощности наиболее перспективным методом компенсации реактивной мощности является использование батарей конденсаторов. Основной недостаток применения такого типа устройства – возможность резонансных явлений в сети. Известно, что с целью снижения доли высших гармоник применяются различные типы фильтров. Наиболее простым и дешевым является узкополосный пассивный фильтр гармоник, состоящий из параллельно соединенных L–C звеньев – реактор-конденсатор.

В настоящее время существуют различные подходы к расчету параметров силовой части такого энергетического объекта. Дан анализ работы пассивного фильтра гармоник, на основе которого разработана эффективная методика определения его параметров, отличающаяся простотой и точностью расчета. Реактивную мощность, генерируемую отдельным звеном фильтра, можно регулировать без изменения резонансной частоты данного звена за счет изменения емкости конденсатора при одновременной коррекции индуктивности реактора.

Авторами также рассмотрен пример расчета параметров пассивного фильтра, рассчитанного на подавление 5-, 7-, 11- и 13-й гармоник тока с одновременной генерацией заданной реактивной мощности. Приведена частотная характеристика рассматриваемого фильтра. Даны рекомендации по выбору параметров L–C звеньев с целью снижения стоимости установки.

В настоящее время в гармоническом составе тока систем электроснабжения промышленных предприятий наблюдается увеличение доли высших гармоник. Это объясняется увеличением мощности электроустановок с нелинейными вольт-амперными характеристиками.

На рис. 1 приведена принципиальная схема одной секции подстанции 110/10 кВ с источниками реактивной мощности и фильтрами гармоник. Как правило, коэффициент реактивной мощности предприятия tgφ без применения компенсирующих устройств (естественный коэффициент реактивной мощности) не соответствует требованиям нормативных документов[1]. Компенсация реактивной мощности может быть выполнена синхронными двига-

[1] О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии: приказ Министерства энергетики РФ от 23.06.2015 г. № 380 [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс».

телями (СД) при их наличии на шинах РУ-10 кВ. В случае незначительной реактивной мощности возможна установка батарей конденсаторов (БК). Если нагрузка имеет нестабильный характер потребления реактивной мощности, целесообразно применение УАКРМ – устройств автоматической компенсации реактивной мощности [2]. При необходимости компенсации значительной реактивной мощности (несколько десятков МВАр) довольно часто применяются синхронные компенсаторы (СК).

В состав нагрузки НГ-1 входит как линейная, так и значительная нагрузка с нелинейной характеристикой. Последнее обуславливает наличие высших гармоник тока и напряжения в рассматриваемой схеме. С целью снижения доли высших гармоник довольно часто применяются фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) в виде пассивных фильтров гармоник [5]. Основными достоинствами таких устройств являются их простота и экономичность. Пассивные фильтры одновременно с подавлением гармоник выполняют функцию компенсирующего устройства и регулятора напряжения [6]. Их основной недостаток – возможность появления в сети резонансных явлений, невозможность фильтрации гармоник в случае резкопеременной нелинейной нагрузки.

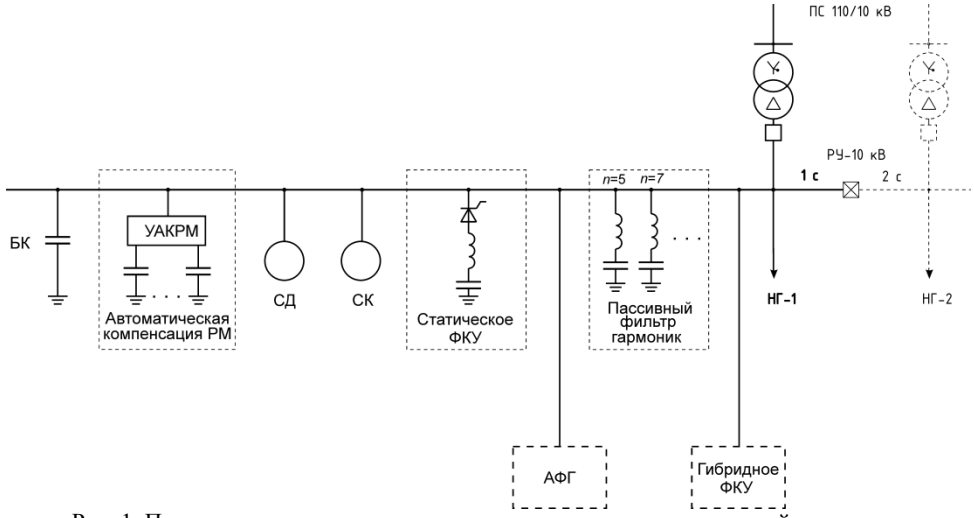


Рис. 1. Принципиальная схема подстанции с источниками реактивной мощности и фильтрами гармоник

В настоящее время большое внимание уделяется активным фильтрам гармоник (АФГ). Данные устройства позволяют компенсировать высшие гармоники в системах электроснабжения с резкопеременной нелинейной нагрузкой за счет изменения своих характеристик в зависимости от режима работы сети [4]. Применение АФГ ограничивается их сложностью и высокой стоимостью. Использование силовых активных фильтров экономически нецелесообразно в случае мощной нелинейной нагрузки.

Большой интерес представляет гибридный фильтр гармоник, когда АФГ применяется в сочетании с пассивными фильтрами гармоник. В этом случае

активный фильтр небольшой мощности используется для регулирования характеристик пассивных устройств. Как правило, мощность АФГ в составе такого гибридного фильтра примерно на порядок меньше мощности пассивной части [1].

В соответствии с [3], в настоящее время отсутствует общепринятая методика расчета и определения параметров силовой части активного фильтра. Также следует отметить, что существуют различные подходы к расчету параметров силовой части пассивного фильтра. Наиболее простым является расчет методом последовательных приближений с целью получения необходимых частотных характеристик звеньев и генерируемой фильтром реактивной мощности. В [4] пассивный фильтр рассматривается как четырехполюсник, на внешних зажимах которого действуют источники гармоник. Для его описания используется уравнение в гибридных параметрах. На следующем шаге выполняется синтез данного четырехполюсника и производится денормирование параметров фильтра по отношению к частоте основной гармоники.

В рассматриваемой статье выполнен анализ работы пассивного фильтра гармоник, на основе которого разработана эффективная методика определения его параметров, отличающаяся простотой и малым объемом расчетов при обеспечении высокой точности результатов по резонансной частоте звеньев и генерируемой реактивной мощности.

Рассмотрим узкополосный пассивный фильтр гармоник (рис. 2), состоящий из параллельно соединенных *L*–*C* звеньев – реактор-конденсатор (вторая каноническая схема Фостера [4]).

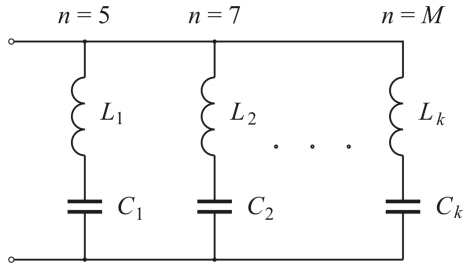


Рис. 2. Схема пассивного фильтра гармоник

Каждое из звеньев L_i–C_i рассчитано на подавление определенной гармоники канонического ряда (как правило, гармоник порядка $n < 20$). Результирующее сопротивление каждого *i*-го звена для резонансной гармоники порядка $n_р = f_р / f_0$ ($f_р$ – резонансная частота звена; f_0 – основная частота сети – 50 Гц) близко к нулю, т.е.

$$x_{L(n)} - x_{C(n)} \approx 0,$$

где $x_{L(n)}$, $x_{C(n)}$ – сопротивления элементов звена (реактора и конденсатора) току резонансной гармоники.

Таким образом, на резонансной частоте справедливо равенство

$$x_{L(n)} \approx x_{C(n)}. \qquad (1)$$

Результирующее сопротивление звена току основной гармоники определяется выражением

$$x_{\text{зв}} = x_L - x_C ,$$

где x_L, x_C – сопротивления реактора и конденсатора току основной гармоники, соответственно.

Значения x_L и x_C определяются через соответствующие сопротивления току резонансной гармоники

$$x_L = x_{L(n)} / n_{\text{р}} , \quad (2)$$

$$x_C = n_{\text{р}} x_{C(n)} . \quad (3)$$

На основе равенств (2) и (3) сопротивление $x_{\text{зв}}$ определяется по формуле

$$x_{\text{зв}} = x_{L(n)} / n_{\text{р}} - n_{\text{р}} x_{C(n)} .$$

Приняв строгое равенство в выражении (1), можно записать

$$x_{\text{зв}} = x_{C(n)} / n_{\text{р}} - n_{\text{р}} x_{C(n)} .$$

В соответствии с равенством (3) сопротивление $x_{\text{зв}}$ определяется выражением

$$x_{\text{зв}} = \frac{1 - n_{\text{р}}^2}{n_{\text{р}}^2} x_C . \quad (4)$$

С учетом $n_{\text{р}} > 1$ можно заключить, что сопротивление звена имеет емкостный характер ($x_{\text{зв}} < 0$), При этом соотношение между сопротивлениями удовлетворяет условию $x_L < x_C$.

В соответствии с этим ток звена опережает приложенное напряжение на 90° (в предположении, что активные сопротивления реактора и конденсатора равны нулю). Если принять вектор напряжения направленным по действительной оси комплексной плоскости, то вектор тока будет направлен по мнимой. В этом случае справедливо равенство

$$jI_{\text{зв}} = \frac{U_{\text{зв}}}{jx_{\text{зв}}} .$$

С учетом сопротивлений элементов звена данное выражение переписывается в виде

$$jI_{\text{зв}} = \frac{U_{\text{зв}}}{jx_L - jx_C} .$$

Напряжение, приложенное к звену (фильтру), через падения напряжения на реакторе и конденсаторе определяется по формуле

$$U_{\text{зв}} = jI_{\text{зв}} jx_L - jI_{\text{зв}} jx_C , \; U_{\text{зв}} = U_C - U_L .$$

Таким образом, напряжение на конденсаторе зависит от падения напряжения на реакторе

$$U_C = U_{\text{зв}} + U_L .$$

Полученное выражение свидетельствует, что напряжение на конденсаторе пассивного фильтра высших гармоник больше, чем приложенное к зве-

ну (фильтру) значение, на величину падения напряжения на реакторе. В результате конденсатором в составе фильтра генерируется большая реактивная мощность, чем в отдельности (без реактора):

$$Q_C = \frac{U_C^2}{x_C} = \frac{\left(U_{\text{зв}} + U_L\right)^2}{x_C}.$$

Реактивную мощность звена можно выразить через ее сопротивление

$$Q_{\text{зв}} = U_{\text{ном сети}}^2 \Big/ x_{\text{зв}},$$

где $U_{\text{ном сети}}$ – номинальное напряжение сети.

С учетом выражения (4) реактивная мощность звена через сопротивление входящего в него конденсатора рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{зв}} = \frac{U_{\text{ном сети}}^2}{x_C} \frac{n_{\text{р}}^2}{\left(n_{\text{р}}^2 - 1\right)},$$

что также свидетельствует об увеличении генерируемой реактивной мощности звена по сравнению с мощностью отдельного конденсатора.

Как известно, резонансная частота последовательного *L–C* контура определяется выражением

$$f_{\text{р}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{L\,C}}. \qquad (5)$$

На основе данного выражения можно заключить, что резонансная частота звена фильтра не изменится, если увеличить (уменьшить) емкость конденсатора и уменьшить (увеличить) индуктивность реактора в *K* раз. Данная зависимость резонансной частоты от параметров звена позволяет определить такие значения L_i и C_i, которые обеспечивают либо необходимую генерируемую реактивную мощность, либо минимальную стоимость пассивного фильтра.

Реактивная мощность, генерируемая фильтром, через индуктивности и емкости звеньев рассчитывается по выражению

$$Q_{\text{ф}} = \sum_{i=1}^{m} \frac{U_{\text{ном сети}}^2}{\dfrac{1}{2\pi f_0 C_i} - 2\pi f_0 L_i}, \qquad (6)$$

где $U_{\text{ном сети}}$ – номинальное линейное напряжение сети; m – количество звеньев фильтра.

Расчет параметров пассивного фильтра целесообразно выполнить в два этапа. На первом этапе определяются значения индуктивностей $L_{i\,\text{нач}}$ и емкостей $C_{i\,\text{нач}}$ каждого звена с учетом резонансных гармоник n_i. Для этого в качестве исходных параметров произвольно принимаются значения индуктивностей $L_{i\,\text{нач}}$ (или емкостей $C_{i\,\text{нач}}$) звеньев. При этом имеется возможность задать соотношения между индуктивностями (емкостями) отдельных звеньев фильтра. С учетом выражения (5) емкости конденсаторов каждого звена при известных значениях индуктивности рассчитываются по формуле

$$C_{i\,\text{нач}} = \frac{1}{L_{i\,\text{нач}}(2\pi f_{\text{р}\,i})^2}.$$

Если в качестве исходного параметра заданы емкости конденсаторов, индуктивности звеньев определяются аналогично:

$$L_{i\,\text{нач}} = \frac{1}{C_{i\,\text{нач}}(2\pi f_{\text{р}\,i})^2}.$$

Второй этап заключается в уточнении полученных значений индуктивностей и емкостей звеньев с учетом необходимой (планируемой) реактивной мощности фильтра:

– согласно выражению (6) рассчитывается генерируемая реактивная мощность фильтра с параметрами $L_{i\,\text{нач}}$ и $C_{i\,\text{нач}}$, определенными на первом этапе – $Q_{\text{ф нач}}$;

– определяется отношение K_Q необходимого (планируемого) значения реактивной мощности фильтра $Q_{\text{ф}}$ к полученному на первом этапе значению $Q_{\text{ф нач}}$:

$$K_Q = \frac{Q_{\text{ф}}}{Q_{\text{ф нач}}};$$

– окончательные значения параметров фильтра определяются с учетом выражения (5) – неизменности резонансной частоты звена при пропорциональном изменении индуктивности и емкости (уменьшение в K_Q раз одного и увеличение во столько же раз другого значения):

$$\begin{cases} L_i = L_{i\,\text{нач}} / K_Q \\ C_i = K_Q C_{i\,\text{нач}} \end{cases};$$

– по выражению (6) определяется реактивная мощность, генерируемая данным фильтром.

В таблице приведены значения параметров пассивного фильтра с четырьмя *L–C* звеньями, рассчитанными по приведенной выше методике. В качестве исходных параметров приняты: генерируемая реактивная мощность звеньев в соотношении 1:1:1:1; дефицит реактивной мощности на фазу в точке подключения фильтра составляет 100 кВАр.

Расчетные параметры пассивного фильтра гармоник

Показатель	Номер звена			
	1	2	3	4
L, мГн	0,255	0,133	0,051	0,036
C, мкФ	1587,1	1618,0	1639,6	1643,5
$Q_{\text{зв}}$, кВАр	25,0	25,0	25,0	25,0

Как видно из таблицы, каждым звеном генерируется по 25 кВАр, что определяет одинаковую загрузку звеньев. Суммарная реактивная мощность фильтра равна заданной величине – 100,0 кВАр. Таким образом, обеспечивается необходимый уровень компенсации.

На рис. 3 приведена зависимость сопротивления пассивного фильтра от частоты. На частотах, соответствующих резонансным гармоникам звеньев

фильтра (5-, 7-, 11- и 13-я гармоники), сопротивление фильтра равно нулю. В результате этого происходит шунтирование токов указанных гармоник.

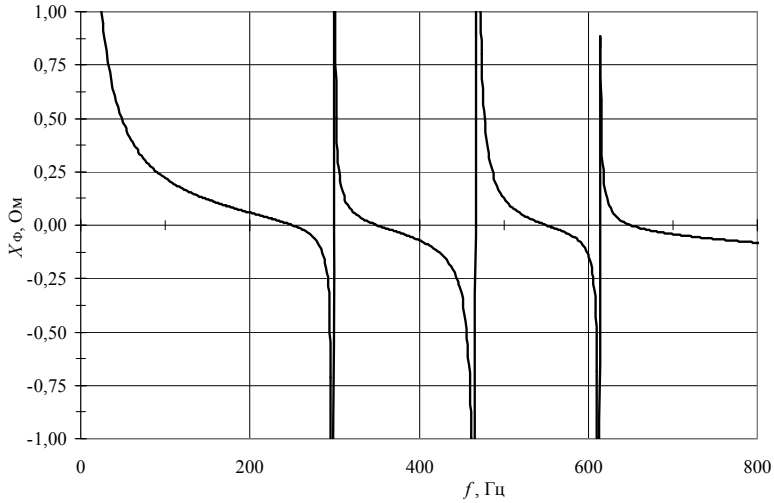


Рис. 3. Зависимость сопротивления фильтра от частоты

Выводы. 1. Сопротивление звена пассивного фильтра току основной гармоники имеет емкостный характер, т.е. пассивный фильтр является источником реактивной мощности.

2. *L–C* звеном пассивного фильтра гармоник генерируется большая реактивная мощность, чем отдельным конденсатором *C*. Это объясняется, с одной стороны, меньшим сопротивлением *L–C* звена, чем сопротивление входящего в него конденсатора, с другой стороны, увеличением напряжения на конденсаторе за счет разного характера сопротивлений индуктивности и емкости.

3. Резонансная частота звена фильтра не изменится, если увеличить (уменьшить) емкость конденсатора и уменьшить (увеличить) индуктивность реактора в *K* раз. Указанная зависимость резонансной частоты от параметров звена позволяет подобрать такие значения индуктивностей и емкостей звеньев, которые обеспечивают минимальную стоимость пассивного фильтра.

4. Реактивную мощность, генерируемую отдельным звеном фильтра, можно регулировать без изменения резонансной частоты данного звена за счет изменения емкости конденсатора при одновременной коррекции индуктивности реактора.

Литература

1. *Егоров Д.Э., Довгун В.П.* Оптимизация компенсационных характеристик гибридных силовых фильтров // Технология электромагнитной совместимости. 2016. № 3(58). С. 18–26.

2. *Михеев Г.М., Атаманов М.Н., Афанасьева О.В., Дрей Н.М.* О компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения с косинусными конденсаторами // Электротехника. 2019. № 4. С. 32–41.

3. *Селезнев А.С., Кондрат С.А., Третьяков А.Н.* Об эффективности применения фильтров при нормализации несинусоидальных режимов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 8. С. 177–183.

4. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения / *Н.П. Боярская, В.П. Довгун, Д.Э. Егоров и др.*; под ред. В.П. Довгуна. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. 192 с.

5. *Chaladying S., Charlangsut A., Rugthaichareoncheep N.* Parallel resonance impact on power factor improvement in power system with harmonic distortion. TENCON 2015 – 2015 IEEE Region 10 Conference, Macao, 2015, pp. 1–5.

6. *Pontt J., Rodriguez J., Martin J.S., Aguilera R., Bernal R., Newman P.* Resonance mitigation and dynamical behavior of systems with harmonic filters for improving reliability in mining plants. Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Tampa, FL, 2006, pp. 1298–1302.

АТАМАНОВ МИХАИЛ НИКОЛАЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (atamanov_m@mail.ru).

ДРЕЙ НАДЕЖДА МИХАЙЛОВНА – аспирантка кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (drey_nadezhda@mail.ru).

ЗИГАНШИН АЙРАТ ГАБДУЛХАКОВИЧ – аспирант кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ZiganshinAG@gridcom-rt.ru).

МИХЕЕВ ГЕОРГИЙ МИХАЙЛОВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (mikheevg@rambler.ru).

M. ATAMANOV, N. DREY, A. ZIGANSHIN, G. MIKHEEV

CALCULATION OF PARAMETERS AND ANALYSIS OF THE PASSIVE HARMONIC FILTER

Key words: *power supply system, reactive power compensation, higher harmonics, passive harmonic filter, resonant frequency, L–C link.*

The paper makes a review of compensating devices used in power supply systems of industrial enterprises. It considers the advantages and disadvantages of each type of reactive power compensation. A variety of considered power plants are filter-compensating devices: passive and active harmonic filters, as well as hybrid filter-compensating devices received by a combination of the first two ones. For small power plants, the most promising method of reactive power compensation is the use of capacitor banks. The main disadvantage of using this type of compensator is the possibility of resonance phenomena in the network. It is known that different types of filters are used to reduce the share of higher harmonics. The simplest and cheapest one is a narrow-band passive harmonic filter consisting of parallel connected L–C links – reactor-capacitor.

At present, there are various approaches to calculating the parameters of the power part of such an energy object. The work of the passive harmonic filter has been analyzed, on the basis of which an effective method for determining its parameters has been developed, which is distinguished by simplicity and accuracy of calculation. The reactive power generated by a separate filter link can be controlled without changing the resonance frequency of this link by changing the capacitance of the capacitor while simultaneously correcting the reactor inductance.

The authors also consider an example of passive filter calculation designed for suppression of 5, 7, 11 and 13 current harmonics with simultaneous generation of set reactive power. The frequency characteristic of the considered filter is given. Recommendations on the choice of parameters L–C of the links to reduce the cost of installation are given.

References

1. Mikheev G.M., Atamanov M.N., Afanas'eva O.V., Drei N.M. *O kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v sistemakh elektrosnabzheniya s kosinusnymi kondensatorami* [On reactive power compensation in power supply systems with cosine capacitors]. *Elektrotekhnika*, 2019, no. 4, pp. 32–41.

2. Chaladying S., Charlangsut A., Rugthaichareoncheep N. Parallel resonance impact on power factor improvement in power system with harmonic distortion. TENCON 2015 – 2015 IEEE Region 10 Conference, Macao, 2015, pp. 1–5.

3. Pontt J., Rodriguez J., Martin J.S., Aguilera R., Bernal R., Newman P. Resonance mitigation and dynamical behavior of systems with harmonic filters for improving reliability in mining plants. Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Tampa, FL, 2006, pp. 1298–1302.

4. Dovgun V.P., ed.; Boyarskaya N.P., Dovgun V.P., Egorov D.E. et al. *Sintez fil'trokompensiruyushchikh ustroistv dlya sistem elektrosnabzheniya* [Synthesis of filter compensating devices for power supply systems]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ, 2014, 192 p.

5. Egorov D.E., Dovgun V.P. *Optimizatsiya kompensatsionnykh kharakteristik gibridnykh silovykh fil'trov* [Optimization of compensation characteristics of hybrid power filters]. *Tekhnologiya elektromagnitnoi sovmestimosti*, 2016, no. 3(58), pp. 18–26.

6. Seleznev A.S., Kondrat S.A., Tret'yakov A.N. *Ob effektivnosti primeneniya fil'trov pri normalizatsii nesinusoidal'nykh rezhimov* [On the effectiveness of filters in normalization of non-sinusoidal modes]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 8, pp. 177–183.

ATAMANOV MIKHAIL – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Power Supply and Intelligent Electric Power Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (atamanov_m@mail.ru).

DREY NADEZHDA – Post-Graduate Student, Department of Power Supply and Intelligent Electric Power Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (drey_nadezhda@mail.ru).

ZIGANSHIN AYRAT – Post-Graduate Student, Department of Power Supply and Intelligent Electric Power Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (ZiganshinAG@gridcom-rt.ru).

MIKHEEV GEORGI – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Power Supply and Intelligent Electric Power Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (mikheevg@rambler.ru).

Формат цитирования: *Атаманов М.Н., Дрей Н.М., Зиганшин А.Г., Михеев Г.М.* Расчёт параметров и анализ работы пассивного фильтра гармоник // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 17–25.

УДК 621.313
ББК 31.261

А.А. АФАНАСЬЕВ

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ключевые слова: *метод разделения переменных, постоянные магниты, зубчатость статора, обмоточные гармоники, электромагнитный момент, серийный двигатель.*

На базе метода разделения переменных Фурье получена двухмерная аналитическая модель вентильного двигателя с постоянными магнитами, в общую расчетную область которой входят ферромагнитные участки и постоянные магниты реальной конфигурации. В качестве источников магнитного поля выступают постоянные магниты ротора, токи обмотки статора и падения магнитного напряжения в зубцах статора. Расчётные значения магнитных индукций в средах находятся с учётом геометрических структур зубчатости статора, расположения постоянных магнитов и обмоточных гармоник МДС. Полученные на модели расчётные величины функциональных показателей двигателя (ток, момент) близки к его паспортным значениям. Применение метода разделения переменных в предлагаемой конфигурации является новым шагом в части его универсализации. Предложенные подходы могут найти применение в расчётной практике вентильных двигателей с постоянными магнитами.

Постановка задачи

Вентильные двигатели с постоянными магнитами являются специфическим электромеханическим объектом, вызывающим трудности при его расчёте. Они связаны, во-первых, с двумя разными по своей природе источниками магнитного поля: обмоткой переменного тока и постоянными высокоэнергетическими магнитами; во-вторых, с наличием зубчатости статорного сердечника и высших обмоточных гармоник, вызывающих нежелательные пульсации электромагнитного момента и тепловые потери от вихревых токов в теле магнитов.

Метод разделения переменных Фурье позволяет получить двухмерную аналитическую модель магнитоэлектрического вентильного двигателя с учётом реальной геометрии высокоэнергетических постоянных магнитов, пазов статора и фиксированной конечной магнитной проницаемости зубцов и ярем сердечников статора и ротора.

Принципиальные особенности метода разделения переменных Фурье – Эйлера

Эти особенности достаточно подробно изложены К.М. Поливановым и проиллюстрированы им при расчёте магнитного поля намагниченной ленты [5].

Обращаясь к плоскопараллельному полю в декартовых координатах, искомую функцию $\varphi(x, y)$ в некоторой области, состоящей из ограниченного количества бесконечных горизонтальных полос, примыкающих друг к другу, можно представить бесконечным произведением

$$\varphi(x, y) = \sum_n c_n X_n Y_n,$$

где c_n – постоянные, значения которых находятся из граничных условий рассматриваемого поля для выбранных полос; X_n, Y_n – функции, зависящие от координат x и y, соответственно.

Если произведение X_nY_n подставить в уравнение в частных производных Лапласа $\nabla^2\varphi = 0$, то получим уже два обыкновенных дифференциальных уравнения второго порядка

$$d^2X_n/dx^2 = K_nX_n\ ;\ d^2Y_n/dy^2 = K_nY_n\ , \qquad (1)$$

где $K_n = k_n^2$ – произвольная постоянная разделения переменных; значение $k_n = \sqrt{K_n}$ (для $n = 1$) совпадает в нашей задаче с угловой частотой переменной $2\pi/T$ (здесь T – геометрический период переменной).

Решения (1) известны. Возможно их представление в такой форме [5]:

$$\varphi(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty}(A_ne^{-k_ny} + B_ne^{k_ny})\cos k_nx\ .$$

Расчётная схема магнитоэлектрического вентильного двигателя, содержащая 6 сред (6 бесконечных полос), показана на рис. 1.

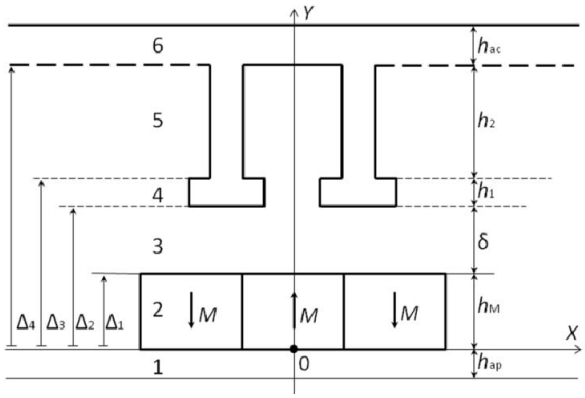


Рис. 1. Расчётная схема задачи с шестью средами:
1 – ярмо ротора; 2 – постоянные магниты с намагниченностью M;
3 – воздушная среда (зазор); 4 – наконечники зубцов статора;
5 – зубцы статора; 6 – ярмо статора

Решаем задачу при следующих допущениях:

1) ферромагнитные среды линейны;

2) вектор намагниченности магнитов имеет только одну компоненту $M = M_y$;

3) справедлив принцип суперпозиции магнитных полей магнитов ротора (индуктора) и токов обмотки статора и магнитных напряжений в зубцах статора.

1. Расчёт магнитного поля магнитов ротора

Исходные уравнения. Рассматриваемое магнитное поле потенциально и удовлетворяет дифференциальному уравнению Лапласа $\nabla^2 u = 0$, которое будем решать методом разделения переменных Фурье отдельно для каждой из шести названных выше сред, стыкуя их граничные значения путем вычисления соответствующих постоянных.

Ищем скалярные магнитные потенциалы $u_n(x, y)$ и радиальные составляющие магнитной индукции $B_{ny}(x, y)$ в указанных средах ($n = 1, 2, \ldots, 6$) в следующем виде, когда источником магнитного поля являются только магниты ротора (ферромагнитные зубцы и ток статора отсутствуют):

$$u_1(x,y) = \sum_{k=1}^{\infty} A_{1k} e^{k\sigma y} \cos k\sigma x ,$$

$$B_{1y}(x,y) = -\mu_0\mu_{\text{р}} \frac{\partial u_1}{\partial y} = -\mu_0\mu_{\text{р}}\sigma \sum_{k=1}^{\infty} kA_{1k} e^{k\sigma y} \cos k\sigma x , \qquad (2)$$

$$-h_{ap} \le y \le 0 ,$$

где $\mu_{\text{р}}$ – относительная магнитная проницаемость ярма ферромагнитного сердечника ротора; $\sigma = \dfrac{\pi}{\tau}$ (τ –полюсное деление магнитов); $h_{\text{ар}}$ – высота ярма ротора.

$$\begin{cases} u_2(x,y) = \sum\limits_{k=1}^{\infty} \left(B_{2k} e^{k\sigma y} + C_{2k} e^{-k\sigma y} \right) \cos k\sigma x, \\ B_{2y}(x,y) = \mu_0 \left(-\dfrac{\partial u_2}{\partial y} + \mu_{\text{м}} \sum\limits_{k=1}^{\infty} M_{yk} \cos k\sigma x \right) = \\ \qquad = \mu_0 \sum\limits_{k=1}^{\infty} \left(-k\sigma B_{2k} e^{k\sigma y} + k\sigma C_{2k} e^{-k\sigma y} + \mu_{\text{м}} M_{yk} \right) \cos k\sigma x, \\ 0 \le y \le h_{\text{м}}, \end{cases} \qquad (3)$$

где $\mu_{\text{м}}$ – относительная магнитная проницаемость магнита; предполагается, что зависимость намагниченности $M = M(x)$ магнитов ротора известна и может быть представлена тригонометрическим рядом[1]

$$M(x) = \sum_{k=1}^{\infty} M_{yk} \cos k\sigma x .$$

$$\begin{cases} u_3(x,y) = \sum\limits_{k=1}^{\infty} \left(B_{3k} e^{k\sigma y} + C_{3k} e^{-k\sigma y} \right) \cos k\sigma x, \\ B_{3y}(x,y) = -\mu_0 \dfrac{\partial u_3}{\partial y} = \mu_0\sigma \sum\limits_{k=1}^{\infty} \left(-kB_{3k} e^{k\sigma y} + kC_{3k} e^{-k\sigma y} \right) \cos k\sigma x, \\ h_{\text{м}} \le y \le h_{\text{м}} + \delta. \end{cases} \qquad (4)$$

[1] Намагниченность магнита можно представить равенством $M = M_r + k_{\text{м}}H$. Тогда выражение для магнитной индукции имеет вид $B = \mu_0[M_r + (1 + k_{\text{м}})H]$. У высокоэнергетических магнитов относительная магнитная проницаемость магнитов $\mu_{\text{м}} = (1 + k_{\text{м}})$ близка к единице (коэффициент восприимчивости $k_{\text{м}} \approx 0$). Поэтому намагниченность M в формуле (3) можно принять равной остаточной намагниченности M_r.

$$\begin{cases} u_4(x,y) = \sum\limits_{k=1}^{\infty}\left(B_{4k}e^{k\sigma y} + C_{4k}e^{-k\sigma y}\right)\cos k\sigma x, \\ B_{4y}(x,y) = -\mu_0\dfrac{\partial u_4}{\partial y} = \mu_0\sigma\sum\limits_{k=1}^{\infty}\left(-kB_{4k}e^{k\sigma y} + kC_{4k}e^{-k\sigma y}\right)\cos k\sigma x, \\ h_{\text{м}} + \delta \le y \le h_{\text{м}} + \delta + h_1, \end{cases} \quad (5)$$

где h_1 – высота шлица полузакрытого паза статора.

$$\begin{cases} u_5(x,y) = \sum\limits_{k=1}^{\infty}\left(B_{5k}e^{k\sigma y} + C_{5k}e^{-k\sigma y}\right)\cos k\sigma x, \\ B_{5y}(x,y) = -\mu_0\dfrac{\partial u_5}{\partial y} = \mu_0\sigma\sum\limits_{k=1}^{\infty}\left(-kB_{5k}e^{k\sigma y} + kC_{5k}e^{-k\sigma y}\right)\cos k\sigma x, \\ h_{\text{м}} + \delta + h_1 \le y \le h_{\text{м}} + \delta + h_1 + h_2, \end{cases} \quad (6)$$

где h_2 – высота полузакрытого паза статора.

$$\begin{cases} u_6(x,y) = \sum\limits_{k=1}^{\infty} A_{6k}e^{k\sigma y}\cos k\sigma x, \\ B_{6y}(x,y) = -\mu_0\mu_{\text{p}}\dfrac{\partial u_6}{\partial y} = -\mu_0\mu_{\text{c}}\sigma\sum\limits_{k=1}^{\infty} kA_{6k}e^{k\sigma y}\cos k\sigma x, \\ h_{\text{м}} + \delta + h_1 + h_2 \le y \le h_{\text{м}} + \delta + h_1 + h_2 + h_{ac}, \end{cases} \quad (7)$$

где h_{ac} – высота ярма статора.

Расчёт постоянных. Входящие в уравнения (2)–(7) десять постоянных A_{1k}, B_{nk}, C_{nk} ($n = 2, 3, 4, 5$), A_{6k} находим из следующих десяти граничных условий, получаемых приравниванием магнитных потенциалов и радиальных магнитных индукций на границах сред:

$$\begin{aligned} A_{1k} - B_{2k} - C_{2k} &= 0, \\ -B_{2k} + C_{2k} + \mu_p A_{1k} &= -m_k, \\ B_{2k}e^{k\sigma\Delta_1} + C_{2k}e^{-k\sigma\Delta_1} - B_{3k}e^{k\sigma\Delta_1} - C_{3k}e^{-k\sigma\Delta_1} &= 0, \\ -B_{2k}e^{k\sigma\Delta_1} + C_{2k}e^{-k\sigma\Delta_1} + B_{3k}e^{k\sigma\Delta_1} - C_{3k}e^{-k\sigma\Delta_1} &= -m_k, \\ B_{3k}e^{k\sigma\Delta_2} + C_{3k}e^{-k\sigma\Delta_2} - B_{4k}e^{k\sigma\Delta_2} - C_{4k}e^{-k\sigma\Delta_2} &= 0, \\ -B_{3k}e^{k\sigma\Delta_2} + C_{3k}e^{-k\sigma\Delta_2} + B_{4k}e^{k\sigma\Delta_2} - C_{4k}e^{-k\sigma\Delta_2} &= 0, \\ B_{4k}e^{k\sigma\Delta_3} + C_{4k}e^{-k\sigma\Delta_3} - B_{5k}e^{k\sigma\Delta_3} - C_{5k}e^{-k\sigma\Delta_3} &= 0, \\ -B_{4k}e^{k\sigma\Delta_3} + C_{4k}e^{-k\sigma\Delta_3} + B_{5k}e^{k\sigma\Delta_3} - C_{5k}e^{-k\sigma\Delta_3} &= 0, \\ B_{5k}e^{k\sigma\Delta_4} + C_{5k}e^{-k\sigma\Delta_4} - A_{6k}e^{-k\sigma\Delta_4} &= 0, \\ -B_{5k}e^{k\sigma\Delta_4} + C_{5k}e^{-k\sigma\Delta_4} + \mu_c A_{6k}e^{-k\sigma\Delta_4} &= 0, \end{aligned}$$

где $m_k = \dfrac{M_k}{k\sigma}$, $\Delta_1 = h_{\text{м}}$, $\Delta_2 = h_{\text{м}} + \delta$, $\Delta_3 = h_{\text{м}} + \delta + h_1$, $\Delta_4 = h_{\text{м}} + \delta + h_1 + h_2$.

2. Расчёт магнитного поля обмотки статора

Магнитное поле $\mathbf{H}^{\text{c}}$, созданное током обмотки статора, является суммой потенциального $\mathbf{H}^{\text{c}}_{p}$ и дополнительного $\mathbf{H}^{\text{c}}_{0}$ магнитных полей [4]

$$\mathbf{H}^{\text{c}} = \mathbf{H}^{\text{c}}_{p} + \mathbf{H}^{\text{c}}_{0}.$$

Вектор дополнительного поля $\mathbf{H}^{\text{c}}_{0}$ находится по несложной формуле

$$\mathbf{H}^{\text{c}}_{0} = \int_{l_0}^{l} [\mathbf{\Delta} d\mathbf{l}], \tag{8}$$

где $\mathbf{\Delta}$ – вектор плотности тока в проводниках обмотки.

При взятии интеграла в формуле (8) в направлении против координаты y вектор дополнительного поля $\mathbf{H}^{\text{c}}_{0}$ будет параллелен координате x, а магнитные листы с потенциалами МДС катушек обмотки статора будут расположены на нижней границе токового слоя[1] (внизу пазов у шлицевых отверстий).

$$H^{c}_{0} = H^{c}_{0x} = \Delta\left[y - (\Delta_3 - h_2)\right].$$

Для бесконечно тонкого магнитного листа (МДС) m фазной обмотки статора справедливо выражение для бегущих волн основной и высших гармоник [6]

$$F^{\text{c}} = \frac{m}{2}\sum_{k=0}^{\infty} F_{\max(2mk\pm1)}\left[\sin\omega t\cos(2mk\pm1)\sigma x \mp \cos\omega t\sin(2mk\pm1)\sigma x\right], \tag{9}$$

где $F_{\max(2mk\pm1)} = \dfrac{2\sqrt{2}}{\pi} I \dfrac{wk_{w(2mk\pm1)}}{(2mk\pm1)p}$; $\sigma = \dfrac{\pi}{\tau}$.

Расчёт потенциального магнитного поля обмотки статора. Потенциальное магнитное поле, создаваемое магнитным листом с МДС, будем находить методом разделения переменных Фурье отдельно для каждой из шести областей на рис. 1, стыкуя их граничные значения путем вычисления соответствующих постоянных.

Ищем скалярные магнитные потенциалы $u_j(x, y)$ и радиальные составляющие магнитной индукции $B_{jy}(x, y)$ в областях (j = 1, 2, …, 6), вызванные синусной составляющей МДС в формуле (9) для времени $t = 0$. Косинусная составляющая в этот момент равна нулю

$$F_1 = F_{s\nu}\sin\nu\sigma x,$$

где $F_{s\nu} = \dfrac{m}{2}F_{max\nu}\cos\omega t$; $\nu = 2mk \pm 1$; $\omega t = 0$.

Будем иметь следующие выражения для магнитных потенциалов и индукций при отсутствии магнитов ротора и зубцов статора

[1] Для расположения дополнительного поля только в токовом слое обмотки устанавливаем на его верхней границе два магнитных листа МДС с противоположными знаками (они, очевидно, в совокупности не будут источниками магнтного поля), линейные плотности токов которых равны $\mp H_{0\max}$. Магнитный лист с плотностью $(-H_{0\max})$, являющийся дельта функцией $\delta(y - \delta_1)$, при взятии интеграла (20) обнулит дополнительное поле на линии $y = \delta_1$. Второй магнитный лист МДС будет источником потенциального магнитного поля обмотки статора [1].

$$\begin{cases} u_1(x,y) = \sum\limits_{\nu=1}^{\infty} A_{1\nu} e^{\nu\sigma y} \sin \nu\sigma x, \\ B_{1y}(x,y) = -\mu_0\mu_{\text{p}} \dfrac{\partial u_1}{\partial y} = -\mu_0\mu_{\text{p}}\sigma \sum\limits_{\nu=1}^{\infty} \nu A_{1\nu} e^{\nu\sigma y} \sin \nu\sigma x, \quad y \le 0, \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases} u_2(x,y) = \sum\limits_{\nu=1}^{\infty} \left(B_{2\nu} e^{\nu\sigma y} + C_{2\nu} \nu e^{-\nu\sigma y}\right) \sin \nu\sigma x, \\ B_{2y}(x,y) = -\mu_0 \dfrac{\partial u_2}{\partial y} = \mu_0\sigma \sum\limits_{\nu=1}^{\infty} \nu \left(- B_{2\nu} e^{\nu\sigma y} + C_{2\nu} e^{-\nu\sigma y}\right) \sin \nu\sigma x, \\ 0 \le y \le \Delta_1, \end{cases} \tag{11}$$

$$\begin{cases} u_3(x,y) = \sum\limits_{\nu=1}^{\infty} \left(B_{3\nu} e^{\nu\sigma y} + C_{3\nu} \nu e^{-\nu\sigma y}\right) \sin \nu\sigma x, \\ B_{3y}(x,y) = -\mu_0 \dfrac{\partial u_3}{\partial y} = \mu_0\sigma \sum\limits_{\nu=1}^{\infty} \nu \left(- B_{3\nu} e^{\nu\sigma y} + C_{3\nu} e^{-\nu\sigma y}\right) \sin \nu\sigma x, \\ \Delta_1 \le y < \Delta_2, \end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases} u_3(x,\Delta_2) = \sum\limits_{\nu=1}^{\infty} \left(B_{3\nu} e^{\nu\sigma\Delta_2} + C_{3\nu} \nu e^{-\nu\sigma\Delta_2} + F_{s\nu}\right) \sin \nu\sigma x, \\ B_{3y}(x,\Delta_2) = -\mu_0 \dfrac{\partial u_3}{\partial y} = \mu_0\sigma \sum\limits_{\nu=1}^{\infty} \nu \left(- B_{3\nu} e^{\nu\sigma\Delta_2} + C_{3\nu} e^{-\nu\sigma\Delta_2}\right) \sin \nu\sigma x, \\ y = \Delta_2, \end{cases} \tag{13}$$

$$\begin{cases} u_4(x,y) = \sum\limits_{\nu=1}^{\infty} \left(B_{4\nu} e^{\nu\sigma y} + C_{4\nu} \nu e^{-\nu\sigma y}\right) \sin \nu\sigma x, \\ B_{4y}(x,y) = -\mu_0 \dfrac{\partial u_4}{\partial y} = \mu_0\sigma \sum\limits_{\nu=1}^{\infty} \nu \left(- B_{4\nu} e^{\nu\sigma y} + C_{4\nu} e^{-\nu\sigma y}\right) \sin \nu\sigma x, \\ \Delta_2 \le y \le \Delta_3, \end{cases} \tag{14}$$

$$\begin{cases} u_5(x,y) = \sum\limits_{\nu=1}^{\infty} \left(B_{5\nu} e^{\nu\sigma y} + C_{5\nu} \nu e^{-\nu\sigma y}\right) \sin \nu\sigma x, \\ B_{5y}(x,y) = -\mu_0 \dfrac{\partial u_4}{\partial y} = \mu_0\sigma \sum\limits_{\nu=1}^{\infty} \nu \left(- B_{5\nu} e^{\nu\sigma y} + C_{5\nu} e^{-\nu\sigma y}\right) \sin \nu\sigma x, \\ \Delta_3 \le y \le \Delta_4, \end{cases} \tag{15}$$

$$\begin{cases} u_6(x,y) = \sum\limits_{\nu=1}^{\infty} A_{6\nu} e^{-\nu\sigma y} \sin \nu\sigma x, \\ B_{6y}(x,y) = -\mu_0\mu_c \dfrac{\partial u_6}{\partial y} = \mu_0\mu_c\sigma \sum\limits_{\nu=1}^{\infty} \nu A_{6\nu} e^{-\nu\sigma y} \sin \nu\sigma x, \quad y \ge \Delta_4. \end{cases} \tag{16}$$

Входящие в уравнения (10)–(16) десять постоянных A_{1k}, B_{nk}, C_{nk} ($n = 2, 3, 4, 5$), A_{6k} находим из следующих десяти граничных условий, получаемых приравниванием магнитных потенциалов и радиальных магнитных индукций на границах сред:

$$
\begin{aligned}
&A_{1\nu} - B_{2\nu} - C_{2\nu} = 0\,,\\
&-B_{2\nu} + C_{2\nu} + \mu_p A_{1\nu} = 0\,,\\
&B_{2\nu}e^{\nu\sigma\Delta_1} + C_{2\nu}e^{-\nu\sigma\Delta_1} - B_{3\nu}e^{\nu\sigma\Delta_1} - C_{3\nu}e^{-\nu\sigma\Delta_1} = 0\,,\\
&-B_{2\nu}e^{\nu\sigma\Delta_1} + C_{2\nu}e^{-\nu\sigma\Delta_1} + B_{3\nu}e^{\nu\sigma\Delta_1} - C_{3\nu}e^{-\nu\sigma\Delta_1} = 0\,,\\
&B_{3\nu}e^{\nu\sigma\Delta_2} + C_{3\nu}e^{-\nu\sigma\Delta_2} - B_{4\nu}e^{\nu\sigma\Delta_2} - C_{4\nu}e^{-\nu\sigma\Delta_2} = -F_{sv}\,,\\
&-B_{3\nu}e^{\nu\sigma\Delta_2} + C_{3\nu}e^{-\nu\sigma\Delta_2} + B_{4\nu}e^{\nu\sigma\Delta_2} - C_{4\nu}e^{-\nu\sigma\Delta_2} = 0\,,\\
&B_{4k}e^{k\sigma\Delta_3} + C_{4k}e^{-k\sigma\Delta_3} - B_{5k}e^{k\sigma\Delta_3} - C_{5k}e^{-k\sigma\Delta_3} = 0\,,\\
&-B_{4\nu}e^{\nu\sigma\Delta_3} + C_{4\nu}e^{-\nu\sigma\Delta_3} + B_{5\nu}e^{\nu\sigma\Delta_3} - C_{5\nu}e^{-\nu\sigma\Delta_3} = 0\,,\\
&B_{5\nu}e^{\nu\sigma\Delta_4} + C_{5\nu}e^{-\nu\sigma\Delta_4} - A_{6\nu}e^{-\nu\sigma\Delta_4} = 0\,,\\
&-B_{5\nu}e^{\nu\sigma\Delta_4} + C_{5\nu}e^{-\nu\sigma\Delta_4} + \mu_c A_{6\nu}e^{-\nu\sigma\Delta_4} = 0\,.
\end{aligned}
$$

По формулам (4), (12) были рассчитаны радиальные составляющие магнитной индукции в середине воздушного зазора (в середине полосы 3) вентильного двигателя 6ДВМ 300 А35[1], вызванные, соответственно, магнитами ротора и номинальным током обмотки статора при отсутствии электротехнической стали в зубцовой зоне статора (в полосах 4 и 5 на рис. 1). Полученные зависимости показаны на рис. 2. Видим, что названные индукции сравнительно невелики.

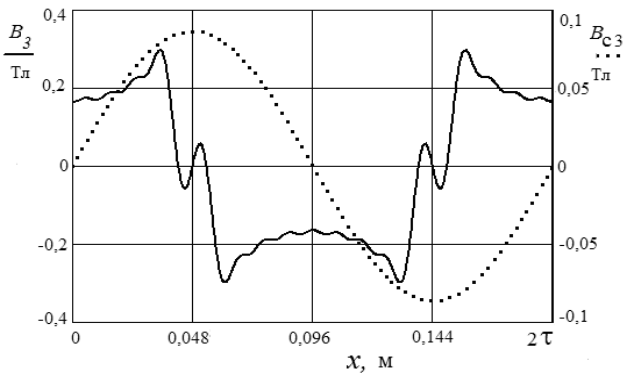


Рис. 2. Магнитные индукции по оси y в середине воздушного зазора от магнитов ротора (кривая B_3) и от тока обмотки статора (кривая B_{c3})

[1] Технические данные серийного вентильного двигателя 6ДВМ 300 А35 производства Чебоксарского электроаппаратного завода (ЧЭАЗ): диаметр расточки статора 126 мм; активная длина 150 мм; высота неодим–железо–боровых магнитов 7,1 мм; $z = 24$; $2p = 4$.

3. Расчёт магнитных полей, вызванных падением магнитного напряжения в зубцах статора

Двумя другими источниками магнитного поля будут падения магнитного напряжения в ферромагнитных зубцах статора, принадлежащих двум средам (рис. 1): полосе 4, содержащей узкие пазовые шлицы, и полосе 5 с пазами статора. В первом приближении максимумы этих магнитных напряжений U_{mz4} и U_{mz5} (в некотором зубце) будем считать средними в названных полосах, вызванными магнитами ротора и током обмотки статора. Эти напряжения в ферромагнитных участках полос полагаем изменяющимися синусоидальным образом

$$U_{z4(5)} = U_{mz4(5)} \cos \sigma x ,$$

где $\sigma = \pi / \tau$.

В целом магнитные напряжения в указанных полосах находим в виде бесконечного тригонометрического ряда, коэффициенты которого вычисляются в предположении, что магнитные напряжения в воздушных участках (в шлицах и пазах) равны нулю[1]

$$u_{4(5)}(x) = \sum_{k=1}^{\infty} U_{4(5)}(k) \cos k\sigma x ,$$

где

$$U_{4(5)}(k) = \frac{4U_{mz4(5)}}{zt_z} \sum_{k=1}^{\frac{z}{2p}} \int_{(k-1)t_z + \frac{b_{1(2)}}{2}}^{kt_z - \frac{b_{1(2)}}{2}} \cos \sigma x \cos k\sigma x dx ;$$

где $t_z = \dfrac{\pi D_i}{z}$ – зубцовый шаг статора; b_1, b_2 – ширина шлица и паза статора, соответственно.

Максимумы магнитных напряжений U_{mz4} и U_{mz5} связаны с кривой намагничивания электротехнической стали известным равенством

$$U_{mz4(5)} = H_{m4(5)} h_{4(5)} ,$$

где $H_{m4(5)}$, $h_{4(5)}$ – максимум напряжённости магнитного поля в стали и высоты соответствующих полос (элементов зубца).

Исходные уравнения. Ищем скалярные магнитные потенциалы $u_n(x, y)$ и радиальные составляющие магнитной индукции $B_{ny}(x, y)$ в названных средах ($n = 1, 2, \ldots, 6$), когда единственным источником магнитного поля являются магнитные напряжения (или напряжённости магнитного поля) зубцов в полосе 4. Магниты ротора и токи обмотки статора отсутствуют.

При этом, очевидно, расчёт магнитных индукций как в полосе 4, так и в других полосах связан с умножением магнитной напряженности на магнитную проницаемость $\mu_4(x)$ ферромагнитной полосы 4. В этом случае обеспечивается соблюдение граничных условий для рассматриваемых полос: равен-

[1] Радиальные составляющие магнитной индукции в пазах, имеющих слабо- и средненасыщенные зубцы, близки к нулю [2].

ство магнитных потенциалов $u_n(x, y)$ и нормальных составляющих магнитных индукций $B_{ny}(x, y)$ на границах полос.

Магнитные проницаемости $\mu_{4(5)}(x)$ будем находить в предположении, что магнитная характеристика является прямой, проходящей через начало координат и рабочую точку магнитной индукции на нелинейной зависимости $B = f(H)$:

$$\mu_{4(5)}(x) = \left| \sum_{k=1}^{\infty} \mu_{4(5)}(k) \cos k\sigma x \right|,$$

где

$$\mu_{4(5)}(k) = \frac{4\mu_{z4(5)}}{zt_z} \sum_{k=1}^{\frac{z}{2p}} \int_{kt_z - b_{1(2)}}^{kt_z} (sign \cos \sigma x) \cos k\sigma x dx + \frac{4}{zt_z} \sum_{k=1}^{\frac{z}{2p}} \int_{kt_z - b_{1(2)}}^{kt_z} (sign \cos \sigma x) \cos k\sigma x dx .$$

Значения максимальных проницаемостей в участках зубцов $\mu_{z4(5)}$ уточняются по результатам расчёта суммарного магнитного поля в зубцах, вызванного всеми тремя его источниками.

Выражения для магнитных потенциалов и магнитных индукций будут иметь вид

$$\begin{cases} u_1(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} A_{1k} e^{k\sigma_z y} \cos k\sigma x, \\ B_{1y}(x, y) = -\mu_0 \mu_4(x) \dfrac{\partial u_1}{\partial y} = -\mu_0 \mu_4(x) \sigma \sum_{k=1}^{\infty} k A_{1k} e^{k\sigma_z y} \cos k\sigma x, \\ -h_{ap} \le y \le 0, \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} u_2(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} \left(B_{2k} e^{k\sigma y} + C_{2k} e^{-k\sigma y} \right) \cos k\sigma x, \\ B_{2y}(x, y) = -\mu_0 \mu_4(x) \dfrac{\partial u_2}{\partial y} = \mu_0 \mu_4(x) \sigma \sum_{k=1}^{\infty} \left(-k B_{2k} e^{k\sigma y} + k C_{2k} e^{-k\sigma y} \right) \cos k\sigma x, \\ 0 \le y \le \Delta_1, \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} u_3(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} \left(B_{3k} e^{k\sigma y} + C_{3k} e^{-k\sigma y} \right) \cos k\sigma x, \\ B_{3y}(x, y) = -\mu_0 \mu_4(x) \dfrac{\partial u_3}{\partial y} = \mu_0 \mu_4(x) \sigma \sum_{k=1}^{\infty} \left(-k B_{3k} e^{k\sigma y} + k C_{3k} e^{-k\sigma y} \right) \cos k\sigma x, \\ \Delta_1 \le y \le \Delta_2. \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} u_4(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} \left(B_{4k} e^{k\sigma y} + C_{4k} e^{-k\sigma y} + U_4(k) \right) \cos k\sigma x, \\ B_{4y}(x, y) = -\mu_0 \mu_4(x) \dfrac{\partial u_3}{\partial y} = \mu_0 \mu_4(x) \sigma \sum_{\nu=1}^{\infty} k \left(-B_{4k} e^{k\sigma y} + C_{4k} e^{-k\sigma y} \right) \cos k\sigma x, \\ \Delta_2 < y \le \Delta_3, \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} u_5(x,y) = \sum\limits_{k=1}^{\infty}\left(B_{5k}e^{k\sigma y} + C_{5k}e^{-k\sigma y}\right)\cos k\sigma x, \\ B_{5y}(x,y) = -\mu_0\mu_4(x)\dfrac{\partial u_5}{\partial y} = \mu_0\mu_4(x)\sigma\sum\limits_{k=1}^{\infty}\left(-kB_{5k}e^{k\sigma y} + kC_{5k}e^{-k\sigma y}\right)\cos k\sigma x, \\ \Delta_3 \le y \le \Delta_4, \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} u_6(x,y) = \sum\limits_{k=1}^{\infty} A_{6k}e^{k\sigma y}\cos k\sigma x, \\ B_{6y}(x,y) = -\mu_0\mu_4(x)\dfrac{\partial u_6}{\partial y} = -\mu_0\mu_4(x)\sigma\sum\limits_{k=1}^{\infty} kA_{6k}e^{k\sigma y}\cos k\sigma x, \\ \Delta_4 \le y \le \Delta_5. \end{cases} \quad (22)$$

Выражения, аналогичные формулам (17)–(22), могут быть записаны для случая, когда источником магнитного поля являются магнитные напряжения зубцов в полосе 5.

Расчёт постоянных. Входящие в уравнения (17)–(22) десять постоянных A_{1k}, B_{nk}, C_{nk} ($n = 2, 3, 4, 5$), A_{6k} находим из следующих десяти граничных условий, получаемых приравниванием магнитных потенциалов и радиальных магнитных индукций на границах сред:

$$\begin{aligned}
&A_{1k} - B_{2k} - C_{2k} = 0, \\
&-B_{2k} + C_{2k} + A_{1k} = 0, \\
&B_{2k}e^{k\sigma\Delta_1} + C_{2k}e^{-k\sigma\Delta_1} - B_{3k}e^{k\sigma\Delta_1} - C_{3k}e^{-k\sigma\Delta_1} = 0, \\
&-B_{2k}e^{k\sigma\Delta_1} + C_{2k}e^{-k\sigma\Delta_1} + B_{3k}e^{k\sigma\Delta_1} - C_{3k}e^{-k\sigma\Delta_1} = 0, \\
&B_{3k}e^{k\sigma\Delta_2} + C_{3k}e^{-k\sigma\Delta_2} - B_{4k}e^{k\sigma\Delta_2} - C_{4k}e^{-k\sigma\Delta_2} = U_4(k), \\
&-B_{3k}e^{k\sigma\Delta_2} + C_{3k}e^{-k\sigma\Delta_2} + B_{4k}e^{k\sigma\Delta_2} - C_{4k}e^{-k\sigma\Delta_2} = 0, \\
&B_{4k}e^{k\sigma\Delta_3} + C_{4k}e^{-k\sigma\Delta_3} - B_{5k}e^{k\sigma\Delta_3} - C_{5k}e^{-k\sigma\Delta_3} = -U_4(k), \\
&-B_{4k}e^{k\sigma\Delta_3} + C_{4k}e^{-k\sigma\Delta_3} + B_{5k}e^{k\sigma\Delta_3} - C_{5k}e^{-k\sigma\Delta_3} = 0, \\
&B_{5k}e^{k\sigma\Delta_4} + C_{5k}e^{-k\sigma\Delta_4} - A_{6k}e^{-k\sigma\Delta_4} = 0, \\
&-B_{5k}e^{k\sigma\Delta_4} + C_{5k}e^{-k\sigma\Delta_4} + A_{6k}e^{-k\sigma\Delta_4} = 0.
\end{aligned}$$

Аналогичные уравнения для нахождения постоянных будем иметь для случая, когда источником магнитного поля являются магнитные напряжения зубцов в полосе 5.

Расчёты показывают, что при одинаковых магнитных индукциях, а значит, и при одинаковых магнитных напряжённостях в полосах 4 и 5 магнитные напряжения в полосе 5 будут в h_5 / h_4 раз больше напряжения полосы 4. Для рассматриваемого двигателя это отношение составит $h_5 / h_4 = 40 / 1{,}5 = 26{,}7$. Это отношение будет ещё больше, если учесть, что магнитная индукция в элементе зубца из полосы 4 будет существенно

меньше, чем в остальной части зубца. Поэтому влиянием магнитного напряжения в полосе 4 (как одного из источников магнитного поля) на магнитные индукции в других полосах можно пренебречь.

На рис. 3. показана кривая распределения магнитной индукции в полосе 5 (в зубцах статора), полученная суммированием магнитных индукций от всех трёх источников с помощью формул (6), (15) и (21).

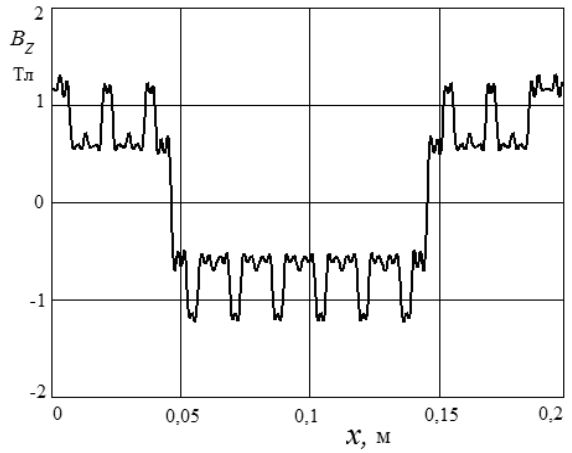


Рис. 3. Магнитная индукция
в среднем сечении ($y = \Delta_3 + 0{,}5h_2$) зубцов статора

Результирующая магнитная индукция в воздушном зазоре (полосе 3), полученная по формулам (4), (12) и (19), представлена на рис. 4. Её максимум составил 0,84 Тл.

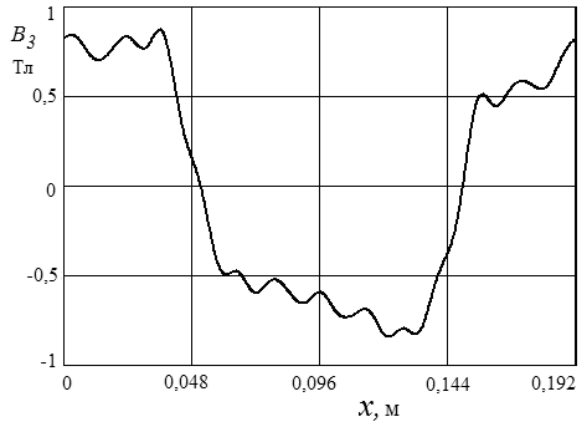


Рис. 4. Результирующая магнитная индукция на середине
воздушного зазора (на средней линии полосы 3)

4. Электромагнитный момент

Основной электромагнитный момент находим, используя результирующие значения радиальной индукции и тангенциальной напряжённости магнитного поля в воздушном зазоре (полоса 3), по формуле [3]

$$M = \frac{plD_i}{2} \int_0^{2\tau} B_{3y} H_{3x} dx .$$

Величина этого момента находилась в функции положения напряжённости магнитного поля обмотки статора относительно продольной оси ротора (рис. 5). Максимум его составил 68,6 Нм. Паспортное значение момента рассматриваемого вентильного двигателя 6ДВМ 300 А35 для тока $I = 70$ А (при неподвижном роторе) равно 70 Нм.

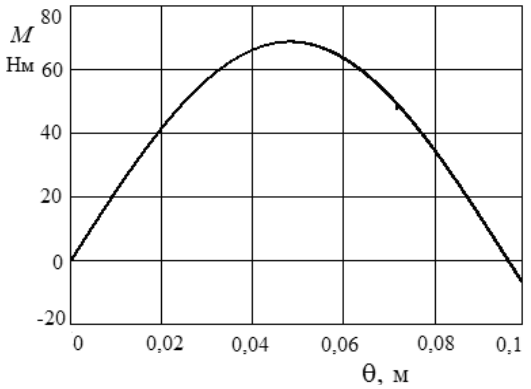


Рис. 5. Зависимость электромагнитного момента вентильного двигателя от величины сдвига напряженности магнитного поля обмотки статора в направлении координаты *x*

Кривая электромагнитного момента реактивного происхождения при обесточенной обмотке статора (при отсутствии скоса пазов статора) показана на рис. 6. Его максимум составил 2,65 Нм, или 3,8% от номинального значения электромагнитного момента.

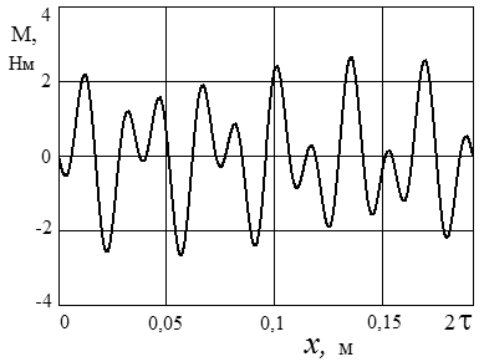


Рис. 6. Реактивный момент обесточенного вентильного двигателя

Выводы. 1. На базе метода разделения переменных Фурье получена двухмерная аналитическая модель вентильного двигателя с постоянными магнитами, в которой в качестве источников магнитного поля помимо магнитов ротора и тока обмотки статора выступают магнитные напряжения статорных зубцов.

2. Расчётные значения магнитных индукций в средах находятся с учётом зубчатости статора, обмоточных гармоник МДС и геометрической структуры расположения постоянных магнитов.

3. Расчётные величины функциональных показателей двигателя (ток, момент) близки к его паспортным значениям.

Литература

1. *Афанасьев А.А.* Расчёт магнитного поля проводника в пазу электрической машины // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1985. № 4. С. 14–22.

2. *Афанасьев А.А.* Аналитические и численные методы решения задач электромеханики на основе комплексного магнитного потенциала. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. 430 с.

3. *Иванов-Смоленский А.В.* Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. М.: Высш. шк., 1989. 312 с.

4. *Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.В., Власов А.И., Кузнецов В.А.* Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / под ред. А.В. Иванова-Смоленского. М.: Энергоатомиздат, 1986. 216 с.

5. *Поливанов К.М.* Теоретические основы электротехники. Ч. 3. Теория электромагнитного поля. М.: Энергия, 1969. 352 с.

6. *Сергеев П.С.* Электрические машины. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962. 280 с.

АФАНАСЬЕВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры автоматики и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (afan39@mail.ru).

A. AFANASIEV

ANALYTICAL CALCULATION OF THE MAGNETOELECTRIC VALVE MOTOR

Key words*: variable separation method, permanent magnets, serration of the stator, winding harmonics, electromagnetic torque, series motor.*

On the basis of the Fourier variable separation method, a two-dimensional analytical model of a gate motor with permanent magnets is obtained, the general computational domain of which includes ferromagnetic sites and permanent magnets of real configuration. The sources of the magnetic field are the permanent magnets of the rotor, the currents of the stator winding and the magnetic voltage drop in the stator teeth. The calculated values of magnetic inductions in the environment are based on the geometric structures of the stator gear, the location of permanent magnets and winding harmonics MDS. The calculated values of the functional parameters of the engine (current, torque) obtained on the model are close to its passport values. Using the variable separation method in the proposed configuration is a new step in its universalization. The proposed approaches can be applied in the design practice of gate motors with permanent magnets.

References

1. Afanasiev A.A. *Raschet magnitnogo polya provodnika v pazu elektricheskoi mashiny* [Calculation of the magnetic field of the conductor in the groove of the electric machine]. *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport*, 1985, no. 4, pp. 14–22.

2. Afanasyev A.A. *Analiticheskie i chislennye metody resheniya zadach elektromekhaniki na osnove kompleksnogo magnitnogo potentsiala* [Analytical and numerical methods for solving problems of electromechanics on the basis of complex magnetic potential]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2017, 430 p.

3. Ivanov-Smolensky A.V. *Elektromagnitnye sily i preobrazovanie energii v elektricheskikh mashinakh* [Electromagnetic forces and energy conversion in electric machines]. Moscow, Vyschaya Shkola Publ., 1989, 312 p.

4. Ivanov-Smolenskiy A.V., Abramkin Yu.V, Vlasov A.I., Kuznetsov V.A. *Universal'nyi metod rascheta elektromagnitnykh protsessov v elektricheskikh mashinakh* [Universal method of calculation of electromagnetic processes in electric machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, 216 p.

5. Polivanov K.M. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Ch. 3. Teoriya elektromagnitnogo polya* [Theoretical foundations of electrical engineering. Part 3: Electromagnetic field theory]. Moscow, Energia Publ., 1969, 352 p.

6. Sergeev P.S. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1962, 280 p.

AFANASYEV ALEXANDER – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (afan39@mail.ru).

Формат цитирования: *Афанасьев А.А.* Аналитический расчёт магнитоэлектрического вентильного двигателя // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 26–39.

УДК 621.313.333
ББК 31.291

И.Ф. АФЛЯТУНОВ, Н.И. ГОРБАЧЕВСКИЙ, Е.Н. ГАВРИЛОВ

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ НА НАЧАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПУСКОВОГО ТОКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ключевые слова: *асинхронный двигатель, конденсаторный пуск, плавный пуск, форсированный пуск, управляемый пуск, компенсация реактивной мощности.*

Исследование способа пуска асинхронного двигателя, основанного на подключении конденсаторов последовательно с цепью статора электродвигателя, является актуальным, так как такой способ пуска решает задачи плавного и форсированного пуска. Целью исследования является определение границ диапазонов емкостных сопротивлений конденсаторов, последовательно подключенных в цепь статора электродвигателя, для режимов плавного и форсированного пуска. Новизна исследования состоит в том, что получены соотношения емкостного сопротивления конденсаторов и индуктивного сопротивления АД, при которых обеспечиваются форсированный и плавный режимы конденсаторного пуска АД, позволяющие упростить анализ этих режимов на универсальных моделях путем использования полученных соотношений в качестве ограничений. Форсированный пуск достигается снижением суммарного реактивного сопротивления цепи за счет компенсации индуктивного сопротивления электродвигателя емкостным сопротивлением конденсаторов. Режим ограничения пускового тока достигается за счет увеличения суммарного реактивного сопротивления цепи за счет перекомпенсации индуктивного сопротивления электродвигателя.

В настоящее время среди всего разнообразия электродвигателей, применяемых в качестве приводного звена различных производственных механизмов, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АД) получил наибольшее распространение. Во многом этому способствуют простота его конструкции, высокая надежность, низкая трудоемкость технического обслуживания.

Общеизвестно, что серьезным недостатком АД является его высокий пусковой ток, кратность пикового значения которого при прямом пуске достигает 6,5–7,5 раза от номинального тока электродвигателя. Наряду с этим на практике часто по условию гарантированного пуска приводной электродвигатель выбирается завышенной мощности лишь для преодоления начального момента сопротивления механизма, который превышает пусковой момент АД. Вследствие этого в рабочем режиме АД работает с низким коэффициентом мощности. Также возможны случаи, когда от электродвигателя требуется быстрое прохождение резонансного диапазона скоростей вращения, в котором при малом ускорении двигателя момент сопротивления на его валу увеличивается настолько, что выход электропривода на рабочий режим становится невозможным [4].

Обеспечить пусковой режим АД с заданными параметрами пусковых характеристик, а также качества электроэнергии возможно при пуске АД с подключенными в цепь статора статическими конденсаторами. Целесообразность такого способа заключается в следующем:

1) в нормальном рабочем режиме электродвигателя конденсаторы можно использовать для компенсации потребляемой реактивной мощности, а также в качестве тормозных во время останова;

2) в пусковом режиме конденсаторы снижают амплитуду ударных составляющих момента за счет снижения апериодической составляющей тока статора;

3) при подключении конденсаторов происходит компенсация падения напряжения в протяженной линии. Это благоприятно влияет на перегрузочную способность электродвигателя. Еще большую актуальность это свойство имеет при питании АД от источника ограниченной мощности [5, 7].

Включенные в цепь статора АД конденсаторы в зависимости от величины своей емкости обладают двумя противоположными друг другу свойствами. Конденсаторы способны как снизить приложенное к статору напряжение, что позволяет ограничить пусковой ток электродвигателя, так и, наоборот, повысить значение приложенного к статору напряжения, что позволяет повысить пусковой момент электродвигателя, но влечет за собой также повышение значения пускового тока. Представляет интерес исследование влияния величины емкости конденсаторов на начальное значение пускового тока АД.

Целью данного исследования является определение границ диапазонов емкостных сопротивлений конденсаторов, последовательно подключенных в цепь статора электродвигателя, для двух пусковых режимов:

1) режима плавного пуска;

2) режима форсированного пуска.

Влияние величины емкости конденсаторов на начальное значение пускового тока АД, а также электромагнитного момента и фазного напряжения на статоре исследовалось при помощи упрощенных выражений для электромеханических и механических характеристик электродвигателя при скольжении ротора равном единице. Данные выражения имеют следующий вид:

$$I_{1\text{пуск}} = \frac{U_{\text{ф}}}{R_1 + R_2^{'} + j(X_1 + X_2^{'} - X_C)}, \tag{1}$$

$$U_{\text{Д.пуск}} = U_{\text{ф}} \cdot \frac{\sqrt{(R_1 + R_2^{'})^2 + (X_1 + X_2^{'})^2}}{\sqrt{(R_1 + R_2^{'})^2 + (X_1 + X_2^{'} - X_C)^2}}, \tag{2}$$

$$M_{\text{мех.пуск}} = \frac{3 \cdot U_{\text{ф}}^2 \cdot R_2^{'}}{\omega_{\text{с}} \cdot [(R_1 + R_2^{'})^2 + (X_1 + X_2^{'} - X_C)^2]}, \tag{3}$$

где U_{ϕ} – напряжение фазы, В; R_1, R'_2, X_1, X'_2 – соответственно активные и индуктивные сопротивления статора и ротора АД, Ом; X_C – реактивное (емкостное) сопротивление включенных в цепь статора конденсаторов, Ом; ω_c – угловая частота вращения магнитного поля, рад/с.

Емкостное сопротивление

$$X_C = \frac{1}{\omega_{\text{с}} \cdot C \cdot 10^{-6}},$$

где C – емкость пусковых конденсаторов, мкФ.

Исследования проводились с использованием паспортных данных электродвигателя 1LA7113-2AA60 марки Siemens, на основе которых по методике

[6] были определены параметры схемы замещения асинхронной машины. Электродвигатель имеет следующие параметры:

– номинальная мощность: $P_н = 4$ кВт;

– номинальная частота вращения: $n_н = 2905$ об/мин;

– момент инерции ротора: $J_д = 0{,}0055$ кг/м^2;

– значения активных сопротивлений и индуктивностей электродвигателя: $R_1 = 1{,}57$ Ом, $R'_2 = 1{,}02$ Ом, $L_1 = 0{,}0061$ Гн, $L_2 = 0{,}0084$ Гн, $L_m = 0{,}25$ Гн;

– пусковой и критический электромагнитные моменты, а также пусковой ток прямого пуска АД: $M_П = 2{,}6M_{ном}$, $M_{кр.} = 2{,}9M_{ном}$, $I_П = 7{,}2I_{ном}$, где $M_{ном} = 13$ Н·м, $I_{ном} = 7{,}8$ А.

В ходе исследования с помощью выражений (1)–(3) были построены графики функций $I_{1пуск}(X_C)$, $U_{Д.пуск}(X_C)$, $M_{мех.пуск}(X_C)$, которые дают представление о значениях тока и напряжения статора, а также развиваемого электродвигателем момента в начальный момент времени пуска. На рис. 1 представлены кривые зависимостей $I_{1пуск}(X_C)$, $U_{Д.пуск}(X_C)$, $M_{мех.пуск}(X_C)$ в относительных единицах. Здесь:

$$I_{о.е.} = \frac{I_{1пуск}}{I_{ном}}; M_{о.е.} = \frac{M_{мех.пуск}}{M_{ном}}; U_{о.е.} = \frac{U_{Д.пуск}}{U_{ном}}; X_{о.е.} = \frac{X_C}{X_{АД}}.$$

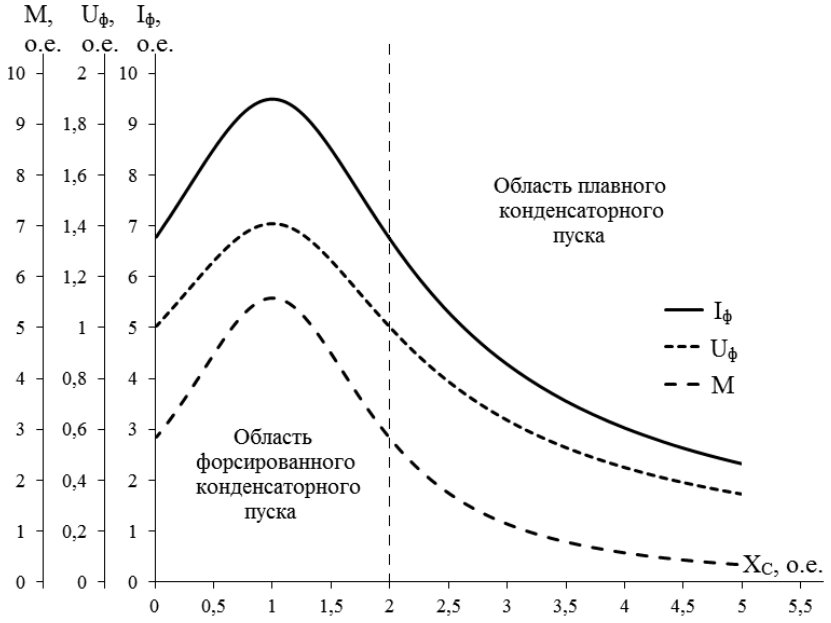


Рис. 1. Графики функций $I_{1пуск}(X_C)$, $U_{Д.пуск}(X_C)$, $M_{мех.пуск}(X_C)$

На рис. 2 представлен график зависимости тока статора АД от емкости подключенных конденсаторов. Данный график представляет собой комплексную плоскость, на которой показано изменение характера пускового тока электродвигателя при увеличении емкости конденсаторов от 10 мкФ до 10000 мкФ. Действительная и мнимая части пускового тока АД определены с использованием выражения (1).

Рис. 2. Зависимость характера начального значения тока исследуемого АД от емкостного сопротивления конденсаторов

Анализируя построенные зависимости начальных значений тока, электромагнитного момента и фазного напряжения на статоре АД от емкостного сопротивления конденсаторов в цепи статора (рис. 1), можно заметить, что с увеличением значения емкостного сопротивления конденсаторов от нуля до двукратного значения пускового индуктивного сопротивления электродвигателя $0 < X_C < 2X_{АД}$ значения электромагнитного момента, тока и напряжения статора сначала возрастают, достигают максимального значения, а затем снова снижаются.

При дальнейшем увеличении значения емкостного сопротивления конденсаторов от $X_C = 2X_{АД}$ и выше наступает режим ограничения пускового тока АД за счет снижения значения напряжения, приложенного к обмоткам статора электродвигателя.

Максимальные значения тока статора и электромагнитного момента возможны при условии равенства между собой емкостного сопротивления конденсаторов и индуктивного сопротивления электродвигателя: $X_C = X_{АД} = X_1 + X'_2$. При этом суммарное реактивное сопротивление участка цепи равно нулю, пусковой коэффициент мощности равен единице: $\cos\varphi_{пуск} = 1$, т.е. потребляемая мощность имеет активный характер, а значение напряжения на обмотках статора выше, чем при прямом пуске. Например, как видно из графиков на рис. 1, при $X_C = X_{АД}$ для исследуемого АД относительные значения напряжения и тока статора повышаются до 1,4, пусковой момент при этом увеличивается в 2 раза, что соответствует зависимости $M_{АД}(U^2_Ф)$.

Проанализируем, как влияет величина емкостного сопротивления конденсаторов на характер начального значения тока АД (рис. 2). В точке «А» значение емкостного сопротивления подключенных к обмоткам статора конденсаторов равно нулю: $X_C = 0$, т.е. значение тока статора соответствует режиму прямого пуска АД; в точке «Г» $X_C = \infty$, что практически соответствует разрыву между питающим кабелем и статорными обмотками. Для точки «Б» пусковой ток, следовательно, и пусковой момент АД максимальны. В данной точке выполняется условие резонанса напряжений: $X_C = X_{АД}$, а полное сопротивление цепи равно активному сопротивлению АД. Следуя на анализируемой кривой по участку

«АБ» от точки «А» к точке «Б», вектор потребляемого из сети электроприводом тока отстает от вектора напряжения сети, т.е. имеет активно-индуктивный характер, но значение угла сдвига между векторами снижается. Приближаясь к точке «Б», значение емкостного сопротивления конденсаторов увеличивается, оно все больше компенсирует индуктивное сопротивление цепи, благодаря чему полное сопротивление участка цепи снижается. Это приводит к тому, что пусковой ток двигателя увеличивается. За счет повышения тока статора приложенное к статорным обмоткам напряжение также увеличивается, а вместе с этим повышается электромагнитный момент электродвигателя (рис. 1).

Рассмотрим участок «БВ» (рис. 2). На данном участке емкость конденсаторов изменяется от $X_C = X_{АД}$ до $X_C = 2X_{АД}$. Вектор потребляемого электроприводом из сети тока опережает вектор напряжения питающей сети. Для точки «В» значение емкостного сопротивления пусковых конденсаторов в два раза превышает значение пускового индуктивного сопротивления АД: $X_C = 2X_{АД}$. В этой точке эквивалентное полное сопротивление цепи равно эквивалентному полному сопротивлению АД без конденсаторов. Следовательно, модуль вектора пускового тока АД равен модулю вектора пускового тока электродвигателя в режиме прямого пуска, но имеет опережающий характер. Аналогично, значения электромагнитного момента и напряжения статора равны значениям при прямом пуске (рис. 1).

Участок «ВГ». На данном участке $X_C > 2X_{АД}$, вследствие чего наблюдается перекомпенсация индуктивного сопротивления участка цепи, полное сопротивление этого участка цепи превышает полное сопротивление АД. С увеличением значения емкостного сопротивления конденсаторов от точки «В» к точке «Г» полное сопротивление цепи увеличивается. Поэтому происходят ограничение пускового тока, снижение приложенного к обмоткам статора напряжения и электромагнитного момента электродвигателя (рис. 1).

Выводы. 1. При включении в цепь статора АД статических конденсаторов существует возможность либо «форсировать» пуск электродвигателя увеличением кратности его пускового момента, либо, наоборот, ограничить пусковой ток и электромагнитный момент АД на требуемом уровне.

2. Для форсирования пуска АД суммарное реактивное сопротивление цепи не должно превышать пусковое индуктивное сопротивление электродвигателя. При этом возможны два случая: 1) $X_C < X_{АД}$ – ток, потребляемый из сети, имеет активно-индуктивный характер; 2) $X_{АД} < X_C < 2X_{АД}$ – ток, потребляемый из сети, имеет активно-емкостный характер. Режим форсированного пуска применим для механизмов, которым для начала движения необходимо преодолеть большой момент сопротивления, резко снижающийся после начала движения. Также данный режим применим для увеличения динамики разгона АД с целью быстрого преодоления резонансных участков скоростей.

3. Для ограничения пускового тока емкостное сопротивление конденсаторов должно в два раза превышать индуктивное сопротивление электродвигателя: $X_C > 2X_{АД}$. Потребляемый из сети ток имеет активно-емкостный характер. Так как при ограничении тока АД снижается и его электромагнитный

момент, то данный режим пуска можно рекомендовать для электроприводов насосов и вентиляторов.

Отдельно стоит сказать, что в проведенном анализе рассматривается начальный момент пуска АД, т.е. определены значения тока, электромагнитного момента и напряжения статора АД в начальный момент подключения к сети. Это, естественно, не дает полную картину переходного процесса конденсаторного пуска АД, а позволяет лишь приближенно оценить характеристики пускового режима. Для исследования протекания переходного процесса пуска АД с включенными в цепь статора конденсаторами во времени необходимо прибегать к методу моделирования [1–3].

Литература

1. *Афлятунов И.Ф.* Асинхронный электропривод с конденсаторным пуско-компенсирующим устройством: дис. … канд. техн. наук. Ульяновск, 2016. 181 с.

2. *Афлятунов И.Ф., Дмитриев В.Н.* Динамические режимы асинхронного двигателя с пуско-компенсирующим устройством // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. № 11-12. С. 61–67.

3. *Афлятунов И.Ф., Мухитов М.М., Дмитриев В.Н.* Форсированный пуск асинхронного двигателя с последовательно включенными в цепь статора конденсаторами // Электротехнические комплексы и системы управления. 2015. № 4. С. 52–56.

4. *Гаврилов Е.Н.* Разработка и исследование асинхронного электропривода зарезонансных вибрационных транспортирующих машин: дис. ... канд. техн. наук. Ульяновск, 2012. 177 с.

5. *Дмитриев В.Н., Крицштейн А.М., Кислицин А.Л.* Конденсаторный пуск асинхронных двигателей малой мощности // Материалы международной научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах». Севастополь, 2015. С. 71-72.

6. *Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А.* Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. 1998. № 4. С. 38–42.

7. *Мухитов М.М., Дмитриев В.Н.* Исследование асинхронного двигателя с конденсаторным пуско-компенсирующим устройством // Проблемы энергетики. 2011. №11-12. С. 187-190.

АФЛЯТУНОВ ИЛЬДАР ФААТОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и энергообеспечения предприятий, Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) Казанского национального исследовательского технологического университета, Россия, Нижнекамск (aif_69@inbox.ru).

ГОРБАЧЕВСКИЙ НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и энергообеспечения предприятий, Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) Казанского национального исследовательского технологического университета, Россия, Нижнекамск (aep-nk@mail.ru).

ГАВРИЛОВ ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и энергообеспечения предприятий, Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) Казанского национального исследовательского технологического университета, Россия, Нижнекамск (noble-86@mail.ru).

I. AFLYATUNOV, N. GORBACHEVSKY, E. GAVRILOV

IMPACT OF CAPACITIVE REACTANCE OF CAPACITORS ON INITIAL VALUE OF STARTING CURRENT OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR

***Key words**: asynchronous motor, capacitor start-up, soft start-up, forced start-up, controlled start-up, compensation of reactive power.*

The research on the way of the asynchronous engine launch based on capacitors consistently connected with an electric motor stator chain is relevant as this way of start-up solves problems of the soft and forced start-up. The research objective is delimitation of ranges of capacitances of the capacitors which are consistently connected in the electric motor stator chain for the modes of the soft and forced start-up. The newness of the research consists in received ratios between capacitance of capacitors and inductive resistance of the asynchronous engine at which the forced and soft modes of capacitor launch of the electric motor are provided to simplify the analysis of these modes on universal models by using the received ratios as restrictions. The forced start-up is reached by decreasing total reactive impedance of a chain due to compensation of inductive resistance of the electric motor by the capacitance of capacitors. The mode of restriction of a starting current is reached by increasing total reactive impedance of a chain due to overcompensation of inductive resistance of the electric motor.

References

1. Aflyatunov I.F. *Asinkhronnyy elektroprivod s kondensatornym pusko-kompensiruyushchim ustroystvom: dis. ... kand. techn. nauk* [The asynchronous electric drive with the device for capacitor start-up of induction motor and compensation of reactive power. Doct. Diss.]. Ulyanovsk, 2016, 181 p.

2. Aflyatunov I.F., Dmitriev V.N. *Dinamicheskiye rezhimy asinkhronnogo dvigatelya s pusko-kompensiruyushchim ustroystvom* [Dynamic modes of asynchronous motor with capacitor starting – compensating device]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki, 2013, no. 11-12, pp. 61–67.

3. Aflyatunov I.F., Muhitov M.M., Dmitriev V.N. *Forsirovannyy pusk asinkhronnogo dvigatelya s posledovatel'no vklyuchennymi v tsep' statora kondensatorami* [Forced start of induction motor with a series capacitors in the stator]. *Elektrotekhnicheskie kompleksy i sistemy upravleniya*, 2015, no. 4, pp. 52–56.

4. Gavrilov E.N. *Razrabotka i issledovanie asinkhronnogo elektroprivoda zarezonansnykh vibratsionnykh transportiruyushchikh mashin: dis. ... kand. techn. nauk* [Development and research of the asynchronous electric drive of resonant vibratory transporting machines. Doct. Diss.]. Ulyanovsk, 2012, 177 p.

5. Dmitriev V.N., Kritshtein A.M., Kislitsin A.L. *Kondensatornyy pusk asinkhronnykh dvigateley maloy moshchnosti* [Capacitor start-up of low-power asynchronous motors]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy povysheniya effektivnosti elektromekhanicheskikh preobrazovateley v elektroenergeticheskikh sistemakh»*. Sevastopol, 2015. pp. 71–72.

6. Moshchinskiy YU.A., Bespalov V.YA., Kiryakin A.A. *Opredeleniye parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnoy mashiny po katalozhnym dannym* [Determination of the parameters of the equivalent circuit of an asynchronous machine from catalog data]. *Elektrichestvo*, 1998, no. 4, pp. 38–42.

7. Mukhitov M.M., Dmitriev V.N. *Issledovaniye asinkhronnogo dvigatelya s kondensatornym pusko-kompensiruyushchim ustroystvom* [Investigation of an asynchronous motor with a capacitor starting-compensating device]. *Problemy energetiki*. 2011. №11-12. pp. 187-190.

AFLYATUNOV ILDAR – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Power Supply of the Enterprise, Nizhnekamsk Chemical Technology Institute (Branch) of Kazan National Research Technological University, Russia, Nizhnekamsk (aif_69@inbox.ru).

GORBACHEVSKY NIKOLAY – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Power Supply of the Enterprise, Nizhnekamsk Chemical Technology Institute (Branch) of Kazan National Research Technological University, Russia, Nizhnekamsk (aep-nk@mail.ru).

GAVRILOV EVGENY – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Power Supply of the Enterprise, Nizhnekamsk Chemical Technology Institute (Branch) of Kazan National Research Technological University, Russia, Nizhnekamsk (noble-86@mail.ru).

Формат цитирования: *Афлятунов И.Ф., Горбачевский Н.И., Гаврилов Е.Н.* Влияние величины емкости конденсаторов на начальное значение пускового тока асинхронного двигателя // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 40–46.

УДК 621.3.027.3
ББК 31.2

В.В. АШМАРИН, А.А. БЛОХИНЦЕВ

РЕСУРСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ЭРОЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДНИКА С ИСКАЖЕНИЕМ ПОЛЯ

Ключевые слова: *разрядник с искажением поля, индуктивный делитель тока, эрозия электродов, искажение рельефа поверхности, металлокерамика, шероховатость поверхности электродов, фактор усиления поля, рентгеноструктурный анализ.*

При разработке экспериментальных стендов для исследования быстропротекающих электрофизических процессов силового воздействия сильных импульсных магнитных полей на проводящие материалы (электромагнитные ускорители масс) широкое применение нашли емкостные накопители энергии многомодульного исполнения. Каждый модуль коммутируется на нагрузку своим коммутатором. Как показали теоретические и экспериментальные исследования, для расширения диапазона срабатывания накопителя, стабильности формирования многоканального разряда, обеспечения шунтирующего режима нагрузки, наиболее перспективными являются разработанные и исследованные многоканальные разрядники с искажением поля.

При работе экспериментальных стендов по условиям проведения эксперимента через малоиндуктивную нагрузку протекают импульсные токи с амплитудным значением более 10^6 А. При этом через каждый канал многоканальной коммутационной системы протекают токи более 100 кА, что накладывает повышенные требования к эрозионной стойкости электродов разрядника.

Установлено, что наряду с уносом массы электрода за счет эрозии происходит изменение рельефа его поверхности, это может привести к изменению пробивных напряжений. От этого напрямую зависят стабильность разрядных характеристик и синхронное срабатывание всех модулей накопителя. Поэтому актуальной задачей является проведение ресурсных испытаний разрядника с искажением поля и исследованием его эрозионных характеристик для выбора наиболее оптимального с точки зрения эрозионной стойкости материала электродов.

На основе анализа результатов ресурсных испытаний и исследований эрозионных характеристик электродов разрядника установлено, что уменьшение статического пробивного напряжения разрядника в процессе его длительной эксплуатации не связано с механизмом ударной ионизации в поле микровыступов поверхности электродов, а обусловлено преимущественным осаждением на внутренних поверхностях изоляции продуктов эрозии.

Предложены аналитические выражения для расчета напряженности электрического поля E вблизи микровыступов, фактора усиления поля M_n, условия самостоятельности разряда с учетом процессов ударной ионизации в поле микровыступа. Приведены данные о количественном изменении массы материала электродов, определены форма и размеры образующихся микронеровностей на поверхности электродов, рассмотрено условие равномерности распределения тока по каналам четырехканального разрядника, анализируется влияние указанных факторов на электрическую прочность разрядника в процессе эксплуатации.

Установлено, что формирование многоканального разряда в разряднике с искажением поля с электродами из ВНМ (вольфрам–никель–медь) позволяет получить незначительный равномерный износ электродов и обеспечить стабильность характеристик срабатывания коммутатора. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований дают возможность для обоснованного выбора основных конструктивных элементов разрядника по рекомендациям, предложенным в статье.

В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований влияния тока емкостного накопителя энергии на эрозию электродов рельсового разрядника с искажением поля (РИП). Протекание тока через промежуток приводит как к выбросу материала электродов с их поверхности, так и к искажению рельефа этой поверхности. Оба явления влияют на электрические характеристики промежутка, в первую очередь на его статическое пробивное напряжение $U_{пр}$. Изучению эрозии электродов при токах сотни килоампер и протекающих через промежуток зарядах до десятков кулон посвящено много работ [1, 4, 6].

При этом вопрос эрозии, как правило, не связывался с проблемами сохранения стабильности величины $U_{пр}$ и равномерного распределения заряда Q по параллельным каналам разрядника. Поэтому при оценке материала, пригодного для изготовления электродов разрядника, необходимо и износ электродов, и изменение рельефа их поверхности учитывать одновременно.

При определении потерь материала электродов удобно использовать понятие удельной эрозии $M_у$, представляющей собой отношение массы выброшенного материала m к протекшему за разряд через промежуток заряду Q:

$$M_y = \frac{m}{Q}. \quad (1)$$

Искажение рельефа поверхности электродов можно характеризовать величиной

$$\Delta u_{ст} = \frac{U_{ст} - U_{пр}}{U_{ст}} 100\%, \quad (2)$$

где $U_{ст}$ – статическое пробивное напряжение промежутка до прохождения тока через разрядник; $U_{пр}$ – статическое пробивное напряжение промежутка после прохождения тока через разрядник.

При заряде Q порядка 2-30 Кл за одно включение износ электродов при достаточно большом количестве коммутаций может быть значительным, что приводит к заметному изменению $\Delta u_{ст}$ за счет увеличения промежутка между электродами и искажения рельефа поверхности. Даже при использовании композиционных материалов, имеющих высокую эрозионную стойкость, величина $\Delta u_{ст}$ может быть более 10%. Поэтому оценка эрозионных характеристик композиционных материалов становится необходимой.

В настоящей работе испытаниям подвергался рельсовый РИП. Основу исследуемой конструкции составляют рельсы с индуктивным делителем тока (ИДТ) в виде гребенки (шириной 8 см), с зубцами (высотой 4 см и шириной 2 см) [2]. Электродная система с ИДТ обеспечивает соотношение индуктивностей канала разряда к индуктивности разрядной цепи $L_к / L_{цр} \geq 5 \cdot 10^{-2}$. При этом увеличивается постоянная времени развития неустойчивости системы параллельных импульсных дуг, что повышает вероятность равномерного распределения тока между каналами [5]. При питании от емкостного накопителя энергии это увеличение составляет около 30%.

На зубцах гребенки установлены электроды из металлокерамической композиции ВНМ (вольфрам – 75%, никель – 1,5%, медь – 23,5%). Главные

электроды представляли собой цилиндры с полусферическими концами диаметром 2 см, один из которых подключен к высоковольтной батарее конденсатов, а другой – к нагрузке. В межэлектродном промежутке располагались управляющие электроды – заостренные пластины толщиной 0,1 см, высотой и шириной 1 см. Электродная система с четырьмя параллельными каналами с межэлектродным зазором 0,69 см размещалась в камере, наполненной сухим воздухом при давлении p = 0,3 МПа. Статическое разрядное напряжение межэлектродных зазоров $U_{ст}$ = 30 кВ. Внутренняя изоляция коммутатора была выполнена из фторопласта.

Разрядный ток в цепи обеспечивался батареей конденсаторов, состоящей из 9 конденсаторов типа ИК-25-12 суммарной емкостью 108 мкФ, и имел форму затухающей синусоиды с максимальным значением тока 300 кА, периодом 37 мкс, за один разряд через промежутки протекал заряд Q = 5,1 Кл. Индуктивность разрядной цепи составила 320 нГн. Исследовался режим однократной коммутации разрядника с частотой срабатывания 1 раз в 3 мин. После каждого разряда камера разрядника продувалась воздухом в течение 30 с. В процессе испытаний разрядник не вскрывался, электроды не шлифовались, внутренние детали не промывались. Электрическая прочность промежутков определялась до начала испытаний и после каждой серии из 100 разрядов.

В результате исследований получена зависимость статического пробивного напряжения $U_{пр}$ от числа коммутаций разрядника N (рис. 1), которая иллюстрирует необратимое уменьшение величины $U_{пр}$ после многократных коммутаций. Используя полученную зависимость, можно по выражению (2) оценить величину $\Delta u_{ст}$ после любого числа разрядов. Установлено, что после 1000 коммутаций $\Delta u_{ст}$ = 6%.

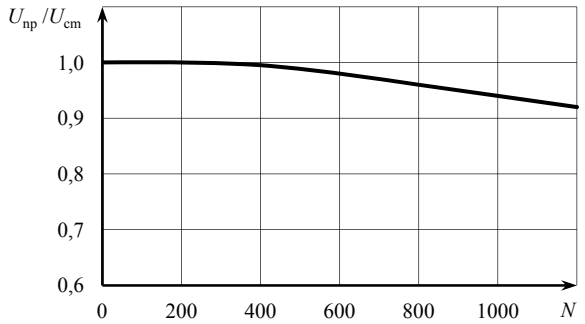


Рис. 1. Зависимость статического пробивного напряжения $U_{пр}$ от числа коммутации N разрядника

Необходимо отметить, что ресурс разрядника характеризуется допустимым числом разрядов, при котором основные характеристики остаются достаточно стабильными. В качестве такой характеристики можно выбрать величину $\Delta u_{ст}$ и допустить в ряде конкретных применений разрядников [3, 12] отклонение $\Delta u_{ст}$ до ±10%.

Эрозионная стойкость разрядника зависит от равномерности распределения заряда по параллельным каналам. Критерием равномерности может служить масса эрозированного материала, определявшаяся путем взвешивания электродов до и после серии экспериментов из 1000 разрядов. Для взвешивания использовались аналитические весы WA-33 со среднеквадратичной погрешностью $\pm 0{,}05 \cdot 10^{-3}$ г. Общий заряд, коммутируемый разрядником за 1000 разрядов, составил 5100 Кл.

Результаты измерений приведены в табл. 1, где m_1 – масса электродов до испытаний; m_2 – масса электродов после 1000 разрядов; m – унесенная масса, $M_у$ – удельная эрозия электродов; $\Delta u_{ст}$ – величина относительного изменения статического пробивного напряжения.

Таблица 1

Параметры эрозии электродов

Расположение и номера электродов РИП	**Параметры эрозии электродов с указанными номерами**				
	m_1, **г**	m_2, **г**	m, **г**	$M_у$, **г/Кл·10^{-3}**	$\Delta u_{ст}$, **%**
1 4 5 ─O │ O─ 1 канал	1-79,4756 4-2,68 5-70,1321	1-78,4496 4-2,47 5-68,90	1-1,026 4-0,21 5-1,2321	1-1,9 4-0,389 5-2,28	6
2 3 6 ─O │ O─ 2 канал	2-77,3254 3-2,56 6-69,9882	2-76,3054 3-2,2 6-68,7268	2-1,02 3-0,36 6-0,2614	2-1,9 3-0,66 6-2,33	6
3 2 7 ─O │ O─ 3 канал	3-80,7854 2-2,23 7-67,8096	3-79,7654 2-1,95 7-66,65	3-1,02 2-0,28 7-1,1596	3-1,9 2-0,52 7-2,15	6
4 1 8 ─O │ O─ 4 канал	4-81,5528 1-2,38 8-70,0348	4-80,6144 1-2,19 8-68,879	4-0,9384 1-0,19 8-1,1558	4-1,74 1-0,35 8-2,14	6

Анализ данных показывает, что электрод высокого напряжения теряет в среднем $1{,}86 \cdot 10^{-3}$ г/Кл за разряд, электрод нагрузки – $2{,}225 \cdot 10^{-3}$ г/Кл, а управляющий электрод – $0{,}48 \cdot 10^{-3}$ г/Кл. Отличие в величине удельной эрозии электродов, образующих параллельные каналы разрядника, незначительно и не превышает 8%. Этот факт говорит о том, что заряд, протекающий через электроды разрядника, распределяется практически равномерно по искровым каналам. При этом удельная эрозия электродов в (4–6) раз ниже, чем в режиме одноканальной коммутации разрядника.

Из сравнения удельной эрозии электродов из металлокерамики вольфрам–никель–медь, для которой $M_у \le 2{,}33 \cdot 10^{-3}$ г/Кл, с удельной эрозией электродов из композиционного материала ВДПМ, состоящей из 35% W и 15% Cu, имеющей $M_у = 5{,}9 \cdot 10^{-3}$ г/Кл [11], и с удельной эрозией электродов из металлокерамики железо–медь–сурьма, имеющей $M_у = 5{,}1 \cdot 10^{-3}$ г/Кл [8], следует, что наиболее износоустойчивым является первый из перечисленных материалов. Следовательно, износ электродов из ВНМ наименьший, а величина $\Delta u_{ст}$ близка к минимальной.

После 1000 разрядов промежуток между главными электродами увеличился на 0,05 см (7%), а высота управляющих электродов уменьшилась в

среднем на 0,093 см (9,3%). Выброс материала с поверхности электродов способствует увеличению пробивного напряжения $U_{пр}$. С другой стороны, появляются микро- и макронеровности на поверхности электродов, которые уменьшают пробивное напряжение. Так как в результате этих процессов величина пробивного напряжения $U_{пр}$ не возрастает, то можно предположить, что изменение $\Delta u_{ст}$ в первую очередь определяется появлением выступов на поверхности электродов или загрязнением электродной системы и поверхности изоляции под действием продуктов разложения. Измерение параметров шероховатости поверхности электродов проводилось по методике [7] с помощью профилометра–профилографа «Taliserf–10», имеющего погрешность измерения 3%, радиус щупа $2 \cdot 10^{-6}$ м. Результаты измерений параметров шероховатости поверхности электродов, показывающие высоту неровностей профиля по десяти точкам R_z, наибольшую высоту неровностей профиля R_{max}, опорную длину профиля $t_в$, плотность выступов $D_в$ и впадин $D_{вп}$, значение максимальной высоты местных неровностей профиля h для третьего канала разрядника (см. табл. 1) приводятся в табл. 2.

Таблица 2

Параметры шероховатости поверхности электродов после 1000 разрядов

Характеристика состояния электродов	**Значение параметров шероховатости поверхности электродов**					
	R_z, **см·10^{-4}**	R_{max}, **см·10^{-4}**	$t_в$, **см·10^{-4}**	$D_в$, **на 0,1 см**	$D_{вп}$, **на 0,1 см**	h, **см·10^{-4}**
Исходное состояние электродов 3 и 7	2,6	4,2	0	6	5,5	6
Электрод высокого напряжения 3, после 1000 разрядов	41,7	73,8	60	9	6	130
Электрод, подключенный к нагрузке 7, после 1000 разрядов	34,8	54,6	60	9,5	7,5	100

Рельеф поверхности представляет собой чередование выступов и впадин относительной средней линии. Из табл. 2. следует, что после 1000 разрядов R_z и R_{max} возрастают в 10–15 раз, для электрода 3 значение максимальной высоты выступа $h = 130 \cdot 10^{-4}$ см, для электрода 7 значение максимальной высоты выступа $h = 100 \cdot 10^{-4}$ см. Опорная длина профиля (т.е. ширина выступа) $t_в$ одинакова для электрода высокого напряжения и электрода, подключенного к нагрузке не превышает $60 \cdot 10^{-4}$ см.

Таким образом, после 1000 разрядов на поверхности электродов образуются микровыступы, которые можно представить в форме вытянутых полуэллипсоидов вращения высотой $130 \cdot 10^{-4}$ см и опорной длиной $60 \cdot 10^{-4}$ см.

Образовавшиеся на поверхности электродов микровыступы создают поле, которое может оказывать влияние на статическое пробивное напряжение $U_{пр}$ разрядника. Величина напряженности электрического поля E вблизи микровыступа определялась как решение задачи об электрическом поле эллипсоида вращения, помещенного в равномерное поле с напряженностью $E_{ср}$. Выражение для определения величины E получено на основании формулы

для распределения потенциала [9]. При отношении большой и малой полуосей эллипсоида вращения $h / t_в > 1$ выражение для E поля на вершине микровыступа, окруженного четырьмя аналогичными микровыступами, может быть представлено в следующем виде:

$$E = E_{ср}\left\{\frac{\Delta_1}{\Delta}\left(\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{1+\eta}-\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{\eta-1}+\frac{1}{\eta^2}\right)\cdot\frac{h}{a}+\frac{\Delta_2}{\Delta}\left(\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{\eta_1+1}-\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{\eta_1-1}+\frac{1}{\eta_1^2}\right)\cdot\frac{h^2}{a_1^2\eta_1}+\right.$$
$$+\frac{\Delta_3}{\Delta}\left(\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{\eta_2+1}-\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{\eta_2-1}+\frac{1}{\eta_2^2}\right)\cdot\frac{h^2}{a_2^2\eta_2}+\frac{\Delta_4}{\Delta}\left(\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{\eta_3+1}-\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{\eta_3-1}+\frac{1}{\eta_3^2}\right)\cdot\frac{h^2}{a_3^2\eta_3}+ \quad (3)$$
$$\left.+\frac{\Delta_5}{\Delta}\left(\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{\eta_4+1}-\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{\eta_4-1}+\frac{1}{\eta_4^2}\right)\cdot\frac{h^2}{a_4^2\eta_4}\right\},$$

где $E_{ср}$ – средняя напряженность поля в промежутке; $\eta_i = \frac{r_i}{a_i}$ – обобщенная координата; $a_i = \sqrt{h_i^2 - t_в^2}$; r_i – расстояние от вершины выступа до центров рядом расположенных выступов; $\Delta, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5$ – матрицы определителей пяти линейных уравнений.

Для этого случая фактор усиления поля $M_п$ на вершине микровыступа, окруженного четырьмя аналогичными микровыступами, т.е. отношение напряженности электрического поля E на вершине эллипсоида к средней напряженности поля в промежутке $E_{ср}$, рассчитанный по формуле (3), равен $M_п = 5{,}3$.

Условие самостоятельности разряда с учетом процессов ударной ионизации в поле микровыступа, имеющего форму вытянутого полуэллипсоидов вращения с параметрами h и $M_п$, согласно [1], запишется в виде

$$dm_1\left(\frac{E}{p}-C\right)^2+\frac{hA}{2Bn}\cdot\frac{E}{p}\exp\left(-\frac{Bp}{MnE}\right)=\frac{K}{p}, \quad (4)$$

где $p = 3\cdot10^5$ Па – давление газа; $m_1 = 0{,}2\cdot10^5$ Па·см/кВ; $C = 24\cdot10^5$ кВ/см·Па; $A = 0{,}12$ 1/см·Па; $B = 340\cdot10^{-5}$ кВ/см·Па; $K = 37{,}22$ – коэффициент аппроксимации для воздуха; $n = \ln\frac{h}{2t_в} - 1 = -0{,}92$ – постоянная, зависящая от параметров микровыступа h и $t_в$.

Решение уравнения (4) графическим методом относительно E позволяет найти степень и характер влияния состояния поверхности электродов РИП на пробивное напряжение $U_{пр}$ зазора. Результаты проведенных численных расчетов показали, что при $h = 130\cdot10^{-4}$ см и $M_п = 5{,}3$ пробивное напряжение не изменяется и равно $U_{пр} = 30$ кВ после 1000 разрядов. Анализ показывает, что для уменьшения $U_{пр}$ более чем на 10% изменение рельефа поверхности должно быть таким, чтобы выполнялось условие $M_п \geq 10$.

Таким образом, микровыступы на поверхности электродов с $h = 130\cdot10^{-4}$ см и $M_п = 5{,}3$ не оказывают влияния на пробивное напряжение $U_{пр}$ разрядника. Изменение величины $\Delta u_{ст}$ обусловлено, следовательно, загрязнением электродной

системы и поверхности изоляции под действием продуктов разложения. Этот вывод следует из проверки, которая проводилась следующим образом.

После 1000 разрядов разрядник вскрывался, внутренние детали промывались, поверхность главных и управляющих электродов тщательно очищалась. После этого проводилось 25 контрольных испытаний, результаты которых сравнивались с исходными данными, полученными в начале ресурсных испытаний. Так как пробивное напряжение $U_{\text{пр}}$ практически восстанавливается до исходного, естественно предположить, что изменение значения $U_{\text{пр}}$ в процессе испытаний обусловлено воздействием продуктов разложения диэлектрика и паров металла на электродную систему и поверхность изолятора.

Кроме того, после 1000 разрядов был проведен рентгеноструктурный анализ главных электродов РИП, который основывался на методе отношения интенсивностей аналитических линий [10]. В качестве анализируемой фазы была выбрана медь. С помощью фотометрирования рентгенограмм определялось среднее значение концентрации меди в электродах разрядника. Зависимость концентрации меди от глубины исследуемого слоя главных электродов приведена на рис. 2.

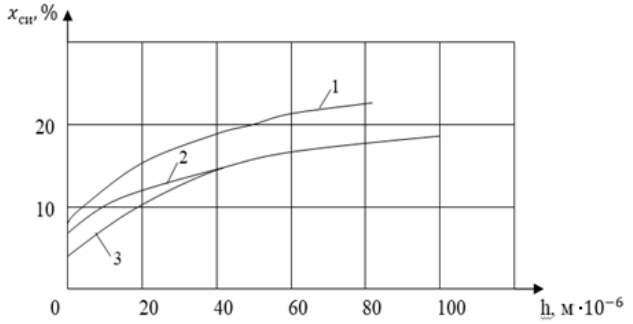


Рис. 2. Зависимость концентрации меди
от глубины исследуемого слоя главных электродов:
1 – исходные электроды; 2 – электрод, подключенный к нагрузке 7;
3 – электрод высокого напряжения 3

Из рисунка видно, что концентрация меди в поверхностных слоях главных электродов после 1000 разрядов ниже, чем в исходных электродах. Для композиции ВНМ до проведения ресурсных испытаний концентрации меди x_{Cu} в поверхностных слоях составляла 9% (кривая 1), а после испытаний концентрация меди в электроде 3 стала равной 4% (кривая 3), а в электроде 7 – 7% (кривая 2). Различие между кривыми 2 и 3 имеет место до глубины $50 \cdot 10^{-4}$ см, при больших глубинах зависимости совпадают. Следовательно, при разрядах медь с поверхности электродов испаряется, а структура вольфрамового каркаса остается практически неизменной.

Таким образом, по результатам проведенных испытаний установлено, что ресурс безотказной работы разрядника составляет более 1000 разрядов. В РИП с индуктивным делителем тока при выполнении условия $L_{\text{к}} / L_{\text{цр}} \geq 5 \cdot 10^{-2}$ обеспечивается равенство эрозированной массы электродов, что свидетельствует о рав-

номерном (в среднем) распределении тока по каналам и сохранении в допустимых пределах основных характеристик коммутатора.

Незначительное уменьшение статического пробивного напряжения разрядника с электродами из металлокерамики ВНМ при величине протекающего заряда $Q \leq 5100$ Кл обусловлено загрязнением электродной системы вследствие абляции и металлизации изолятора. Внутренние изоляционные детали из фторопласта изнашиваются достаточно сильно – после 1000 разрядов на них наблюдались отколы и незначительные локальные разрушения.

Основные результаты проведенных ресурсных испытаний РИП могут быть сформулированы следующим образом:

– в многоканальном РИП с использованием ИДТ при выполнении условия $L_к / L_{цр} \geq 5 \cdot 10^{-2}$ обеспечивается равенство эрозированной массы электродов, что свидетельствует о равномерном распределении тока по каналам;

– формирование многоканального разряда в РИП с электродами из ВНМ позволяет получить незначительный равномерный износ электродов, обеспечивающий стабильность пробивных напряжений разрядных промежутков;

– образующиеся микровыступы на поверхности главных электродов РИП практически не оказывают влияние на $U_{пр}$ промежутков;

– уменьшение $U_{пр}$ РИП с электродами из металлокерамики ВНМ при значении протекающего заряда $Q \leq 5100$ Кл обусловлено загрязнением электродной системы вследствие абляции и металлизации изолятора.

Литература

1. *Авруцкий В.А., Гончаренко Г.М., Прохоров Е.Н.* Влияние шероховатости электродов на электрическую прочность газов // Журн. техн. физики. 1978. Т. 43, вып. 3. С. 615–619.

2. А.с. СССР № 983852 МКНЗ HOIT3/00 HOIT5/00. Многоканальный искровой разрядник / Ашмарин В.В., Блохинцев А.А., Калихман С.А. Опубл. 23.12.82. Бюл. № 47. 2 с.

3. *Ашмарин В.В.* Коммутаторы емкостного накопителя энергии для электродинамического ускорителя массы: автореф. дис. … канд. техн. наук. М., 1994. 19 с.

4. *Ашмарин В.В., Блохинцев А.А.* Разработка и исследование шунтирующего разрядника для мощных емкостных накопителей энергии, работающих на малоиндуктивные электродинамические устройства // Вестник Чувашского университета. 2018. № 1. С. 14–23.

5. *Ашмарин В.В., Калихман С.А.* Динамика системы параллельных импульсных дуг с индуктивным делителем тока // Электротехника. 1981. № 9. С. 17–18.

6. *Крастелев Е.Г., Калинин Ю.Г., Черненко А.С.* Усовершенствованный разрядник для генераторов импульсного напряжения установки «Стенд-300» // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 2. С. 35–42.

7. Методика выполнения измерений параметров шероховатости поверхности по ГОСТ 2789–73 при помощи приборов профильного метода МИ / 41–75. М.: Изд-во стандартов, 1975.

8. *Наймарк Г.В.* Разработка управляемых многозазорных разрядников для импульсных установок высокого напряжения: дис. … канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1982. 207 с.

9. *Смайт В.* Электростатика и электродинамика. М.: Изд-во иностр. лит., 1954. 604 с.

10. *Суворов Э.В.* Материаловедение: методы исследования структуры и состава материалов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2019. 180 с.

11. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов / *Г.В. Буткевич, Г.С. Белкин и др*. М.: Энергия, 1978. 250 с.

12. *Lee Li, Cai Li, Yu Feng, Nan Jing, Zhou Zheng-Yang, Lin Fu-Chang.* Analysis of electrical contact temperature rise in spark gap switches with graphite electrodes. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, vol. 18, iss. 4, pp. 1144–1148.

АШМАРИН ВАСИЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ashmarin1953@yandex.ru).

БЛОХИНЦЕВ АНАТОЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (blokhintsev46@mail.ru).

V. ASHMARIN, A. BLOKHINTSEV

LIFE TESTING AND EROSION CHARACTERISTICS OF THE DISCHARGER WITH FIELD DISTORTION

Key words: *arrester with field distortion, inductive current divider, erosion of electrodes, distortion of the surface topography, cermet, surface roughness of electrodes, enhancement factor of the field, x-ray analysis.*

When developing experimental stands for the study of fast-flowing electrophysical processes of the force action of strong pulsed magnetic fields on conductive materials (electromagnetic mass accelerators), capacitive multi-module energy storage devices were widely used. Each module is switched to the load by its own switch. As shown by theoretical and experimental studies, to expand the range of operation of the drive, to ensure stability of the formation of multi-channel discharge and to provide a shunt load mode, the developed and studied multi-channel dischargers with field distortion are the most promising.

When pilot stands operate, according to the experimental conditions, pulse currents with an amplitude value of more than 106 A flow via a low-inductance load. In this case, currents exceeding 100 kA flow through each channel of multi-channel commutation system, which imposes higher requirements on erosion resistance of the arrester electrodes.

It was found that along with the loss of the electrode mass due to erosion, there is a change in the topography of its surface, this can lead to a change in the breakdown stresses. This directly affects the stability of the bit characteristics and synchronous operation of all storage modules. Therefore, an urgent task is to conduct resource tests of the spark gap with field distortion and study its erosion characteristics to select the most optimal in terms of erosion resistance of the electrode material.

Based on the analysis of the results of resource tests and studies of the erosion characteristics of the spark gap electrodes, it was found that the decrease in the static breakdown voltage of the spark gap during its long-term operation is not associated with the mechanism of shock ionization in the field of micro-steps on the top of the electrodes, but is due to the predominant deposition of erosion products on the internal insulation surfaces.

Analytical expressions are proposed for calculating the value of the electric field strength E near micro-steps, the field amplification factor M_p, and the condition of discharge independence, taking into account the processes of shock ionization in the micro-protrusion field. The paper provides the data on the quantitative change in mass of the material of the electrode, defines the shape and dimensions of asperities on the electrode surface, consideres the condition of uniformity of the current distribution through channels of four-channel discharger, and analyses the impact of these factors on the dielectric strength of the arrester in service.

It was found that the formation of a multi-channel discharge in a spark gap with a field distortion with electrodes made of metal alloy «tungsten–nickel–copper» allows for a small uniform wear of the electrodes and provides stability of the switching response characteristics. The results of the conducted theoretical and experimental studies make it possible to make a reasonable choice of the main design elements of the spark gap according to the recommendations proposed in the article.

References

1. Avrutskii V.A., Goncharenko G.M., Prokhorov E.N. *Vliyanie sherokhovatosti elektrodov na elektricheskuyu prochnost' gazov* [Effect of electrode roughness on the electrical strength of gases]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1978, vol. 43, iss. 3, pp. 615–619.

2. Ashmarin V.V., Blokhintsev A.A., Kalikhman S.A. *Mnogokanal'nyi iskrovoi razryadnik* [Multi-channel spark gap]. Patent SSSR, no 983852, 1982.

3. Ashmarin V.V. *Kommutatory emkostnogo nakopitelya energii dlya elektrodinamicheskogo uskoritelya massy: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Capacitive energy storage switches for an electrodynamic mass accelerator. Abstract of Cand. Diss.]. Moscow, 1994. 19 p.

4. Ashmarin V.V., Blokhintsev A.A. *Razrabotka i issledovanie shuntiruyushchego razryadnika dlya moshchnykh emkostnykh nakopitelei energii, rabotayushchikh na maloinduktivnye elektrodinamicheskie ustroistva* [Development and research of a shunt arrester for high-power capacitive energy storage devices operating on low-inductive electrodynamic devices]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2018, no. 1, pp. 14–23.

5. Ashmarin V.V., Kalikhman S.A. *Dinamika sistemy parallel'nykh impul'snykh dug s induktivnym delitelem toka* [Dynamics of a system of parallel pulse arcs with an inductive current divider]. *Elektrotekhnika*, 1981, no. 9, pp. 17–18.

6. Krastelev E.G., Kalinin Yu.G., Chernenko A.S. *Usovershenstvovannyi razryadnik dlya generatorov impul'snogo napryazheniya ustanovki «Stend-300»* [Improved spark gap for pulse voltage generators of the "Stand-300" installation»]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2014, no. 2, pp. 35–42.

7. *Metodika vypolneniya izmerenii parametrov sherokhovatosti poverkhnosti po GOST 2789–73 pri pomoshchi priborov profil'nogo metoda MI/41–75* [Method for performing measurements of surface roughness parameters in accordance with GOST 2789-73 using devices of the MI /41-75 profile method]. Moscow, 1975.

8. Naimark G.V. *Razrabotka upravlyaemykh mnogozazornykh razryadnikov dlya impul'snykh ustanovok vysokogo napryazheniya: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of controlled multi-phase arresters for high-voltage pulse installations. Cand. Diss.]. Moscow, 1982. 207 p.

9. Smait V. *Elektrostatika i elektrodinamika* [Electrostatics and electrodynamics]. Moscow, 1954, 604 p.

10. Suvorov E.V. *Materialovedenie: metody issledovaniya struktury i sostava materialov. 2-e izd., pererab. i dop.* [Materials science: methods for studying the structure and composition of materials: a textbook for academic undergraduate courses. 2nd ed.]. Moscow, Yurait Publ., 2019, 180 p.

11. Butkevich G.V., Belkin G.S. et al. *Elektricheskaya eroziya sil'notochnykh kontaktov i elektrodov* [Electrical erosion of high-current contacts and electrodes]. Moscow, Energiya Publ., 1978, 250 p.

12. Lee Li, Cai Li, Yu Feng, Nan Jing, Zhou Zheng-Yang, Lin Fu-Chang. *Analysis of electrical contact temperature rise in spark gap switches with graphite electrodes*. [Analysis of electrical contact temperature rise in spark gap switches with graphite electrodes] IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, vol. 18, iss. 4, pp. 1144–1148.

ASHMARIN VASILIY – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Life Safety and Environmental Engineering Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (ashmarin1953@yandex.ru).

BLOKHINTSEV ANATOLIY – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of Life Safety and Environmental Engineering Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (blokhintsev46@mail.ru).

Формат цитирования: *Ашмарин В.В., Блохинцев А.А.* Ресурсные испытания и эрозионные характеристики разрядника с искажением поля // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 47–56.

УДК 621.31; 004.94
ББК 32.859

К.В. БЫКОВ, Н.М. ЛАЗАРЕВА, В.М. ЯРОВ

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРА НА РАБОТУ ИНВЕРТОРА

Ключевые слова: *инвертор с синусоидальным выходным напряжением; модели трансформатора в Simulink Matlab; кривая намагничивания; остаточное потокосцепление.*

В статье дается оценка влияния параметров ветви намагничивания трансформатора на режим пуска инвертора. Исследование реализуется имитационным моделированием в Simulink Matlab. Симуляция проводится с использованием различных SPS-моделей трансформатора. Показано, что характер режима пуска инвертора зависит от того, какая именно модель трансформатора используется. При включении инвертора с линейной моделью броски тока намагничивания отсутствуют. Учет нелинейного характера характеристики намагничивания приводит к появлению бросков тока намагничивания, которые вызывают броски первичного тока трансформатора и, как следствие, броски токов силовых ключей, которые могут привести к выходу их из строя. Сделан вывод о том, что значение бросков тока трансформатора в переходном режиме определяется видом характеристики намагничивания. Показано, что амплитуда выброса тока зависит от значения остаточной индукции. При одном и том же значении остаточной индукции броски тока намагничивания зависят от угла включения синусоидального модулирующего напряжения. При «неудачном» включении амплитуда первичного тока может превышать установившееся значение в несколько десятков раз. Показано, что снижение пусковых токов можно достигнуть плавным изменением угла включения модулирующего синусоидального напряжения.

На каждой электростанции и практически на каждой подстанции имеется система оперативного постоянного тока, которая предназначена для питания различных систем и устройств, обеспечивающих функционирование энергообъекта. В аварийном режиме, например при пропадании напряжения в сети переменного тока, питание нагрузки обеспечивает аккумуляторная батарея. Для потребителей переменного тока используется инвертор, преобразующий напряжение аккумуляторной батареи в переменное напряжение частотой 50 Гц. В связи с этим представляется актуальной задача определения условий безударного включения инвертора.

В установившемся режиме работы инвертора параметры преобразователя принято считать неизменными. В переходных режимах при пуске инвертора или релейном алгоритме управления возможны аварийные режимы, вызываемые бросками первичного тока трансформатора, обусловленными нелинейным характером зависимости индукции от напряженности магнитного поля в сердечнике трансформатора. Несимметричные режимы работы силового трансформатора в транзисторных преобразователях исследованы в работах [1–3], однако не освещены вопросы пуска в работу с учетом нелинейности параметров трансформатора.

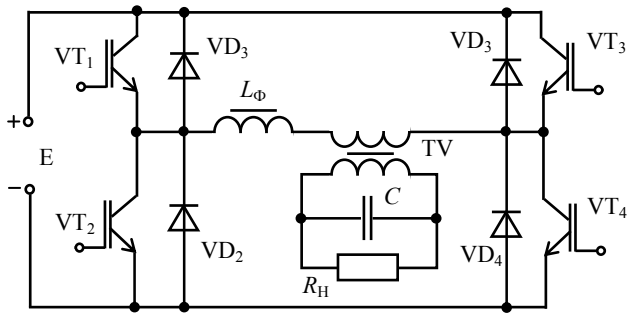


Рис. 1. Инвертор с синусоидальным выходным напряжением

В состав инвертора с синусоидальным выходным напряжением (рис. 1) входит силовой каскад на транзисторах VT_1, …, VT_4 и диодах VD_1, …, VD_4, выходной трансформатор *TV* и *LC*-фильтр.

Сигнал управления транзисторами представляет собой прямоугольные импульсы частотой 10 кГц, длительность которых изменяется по синусоидальному закону (синусоидальная ШИМ). На одном полупериоде частоты 50 Гц включены транзисторы VT_1, VT_4, а на другом – транзисторы VT_2, VT_3. В результате сердечник трансформатора перемагничивается по частным циклам.

В установившемся режиме работы инвертора параметры трансформатора принято считать неизменными. В переходных режимах необходимо учитывать нелинейный характер зависимости индукции от напряженности $B=f(H)$ магнитного поля.

В модели трансформатора (рис. 2) сопротивление цепи намагничивания R_μ учитывает активные потери в сердечнике, а нелинейная индуктивность L_μ – насыщение сердечника трансформатора.

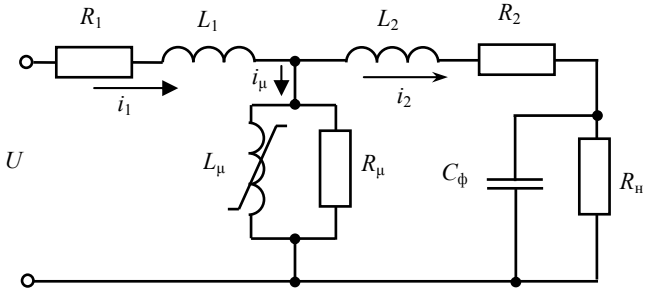


Рис. 2. Схема замещения нелинейного трансформатора
с нагрузкой во вторичной цепи

Сложность расчета процессов в трансформаторе обусловливается нелинейностью зависимости его основных параметров друг от друга. Известны различные способы аппроксимации реальных зависимостей достаточно простыми приближенными функциями. Например в [4] зависимость индукции от тока

намагничивания предлагается представлять полиномом девятой степени $B = KI_{\mu}^{9}$, а в [5] и [6] – использовать кусочно-линейную аппроксимацию.

Для определенности рассмотрим однофазный трансформатор напряжения ОСП-5,0/0,7. На рис. 3 пунктирной линией показана кривая намагничивания для стали 3413, из которой выполнен сердечник трансформатора, а сплошной ломаной – ее кусочно-линейная аппроксимация.

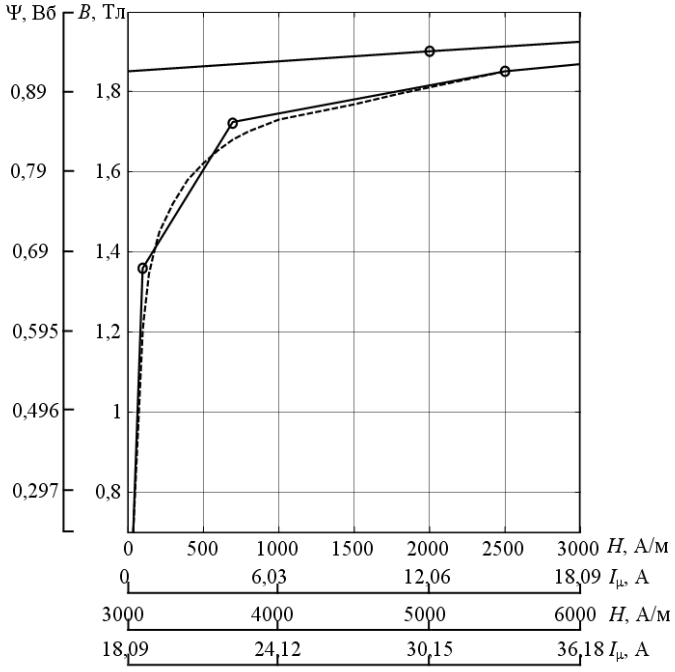


Рис. 3. Кривая намагничивания и ее кусочно-линейная модель

Преобразуем зависимость $B = f(H)$, заданную в справочнике, в зависимость потокосцепления – полного магнитного потока, пронизывающего витки обмотки – от тока намагничивания $\psi = f(I_{\mu})$, используя соотношения $\psi = BSw_1$ и $I\mu = H\, l_{ср} / w_1$. Для рассматриваемого трансформатора ОСП-5,0/0,7 сечение сердечника $S = 76{,}8 \cdot 10^{-4}$ м^2, количество витков первичной обмотки трансформатора $w_1 = 64$, средняя длина магнитной линии $l_{ср} = 0{,}389$ м.

Процессы в инверторе описываются математической моделью в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Для получения решения – расчета токов и напряжений – можно использовать имитационное моделирование в Simulink Matlab [6]. Simulink-модель силовой части инвертора приведена на рис. 4.

Чтобы оценить влияние параметров ветви намагничивания трансформатора на режим работы инвертора, выполним симуляцию, используя различные модели трансформатора.

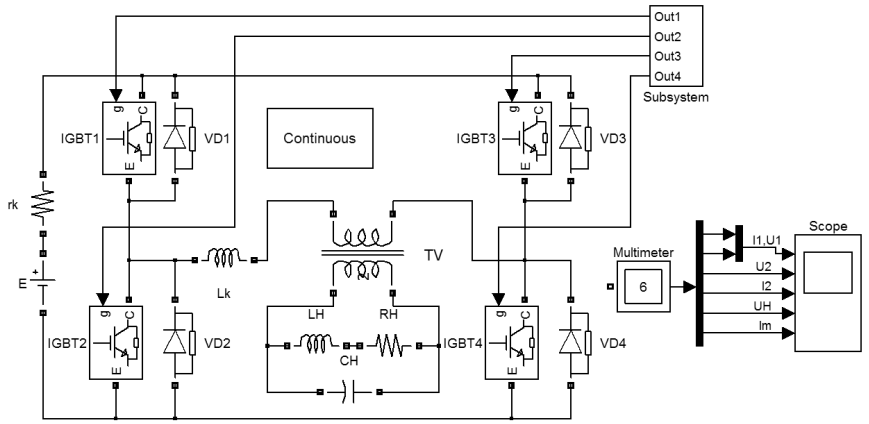


Рис. 4. Simulink-модель силовой части инвертора

В первом варианте используется линейная модель трансформатора – блок Linear Transformer из библиотеки SimPowerSystems Simulink. Параметры настройки блока показаны на рис. 5, а на рис. 6 представлены временные диаграммы работы инвертора. На осциллограммах отсутствуют броски тока намагничивания (самое большое значение тока 3,8 А), но так как индуктивность L_μ имеет большое значение, ток намагничивания не достигает установившегося значения за 5 периодов промышленной частоты.

Для моделирования трансформатора можно использовать и нелинейную модель – блок Saturable Transformer библиотеки SimPowerSystems Simulink. В данной модели учитывается нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника, которая задается в виде кусочно-линейной зависимости между потокосцеплением и током намагничивания $\psi = f(i_\mu)$.

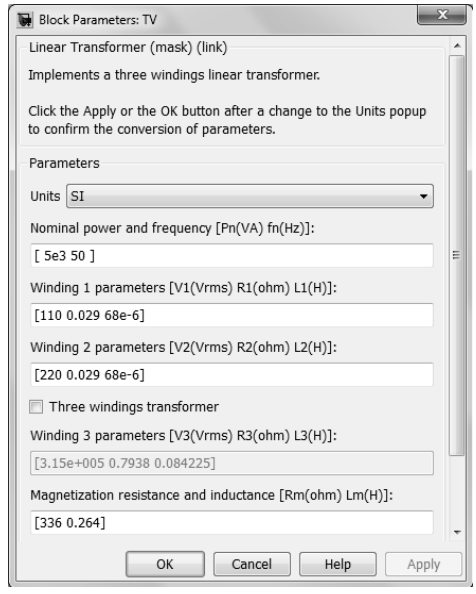


Рис. 5. Параметры настройки блока Linear Transformer

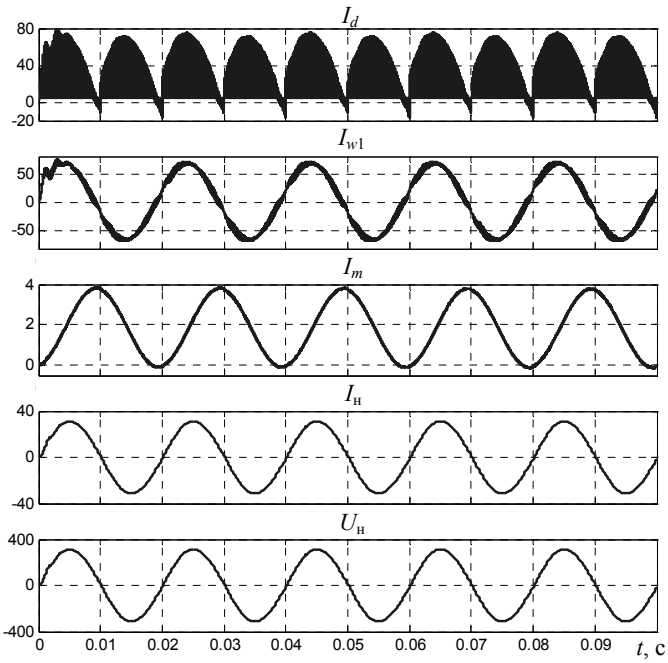


Рис. 6. Временные диаграммы работы инвертора с линейным трансформатором

При использовании блока Saturable Transformer, в свою очередь, допускаются варианты задания модели характеристики $\psi = f(I_\mu)$.

Во-первых, можно использовать нелинейную модель трансформатора, кривая намагничивания которого без остаточного потокосцепления ψ_0 (рис. 7, *а*).

Параметры настройки блока Saturable Transformer показаны на рис. 8.

Временные диаграммы работы инвертора с нелинейным трансформатором, имеющим характеристику намагничивания без остаточного потокосцепления, приведенные на рис. 9, демонстрируют увеличение амплитуды тока намагничивания до значения 44,3 А. Кроме того, сравнивая осциллограммы, представленные на рис. 6 и рис. 9, можно сделать вывод о том, что в случае использования нелинейного трансформатора переходный процесс затягивается: амплитуда тока намагничивания постепенно уменьшается, но к моменту $t = 0{,}1$ с установившийся режим работы инвертора не наступает.

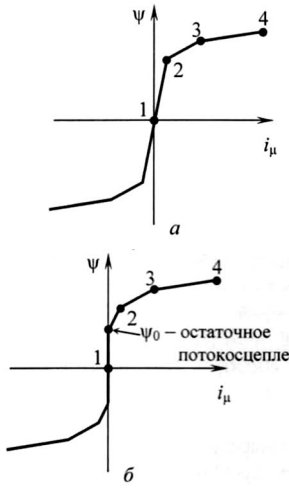


Рис. 7. Задание нелинейной характеристики намагничивания:
а – без остаточного потокосцепления;
б – с остаточным потокосцеплением ψ_0

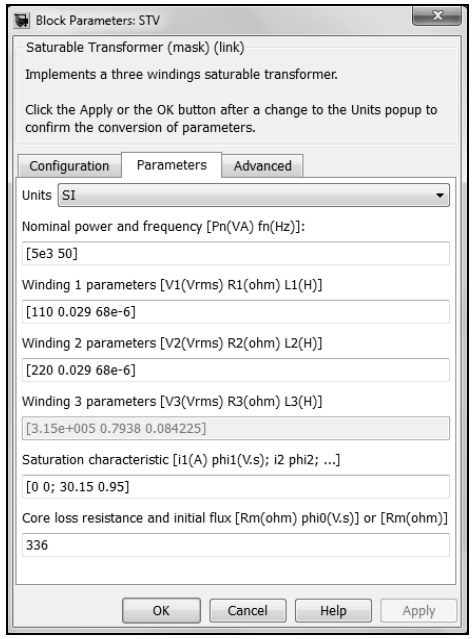


Рис. 8. Параметры настройки блока Saturable Transformer
с кривой намагничивания без остаточного потокосцепления

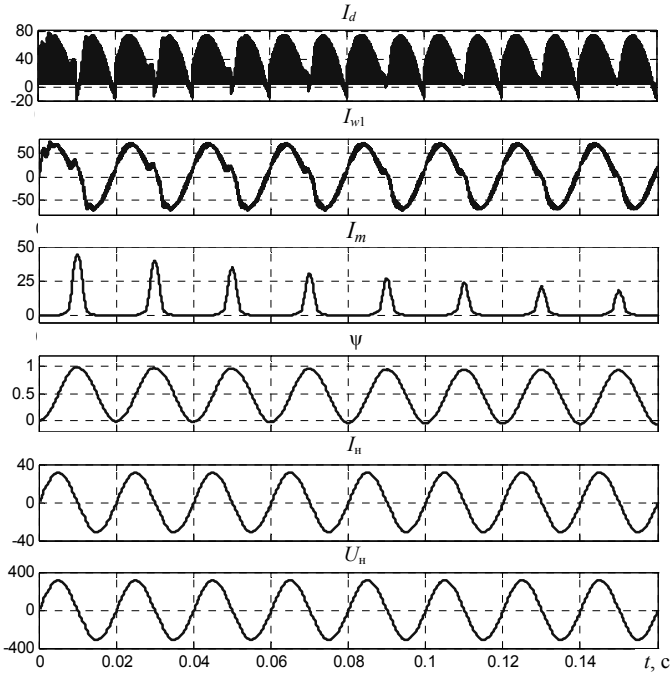


Рис. 9. Временные диаграммы работы инвертора
с нелинейным трансформатором с кривой намагничивания
без остаточного потокосцепления

Во-вторых, возможно использование нелинейной модели трансформатора, кривая намагничивания которого имеет остаточное потокосцепление ψ_0 (рис. 7, *б*).

Временные диаграммы работы инвертора с нелинейным трансформатором, характеристика намагничивания которого с остаточным потокосцеплением $\psi_0 = 0{,}4$ Вб, приведены на рис. 10. Наблюдаются броски тока намагничивания и первичного тока трансформатора, равные 215,4 и 207,6 А соответственно. Даже к моменту времени $t = 0{,}2$ с амплитуда тока намагничивания более 50 А. Для оценки влияния значения остаточного потокосцепления на качество переходного процесса при включении инвертора было выполнено моделирование пуска с вдвое меньшим значением ψ_0.

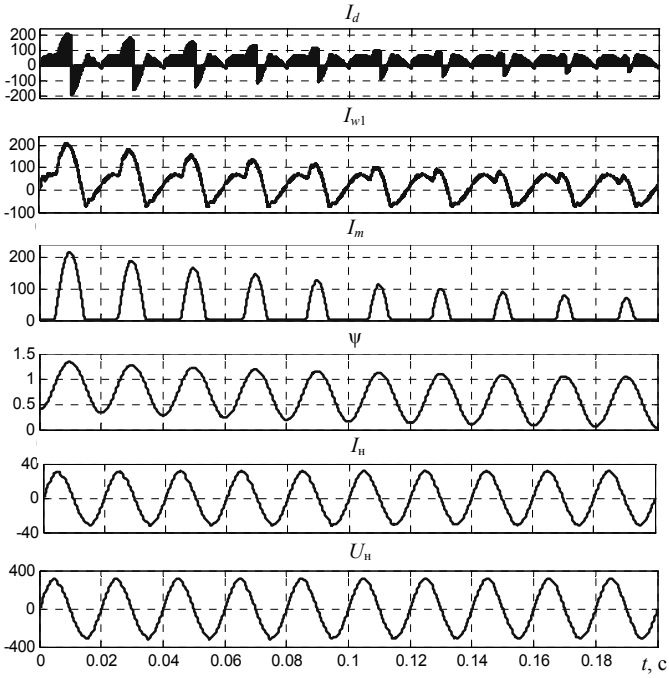


Рис. 10. Временные диаграммы работы инвертора с нелинейным трансформатором, кривая намагничивания которого с остаточным потокосцеплением $\psi_0 = 0{,}4$ Вб

На рис. 11 представлены временные диаграммы работы инвертора с нелинейным трансформатором, кривая намагничивания которого с остаточным потокосцеплением $\psi_0 = 0{,}2$ Вб. В результате броски тока намагничивания и первичного тока в процессе пуска преобразователя уменьшились почти в два раза. В реальном трансформаторе снизить значение остаточного потокосцепления можно введением немагнитного зазора в магнитопроводе.

При одной и той же характеристике намагничивания значения бросков тока намагничивания и первичного тока трансформатора в значительной степени зависят от значения угла включения синусоидального модулирующего

напряжения. На рис. 12 и рис. 13 приведены зависимости амплитуды первичного тока и тока намагничивания от значения угла включения α синусоидального модулирующего напряжения для трех рассмотренных моделей трансформатора.

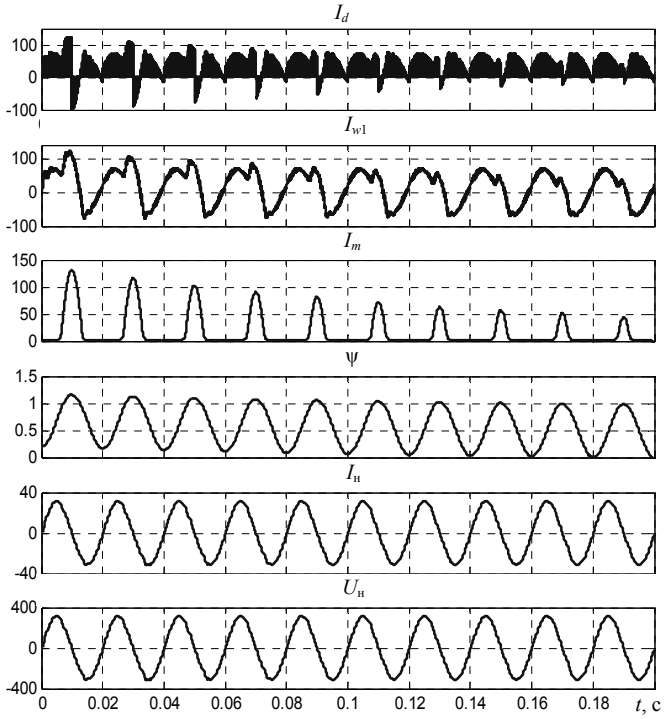


Рис. 11. Временные диаграммы работы инвертора с нелинейным трансформатором, кривая намагничивания которого с остаточным потокосцеплением $\psi_0 = 0{,}2$ Вб

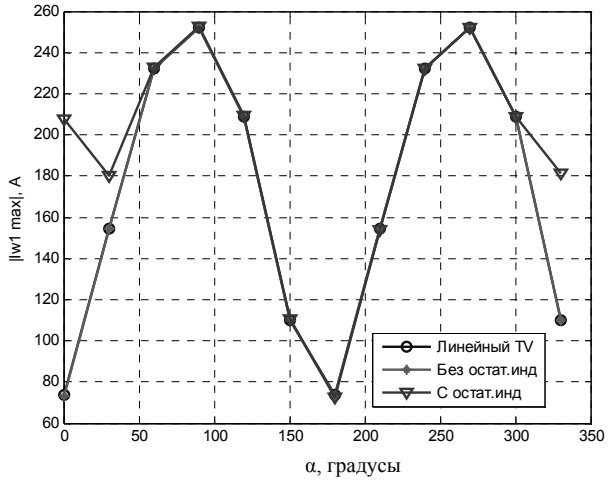


Рис. 12. Зависимость амплитуды тока первичной обмотки трансформатора от угла включения модулирующего напряжения

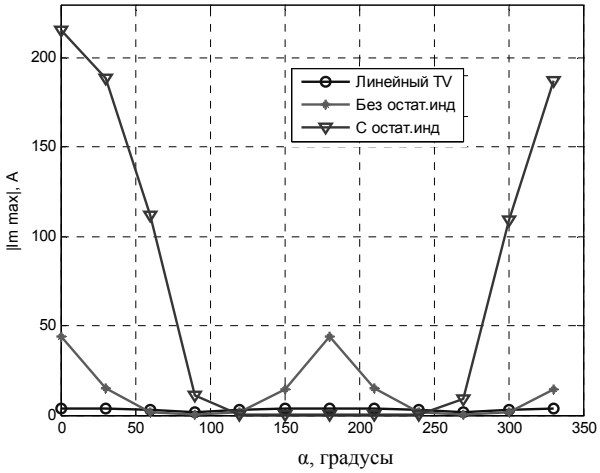


Рис. 13. Зависимость амплитуды тока намагничивания трансформатора от угла включения модулирующего напряжения

Выводы. 1. Характер режима пуска инвертора зависит от того, какая именно характеристика намагничивания трансформатора задается.

2. Вид характеристик намагничивания $B = f(H)$ сердечника нелинейного трансформатора определяет значение бросков токов трансформатора в переходном режиме.

3. Уменьшение остаточного потокосцепления путем введения немагнитного зазора в сердечнике трансформатора позволяет снизить броски токов трансформатора в переходном режиме работы инвертора.

Литература

1. *Андреев В.В.* Несимметричный режим работы силового трансформатора в транзисторном преобразователе // Электронная техника в автоматике: сб. М.: Сов. радио, 1971. Вып. 2. С. 124–131.

2. *Головацкий В.А., Конев Ю.И., Юрченко А.И.* Анализ несимметричных режимов силовых трансформаторов транзисторных преобразователей // Электронная техника в автоматике: сб. М.: Сов. радио, 1981. Вып. 12. С. 64–70.

3. *Головацкий В.А., Юрченко А.И.* Применение магнитного пояса в транзисторных преобразователях // Электронная техника в автоматике: сб. М.: Сов. радио, 1981. Вып. 12. С. 71–76.

4. *Важнов А.Н.* Электрические машины. Л.: Энергия, 1969. 360 с.

5. *Ицхоки Я.С.* Импульсные трансформаторы. М.: Сов. радио, 1950. 745 с.

6. *Лазарева Н.М., Яров В.М.* Компьютерное моделирование резонансных инверторов. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. 498 с.

БЫКОВ КОНСТАНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ – заместитель директора департамента низковольтных комплектных устройств и комплектных распределительных устройств по НИОКР, ООО НПП «ЭКРА», Россия, Чебоксары (bykov_kv@ekra.ru).

ЛАЗАРЕВА НАДЕЖДА МИХАЙЛОВНА – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (lana21lana21@mail.ru).

ЯРОВ ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (vicjar@mail.ru).

K. BYKOV, N. LAZAREVA, V. YAROV

INFLUENCE OF TRANSFORMER CHARACTERISTICS ON INVERTER PERFORMACE

Key words: *inverter with sinusoidal output voltage; transformer models in Simulink Matlab; magnetization curve; residual flux linkage.*

The article assesses the influence of the parameters of the magnetization branch of the transformer on the inverter start-up mode. The study is implemented by simulation in Simulink Matlab. Simulation is carried out using various SPS-models of the transformer. It is shown that the nature of the inverter start-up mode depends on which model of the transformer is used. When an inverter with a linear model is switched on, there are no magnetizing current surges. Taking into account the nonlinear nature of the magnetization characteristic leads to the appearance of magnetization current surges, which cause transformer primary current surges and, as a result, surges in power switch currents, which can lead to their failure. It is concluded that the value of the inrush current of the transformer in transition mode is determined by the type of magnetization characteristic. It is shown that the amplitude of the current surge depends on the value of the residual induction. For the same value of the residual induction, the inrush currents of the magnetization depend on the angle of inclusion of the sinusoidal modulating voltage. In case of «unsuccessful» switching on, the amplitude of the primary current can exceed several times the steady-state value. It is shown that a decrease in inrush currents can be achieved by smoothly changing the angle of inclusion of the modulating sinusoidal voltage.

References

1. Andreev V.V. *Nesimmetrichnyi rezhim raboty silovogo transformatora v tranzistornom preobrazovatele* [Asymmetrical mode of power transformer in a transistor converter]. In: *Elektronnaya tekhnika v avtomatike: sb.* [Electronic technology in automation. A collection of works]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1971, iss. 2, pp. 124–131.

2. Golovatskii V.A., Konev Yu.I., Yurchenko A.I. *Analiz nesimmetrichnykh rezhimov silovykh transformatorov tranzistornykh preobrazovatelei* [Analysis of asymmetric modes of power transformers transistor converters]. In: *Elektronnaya tekhnika v avtomatike: sb.* [Electronic technology in automation. A collection of works]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1981, iss. 12, pp. 64–70.

3. Golovatskii V.A., Yurchenko A.I. *Primenenie magnitnogo poyasa v tranzistornykh preobrazovatelyakh* [The use of a magnetic belt in transistor converters]. In: *Elektronnaya tekhnika v avtomatike: sb*. [Electronic technology in automation. A collection of works]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1981, iss. 12, pp. 71–76.

4. Vazhnov A.N. *Elektricheskie mashiny* [Electric cars]. Leningrad, Energiya Publ., 1969, 360 p.

5. Itskhoki Ya.S. *Impul'snye transformatory* [Pulse transformers]. Moscow, Sovetskoe radio, 1950, 745 p.

6. Lazareva N.M., Yarov V.M. *Komp'yuternoe modelirovanie rezonansnykh invertorov* [Computer simulation of resonant inverters]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2011, 498 p.

BYKOV KONSTANTIN – Deputy Director, Department of Low Voltage Complete Devices and Complete Switchgears for R&D, EKRA Research and Production Enterprise Ltd, Russia, Cheboksary (bykov_kv@ekra.ru).

LAZAREVA NADEZHDA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Industrial Electronics, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (lana21lana21@mail.ru).

YAROV VIKTOR – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Industrial Electronics, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (vicjar@mail.ru).

Формат цитирования: *Быков К.В., Лазарева Н.М., Яров В.М.* Влияние характеристик трансформатора на работу инвертора // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 57–66.

УДК 621.31: 658.588.2:53.082.4: 004.032.26
ББК 32.873

А.В. БЫЧКОВ, П.Н. ФЕДОРОВА, Л.А. СЛАВУТСКИЙ

НЕЙРОАЛГОРИТМ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЧАСТОТЫ ВИБРАЦИЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ

Ключевые слова: *искусственная нейронная сеть, виброконтроль, ультразвуковые импульсы, электрооборудование.*

Предлагается использование аппарата искусственных нейронных сетей для обработки данных активного ультразвукового виброконтроля электрооборудования. Нейросетевой алгоритм применяется для оценки частоты низкочастотных вибраций при импульсном ультразвуковом зондировании вибрирующей поверхности. Обучение нейросети прямого распространения с обратным распространением ошибки осуществляется на данных численного моделирования задержки ультразвуковых импульсов, отраженных от вибрирующей поверхности. При этом используется выборка из 37 000 импульсов. Погрешность обучения нейросети при 100% распознавании связей не превышает одного процента. Обученная таким образом искусственная нейронная сеть применялась для обработки экспериментальных данных. Для повышения точности измерения временной задержки использовались цифровая фазовая модуляция ультразвуковых импульсов и их корреляционная обработка. Экспериментально показано, что при высоком качестве обучения нейросетевой модели обработка данных, полученных на лабораторной установке, позволяет оценить нестационарную частоту вибраций при низкой частоте импульсного ультразвукового зондирования – 3-4 импульса на период колебаний отражающей поверхности электрооборудования. Точность определения частоты вибраций в этих условиях составляет единицы процентов.

Введение. Аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС) является одной из основ искусственного интеллекта (ИИ) [30, 39, 40] и методов интеллектуального анализа данных (МИАД, data mining) [5, 14, 36, 44]. ИНС используется для широкого круга задач: в метеорологии [27], психологии [13, 41], медицинской диагностике [7] и анализе данных в химических лабораториях [1,8], цифровой технике [23, 28], в том числе для распознавания образов и обработки сигналов [25, 26, 32, 33]. Сложность нейросетевых алгоритмов и архитектуры используемой ИНС зависит от решаемых задач [4]. В настоящей работе приводится пример использование наиболее простой ИНС прямого распространения с обратным распространением ошибки [27, 42] для обработки данных активного дистанционного виброконтроля электрооборудования.

Вибрационный контроль [9, 11, 37] может осуществляться разными методами, которые можно классифицировать как контактные и дистанционные [6, 20], активные и пассивные [6, 15, 22]. Наиболее широко распространены контактные пьезоэлектрические датчики [15, 16, 19], однако для контроля вибраций на низких частотах контактными методами оказывается достаточно сложно обеспечить необходимую чувствительность, динамический диапазон и линейные характеристики, что требует создания специальных приборов сейсмического типа [17, 24].

Активный ультразвуковой (УЗ) виброконтроль (дистанционное зондирование вибрирующей поверхности), с одной стороны, позволяет измерить

вибрации в широком диапазоне частот [2, 10, 21], с другой – позволяет создавать адаптивные алгоритмы вибрационного контроля, поскольку дает возможность менять частоту и длительность зондирующих импульсов, угол отражения ультразвука и т.д.

Методика дистанционного контроля. Схема дистанционных измерений и моделирования УЗ системы контроля вибраций показана на рис. 1.

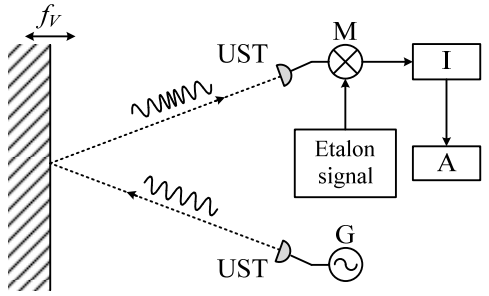


Рис. 1. Схема экспериментальных измерений и обработки сигналов

Отражение ультразвуковой волны в эксперименте происходит от вибрирующей с частотой f_V поверхности. Генератор (G – generator) формирует пакеты УЗ импульсов с частотой 40 кГц. Акустическая волна излучается УЗ преобразователем (UST – ultrasound transducer), распространяется до вибрирующей поверхности и, отражаясь от неё, принимается вторым УЗ преобразователем (приёмником). Электрический сигнал с выхода приёмного преобразователя подается на смеситель (M – mixer), на второй вход которого подается эталонный сигнал (etalon signal). Сигналы, излучаемые генератором и эталонный сигнал, являются фазомодулированными. Модуляция производится согласно коду Баркера 7-го порядка [18, 29, 34, 38]. В интеграторе (I – integrator) производится расчёт взаимной корреляционной функции (ВКФ) сигнала в приёмнике с эталонным сигналом. Цифровая фазовая модуляция позволяет значительно повысить эффективность корреляционного приема [31, 35, 43]. Спектральная обработка и нейросетевой анализ производится в блоке анализатора (A – analyzer). Цифровая система формирования и обработки сигналов частично реализована на программируемой логической интегральной схеме (FPGA – field-programmable gate array). Соответствующие программно-аппаратные средства были апробированы в устройстве УЗ уровнемера [12] и устройстве контроля газовых потоков [3].

Моделирование рассеяния УЗ импульсов на вибрирующей поверхности проводилось в лучевом приближении при задании формы УЗ сигнала следующим образом:

$$S(t) = A\left(t - \frac{2(L - \delta \cdot \sin(\omega_V t))}{c}\right), \quad (1)$$

где ω_V – циклическая частота колебаний поверхности $\omega_V = 2\pi f_V$; c – скорость звука; L – расстояние вдоль луча до поверхности; δ – проекция амплитуды ко-

лебаний поверхности на направление луча; $A(t)$ – функция, описывающая импульс на опорной частоте сигнала $f = 40$ кГц с частотно-фазовой модуляцией.

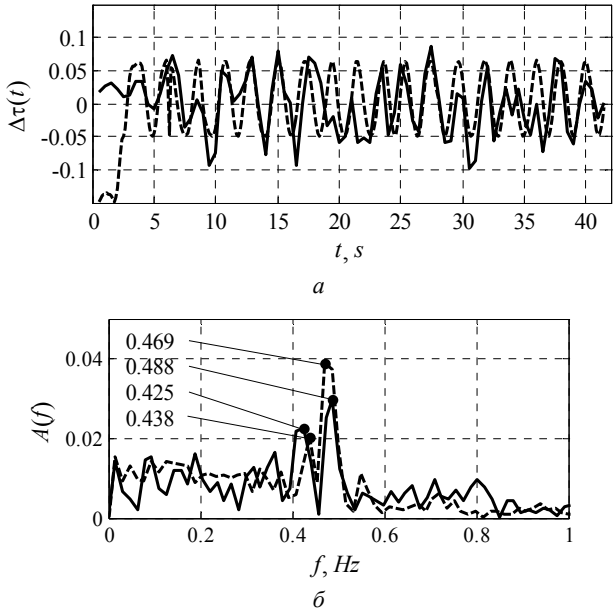
Минимальная длительность импульсов, возбуждаемых резонансным УЗ передатчиком, равна десяткам периодов несущей УЗ волны. Для частоты 40 кГц длительность импульса составляет порядка 1 мс, что соответствует 40 периодам несущей частоты [3].

Оценка частоты колебаний поверхности производилась по анализу формы ВКФ, а точнее – по анализу средневзвешенного положения «центра тяжести» (ЦТ) огибающей мощности корреляционной функции [3, 21]:

$$t_C = \frac{\int t \cdot W(t)\, dt}{\int W(t)\, dt},$$

где $W(t)$ – огибающая мощности ВКФ.

На рис. 2, *а* показаны примеры экспериментальной (сплошная линия) и теоретической (пунктирная линия) зависимостей положения ЦТ ВКФ. Частота колебаний отражающей поверхности в эксперименте при амплитуде 9 мм составляла примерно 0,5 Гц и являлась величиной непостоянной. На рис. 2, *б* представлены спектры этих зависимостей, из которых видно (в теоретически рассчитанной и полученной зависимости положения ЦТ ВКФ на основе экспериментальных данных) наличие двух пиков на частотах ~0,43 и ~0,49 Гц. Таким образом, моделирование и экспериментальные измерения проводились при нестационарной частоте вибраций, которая менялась в переделах 10–15%.



а

б

Рис. 2. Экспериментальный (сплошная линия) и теоретический (пунктирная линия) графики положения средневзвешанного положения огибающей мощности ВКФ (*а*) и их амплитудные спектры с указанием значений частот в пиковых точках (*б*). Частота вибраций поверхности ~ 0,43-0,5 Гц

Спектральный анализ временных зависимостей в данном случае затрудняется тем, что частота дискретизации такого сигнала определяется частотой зондирующих импульсов (порядка 3-4 отсчетов на один период колебании поверхности). Данное ограничение связано с длительностью записи, обработки сигналов и расчета временной задержки положения ЦТ [2, 21]. В этих условиях производился анализ данных при помощи ИНС прямого распространения с обратным распространением ошибки [27, 42]. Для дополнительной проверки результатов проводилась аппроксимация соответствующих временных зависимостей методом наименьших квадратов.

Алгоритм и структура нейронной сети. На рис. 3, *а* представлена архитектура простой ИНС. Структурно нейронная сеть состоит из 6 входных нейронов, что соответствует числу дискретных отсчетов примерно двух периодов колебаний поверхности. В скрытом слое ИНС имеет от 5 до 10 нейронов. На выходе ИНС предполагается получать значение частоты сигнала f_V. Обучение ИНС осуществлялось при количестве записей сигнала $N = 37\,000$. Моделирование сигналов для обучения ИНС проводилось при варьировании колебаний поверхности по значениям начальной фазы и частоты.

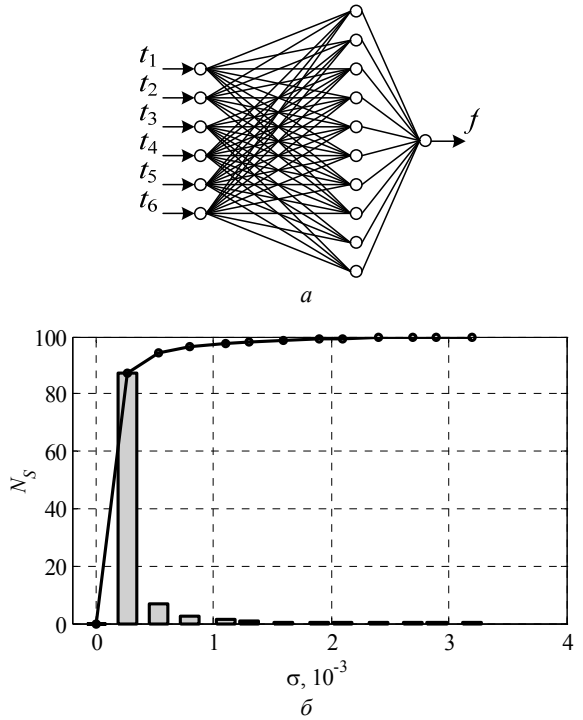


Рис. 3. Структура нейронной сети (*а*) и гистограмма ошибок при обучении ИНС (*б*). Сплошная кривая – сумма с накоплением.

Так как число связей между нейронами (от 30 до 60) значительно меньше N, точность распознавания сигнала можно оценить по качеству обучения ИНС,

гистограмме распределения среднеквадратичной ошибки. В таблице приведены значения максимальной и среднеквадратической ошибок для ИНС с 5 и 10 нейронами в скрытом слое, соответственно. Распознаваемость в обоих случаях – 100%. На рис. 3, *б* показан пример гистограммы распределения ошибок при обучении ИНС для случая 10 нейронов в скрытом слое. N_S в данном случае определяет количество примеров в процентах из общей выборки N, для которых среднеквадратичная ошибка находится в соответствующем интервале.

Значения максимальной и среднеквадратической ошибок при обучении ИНС

Количество нейронов в скрытом слое	Максимальная ошибка ($\sigma_{макс}$)	Среднеквадратическая ошибка (σ_s)	Распознавание связей (S)
5	$1{,}12\cdot10^{-2}$	$6{,}44\cdot10^{-4}$	100%
10	$3{,}52\cdot10^{-3}$	$1{,}45\cdot10^{-4}$	100%

Как видно из таблицы и рис. 3, погрешность идентификации значения частоты не превышает 0,4% ($3{,}52\cdot10^{-3}$).

После обучения ИНС на данных математического моделирования на ее вход подавались временные зависимости задержки УЗ сигналов, полученные экспериментально в лабораторных условиях при отражении от вибрирующей поверхности.

На рис. 4 приведены результаты использования ИНС для обработки экспериментальной временной зависимости задержки сигналов, показанной на рис. 2. Зависимость получена по 65 отсчетам (значениям ЦТ) при вводе значений задержки на вход ИНС в «скользящем окне» по 6 значениям. ИНС обучалась в диапазоне частот вибраций от 0,2 до 0,6 Гц. Средние локальные значения частот, вычисленные при помощи ИНС на трех одинаковых временных интервалах, составляют 0,432; 0,471; 0,458 Гц, что отмечено на рисунке пунктиром. Перекрестиями обозначены значения частот пиков, полученных при помощи спектрального анализа, – 0,425; 0,488; 0,433 Гц.

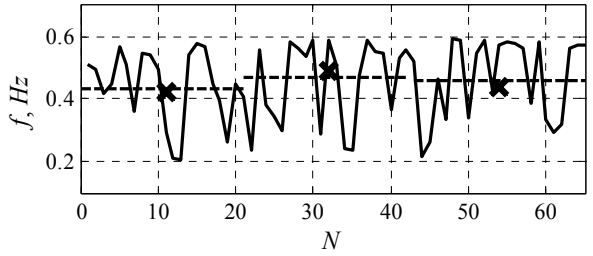


Рис. 4. Результаты расчёта частоты вибраций с помощью ИНС (сплошная линия), их локальные линейные тренды (пунктирная линия) и значения частот при использовании спектрального анализа (перекрестия)

Из рис. 4 видно, что значения частоты колебаний поверхности, рассчитанные при помощи спектрального анализа положения ЦТ ВКФ и при помощи нейроалгоритма, отличаются в пределах единиц процентов. И при этом

они близки к теоретически рассчитанным значениям частоты вибраций. Результаты демонстрируют возможности аппарата ИНС для анализа вибросигналов в условиях малых частот дискретизации.

Заключение. Таким образом, результаты моделирования и обработки экспериментальных данных при активном импульсном УЗ контроле низкочастотных вибраций позволяют сделать следующие выводы:

1. Измерения строятся на кинематическом принципе: фиксируются изменения в положении поверхности объекта. Поэтому предложенная методика практически не имеет ограничений по частоте в низкочастотной области колебаний. Для оценки основной частоты вибраций достаточно 3-4 зондирующих УЗ импульсов на период колебаний поверхности.

2. Для экспериментальной идентификации основной частоты вибраций показана возможность использования нейронной сети прямого распространения с простой архитектурой. При этом необходимо учитывать, что численное моделирование задержки УЗ сигналов, которое использовалось для обучения ИНС, проводилось приближенно, без учета дифракционных эффектов при рассеянии ультразвука, неизбежно возникающих гармоник основной частоты вибраций и т.д. В таких условиях полученная экспериментально точность оценки (нестационарной) частоты единицы процентов может считаться достаточно высокой.

3. При изменении частоты зондирующих УЗ импульсов ИНС может использоваться вместе с традиционным спектральным анализом данных и аппроксимацией дискретных временных зависимостей задержки сигналов. В целом предлагаемый подход позволяет реализовать адаптивные алгоритмы активного виброконтроля.

Литература

1. *Баскин И.И., Палюлин В.А., Зефиров Н.С.* Применение искусственных нейронных сетей в химических и биохимических исследованиях // Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия. 1999. Т. 40, № 5. С. 86–96.

2. *Бычков А.В., Славутский Л.А.* Возможности корреляционной обработки импульсных ультразвуковых сигналов при бесконтактном виброконтроле оборудования электроэнергетики // Вестник Чувашского университета. 2018. № 3. С. 24–32.

3. *Бычкова И.Ю., Бычков А.В., Славутский Л.А.* Цифровая фазовая модуляция и корреляционная обработка ультразвуковых сигналов для импульсных измерений в неоднородной среде // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 3. С. 114–119. DOI: 10.1134/S0020441218030077.

4. *Горбань А.Н., Дунин-Барковский В.Л.* Нейроинформатика. Новосибирск: Наука, Сибирское отд-ние РАН, 1998. 296 с.

5. *Дюк В., Самойленко А.* Data Mining. СПб.: Питер, 2001. 386 с.

6. *Костюков В.Н.* Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 360 с.

7. *Костюкова Н.И.* Система принятия решений в области медицинской диагностики и выбора оптимальных решений по технологии Data Mining // Открытое образование. 2010. Прил. С. 145–146.

8. *Кузнецова А.В., Сенько О.В.* Возможности использования методов Data Mining при медико-лабораторных исследованиях для выявления закономерностей в массивах данных // Врач и информационные технологии. 2005. № 2. С. 49–56.

9. *Матюшкова О.Ю., Тэттэр В.Ю.* Современные методы виброакустического диагностирования // Омский научный вестник. 2013. № 3(123). С. 294–299.

10. *Николаев А.А., Славутский Л.А.* Дистанционный контроль ультразвуковых магнитострикционных преобразователей противонакипных устройств // Вестник Чувашского университета. 2008. № 2. С. 228–232.

11. *Русов В.А.* Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. Пермь: ДимРус, 2012. 200 с.

12. *Славутский Л.А., Костюков А.С.* Статистическая погрешность ультразвукового цифрового уровнемера с частотно-фазовой модуляцией сигнала // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 8. С. 35–37.

13. *Славутская Е.В., Абруков В.С., Славутский Л.А.* Нейросетевой системный анализ уровневых психологических характеристик // Вестник Чувашского университета. 2016. № 1. С. 164–173.

14. *Финн В.К.* Об интеллектуальном анализе данных // Новости искусственного интеллекта. 2004. № 3. С. 3–18.

15. *Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В.* Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006. 632 с.

16. *Янич В.В.* Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи. Т. 7. Пьезоэлектрическое приборостроение. Ростов: Изд-во ЮФУ, 2010. 304 с.

17. *Aldasouqi I., Shaout A.* Earthquake Monitoring System Using Ranger Seismometer Sensor. International journal of geology, 2009, vol. 3, no. 3, pp. 55–59.

18. *Banket V., Manakov S.* Composite Walsh-Barker Sequences. In: Proc. of 9th Int. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS), 2018. С. 343–347. DOI: 10.1109/UWBUSIS.2018.8520220.

19. *Bartoletti C., Desiderio M., Carlo D.Di., Fazio G., Muzi F., Sacerdoti G., Salvatori F.* Vibro-acoustic techniques to diagnose power transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, no. 19, pp. 221–229. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.820177.

20. *Ben-Yosef N., Ginio O., Weitz A.* Measurement and analysis of mechanical vibrations by means of optical heterodyning techniques. Journal of physics E: Scient. Instruments, 1974, vol. 7, no. 3, p. 218. DOI: 10.1088/0022-3735/7/3/323.

21. *Bychkov A., Bychkova I., Slavutskii L.* Active Ultrasonic Vibration Control of Electrical Equipment: Correlation Signal Processing. In: Proc. of Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019, pp. 244–248. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877666.

22. *Cristallia C., Paoneb N., Rodríguezc R.M.* Mechanical fault detection of electric motors by laser vibrometer and accelerometer measurements. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, no. 20, pp. 1350–1361. DOI:10.1016/j.ymssp.2005.11.013.

23. *Dillon T.S., Niebur D.* Neural Networks Application in Power Systems. London, CRL Ltd. Publ., 1996.

24. *Dupuis J.C., Butler K.E., Kepic A.W., Harris B.D.* Anatomy of a seismoelectric conversion: Measurements and conceptual modeling in boreholes penetrating a sandy aquifer. Journal of geophysical research, 2009, vol. 114. DOI: 10.1029/2008JB005939.

25. *Hinton G., Deng L., Yu D., Dahl G., Mohamed A., Jaitly N., Senior A., Vanhoucke V., Nguyen P., Sainath T., Kingsbury B.* Deep Neural Networks for Acoustic Modeling in Speech Recognition – The shared views of four research groups. IEEE Signal Processing Magazine, 2012, vol. 29, no. 6, pp. 82–97. DOI: 10.1109/msp.2012.2205597.

26. *Jambukia S.H., Dabhi V.K., Prajapati H.B.* Classification of ECG signals using machine learning techniques: A survey. In: Proc. of Int. Conf. on Advances in Computer Engineering and Applications, 2015, pp. 714–721. DOI: 10.1109/ICACEA.2015.7164783.

27. *Kakar S.A., Sheikh N., Naseem A., Iqbal S, Rehman A., Kakar A., Kakar B.A., Kakar H.A., Khan B.* Artificial Neural Network based Weather Prediction using Back Propagation Technique. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2018, vol. 9, no. 8, pp. 462–470. DOI: 10.14569/IJACSA.2018.090859.

28. *Kezunovic M.* A Survey of Neural Net Applications to Protective Relaying and Fault Analysis. Engineering Intelligent Systems, 1997, vol. 5, no. 4, pp. 185–192.

29. *Kim P., Jung E., Bae S., Kim K., Song T.* Barker-sequence-modulated golay coded excitation technique for ultrasound imaging. In: Proc. of International Ultrasonics Symposium (IUS), 2016, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ULTSYM.2016.7728737.

30. *Kumar K., Thakur G.S.M.* Advanced Applications of Neural Networks and Artificial Intelligence: A Review. International Journal of Information Technology and Computer Science, 2012, no. 6, pp. 57–68. DOI: 10.5815/ijitcs.2012.06.08.

31. *Lakshmi Ch.R., Trivikramarao D., Subhani Sk., Ghali V.S.* Barker coded thermal wave imaging for anomaly detection. In: Proc. of Conf. on Signal Processing And Communication Engineering Systems (SPACES), 2018, pp. 198–201. DOI: 10.1109/SPACES.2018.8316345.

32. *LeCun Y., Bengio Y.* Convolutional Networks for Images, Speech, and Time-Series. In: Arbib M.A., ed. The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Cambrige, MIT Press, 1995.

33. *Matti D., Ekenel H.K., Thiran J.P.* Combining LiDAR space clustering and convolutional neural networks for pedestrian detection. Proc. of 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance, 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/AVSS.2017.8078512.

34. *Matsuyuki S., Tsuneda A.* A Study on Aperiodic Auto-Correlation Properties of Concatenated Codes by Barker Sequences and NFSR Sequences. In: Proc. of Int. Conf. on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 2018, pp. 664–666. DOI: 10.1109/ICTC.2018.8539367.

35. *Omar S-M., Kassem F., Mitri R., Hijazi H., Saleh M.* A novel barker code algorithm for resolving range ambiguity in high PRF radars. In: Proc. of European Radar Conf. (EuRAD), 2015, pp. 81–84. DOI: 10.1109/EuRAD.2015.7346242.

36. *Petrushin V.A., Khan L.* Multimedia Data Mining and Knowledge Discovery. New York, Springer-Verlag, 2006, 539 p.

37. *Rivas E., Burgos J.C., Garcia-Prada J.C.* Condition Assessment of Power OLTC by Vibration Analysis Using Wavelet Transform. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, no. 24, pp. 687–694. DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2014268.

38. *Riznyk O., Balych B., Yurchak I.* A synthesis of barker sequences is by means of numerical bundles. In: Proc. of 14th Int. Conf. The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), 2017, pp. 82–84. DOI: 10.1109/CADSM.2017.7916090.

39. *Samarasinghe S.* Neural Networks for Applied Sciences and Engineering: From Fundamentals to Complex Pattern Recognition. 1st ed. Boca Raton, Auerbach Publications, 2006, 570 p.

40. *Schmidhuber J.* Deep Learning in Neural Networks: An Overview. Neural Networks, 2014, no. 61, pp. 85–117. DOI: 10.1016/j.neunet.2014.09.003.

41. *Slavutskaya E.V., Slavutskii L.A.* Preteen Age: The Analysis Of The Multilevel Psycho-Diagnostic Data Based On Neural Network Models. Society. Integration. Education: Proceedings of the Scientific Conference, 2018, iss. 5, pp. 455–464. DOI: 10.17770/ sie2018vol1.3348.

42. *Su H., Li G., Yu D., Seide F.* Error back propagation for sequence training of context-dependent deep networks for conversational speech transcription. In: Proc. of Int. Conf. on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP), 2013, pp. 6664–6668.

43. *Wang Sh., He P.* Research on Low Intercepting Radar Waveform Based on LFM and Barker Code Composite Modulation. Proc. of Int. Conf. on Sensor Networks and Signal Processing (SNSP), 2019, pp. 297–301. DOI: 10.1109/SNSP.2018.00064.

44. *Witten I.H., Frank E., Hall M.A., Kaufmann M.* Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques. 3rd ed. Amsterdam, Elsevier, 2011, 629 p.

БЫЧКОВ АНАТОЛИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – аспирант, кафедра электрических и электронных аппаратов, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (bav.xlab@mail.com).

ФЕДОРОВА ПОЛИНА НИКОЛАЕВНА – магистрант факультета радиоэлектроники и автоматики, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (feodorowa.polya@yandex.ru).

СЛАВУТСКИЙ ЛЕОНИД АНАТОЛЬЕВИЧ – доктор физико-математических наук, профессор кафедры автоматики и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (las_co@mail.ru).

A. BYCHKOV, P. FEDOROVA, L. SLAVUTSKII

NEURO ALGORITHM TO ESTIMATE VIBRATION FREQUENCY OF ELECTRICAL EQUIPMENT USING REMOTE ULTRASONIC CONTROL

Key words: *artificial neural network, vibration control, ultrasonic pulses, electrical equipment.*

The paper proposes using an apparatus of artificial neural networks (ANN) for data processing of ultrasonic (US) vibration control of electrical equipment. The neural network algorithm is used to estimate the frequency of low-frequency vibrations during pulsed ultrasonic probing of a vibrating surface. The training of direct propagation ANN with the back error propagation is carried out on the numerical simulation data of the ultrasonic pulses delay reflected from a vibrating surface. The sample of 37 000 pulses is used. The neural network training error at 100% link recognition does not exceed one percent. Thus ANN was used for experimental data processing. Digital phase modulation of ultrasonic pulses and their correlation processing were used to increase the accuracy of measuring the delay time. It has been experimentally shown that with high quality of training of neural network model, the results of studies obtained in a laboratory setup make it possible to estimate the unsteady vibration frequency at a low frequency of pulsed ultrasonic sounding – 3-4 pulses with periodic oscillations of the reflecting surface of electrical equipment. The accuracy of determining the frequency of vibrations under these conditions is a few percent.

References

1. Baskin I.I., Palyulin V.A., Zefirov N.S. *Primenenie iskusstvennykh neironnykh setei v khimicheskikh i biokhimicheskikh issledovaniyakh* [The use of artificial neural networks in chemical and biochemical studies]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 2. Chimiya*, 1999, vol. 40. no. 5, pp. 86–96.

2. Bychkov A.V., Slavutskii L.A. *Vozmozhnosti korrelyatsionnoi obrabotki impul'snykh ul'trazvukovykh signalov pri beskontaktnom vibrokontrole oborudovaniya ehlektroehnergetiki* [Capabilities of correlation processing of pulse ultrasonic signals for noncontact vibration control of electric power industry equipment]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta,* 2018, no. 3, pp. 24–32.

3. Bychkova I.Yu., Bychkov A.V., Slavutskii L.A. *Tsifrovaya fazovaya modulyatsiya i korrelyatsionnaya obrabotka ul'trazvukovykh signalov dlya impul'snykh izmerenii v neodnorodnoi srede* [Digital phase modulation and correlation processing of ultrasound signals for pulsed measurements in an inhomogeneous medium]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2018, no. 3, pp. 114–119. DOI: 10.1134/S0020441218030077.

4. Gorban' A.N., Dunin-Barkovskii V.L. *Neiroinformatika* [Neuroinformatics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1998, 296 p.

5. Dyuk V., Samoilenko A. *Data Mining* [Data mining]. St. Petersburg, Piter Publ., 2001, 386 p.

6. Kostyukov V.N. *Osnovy vibroakusticheskoi diagnostiki i monitoringa mashin* [Fundamentals of machinery vibroacoustic analysis and monitoring]. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2011, 360 p.

7. Kostyukova N.I. *Sistema prinyatiya reshenii v oblasti meditsinskoi diagnostiki i vybora optimal'nykh reshenii po tekhnologii Data Mining* [Decision-making system in the field of medical diagnostics and selection of optimal solutions using Data Mining technology]. *Otkrytoe obrazovanie,* 2010, appendix to the journal, pp. 145–146.

8. Kuznetsova A.V., Sen'ko O.V. *Vozmozhnosti ispol'zovaniya metodov Data Mining pri mediko-laboratornykh issledovaniyakh dlya vyyavleniya zakonomernostei v massivakh dannykh* [Possibilities of using Data Mining methods in medical and laboratory research to identify patterns in data arrays]. *Vrach i informatsionnye tekhnologii*, 2005, no. 2, pp. 49–56.

9. Matyushkova O.Yu., Tetter V.Yu. *Sovremennye metody vibroakusticheskogo diagnostirovaniya* [Modern methods of vibroacoustic diagnostics]. *Omskii nauchnyi vestnik*, no. 3(123), 2013, pp. 294–299.

10. Nikolaev A.A., Slavutskii L.A. *Distantsionnyi kontrol' ul'trazvukovykh magnitostriktsionnykh preobrazovatelei protivonakipnykh ustroistv* [Remote control of ultrasonic magtetostrictive transducers for scale distortion devices]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta,* 2008, no. 2, pp. 228–232.

11. Rusov V.A. *Diagnostika defektov vrashchayushchegosya oborudovaniya po vibratsionnym signalam* [Diagnosis of defects in rotating equipment by vibration signals]. Perm, DimRus Publ., 2012, 200 p.

12. Slavutskii L.A., Kostyukov A.S. *Statisticheskaya pogreshnost' ul'trazvukovogo tsifrovogo urovnemera s chastotno-fazovoi modulyatsiei signala* [Statistical error of an ultrasonic digital level meter with frequency-phase modulation of the signal]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2009, no. 8, pp. 35–37.

13. Slavutskaya E.V., Abrukov V.S., Slavutskii L.A. *Neirosetevoi sistemnyi analiz urovnevykh psikhologicheskikh kharakteristik* [Neural network system analysis of the split-level psychological characteristics. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2016, no. 1, pp. 164–173.

14. Finn V.K. *Ob intellektual'nom analize dannykh* [About data mining]. *Novosti iskusstvennogo intellekta*, 2004, no. 3, pp. 3–18.

15. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. *P'ezoelektricheskie datchiki* [Piezoelectric sensors]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 632 p.

16. Yanich V.V. *P'ezoehlektricheskie vibroizmeritel'nye preobrazovateli. T. 7. P'ezo-ehlektricheskoe priborostroenie* [Piezoelectric vibration transducers. Vol. 7: Piezoelectric Instrumentation]. Rostov, 2010, 304 p.

17. Aldasouqi I., Shaout A. Earthquake Monitoring System Using Ranger Seismometer Sensor. International journal of geology, 2009, vol. 3, no. 3, pp. 55–59.

18. Banket V., Manakov S. Composite Walsh-Barker Sequences. In: Proc. of 9th Int. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS), 2018. C. 343–347. DOI: 10.1109/UWBUSIS.2018.8520220.

19. Bartoletti C., Desiderio M., Carlo D.Di., Fazio G., Muzi F., Sacerdoti G., Salvatori F. Vibro-acoustic techniques to diagnose power transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, no. 19, pp. 221–229. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.820177.

20. Ben-Yosef N., Ginio O., Weitz A. Measurement and analysis of mechanical vibrations by means of optical heterodyning techniques. Journal of physics E: Scient. Instruments, 1974, vol. 7, no. 3, p. 218. DOI: 10.1088/0022-3735/7/3/323.

21. Bychkov A., Bychkova I., Slavutskii L. Active Ultrasonic Vibration Control of Electrical Equipment: Correlation Signal Processing. In: Proc. of Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019, pp. 244–248. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877666.

22. Cristallia C., Paoneb N., Rodríguezc R.M. Mechanical fault detection of electric motors by laser vibrometer and accelerometer measurements. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, no. 20, pp. 1350–1361. DOI:10.1016/j.ymssp.2005.11.013.

23. Dillon T.S., Niebur D. Neural Networks Application in Power Systems. London, CRL Ltd. Publ., 1996.

24. Dupuis J.C., Butler K.E., Kepic A.W., Harris B.D. Anatomy of a seismoelectric conversion: Measurements and conceptual modeling in boreholes penetrating a sandy aquifer. Journal of geophysical research, 2009, vol. 114. DOI: 10.1029/2008JB005939.

25. Hinton G., Deng L., Yu D., Dahl G., Mohamed A., Jaitly N., Senior A., Vanhoucke V., Nguyen P., Sainath T., Kingsbury B. Deep Neural Networks for Acoustic Modeling in Speech Recognition – The shared views of four research groups. IEEE Signal Processing Magazine, 2012, vol. 29, no. 6, pp. 82–97. DOI: 10.1109/msp.2012.2205597.

26. Jambukia S.H., Dabhi V.K., Prajapati H.B. Classification of ECG signals using machine learning techniques: A survey. In: Proc. of Int. Conf. on Advances in Computer Engineering and Applications, 2015, pp. 714–721. DOI: 10.1109/ICACEA.2015.7164783.

27. Kakar S.A., Sheikh N., Naseem A., Iqbal S, Rehman A., Kakar A., Kakar B.A., Kakar H.A., Khan B. Artificial Neural Network based Weather Prediction using Back Propagation Technique. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2018, vol. 9, no. 8, pp. 462–470. DOI: 10.14569/IJACSA.2018.090859.

28. Kezunovic M. A Survey of Neural Net Applications to Protective Relaying and Fault Analysis. Engineering Intelligent Systems, 1997, vol. 5, no. 4, pp. 185–192.

29. Kim P., Jung E., Bae S., Kim K., Song T. Barker-sequence-modulated golay coded excitation technique for ultrasound imaging. In: Proc. of International Ultrasonics Symposium (IUS), 2016, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ULTSYM.2016.7728737.

30. Kumar K., Thakur G.S.M. Advanced Applications of Neural Networks and Artificial Intelligence: A Review. International Journal of Information Technology and Computer Science, 2012, no. 6, pp. 57–68. DOI: 10.5815/ijitcs.2012.06.08.

31. Lakshmi Ch.R., Trivikramarao D., Subhani Sk., Ghali V.S. Barker coded thermal wave imaging for anomaly detection. In: Proc. of Conf. on Signal Processing And Communication Engineering Systems (SPACES), 2018, pp. 198–201. DOI: 10.1109/SPACES.2018.8316345.

32. LeCun Y., Bengio Y. Convolutional Networks for Images, Speech, and Time-Series. In: Arbib M.A., ed. The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Cambrige, MIT Press, 1995.

33. Matti D., Ekenel H.K., Thiran J.P. Combining LiDAR space clustering and convolutional neural networks for pedestrian detection. Proc. of 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance, 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/AVSS.2017.8078512.

34. Matsuyuki S., Tsuneda A. A Study on Aperiodic Auto-Correlation Properties of Concatenated Codes by Barker Sequences and NFSR Sequences. In: Proc. of Int. Conf. on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 2018, pp. 664–666. DOI: 10.1109/ICTC.2018.8539367.

35. Omar S-M., Kassem F., Mitri R., Hijazi H., Saleh M. A novel barker code algorithm for resolving range ambiguity in high PRF radars. In: Proc. of European Radar Conf. (EuRAD), 2015, pp. 81–84. DOI: 10.1109/EuRAD.2015.7346242.

36. Petrushin V.A., Khan L. Multimedia Data Mining and Knowledge Discovery. New York, Springer-Verlag, 2006, 539 p.

37. Rivas E., Burgos J.C., Garcia-Prada J.C. Condition Assessment of Power OLTC by Vibration Analysis Using Wavelet Transform. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, no. 24, pp. 687–694. DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2014268.

38. Riznyk O., Balych B., Yurchak I. A synthesis of barker sequences is by means of numerical bundles. In: Proc. of 14th Int. Conf. The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), 2017, pp. 82–84. DOI: 10.1109/CADSM.2017.7916090.

39. Samarasinghe S. Neural Networks for Applied Sciences and Engineering: From Fundamentals to Complex Pattern Recognition. 1st ed. Boca Raton, Auerbach Publications, 2006, 570 p.

40. Schmidhuber J. Deep Learning in Neural Networks: An Overview. Neural Networks, 2014, no. 61, pp. 85–117. DOI: 10.1016/j.neunet.2014.09.003.

41. Slavutskaya E.V., Slavutskii L.A. Preteen Age: The Analysis Of The Multilevel Psycho-Diagnostic Data Based On Neural Network Models. Society. Integration. Education: Proceedings of the Scientific Conference, 2018, iss. 5, pp. 455–464. DOI: 10.17770/ sie2018vol1.3348.

42. Su H., Li G., Yu D., Seide F. Error back propagation for sequence training of context-dependent deep networks for conversational speech transcription. In: Proc. of Int. Conf. on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP), 2013, pp. 6664–6668.

43. Wang Sh., He P. Research on Low Intercepting Radar Waveform Based on LFM and Barker Code Composite Modulation. Proc. of Int. Conf. on Sensor Networks and Signal Processing (SNSP), 2019, pp. 297–301. DOI: 10.1109/SNSP.2018.00064.

44. Witten I.H., Frank E., Hall M.A., Kaufmann M. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques. 3rd ed. Amsterdam, Elsevier, 2011, 629 p.

BYCHKOV ANATOLY – Post-Graduate Student of Electrical and Electronic Apparatuses Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (bav.xlab@gmail.com).

FEDOROVA POLINA – Master's Program Student, Radioelectronics and Automation Faculty, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (feodorowa.polya@yandex.ru).

SLAVUTSKII LEONID – Doctor of Physics and Mathematical Sciences, Department of Automation and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (las_co@mail.ru).

Формат цитирования: *Бычков А.В., Федорова П.Н., Славутский Л.А*. Нейроалгоритм для оценки частоты вибраций электрооборудования при дистанционном ультразвуковом контроле // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 67–77.

УДК 621. 311.018.782.3
ББК 3279.016.2

П.Л. ВОРОНОВ, В.А. ЩЕДРИН

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ СХЕМНОГО ЭЛЕМЕНТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ – ГИРАТОРА

Ключевые слова: *синхронная машина, схема замещения, преобразование координат, матрица преобразования, тензор импеданса, диакоптика, гиратор.*

Поиск единой основы для эффективного и систематического анализа и исследования тензорно-топологическим методом сложных устройств электротехнических и электроэнергетических систем привел к необходимости одновременного использования двух источников информации: уравнений состояния (движения) и схем замещения или более общих топологических моделей, построенных для этих физических объектов. Электрические модели в виде схем замещения, широко применяемые на практике в качестве средства составления уравнений и объединения их с векторными диаграммами, оказались удобными и для наглядного представления тензоров и многомерных пространств анализируемых систем. Граф электрической цепи и наложенная на него алгебраическая структура в виде законов Кирхгофа, выражающая связь между токами и напряжениями её, стали представлять собой наиболее простую топологическую модель. Тензорные уравнения, устанавливающие связь между параметрами невозбужденной электрической системы и переменными величинами (электромагнитными параметрами режима) возбужденной системы, объединили её в целостный объект и идентифицировали как физическую систему и с её моделью, позволив тем самым не только составлять уравнения состояния (движения) любых сложных систем, но и обосновать и развить новый эффективный способ их решения по частям, называемый методом диакоптики. В статье предлагается топологическая модель для синхронной явнополюсной машины во вращающихся координатах, включающая схемный элемент гиратор, а также показана одна из возможностей физической реализации такой модели.

Опыт анализа и исследования сложных электротехнических комплексов и электроэнергетических систем по частям, включающих и устройства неэлектрического характера, показывают, что топологические модели, построенные для них, содержат в себе обширную информацию о скрытых силах позиционных (голономных) и кинематических (неголономных) связей, появляющихся в процессе расчленения систем на части и соединения этих решений в общее решение для системы в целом [3, 5]. Заметим, что линейные графы комбинаторной (алгебраической) топологии, дополненные понятием полного сопротивления (импеданса), могут использоваться совместно с аппаратом теоретико-множественной топологии, одной из составных частей которого является тензорный анализ, использованный впервые Г. Кроном для преобразования координат электрических вращающихся машин и цепей [14]. Тензорный метод позволяет осуществлять не только физическое, но и функциональное разделение сложных систем на части. В частности, тензор импеданса электрической машины можно разделить на тензоры активного сопротивления, индуктивности и вращения, которые отражают действия электро-

магнитных и механических сил. По существу метод диакоптики является следствием свойств топологических моделей, из которых вытекает как возможность составления ортогональных уравнений электрических систем посредством применения несингулярных матриц преобразования [11, 13], так и принадлежность этих матриц преобразования, применяемых для разных целей, к определенным группам, объединяющим их благодаря групповым свойствам в одно семейство или в общий соответствующий тензор преобразования. Именно в тензорах преобразования содержатся основные характеристики скелета динамических систем, хотя сами матрицы как компоненты тензора преобразования в уравнения состояния систем не входят. Они выполняют специфическую роль, связанную с ключевыми понятиями: группа, инвариантность, преобразование. Если сингулярные или несингулярные матрицы **C** являются сущностями определенной группы и для них единственной допустимой операцией принимается, например, умножение, т.е. произведение $\mathbf{C}_1\mathbf{C}_2\mathbf{C}_3$ образует матрицу $\mathbf{C}_4$, которая принадлежит этой же группе, то эти матрицы обладают «групповым свойством». Они помимо данного главного условия должны удовлетворять еще трем: иметь обратный элемент, принадлежащий этой же группе, причем произведение $\mathbf{C}_k\mathbf{C}_k^{-1} = \mathbf{1}$; умножение любой из матриц на единичный элемент группы должно оставлять их без изменения; умножение матриц может выполняться в любом порядке согласно с ассоциативным законом. Когда элементы не имеют обратных, то такая группа называется «полугруппой», для которых многие теоремы теории групп остаются справедливыми [1].

В статье используются три типа групп матриц преобразования: G_i, G_n, и G_f. Первая группа матриц осуществляет преобразование параметров одной электрической системы, состоящей из «*b*» ветвей (элементов), в другие системы, составленные из тех же ветвей, но соединенных различными способами. Эти матрицы составляют группу так называемых матриц соединения, составляющих основу для изучения электрических цепей, поскольку в зашифрованном или закодированном виде выражают законы Кирхгофа. К группе G_f относятся матрицы линейных преобразований, в которых содержатся компоненты, являющиеся функциями переменных величин, в частности, например, угла положения осей ротора машин относительно вращающегося синхронно вектора напряжения системы. К группе G_n относятся все матрицы **C**, применяющиеся при исследовании систем и имеющие только действительные компоненты. В [10, 12] дан подробный обзор матричных уравнений и используемых схем замещения электрических машин в различных системах координат. Среди схем замещения имеют место и физически реализуемые модели, которые могут использоваться для анализа переходных процессов в электроэнергетических системах. Однако уравнения движения, выраженные через переменные фаз *A, B, C*, не удобны при исследовании задач динамики машин и взаимосвязанных с ними сетей. Наиболее удобными для режимных расчетов таких систем являются их модели, представленные в координатах *f, b,* 0 и *d,*

q, 0, хотя в последних, например, для синхронных машин, нельзя получить статическую схему замещения, выполненную из набора четырех идеализированных и физически реализуемых элементов электрических цепей: *R, L, C* и идеального трансформатора, поскольку синхронная машина в осях *d, q* представляет собой невзаимную систему из-за дополнительных слагаемых в уравнениях состояния, называемых ЭДС вращения, вызванных вращением координатных осей. ЭДС вращения появляются также в каждом элементе электрической сети, если она рассматривается совместно с машинами во вращающихся осях координат. Уравнения синхронных машин и сетей в различных системах координат подробно рассмотрены в [2] на основе тензорных преобразований. Применять к таким системам непосредственно уравнения Лагранжа, как это принято для систем в фазных координатах *A, B, C*, не допустимо, поскольку введение новых координат *d, q* 0 справедливо только для воображаемых электрических токов i_d, i_q, i_0, которые эквивалентны в динамике квазикоординатам (скоростям), в то время как электрические заряды q_d и q_q в этих осях, как координаты, не существуют. Когда вводятся обобщенные координаты для стационарных (неподвижных) электрических цепей, то используются преобразования типа G_i для токов в виде $i_{(ABC)} = Ci'_{(ABC)}$. Тем самым осуществляется переход от токов отдельных ветвей к токам независимых контуров. В этом случае наложенные позиционные связи, ограничивающие число степеней свободы в новой цепи, оказываются интегрируемыми, а уравнения Лагранжа дают правильные уравнения состояния её. Но когда вводятся уравнения связи для вращающихся машин и сетей во вращающихся координатных осях *d* и *q*, то преобразование $i_{(ABC)} = C^{(dq)}_{(ABC)} i'_{(dq)}$ вводит неинтегрируемые связи, а уравнения состояния для электрической системы, полученные непосредственно из уравнений Лагранжа, оказываются ошибочными. Это означает, что система является неголономной и не может быть описана в действительных обобщенных координатах. Она будет характеризоваться квазикоординатами, которыми являются гипотетические токи (скорости) i_d и i_q. Поэтому сначала необходимо получить уравнения машины в голономной фазной системе координат с помощью уравнения Лагранжа, а затем выполнить преобразование к осям *d, q*. Для более полного раскрытия смысла данного преобразования желательно обратиться к тензорным уравнениям динамических систем [14, 10].

Синхронная машина в координатах *d, q*, 0 представляет собой невзаимную систему. Однако ее схему замещения или топологическую модель можно реализовать с помощью невзаимного элемента электрической цепи – гиратора [15]. Поскольку схемный элемент гиратор может быть реализован физически, то такая модель может быть использована для исследования не только на ЦВМ, но и на аналоговых устройствах или АВМ. Проиллюстрируем построение такой модели на примере трехфазной идеализированной явнополюсной синхронной машины с демпферными контурами *D, Q* в координатных осях, жестко связанных с ротором.

Уравнения такой машины в матричной форме записи **u = z i** и ее матрица импеданса или полного сопротивления **z** хорошо известны [2, 10]. Одна из форм, полученная в [12], имеет вид

$$\begin{array}{|c|} \\ u_d \\ u_q \\ u_F \\ u_D \\ u_Q \end{array} = \begin{array}{|c|ccccc|} & d & q & F & D & Q \\ d & r_d + L_d p & -L_d p\theta & M_{Fd}p & M_{Dd}p & -M_{Qd}p\theta \\ q & L_d p\theta & r_q + L_q p & M_{Fd}p\theta & M_{Dd}p\theta & M_{Qd}p \\ F & M_{Fd}p & 0 & r_F + L_F p & M_{DF}p & 0 \\ D & M_{Dd}p & 0 & M_{DF}p & r_D + L_D p & 0 \\ Q & 0 & M_{Qq}p & 0 & 0 & r_Q + L_Q p \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \\ -i_d \\ -i_q \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{array} \qquad (1)$$

Заметим, однако, что преобразованные матричные уравнения вида (1) от фазных координат *A, B, C* к переменным *d, q,* 0, используемые разными авторами, как правило, отличаются большим разнообразием знаков компонент их матриц. Это обусловлено произволом в выборе положительных направлений токов в обмотках машины, механического вращения вала (ротора) её, а также расположением координатных осей *d, q* относительно друг друга. В приведенных же уравнениях (1) токи статора направлены вовне, а ротора – вовнутрь машины, ось *q* опережает ось *d* и вращение вала осуществляется против часовой стрелки, а само преобразование выполнено в отличие от преобразования Парка – Горева с соблюдением инвариантности мощности [2, 12]. Поэтому в уравнениях (1) отсутствуют множители 2/3, а взаимные индуктивности между фазными обмотками статора и обмоткой возбуждения, а также демпферной обмоткой по продольной оси ротора одинаковы. Кроме того, из системы (1) исключено уравнение для напряжения и тока нулевой последовательности. Его нетрудно включить дополнительными строкой и столбцом, на пересечении которых вводится только один диагональный элемент импеданса $z_0 = (r_0 + L_0 p)$. Остальные элементы дополнительного столбца и строки равны нулю. Ток нулевой последовательности i_0 появляется только в случае заземленной нейтрали статора, когда система фазных токов синхронной машины является неравновесной. Часто для генераторов изменяют знаки перед всеми компонентами матрицы **z** и обозначают её через $\mathbf{z}_g$, предполагая при этом, что ось *q* опережает ось *d* и вращение вала совершается против часовой стрелки. Если изменить направление оси *q* на обратное, то при вращении вала по часовой стрелке получаются компоненты импеданса с теми же знаками. Поскольку демпферные обмотки короткозамкнуты, то можно преобразовать матрицу импеданса **z**, исключив с помощью формулы редукции $z' = z_1 - z_2 z_4^{-1} z_3$ оси *D, Q* машины.

Невзаимная связь между контурами *d, q* статора машины, представленная в уравнениях (1), не зависит от выбора положительных направлений переменных и вида записи самих уравнений. Её появление можно наглядно проиллюстрировать и на примере перехода от простой схемы замещения машины в системе комплексных вращающихся координат *f, b,* 0 к схеме в действительных переменных *d, q,* 0. Оси *f, b,* представляющие собой координат-

ную систему прямых и инверсных переменных, соответствуют теории вращающегося поля и являются симметричными составляющими. Данному преобразованию соответствуют следующие соотношения для токов:

$$i_d = \frac{1}{\sqrt{2}}(i_f + i_b),\ \ i_q = -j\frac{1}{\sqrt{2}}(i_f - i_b),$$

а матрицы преобразования соответственно имеют вид

$$C = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{array}{c|cc} & f & b \\ \hline d & 1 & 1 \\ q & -j & j \end{array},\ C_t^* = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{array}{c|cc} & d & q \\ \hline f & 1 & j \\ b & 1 & -j \end{array}.$$

В результате преобразования матрицы импеданса в осях *f, b* по выражению $z' = C_t^* z C$ можно с помощью **C** получить матрицу импеданса в осях *d, q*, выраженную через компоненты z_{ff}, z_{bb}. Следовательно, имеем

$$[z'] = [C_t^*] \cdot \begin{array}{c|cc} & f & b \\ \hline f & z_{ff} & \\ b & & z_{bb} \end{array} \cdot [C] = \frac{1}{2}\begin{array}{c|cc} & d & q \\ \hline d & z_{ff} + z_{bb} & j(z_{ff} - z_{bb}) \\ q & -j(z_{ff} - z_{bb}) & z_{ff} + z_{bb} \end{array}. \qquad (2)$$

Из (2) следует, что взаимные сопротивления между двумя контурами *d, q* машины различаются по знаку и не являются взаимными. Уравнения машины с импедансом из выражения (2) можно реализовать топологической моделью (схемой замещения), включающей невзаимный пассивный элемент электрической цепи – гиратор. Гиратор, его свойства и применение подробно описаны в электротехнической литературе [4, 7 и др.]. Он представляет собой четырехполюсник, прямые и инверсные уравнения которого в матричной форме имеют вид

$$\begin{array}{|c|}\hline u_1 \\ \hline u_2 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|}\hline 0 & -R_g \\ \hline R_g & 0 \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|}\hline i_1 \\ \hline i_2 \\ \hline \end{array},\ \begin{array}{|c|}\hline i_1 \\ \hline i_2 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|}\hline 0 & -G_g \\ \hline G_g & 0 \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|}\hline u_1 \\ \hline u_2 \\ \hline \end{array}, \qquad (3)$$

где $R_g = 1 / G_g$ – сопротивление гирации.

Схемное обозначение гиратора показано на рис. 1, *а*.

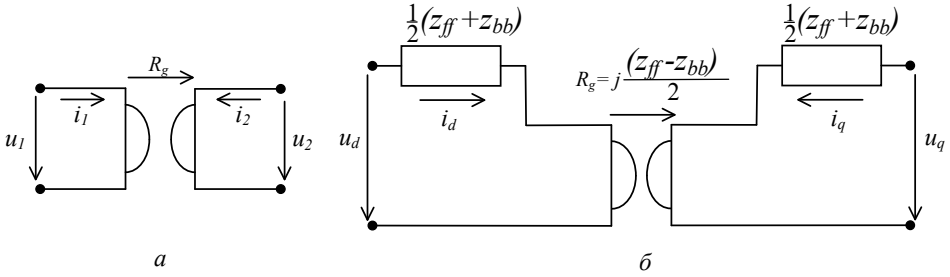


Рис. 1. Схемное обозначение гиратора (*а*)
и гиратора в схеме машины в осях *d, q*, выраженного через параметры *f, b* (*б*)

Из уравнений гиратора следуют его основные свойства. Он является устройством преобразования полных сопротивлений, а также тока в напряжение и наоборот. Если к выходным зажимам гиратора присоединить нагрузку с импедансом $z_{НГ}$, то входное сопротивление его будет равным $z_{вх} = R_g^2 / z_{НГ}$. Следовательно, подключение емкости приводит к индуктивному входному сопротивлению, причем $L = R_g^2 C$. Поскольку мощность, потребляемая гиратором, равна нулю, то отмеченное свойство его может быть широко использовано при моделировании. На рис. 1, *б* показана схема машины в осях *d, q*, соответствующая импедансу (2) и её уравнениям, если их записать в виде

$$\begin{vmatrix} u_d \\ u_q \end{vmatrix} = \left(\frac{1}{2}\cdot \begin{vmatrix} z_{ff}+z_{bb} & 0 \\ 0 & z_{ff}+z_{bb} \end{vmatrix} + \frac{1}{2}\cdot \begin{vmatrix} 0 & j(z_{ff}-z_{bb}) \\ -j(z_{ff}-z_{bb}) & 0 \end{vmatrix}\right) \cdot \begin{vmatrix} i_d \\ i_q \end{vmatrix},$$

разделив исходную матрицу (2) на две части. Тогда вторая часть полученной составной матрицы полного сопротивления может быть представлена гиратором, а результирующая схема машины эквивалентной моделью, показанной на рис. 1, *б*. Она состоит из последовательного соединения двух четырехполюсников и представляет двухконтурную модель, в которой контуры *d, q* обладают антивзаимной связью.

Аналогичным путём можно построить эквивалентные схемы многоконтурных систем и устройств, в частности для рассматриваемой синхронной машины, уравнения (1) которой уже приведены выше. Из этой системы уравнений посредством редукции постоянно замкнутых демпферных контуров можно исключить часть переменных, относящихся к этим контурам, но не пренебрегая ими. Так как исключаемые контуры не содержат ЭДС, то исходная система упрощается. Если еще дополнительно пренебречь и активными сопротивлениями демпферных контуров, то тогда получается трехконтурная несимметричная переходная матрица импеданса синхронной машины, которую можно записать в матричной форме

$$[z'] = \begin{array}{c|ccc} & d & q & F \\ \hline d & r_d + L'_d p & L'_d p\theta & M'_{Fd} p \\ q & -L'_d p\theta & r_q + L'_q p & -M'_{Fd} p\theta \\ F & M'_{Fd} p & 0 & r_F + L'_F p \end{array}. \qquad (4)$$

Ввиду громоздкости матрицы импеданса $[z']$ после исключения короткозамкнутых демпферных контуров и неудобств её размещения в тексте статьи, приведем ряд выражений для отдельных фрагментов компонент этой матрицы в виде

$$L'_d = \left(L_d - \frac{M_{Dd}^2 p}{r_D + L_D p}\right), \quad L'_q = \left(L_q - \frac{M_{Qq}^2 p}{r_Q + L_Q p}\right),$$
$$M'_{Fd} = \left(M_{Fd} - \frac{M_{DF} M_{Dd} p}{r_D + L_d p}\right), \quad L'_F = \left(L_F - \frac{M_{DF}^2 p}{r_D + L_D p}\right). \qquad (5)$$

Подставив в (4) соответствующие фрагменты из (5), можно получить матрицу переходного полного сопротивления рассматриваемой машины в развернутом виде с учетом активных сопротивлений демпферных обмоток.

Любую несимметричную матрицу, подобную (4), всегда можно представить в виде суммы симметричных и кососимметричных матриц. Представим таким способом матрицу (4), разделив дополнительно симметричную часть её на три отдельных матрицы, а кососимметричную часть на две матрицы. В результате выразим $[z']$ суммой следующих пяти матриц:

$$
\begin{array}{c|ccc}
 & d & q & F \\
\hline
d & r_d + L'_d p & & M'_{Fd} p \\
q & & r_q + L'_q p & \\
F & M'_{Fd} p & & r_F + L'_F p
\end{array}
+\frac{1}{2}\cdot
\begin{array}{c|ccc}
 & d & q & F \\
\hline
d & & & \\
q & & & -M'_{Fd} p\theta \\
F & & -M'_{Fd} p\theta &
\end{array}
+
$$

$$
+\frac{1}{2}\cdot
\begin{array}{c|ccc}
 & d & q & F \\
\hline
d & & (L'_q - L'_d) p\theta & \\
q & (L'_q - L'_d) p\theta & & \\
F & & &
\end{array}
+\frac{1}{2}\cdot
\begin{array}{c|ccc}
 & d & q & F \\
\hline
d & & & \\
q & & & -M'_{Fd} p\theta \\
F & & M'_{Fd} p\theta &
\end{array}
+
$$

$$
+\frac{1}{2}\cdot
\begin{array}{c|ccc}
 & d & q & F \\
\hline
d & & (L'_q + L'_d) p\theta & \\
q & -(L'_q + L'_d) p\theta & & \\
F & & &
\end{array}
, \quad [Z''] =
\begin{array}{c|ccc}
 & d & q & F \\
\hline
d & & & \\
q & & & \mp Z \\
F & & \mp Z &
\end{array}
.
$$

Каждая и этих пяти матриц может быть сопоставлена отдельному шестиполюснику. Шестиполюсники, соединенные последовательно, образуют топологическую модель синхронной машины (рис. 2). Она соответствует импедансу (4).

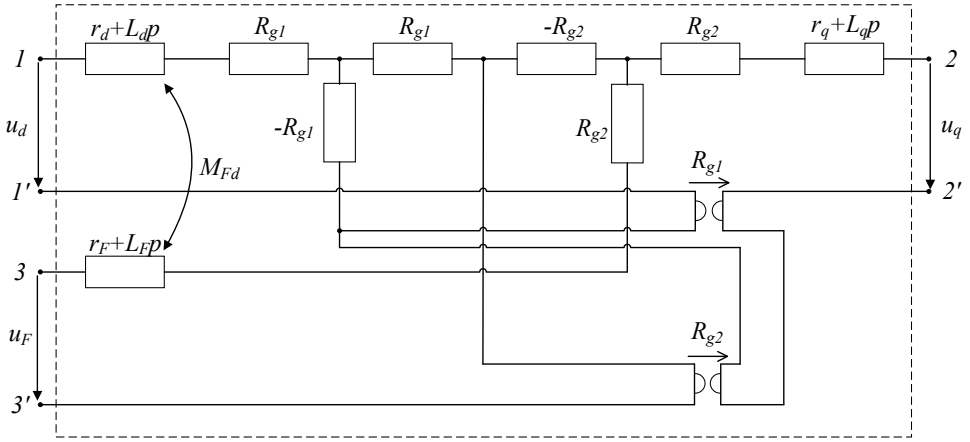


Рис. 2. Топологическая модель синхронной машины, соответствующая импедансу (4)

Модель включает два гиратора, сопротивления гирации которых обозначены на схеме через $R_{g1} = 1/2(L'_d - L'_q)p\theta$ и $R_{g2} = 1/2M'_{Fd}p\theta$. Матрицы типа Z'' (показана выше рядом с пятой матрицей модели) реализуются с помощью Т-образной схемы с поперечным отрицательным сопротивлением. Полученная модель может объединяться со схемами замещения других устройств энергосистем и использоваться при проведении аналитических исследований.

Расчет цепей с гираторами и другими схемными элементами на основе теории электрических цепей подробно рассмотрен в [7, 8]. Физическая интерпретация и реализация топологических моделей с гираторами для конкретных объектов и анализа их режимов работы требуют специального рассмотрения. Наиболее просто реализовать такие модели можно, например, для установившихся режимов симметричной двухфазной асинхронной машины и синхронной машины с равномерным воздушным зазором без демпферных контуров, импедансы которых в осях *d, q* имеют вид

$$[z'] = \begin{array}{c|c|c} & d & q \\ \hline d & Z_S & -\dfrac{X_M^2 jvr_r}{\Delta} \\ \hline q & \dfrac{X_M^2 jvr_r}{\Delta} & Z_S \end{array}, \quad [z'] = \begin{array}{c|ccc} & d & q & F \\ \hline d & R & X_d & \\ q & -X_d & R & -X_d \\ F & & & R_F \end{array}.$$

Поскольку для асинхронной машины единственной возбуждающей функцией являются приложенные симметричные фазные напряжения, изменяющиеся с угловой частотой ω, то матрица импеданса в установившемся режиме получается после исключения короткозамкнутых роторных контуров с помощью замен: $p = d/dt = j\omega$, $p\theta = \dot{\theta} = v\omega$, а также индуктивностей и взаимных индуктивностей на сопротивления $\omega L = X$, $\omega M = X_M$. Величина $\Delta = (r_r + jx_r)^2 + (vx_r)^2$, а сопротивление Z_S вычисляется по формуле $Z_S = r_s + jx_s + \dfrac{X_M^2}{\Delta}[r_r + j(1-v^2)x_r]$, индексы *s* и *r* относятся к статору и ротору соответственно. Аналогичные замены проведены и для синхронной машины. Обратим особое внимание на то, что для исследования переходных процессов сопротивления гирации гираторов пропорциональны $p\theta$ и, следовательно, при изменении скорости ротора машины оно должно быть переменным.

Основная трудность практического построения схем с гираторами заключается непосредственно в физической реализации самих этих элементов. Такая реализация не требуется для расчетов на ЭЦВМ, но она важна при использовании аналоговых устройств переменного тока. Гиратор можно реализовать на основе схемы двух источников тока, включенных встречно параллельно. Существует также возможность и ряда способов физической реализации гираторов с помощью операционных усилителей с дифференциальным входом, например, для создания искусственных индуктивных элементов с высокой добротностью [9].

С помощью гираторов могут синтезироваться многополюсники с различными своеобразными свойствами. Так, каскадное соединение двух иде-

альных гираторов образует идеальный трансформатор, а соединение гиратора с сопротивлением $R = R_g$ – вентиль мощности (энергии) [6].

Выводы. 1. На основе уравнений трехфазной синхронной машины в системе координат *d, q*, 0 построена топологическая модель с применением гираторов – схемных элементов электрических цепей.

2. Разработанная модель, раскрывающая дополнительную информацию о сложных системах, содержащуюся в их уравнениях состояния в неявной форме, повышает эффективность решения режимных задач на ЭВМ методом диакоптики.

3. Показаны возможные способы физической реализации гираторов при моделировании.

Литература

1. *Ван дер Варден Б.Л.* Алгебра: пер. с нем. М.: Мир, 1976. 648 с.

2. *Воронов П.Л.* Разработка и реализация методик и алгоритмов расчета по частям симметричных и несимметричных режимов систем электроснабжения: дис. … канд. техн. наук. Чебоксары, 2019. 258 с.

3. *Воронов П.Л.* Особенности применения матриц преобразования и уравнений связи при анализе несимметричных повреждений // Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2018. Т. 18, № 1. С. 27–37.

4. *Ионкин П.А., Миронов В.Г.* Синтез RC-схем с активными невзаимными элементами (вопросы реализации). М.: Энергия, 1976. 240 с.

5. *Крон Г.* Исследование сложных систем по частям – диакоптика / пер. с англ. Л.Я. Банах, А.В. Власова, И.А. Павлова и др.; под ред. А.В. Баранова. М.: Наука, 1972. 542 с.

6. *Милях А.М., Шидловский А.К.* Принцип взаимности и обратимость явлений в электротехнике. Киев: Наукова думка, 1967. 316 с.

7. *Миронов В.Г.* Методы и алгоритмы оптимального проектирования микроэлектронных частотно-избирательных цепей: дис. … д-ра техн. наук. М., 1984. 375 с.

8. *Сигорский В.П., Петренко А.И.* Алгоритмы анализа электронных схем. М.: Советское радио, 1976. 608 с.

9. *Соколов Н.И., Миронов В.Г., Щедрин В.А.* Искусственные индуктивности для расчетных моделей переменного тока // Электричество. 1970. № 6. С. 78–80.

10. *Уайт Д., Вудсон Г.* Электромеханическое преобразование энергии / пер. с англ. Н.Ф. Ильинского и др.; под ред. С.В. Страхова. М.: Энергия, 1964. 528 с.

11. *Хэпп Х.* Диакоптика и электрические цепи. М.: Мир, 1974. 344 с.

12. *Щедрин В.А., Воронов П.Л.* Применение метода преобразования координат к анализу электрических сетей с распределенными источниками энергии // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. 11. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. С. 42–65.

13. *Щедрин В.А., Воронов П.Л.* Двойственность и ортогональность электрической цепи // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. 10. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. 2014. С. 94–109.

14. *Kron G.* Tensors for Circuits (Formerly entitled A Short Course in Tensor Analysis for Electrical Engineers). N.Y., Dover Publ., Inc., 1959, 250 p.

15. *Tellegen B.D.H.* The gyrator, a new electric network element. *Philips Res. Rep*., 1948, vol. 3, pp. 81–101.

ВОРОНОВ ПАВЕЛ ЛЕОНИДОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (plv911@mail.ru).

ЩЕДРИН ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары.

P. VORONOV, V. SHCHEDRIN

TOPOLOGICAL MODEL OF A SYNCHRONOUS MACHINE ON THE BASIS OF APPLICATION OF THE SCHEME OF THE ELECTRIC CIRCUIT – GIRATOR

Ключевые слова: *synchronous machine, substitution scheme, coordinate transformation, transformation matrix, impedance tensor, diacoptics, gyrator.*

The search for a single basis for effective and systematic analysis and research of complex devices of electrical and electric power systems using tensor-topological methods has led to the need for simultaneous use of two sources of information: equations of state (motion) and substitution schemes, or more general topological models constructed for these physical objects. Electrical models in the form of substitution schemes, widely used in practice as a means of composing equations and combining them with vector diagrams, proved to be convenient for visual representation of tensors and multidimensional spaces of the analyzed systems. The graph of an electric circuit and the algebraic structure superimposed on it in the form of Kirchhoff's laws, expressing the relationship between its currents and voltages, became the simplest topological model. Tensor equations that establish the relationship between the parameters of an unexcited electrical system and the variables (electromagnetic mode parameters) of an excited system, combined it into a complete object and identified it as a physical system and its model, thus allowing not only to make equations of state (motion) of any complex systems, but also to justify and develop a new effective way of solving them in parts, called the diacoptic method. The article proposes a topological model for a synchronous single-pole machine in rotating coordinates, including the gyrator circuit element, and shows one of the possibilities of physical implementation of such a model.

Литература

1. Waerden B. L. van der. Moderne algebra. Berlin. Verlag von Julius Springer, 1930 (Russ. ed.: *Algebra*. Moscow, Mir Publ., 1976, 648 p.).

2. Voronov P.L. *Razrabotka i realizatsiya metodik i algoritmov rascheta po chastyam simmetrichnykh i nesimmetrichnykh rezhimov sistem elektrosnabzheniya: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development and implementation of methods and algorithms for calculating parts of symmetrical and asymmetrical modes of electricity supply systems. Cand. Diss.]. Cheboksary, 2019, 258 p.

3. Voronov P.L. *Osobennosti primeneniya matrits preobrazovaniya i uravnenii svyazi pri analize nesimmetrichnykh povrezhdenii* [On using trasformation matrices and constraint equations for analysis of non-symmetric faults]. *Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Energetika*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 27–37.

4. Ionkin P.A., Mironov V.G. *Sintez RC-skhem s aktivnymi nevzaimnymi elementami (voprosy realizatsii)* [Synthesis of RC schemes with active non-reciprocal elements (implementation issues)]. Moscow, Energiya Publ., 1976, 240 p.

5. Kron G. Diakoptics: The Piecewise Solution of Large-Scale Systems, Macdonald and Co., London, UK, 1963 (Russ. ed.: *Issledovanie slozhnykh sistem po chastyam – diakoptika*. Moscow, Nauka Publ., 1972, 544 p.).

6. Milyakh A.M., Shidlovskii A.K. *Printsip vzaimnosti i obratimost' yavlenii v elektro-tekhnike* [The principle of reciprocity and reversibility of phenomena in electrical engineering]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1967, 316 p.

7. Mironov V.G. *Metody i algoritmy optimal'nogo proektirovaniya mikroelektronnykh chastotno-izbiratel'nykh tsepei: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Methods and algorithms for optimal design of microelectronic frequency-selective chains. Doct. Diss.]. Moscow, 1984, 375 p.

8. Sigorskii V.P., Petrenko A.I. *Algoritmy analiza elektronnykh skhem* [Electronic circuit analysis algorithms]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1976, 608 p.

9. Sokolov N.I., Mironov V.G., Shchedrin V.A. *Iskusstvennye induktivnosti dlya raschetnykh* modelei peremennogo toka [Artificial inductives for calculated AC models]. Elektrichestvo, 1970, no. 6, pp. 78–80.

10. White D.C., Woodson H.H. Electromechanical energy conversion. New York, Wiley, 1959 (Russ. ed.: *Elektromekhanicheskoe preobrazovanie energii*. Moscow, Energiya Publ., 1964, 528 p.).

11. Happ H.H. Diakoptics and hetworks. New York, London, Academic Press, Inc., 1971 (Russ. ed*.: Diakoptika i elektricheskie tsepi*. Moscow, Mir Publ., 1974, 344 p.).

12. Shchedrin V.A., Voronov P.L. *Primenenie metoda preobrazovaniya koordinat k analizu elektricheskikh setei s raspredelennymi istochnikami energii* [Applying the method of converting coordinates to the analysis of electrical networks with distributed energy sources]. In: *Regional'naya energetika i elektrotekhnika: problemy i resheniya: sb. nauch. tr. Vyp. 11*. [Regional energy and electrical engineering: problems and solutions: a collection of scientific works. Iss. 11]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2015, pp. 42–65.

13. Shchedrin V.A., Voronov P.L. *Dvoistvennost' i ortogonal'nost' elektricheskoi tsepi* [The duality and orthogonality of the electrical circuit]. In: *Regional'naya energetika i elektrotekh-nika: problemy i resheniya: sb. nauch. tr. Vyp. 10* [Regional energy and electrical engineering: problems and solutions: a collection of scientific works. Iss. 10]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2014, pp. 94–109.

14. Kron G. Tensors for Circuits (Formerly entitled A Short Course in Tensor Analysis for Electrical Engineers). N.Y., Dover Publ., Inc., 1959, 250 p.

15. Tellegen B.D.H. The gyrator, a new electric network element. *Philips Res. Rep*., 1948, vol. 3, pp. 81–101.

VORONOV PAVEL – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Power Supply and Intelligent Power Systems named after A.A. Fedorov, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (plv911@mail.ru).

SHCHEDRIN VLADIMIR – Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Power Supply and Intelligent Power Systems named after name A.A. Fedorov, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

Формат цитирования: *Воронов П.Л., Щедрин В.А*. Топологическая модель синхронной машины на основе применения схемного элемента электрической цепи – гиратора // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 78–88.

УДК 621.382.026
ББК 3852.3

О.А. ДАНИЛОВ, А.Л. ИВАНОВ, С.А. ИЛЬИН, В.М. НИКИТИН,
А.Н. СЕМЕНОВ, Л.А. СЕМЕНОВ, А.В. ШЕПЕЛИН

СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ПОЛУМОСТОВОЙ ТРАНЗИСТОРНОЙ СХЕМЕ

Ключевые слова: *полумост из транзисторов с антипараллельными диодами, переключение жесткое и при нулевом напряжении, электромагнитная совместимость, реактивные согласующие элементы, квазирезонансный режим переключения.*

В статье рассмотрен один из способов уменьшения динамических потерь при переключении силовых транзисторов в полумостовой схеме, а также алгоритм и схемная реализация, позволяющие выполнять переход из одного устойчивого состояния полумоста в другое в квазирезонансном режиме – с использованием реактивных согласующих элементов. Этим обеспечиваются комфортные условия переключения как для выключаемого, так и для включаемого транзистора, что повышает надежность и КПД преобразователя, снижает его массу и габариты. Приведены результаты работы усовершенствованной схемы, реализованной на транзисторных модулях собственной разработки, установленных в электроприводе. Частота ШИМ 33 кГц, мощность управляемого синхронного двигателя 150 кВт.

Полумост (ПМ) из двух транзисторов с антипараллельными диодами в виде конструктивного модуля широко используется в схемах полупроводниковых преобразователей (рис. 1). С его помощью наиболее просто реализуется режим чередования потенциала выхода ПМ (DC+ или DC–) и регулирования (в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ)) среднего напряжения на выходе преобразователей.

Управление состоянием ключей полумоста обеспечивается с помощью драйверов, при этом находят применение два способа коммутации: «жесткой» и при нулевом напряжении на полупроводниковом ключе. При «жесткой» коммутации запирание открытого и затем отпирание закрытого транзисторов ПМ сопровождаются интервалами времени, в течение которых одновременно через транзистор течет ток нагрузки и (или) сквозной ток восстановления диода и (какое-то время) сохраняется напряжение на переходе эмиттер/коллектор или сток/исток, примерно равное разности потенциалов *V_DC* (рис. 1). Другими словами, в моменты каждого такого переключения транзисторы ПМ кратковременно оказываются в линейном режиме вследствие неидеальности переключательных свойств. Такие повторяющиеся с двойной частотой ШИМ всплески мощности выделяются в виде тепла на транзисторе и называются «динамическими» потерями. С ростом частоты ШИМ они становятся значительными, приводя к дополнительному и существенному нагреву модуля, а значит, и к необходимости увеличения размеров охладителя.

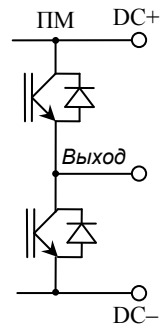


Рис. 1. ПМ из двух транзисторов с антипараллельными диодами

Другим недостатком «жесткого» переключения являются большие производные напряжений на ключах и токов ключей. Этот факт в сочетании с наличием паразитных индуктивностей конструкции тоководов приводит к возникновению опасных для полупроводников всплескам напряжения с последующим их долгим затуханием. Соответственно, это приводит к наличию сильного электромагнитного излучения, ухудшению электромагнитной совместимости изделия. В конечном итоге все сказанное становится причиной снижения надежности изделия в целом [3].

Существуют способы, позволяющие если не полностью, то в значительной мере уменьшить недостатки, присущие схемам, с «жестким» переключением транзисторов. Наиболее распространенным способом борьбы со всплесками напряжения является искусственное затягивание переключения транзисторов, например, путем простого увеличения последовательного сопротивления в цепи затвора в расчете на эффект Миллера. Однако получаемые улучшения сопровождаются ростом тепловых потерь, что на больших частотах ШИМ недопустимо.

Принципиально иным является способ переключения при нулевом напряжении (ZVS – Zero Voltage Switching).

Наиболее простой случай характеризуется наличием значительного внешнего тока транзисторов ПМ, который надо разорвать. Требование коммутации при нулевом напряжении при этом обеспечивается путем простого подсоединения параллельно транзистору ПМ конденсатора: он перехватывает на себя ток транзистора ПМ, не позволяя значительно подняться напряжению на время спада тока транзистора ПМ. Соответственно, незначительным становится выделение импульсной мощности потерь. Далее под действием внешнего тока напряжение плавно нарастает уже на закрытом транзисторе ПМ и доходит до противоположного уровня DC, обеспечивая включение противоположного транзистора ПМ при нулевом напряжении. Затем внешний ток меняется на противоположный, обеспечивая вышеописанный процесс в обратном направлении.

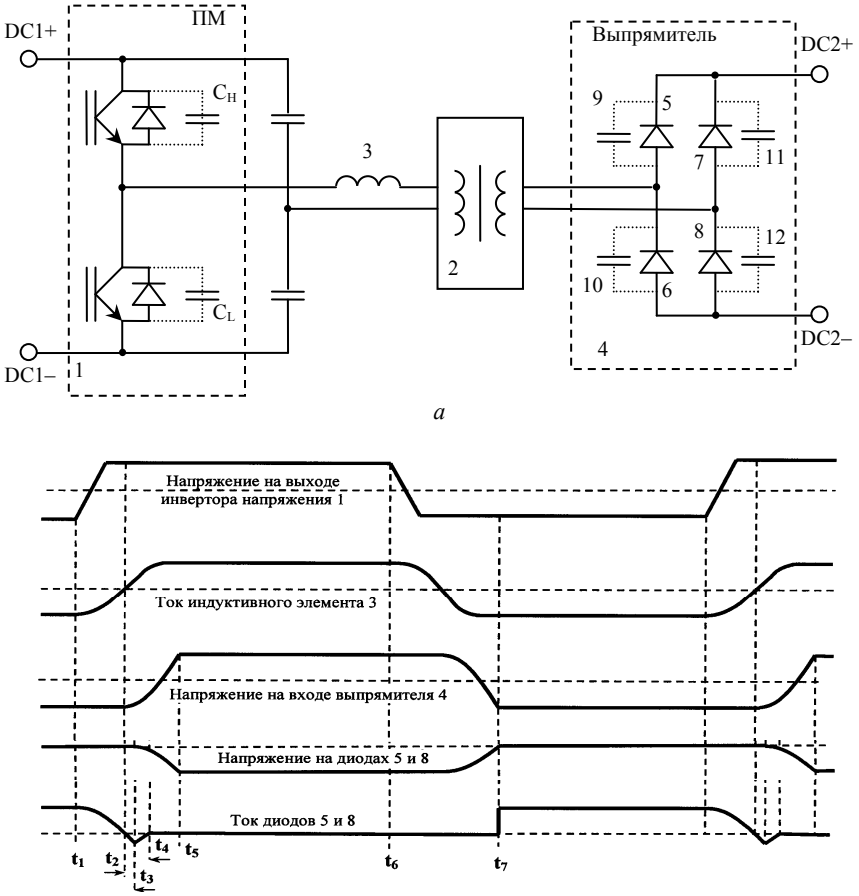
Подобный режим характерен для схем, известных в литературе как автономные инверторы тока. Пример такой схемы – DC/DC преобразователь – показан на рис. 2, *а* [1]. Конденсаторы C_H и C_L шунтируют транзисторы ПМ, обеспечивая выключение последних при нулевом напряжении (рис. 2, *б*). При этом конденсаторы 9–12 обеспечивают восстановление диодов 5–8 выпрямителя 4 также при нулевом напряжении (рис. 2, *б*).

Более сложным оказывается случай, когда внешний ток после переключения сохраняет направление.

В режиме «жесткого» переключения в этом случае имеют место сквозные токи, определяемые процессом «рассасывания» носителей зарядов в структуре восстанавливающегося диода.

В режиме коммутации при нулевом напряжении на одном из двух интервалов ШИМ возникает необходимость в «перетягивании» тока из антипараллельного диода открытого транзистора во вспомогательную цепь. Это услож-

няет переключение и требует установки дополнительного устройства (ДУ) или по-другому – устройства обнуления напряжения. Поскольку такая ситуация складывается и с другим направлением тока, то ДУ должно быть ещё и двунаправленным или содержать две разнонаправленные цепи. Например, в преобразователях синусоидальной формы выходного напряжения (в электроприводах) частота смены тока составляет всего лишь десятки или даже единицы Гц, а частота ШИМ – несколько кГц или более, т.е. несколько тысяч периодов ШИМ внешний ток течет в одном направлении, а потом такое же количество – в обратном.

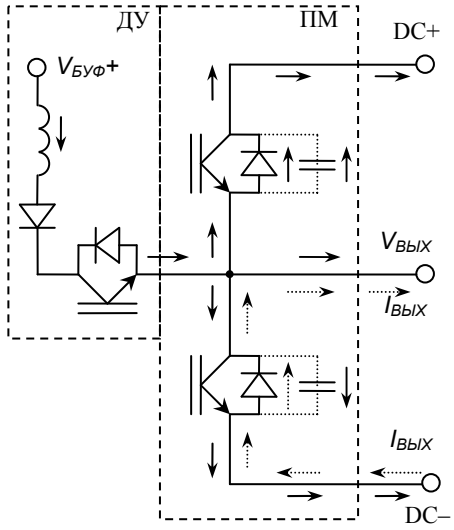


а

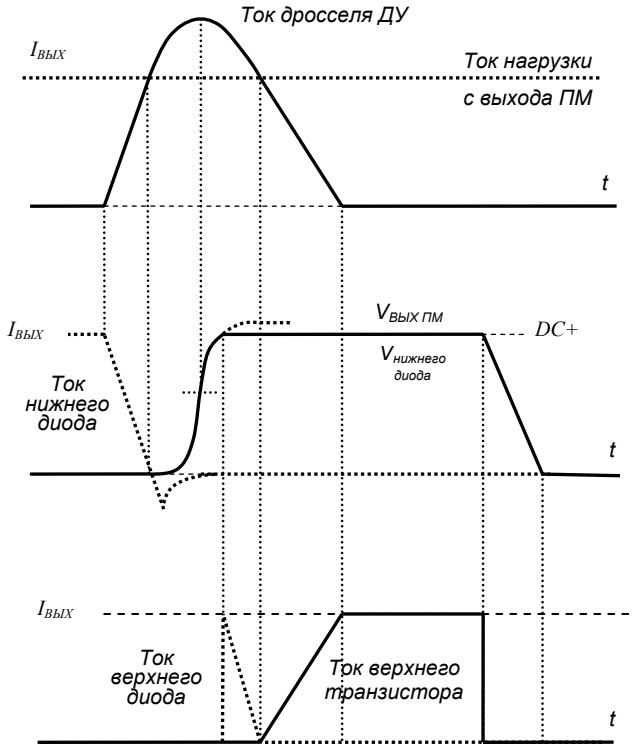
б

Рис. 2. DC/DC преобразователь:
а – принципиальная схема;
б – графики токов и напряжений элементов схемы

Одним из вариантов ДУ является подключение средней точки ПМ через дроссель к источнику напряжения (энергетическому буферу $V_{БУФ}+$) с помощью ключа на время проведения процесса переключения – рис. 3, *а* и *б* [2].



а



б

Рис. 3. Принцип работы дополнительного устройства:
а – принципиальная схема;
б – осциллограммы токов и напряжений элементов схемы

Из представленных на рис. 3, *б* осциллограмм видно, что для всех полупроводников в составе ключей ПМ (включая диоды) произведение тока на напряжение (мощность, выделяемая на ключе в виде тепла) значительно меньше аналогичной величины для «жесткого» переключения, где пиковая мощность часто достигает предельной величины ($V_{DC} \cdot I_{ПИК}$). Другими словами, в режиме переключения при нулевом напряжении предельные ток и напряжение «разнесены» во времени.

Необходимо отметить, что и величина dV/dt значительно снижена по сравнению с аналогом в режиме «жесткого» переключения. Это обеспечивает лучшую внешнюю электромагнитную совместимость преобразователя, практически устраняет «выбросы» напряжения на выходе ПМ и уменьшает внутренние наводки на собственные элементы схемы.

Частным случаем реализации вышеописанного способа переключения при нулевом напряжении является схема, представленная на рис. 4 [4, 5]. В качестве буферного элемента (источника) выступает автотрансформатор.

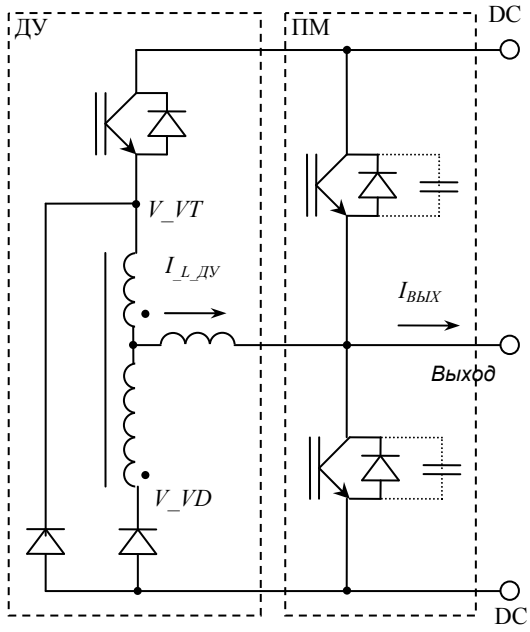


Рис. 4. Вариант дополнительного устройства [4, 5]

Однако схема на рис. 4 имеет недостатки в виде насыщения автотрансформатора при работе в крайних режимах ШИМ, а также в виде увеличенного напряжения до двойного напряжения DC на силовом диоде ДУ.

В АО «ЧЭАЗ» разработан и реализован на практике более надежный вариант обсуждаемой схемы без указанных недостатков. В качестве иллюстрации на рис. 5 представлены осциллограммы работы одного из фазных ПМ электропривода с синхронным двигателем мощностью 150 кВт, работающего на частоте 33 кГц.

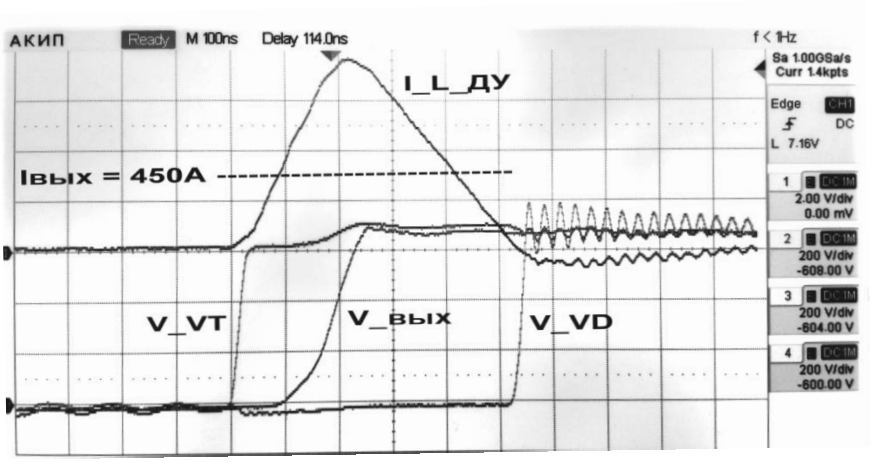


Рис. 5. Осциллограммы работы наиболее экономичного варианта дополнительного устройства
в составе полумостов электропривода мощностью 150 кВт

Выходной ток $I_{ВЫХ}$ в момент регистрации составил 450А. Пиковый ток $I_{\_L\_ДУ}$ дросселя ДУ достиг 1100 А. $V_{\_VT}$ $V_{\_VD}$ – напряжения на транзисторном и диодном концах автотрансформатора, соответственно. Напряжение в звене постоянного тока трёхфазного инвертора при этом было 630 В. Видно, что нет удвоенного напряжения DC ($V_{\_VD}$) на силовом диоде ДУ.

Цена делений: 100 нс, 300А и 200 В.

Отсутствие колебаний («дребезга») на фронте выходного напряжения $V_{\_ВЫХ}$ (на средней точке ПМ) свидетельствует об удовлетворительной топологии размещения чипов и соединительных шин внутри корпуса модуля с точки зрения минимизации паразитных индуктивностей элементов конструкции.

Преобразователь выполнен на полумостовых модулях собственной разработки на основе запатентованной топологии. В качестве ключей применены чипы SiC-транзисторов CPM212000025B (1200 В, 25 мОм) фирмы Cree. Модули изготовлены на предприятии ОАО «НПО «Энергомодуль».

Управление скоростью электродвигателя – бездатчиковое, с коэффициентом мощности, равным единице (наиболее экономичный режим и для двигателя).

Значительными достижениями способа следует считать:

– возможность использования высокой частоты ШИМ (33 кГц);

– высокое качество выходного синусоидального напряжения (спектр гармоник сместился в зону частот 33 кГц и выше);

– уменьшенные габариты радиаторов и синусных фильтров;

– высокий КПД;

– низкие значения шума.

Полученные результаты поставили на повестку дня вопрос о необходимости разработки низкоиндуктивных модулей и новых конструкций для преобразователей, позволяющих работать на частотах в десятки и сотни кГц.

Литература

1. Пат. 2354033 РФ, (51) МПК H02M 3/335 (2006.01). (Квази-)резонансный преобразователь постоянного напряжения с пониженными коммутационными потерями / А.Л. Иванов, Ан.В. Шепелин. № 2008105089/09; заявл. 11.02.2008 г.; опубл. 27.04.2009 г., Бюл. № 12.

2. Пат. 2307441 РФ, (51) МПК H02M 1/16 (2006.01). Способ снижения динамических потерь в преобразователях электроэнергии / Ан.В. Шепелин, А.Л. Иванов, Ал.В. Шепелин. № 2006100572/09; заявл. 10.01.2006 г.; опубл. 27.09.2007 г., Бюл. № 27.

3. *Югай В.В.* Исследование инверторов в мультирезонансном режиме при мягких коммутациях транзисторов. 5D 071900: дис. … д-ра философии (PhD). Алматы, 2015.

4. *Reichl J., Lai J., Hefner A., Ortiz-Rodríguez J.M., Duong T.* Design Optimization of Hybrid-Switch Soft-Switching Inverters Using Multiscale Electrothermal Simulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, no. 1, pp. 503–514.

5. *Wensong Yu, Jih-Sheng Lai, Sung-Yeul Park*. An Improved Zero-Voltage-Switching Inverter Using Two Coupled Magnetics In One Resonant Pole. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, vol. 25, pp. 952–961. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2030197.

ДАНИЛОВ ОЛЕГ АНАТОЛЬЕВИЧ – ведущий инженер-конструктор отдела электропривода и преобразовательной техники, АО «ЧЭАЗ», Россия, Чебоксары (cheaz@cheaz.ru).

ИВАНОВ АНАТОЛИЙ ЛЕОНИДОВИЧ – главный специалист отдела электропривода и преобразовательной техники, АО «ЧЭАЗ», Россия, Чебоксары (cheaz@cheaz.ru).

ИЛЬИН СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ – инженер-конструктор 2-й категории отдела электропривода и преобразовательной техники, АО «ЧЭАЗ», Россия, Чебоксары (cheaz@cheaz.ru).

НИКИТИН ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела электропривода и преобразовательной техники, АО «ЧЭАЗ», Россия, Чебоксары (cheaz@cheaz.ru).

СЕМЕНОВ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ – ведущий инженер-конструктор отдела электропривода и преобразовательной техники, АО «ЧЭАЗ», Россия, Чебоксары (cheaz@cheaz.ru).

СЕМЕНОВ ЛЕВ АНАНЬЕВИЧ – инженер-конструктор 2-й категории отдела электропривода и преобразовательной техники, АО «ЧЭАЗ», Россия, Чебоксары (cheaz@cheaz.ru).

ШЕПЕЛИН АНДРЕЙ ВИТАЛЬЕВИЧ – кандидат физико-математических наук, главный специалист отдела электропривода и преобразовательной техники, АО «ЧЭАЗ», Россия, Чебоксары (cheaz@cheaz.ru).

O. DANILOV, A. IVANOV, S. ILYIN, V. NIKITIN, A. SEMENOV, L. SEMENOV, A. SHEPELIN

METHOD FOR REDUCING DYNAMIC LOSSES IN THE HALF-BRIDGE SCHEME

Key words: *half-bridge of transistors with antiparallel diodes, rigid switching and at zero voltage, electromagnetic compatibility, reactive matching elements, quasi-resonant switching mode.*

The article considers one of the ways to reduce dynamic losses when switching power transistors in a half-bridge circuit, as well as an algorithm and a circuit implementation that allows performing the transition from one stable state of the half-bridge to another in a quasi-resonant mode using reactive matching elements. This ensures comfortable switching conditions for both switched-off and switched-on transistors, which increases reliability and efficiency, and reduces mass and dimensions. The article presents the results of experimental testing of an improved circuit implemented using transistor modules of the author`s own design installed in the electric drive. The switching frequency is 33 kHz, the power of controlled synchronous motor is 150 kW.

References

1. Ivanov, A.L., Shepelin An.V. *(Kvazi-)rezonansnyi preobrazovatel' postoyannogo napryazheniya s ponizhennymi kommutatsionnymi poteryami* [(Quasi-)resonant permanent voltage converter with reduced switching losses]. Patent RF, no. 2354033, 2009.

2. Shepelin An.V., Ivanov, A.L., Shepelin Al.V. *Sposob snizheniya dinamicheskikh poter' v preobrazovatelyakh elektroenergii* [How to reduce dynamic losses in electricity converters]. Patent RF, no. 2307441, 2007.

3. Yugai V.V. *Issledovanie invertorov v mul'tirezonansnom rezhime pri myagkikh kommutatsiyakh tranzistorov. 5D 071900: dis. ... d-ra filosofii (PhD)* [Study of inverters in multi-resonance mode with soft switching transistors. 5D 071900. PhD Diss.]. Almaty, 2015.

4. Reichl J., Lai J., Hefner A., Ortiz-Rodríguez J.M., Duong T. Design Optimization of Hybrid-Switch Soft-Switching Inverters Using Multiscale Electrothermal Simulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, no. 1, pp. 503–514.

5. Wensong Yu, Jih-Sheng Lai, Sung-Yeul Park. An Improved Zero-Voltage-Switching Inverter Using Two Coupled Magnetics In One Resonant Pole. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, vol. 25, pp. 952–961. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2030197.

DANILOV OLEG – Leading Design Engineer, Department of Electric Drives and Converting Technology, CHEAZ Group, Russia, Cheboksary (cheaz@cheaz.ru).

IVANOV ANATOLIY – Chief Specialist, Department of Electric Drives and Converting Technology, CHEAZ Group, Russia, Cheboksary (cheaz@cheaz.ru).

ILYIN SERGEY – Design Engineer of the 2nd Category, Department of Electric Drives and Converting Technology, CHEAZ Group, Russia, Cheboksary (cheaz@cheaz.ru).

NIKITIN VLADIMIR – Candidate of Technical Sciences, Deputy Head, Department of Electric Drives and Converting Technology, CHEAZ Group, Russia, Cheboksary (cheaz@cheaz.ru).

SEMENOV ANDREY – Leading Design Engineer, Department of Electric Drives and Converting Technology, CHEAZ Group, Russia, Cheboksary (cheaz@cheaz.ru).

SEMENOV LEV – Design Engineer of the 2nd Category, Department of Electric Drives and Converting Technology, CHEAZ Group, Russia, Cheboksary (cheaz@cheaz.ru).

SHEPELIN ANDREY – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Chief Specialist Design Engineer of the 2nd Category, Department of Electric Drives and Converting Technology, CHEAZ Group, Russia, Cheboksary (cheaz@cheaz.ru).

Формат цитирования: *Данилов О.А., Иванов А.Л., Ильин С.А., Никитин В.М., Семенов А.Н., Семенов Л.А., Шепелин А.В*. Способ снижения динамических потерь в полумостовой транзисторной схеме // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 89–96.

УДК 621.316
ББК 31.2

Д.В. МОИСЕЕВ, Н.А. ГАЛАНИНА, Н.Н. ИВАНОВА

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АНАЛИЗА РАБОТЫ ФУНКЦИЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ О МЕСТЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ*

Ключевые слова: *система релейной защиты и автоматики, цифровая централизованная система релейной защиты и автоматики, экспресс-анализ аварийных режимов, система диагностики устройств релейной защиты и автоматики, цифровая подстанция, определение места повреждения, функция релейной защиты и автоматики, цифровой регистратор аварийных событий.*

Одним из перспективных направлений развития технологий релейной защиты является создание централизованной системы релейной защиты и автоматики. При этом актуальной является также задача разработки аппаратно-программного комплекса диагностики данной системы, который позволит улучшить селективность, быстродействие, чувствительность и надежность работы релейной защиты. Цель данного исследования – разработка алгоритмов анализа работы функций релейной защиты и автоматики с использованием полученных данных о месте повреждения, а также создание опытного образца программного комплекса для реализации экспресс-анализа аварийных режимов энергосистемы для определения места повреждения и формирования протокола по его результатам. В статье приведена схема диагностики устройств релейной защиты и автоматики на основе расчетов алгоритма определения места повреждения. С учетом данных, полученных в результате работы алгоритма определения места повреждения, были рассмотрены и проанализированы следующие виды защит: 1) максимальная токовая защита; 2) токовая защита нулевой последовательности; 3) защита минимального напряжения; 4) дистанционная защита; 5) направленная высокочастотная защита. Разработаны алгоритмы расчета пуска и срабатывания этих защит по определению места повреждения. В статье приведены соответствующие блок-схемы. Полученные алгоритмы были использованы при создании опытного образца программного комплекса для реализации экспресс-анализа аварийных режимов энергосистемы по определению места повреждения и формирования протокола по результатам анализа, который может быть использован в реальных электроэнергетических системах.

Создание централизованной системы релейной защиты и автоматики (РЗА) является одним из возможных перспективных направлений развития технологий релейной защиты [2]. Развитие новых технологий требует повышенного внимания к вопросам сохранения и улучшения уровня работы релейной защиты (ее селективности, быстродействия, чувствительности, надежности), поэтому разработка системы диагностики централизованной системы РЗА является актуальной задачей. Одной из ее подзадач является экспресс-анализ аварийных событий электрической системы на основе данных, полученных в результате работы алгоритма определения места повреждения (ОМП).

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Чувашской Республики в рамках научного проекта № 19-48-210005 р_а.

Цель данного исследования – разработка алгоритмов анализа работы функций РЗА с использованием полученных данных о месте повреждения, а также создание опытного образца программного комплекса для реализации экспресс-анализа аварийных режимов энергосистемы для ОМП и формирования протокола по его результатам.

Экспресс-анализ необходим для определения причин возникновения аварийных режимов энергообъекта, а также для оценки правильности работы устройств РЗА и противоаварийной автоматики (ПА) [3]. Полученные в ходе такого анализа данные позволят разработать комплекс мероприятий для предупреждения развития аварийного режима [5].

Процедура экспресс-анализа развития аварий на уровнях энергообъекта запускается после срабатывания функции фиксации автоматического отключения силового выключателя микропроцессорными устройствами РЗА. Источниками входной информации являются сигналы, получаемые из программного комплекса регистрации аварийных событий (ПК РАС), а также параметры функций РЗА, описанные стандартизированной моделью данных [10]. Взаимная интеграция энергетических систем может быть реализована на основе стандартов МЭК 61970 и МЭК 61968, в частности с использованием общих информационных моделей CIM (Common Information Model), которые широко применяются в мировой практике и поддерживаются различными существующими программными системами [6, 8]. Информационная CIM-модель энергосистемы содержит схему соединений первичного оборудования с описанием их параметров [11]. Другим вариантом описания модели данных является использование стандарта МЭК 61850-9-2LE, который является более предпочтительным, так как обмен информацией между вторичными устройствами и регистратором аварийных событий осуществляется по протоколу МЭК 61850-9-2LE (по шине процесса) [7].

Схема диагностики устройств РЗА на основе расчетов алгоритма ОМП представлена на рис. 1.

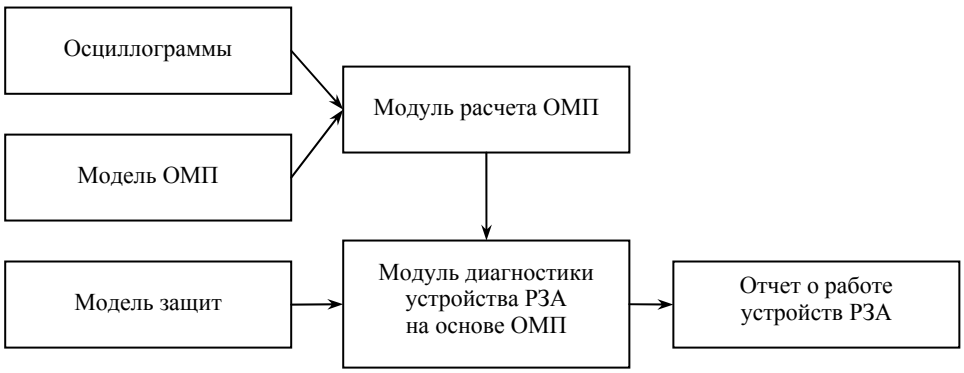


Рис. 1. Схема диагностики устройств РЗА на основе расчетов алгоритма ОМП

Осциллограммы, записанные цифровым регистратором аварийных событий (ЦРАС) в централизованной системе РЗА, и модель линии (модель ОМП) являются исходными данными для модуля расчета ОМП. Алгоритм диагностики устройств РЗА на основе данных, полученных в результате работы алгоритма ОМП, осуществляется после того, как ЦРАС сформирует соответствующую осциллограмму. Осциллограммы должны быть записаны в общепринятом формате регистрации осциллограмм переходных процессов (аварий) в энергосистемах COMTRADE. Модель ОМП описывает линию электропередачи (длину, активные и реактивные сопротивления участков линий, параметры параллельных линий и ответвлений и т.д.). Модуль расчета ОМП выдает следующие данные: расстояние до места повреждения, дату, время, вид короткого замыкания (КЗ) (однофазное, междуфазное, трехфазное, двухфазное на землю), особую фазу, действующие значения токов и напряжений при КЗ и в предаварийном режиме, углы между токами и напряжениями всех фаз, значения нулевой, прямой и обратной последовательностей токов и напряжений при КЗ.

По параметрам КЗ на линии электропередачи и модели защит (параметрам функций защит) производится анализ работы основных и резервных защит, которые контролируют данную линию. Результатом анализа является протокол экспресс-анализа аварийного режима [9].

Под работой защиты имеется в виду наличие пуска и срабатывания защиты. Пуском считается процесс определения нарушения нормального режима защищаемого оборудования [12]. Пуск защиты должен произойти, если выполнены все условия ее пусковых органов. Между блоками, отвечающими за пуск и срабатывание защиты, имеется логическая часть, представляющая собой схему, которая запускается пусковыми органами РЗА. Работа схемы заключается в отключении выключателей мгновенно или с выдержкой по времени, а также в запуске различных устройств и выполнении прочих предусмотренных действий [4].

С учетом данных, полученных в результате работы алгоритма ОМП, были рассмотрены и проанализированы следующие виды защит:

1) максимальная токовая защита;
2) токовая защита нулевой последовательности;
3) защита минимального напряжения;
4) дистанционная защита;
5) направленная высокочастотная защита.

Максимальная токовая защита (МТЗ). Все потребители электроэнергии подключаются к генераторному концу линии электропередачи через силовые выключатели. Устройства токовой защиты в постоянном режиме сканируют систему. Когда нагрузка в энергосети не превышает номинальной величины, т.е. режим ее работы соответствует нормальному, выключатель не срабатывает.

Выключатели срабатывают в следующих случаях:

1) возникает КЗ (в результате значение нагрузки в системе становится больше номинального, создаются токи, которые могут привести к возгоранию оборудования);

2) возникает перегрузка в сети из-за подключения дополнительных потребителей (либо по другим причинам) (в результате ток становится больше

допустимого значения, происходит нагрев оборудования и токоведущих частей системы);

3) происходит сдвиг фазы тока (в результате тока, проходящий через силовой выключатель, меняет направление).

В первом случае отключение необходимо производить максимально быстро. Во втором случае целесообразно отключать выключатель через некоторый промежуток времени, который позволит создать задержку в питании схемы, благодаря чему излишние нагрузки могут устраниться сами.

Во избежание негативных последствий, вызванных данными видами аварийных ситуаций, применяются такие виды электрозащиты, как токовая отсечка и максимальная токовая защита.

В состав систем для токовых защит ЛЭП с двусторонним питанием входят (рис. 2):

– измерительные трансформаторы тока (ТТ), которые предназначены для преобразования первичного тока во вторичный с заданным классом метрологической погрешности;

– реле тока, которые настраиваются на уставку срабатывания;

– схема коммутации, предназначенная для передачи вторичного тока от трансформаторов тока к реле с минимально допустимыми потерями.

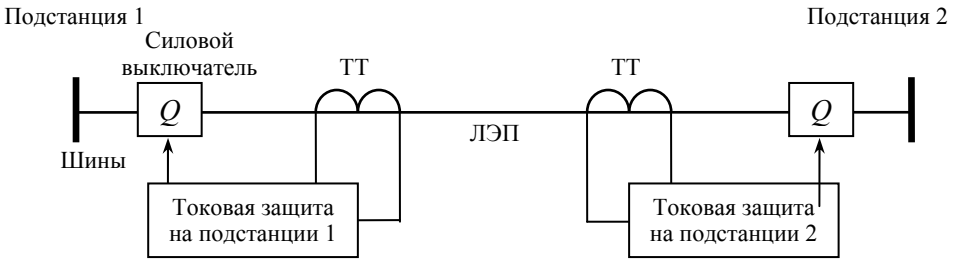


Рис. 2. Схема комплекса токовых защит ЛЭП с двухсторонним питанием

Токовая отсечка (ТО) позволяет максимально быстро осуществить ликвидацию КЗ, если они возникли ближе к началу рабочей зоны (минимум порядка 20% протяженности). При этом в отдельных случаях этот вид релейной защиты может применяться и для всей ЛЭП (рис. 3).

В состав релейной защиты с ТО входят:

– измерительный орган из реле тока, выставленного на срабатывание минимально возможной нагрузки при возникновении металлического замыкания в конце защищаемой зоны (или чувствительности);

– промежуточное реле, на обмотку которого подается напряжение от сработавшего контакта измерительного органа. Выходной контакт промежуточного органа воздействует непосредственно на соленоид отключения силового выключателя, отключает его.

Системы защиты с МТЗ, помимо аналогичных компонентов, используемых при токовой отсечке, для обеспечения ступеней селективности обязательно дополняются реле времени. Данное реле создает задержку на срабатывание выключателя [13].

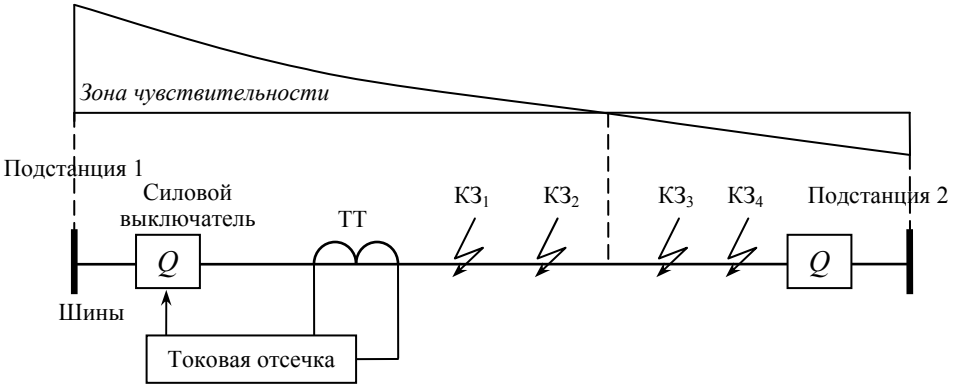


Рис. 3. Зона действия ТО

Работа алгоритма расчета пуска МТЗ начинается с ОМП (рис. 4). Если расстояние до места возникновения КЗ (Length) находится в пределах длины линии и если, по крайней мере, хотя бы один из фазных аварийных токов (Ia авар., Ib авар., Ic авар.) превышает параметр тока срабатывания МТЗ (ISetting), то должен произойти ее пуск.

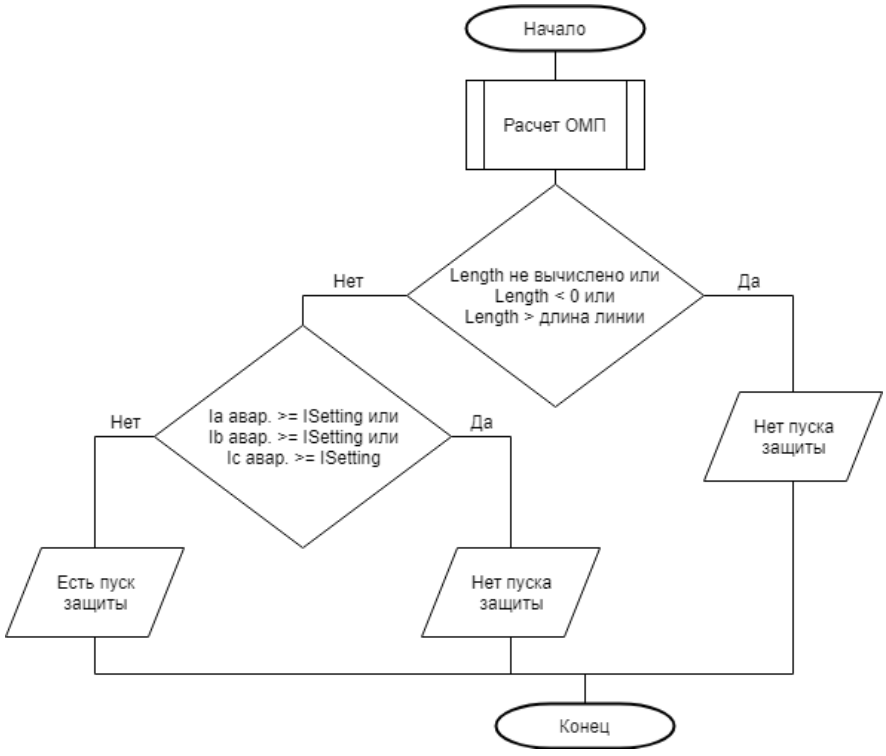


Рис. 4. Алгоритм расчета пуска МТЗ по ОМП

Анализ правильности срабатывания МТЗ по ОМП осуществляется по алгоритму, представленному на рис. 5. Защита должна сработать, если произо-

шел ее пуск и длительность КЗ (Ткз) больше или равна значению задержки после пуска перед срабатыванием (OperationDelay).

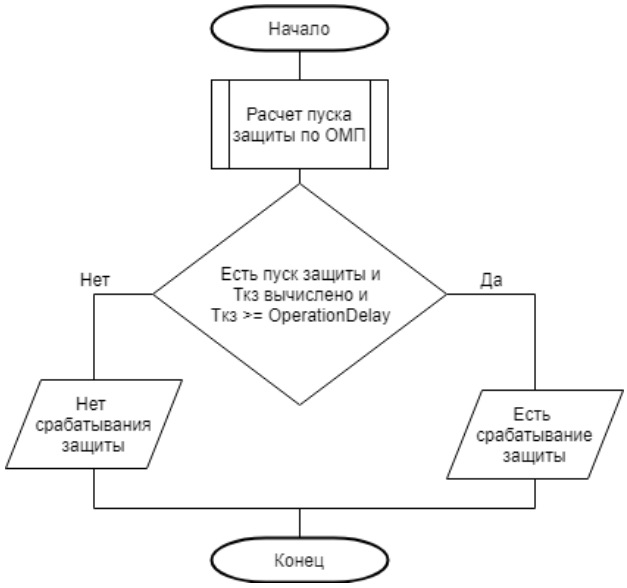


Рис. 5. Алгоритм расчета срабатывания защит

Токовая защита нулевой последовательности (ТЗНП). При наличии замыкания на землю нарушается симметрия в сети, что может привести к повреждению оборудования. Устройства ТЗНП используются для предотвращения возможных последствий от таких повреждений. На появившийся результирующий ток реагирует релейная защита таких устройств (рис. 6).

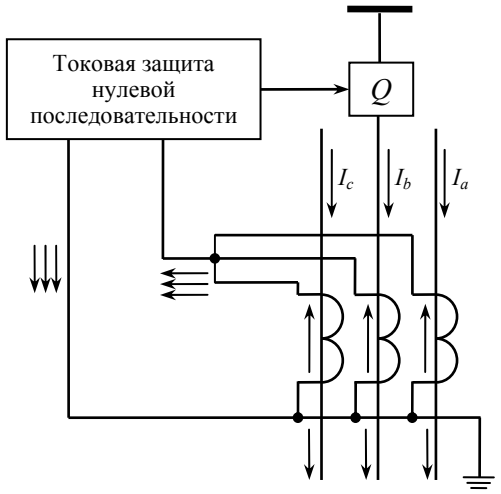


Рис. 6. Принцип работы ТЗНП

В системах с изолированной нейтралью для выделения этих токов используется специальный трансформатор, установленный на кабель.

На ЛЭП напряжением 110 кВ с заземленной нейтралью это выполнить невозможно, так как токи КЗ на землю достигают больших значений. В этом случае на обычных трансформаторах тока, которые используются для релейной защиты, выделяются отдельные обмотки на каждой фазе, которые соединяются между собой последовательно, при этом начало следующей фазы соединяется с концом предыдущей. Кроме этого в эту цепь включаются также и токовые обмотки реле.

Весь участок, подлежащий защите, разделяется на зоны. Система защиты становится многоступенчатой. Первая ступень срабатывает при максимальных значениях тока, при этом выдержка времени минимальна или равна нулю, следующая – при меньшем токе, но с большей выдержкой по времени.

Алгоритм расчета пуска ТЗНП начинается с ОМП (рис. 7). Если расстояние до места возникновения КЗ (Length) находится в пределах длины линии и если ток нулевой последовательности (3I0сим.) превышает параметр тока срабатывания ТЗНП (3I0Setting), то можно утверждать, что должен произойти пуск ТЗНП.

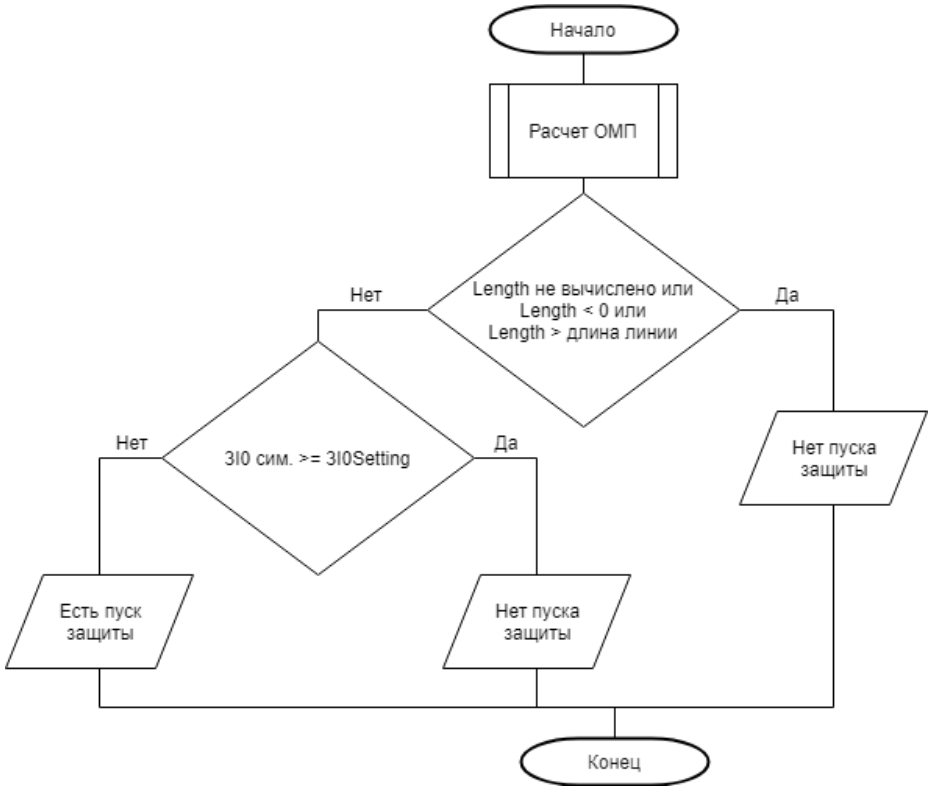


Рис. 7. Алгоритм расчета пуска ТЗНП по ОМП

Анализ правильности срабатывания ТЗНП по ОМП осуществляется аналогично таковому при использовании МТЗ (см. рис. 5).

Защита минимального напряжения (ЗМН). При возникновении аварийных ситуаций, связанных с КЗ, когда происходят значительные потери энергии, приложенная мощность расходуется на развитие повреждений. При этом возникают большие токи, а напряжение резко падает.

Аналогичная картина может также наблюдаться при перегрузке системы, когда мощностей источников напряжения не хватает.

Устройства ЗМН контролируют величину напряжения в сети и отключают силовой выключатель при снижении напряжения до минимально возможной величины (уставки) или подают соответствующий сигнал оперативному персоналу (рис. 8).

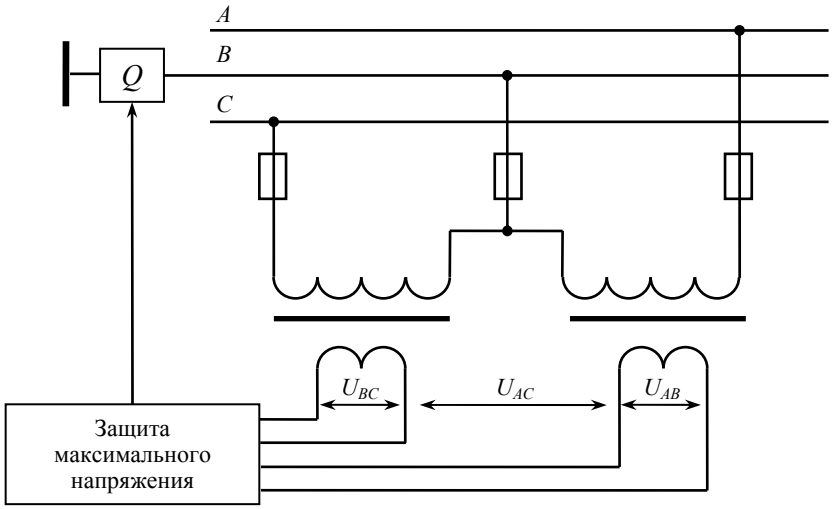


Рис. 8. Принцип работы ЗМН

Их измерительный орган похож по структуре на тот, который используется в токовых защитах. Но он имеет собственные конструктивные особенности.

В состав устройств ЗМН входят:

– измерительный трансформатор напряжения (ТН), который предназначен для преобразования первичного напряжения сети в пропорциональное значение вторичного с высокой точностью, ограниченной допустимыми метрологическими характеристиками;

– реле минимального напряжения (РН), которое срабатывает, если контролируемый им уровень напряжения снизился и достиг величины напряжения уставки;

– электрическая схема цепей напряжения, которые предназначены для передачи вторичного вектора от трансформатора напряжения к реле напряжения с минимальными потерями и погрешностями.

При этом ЗМН могут работать как автономно, так и в комплексе с другими устройствами, например, токовыми защитами или контролем мощности.

Алгоритм расчета пуска ЗМН начинается с ОМП (рис. 9). В случае если расстояния до места возникновения КЗ (Length) находится в пределах длины линии и если, по крайней мере, хотя бы одно из фазных аварийных напряжений (Ua авар., Ub авар., Uc авар.) понижается ниже параметра напряжения срабатывания МТЗ (USetting), то должен произойти пуск ЗМН.

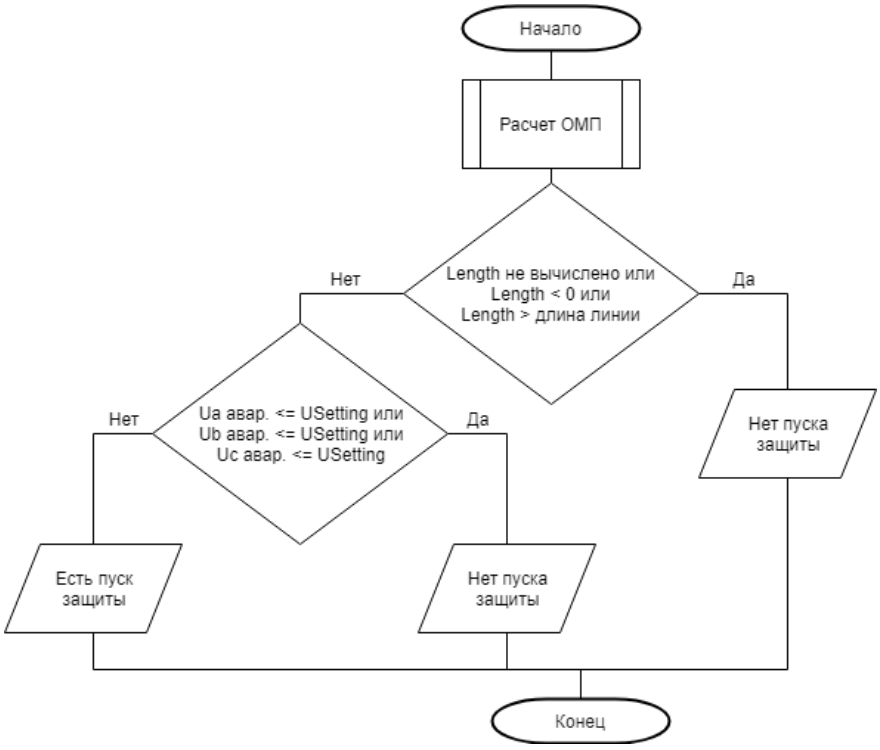


Рис. 9. Алгоритм расчета пуска ЗМН по ОМП

Анализ правильности срабатывания ЗМН по ОМП осуществляется так же, как и при использовании других видов защиты (см. рис. 5).

Дистанционная защита (ДЗ). Дистанционная защита – защита, реагирующая на расстояние до точки КЗ. Место замыкания определяется с помощью реле сопротивления. Сопротивление рассчитывается по закону Ома на основании значений тока и напряжения, получаемых от трансформаторов тока и напряжения, соответственно.

Реле сопротивления срабатывает при условии

$$Z_{\text{р}} = \frac{U_p}{I_p} < Z_{\text{уст}},$$

где $Z_{\text{р}}$ – сопротивление линии электропередачи при КЗ; $U_{\text{р}}$ – напряжение электрической сети при КЗ; $I_{\text{р}}$ – сила тока линии электропередачи при КЗ; $Z_{\text{уст}}$ – уставка сопротивления срабатывания реле.

Измеряемая величина является фиктивной, так как в некоторых режимах работы (например, при качаниях) ее физический смысл как сопротивления теряется.

Вся защищаемая область делится на зоны. Устройства ДЗ, как правило, в своем составе имеют не менее трех уставок срабатывания и реле сопротивления. Для каждой зоны время срабатывания свое, а уставка реле сопротивления равна сопротивлению до точки возникновения КЗ в конце соответствующей зоны.

Уставка сопротивления срабатывания реле в первой зоне ДЗ рассчитывается так, чтобы обеспечить защиту только своей отходящей линии (не до конца, а с учетом погрешности измерения сопротивления – 0,7–0,85 ее длины). При срабатывании реле сопротивления первой зоны ДЗ линия отключается с минимально возможной выдержкой времени, так как место возникновения КЗ точно находится на ней.

Вторая зона ДЗ резервирует отказ защиты следующей подстанции. Для этого устройства защиты реагируют на КЗ в конце второй линии. При этом выдержки времени второй зоны ДЗ первой подстанции больше, чем первой зоны ДЗ второй подстанции. Благодаря этому обеспечивается требуемая селективность, в результате чего выключатель второй линии от второй подстанции отключится раньше, чем отработает реле времени защиты на первой подстанции.

Третья зона ДЗ используется для резервирования защиты следующей линии, если она есть в наличии. Дополнительного количества зон не предусматривается.

При анализе работы ДЗ стоит учесть, что ОМП дает результаты только на контролируемой линии. В случае, когда в результате ОМП расстояние до места возникновения КЗ будет превышать длину самой линии, нельзя с точностью утверждать, что КЗ произошло на расстоянии, которое вычисляет алгоритм. Это связано с тем, что ОМП ведется по параметрам заданной линии, за пределами линии – по аппроксимируемым характеристикам линии, которые могут и не соответствовать фактическим данным.

В случае, когда расстояние до КЗ попадает на линию, в обязательном порядке должен произойти пуск защиты ДЗ второй и третьей зон, так как они контролируют все зоны. Пуск защита первой зоны ДЗ происходит, когда расстояние до места возникновения КЗ не превышает длину контролируемой зоны, которая равна 0,7–0,85 длины линии (Length контр.) (рис. 10).

Экспресс-анализ допускает анализ работы ДЗ по всей длине контролируемых зон. При анализе функций РЗА по эталонным алгоритмам характеристика срабатывания ДЗ строится для каждой ступени (каждая ступень контролирует свою зону).

Анализ срабатывания ДЗ по ОМП осуществляется так же, как и при использовании других видов защиты (см. рис. 5).

Направленная высокочастотная (ВЧ) защита (НВЧЗ). Защита участка линии электропередачи состоит из двух полукомплектов, расположенных по

обоим концам линии и включающих в себя микропроцессорные терминалы релейной защиты, приемопередатчик и соответствующее высокочастотное оборудование (рис. 11).

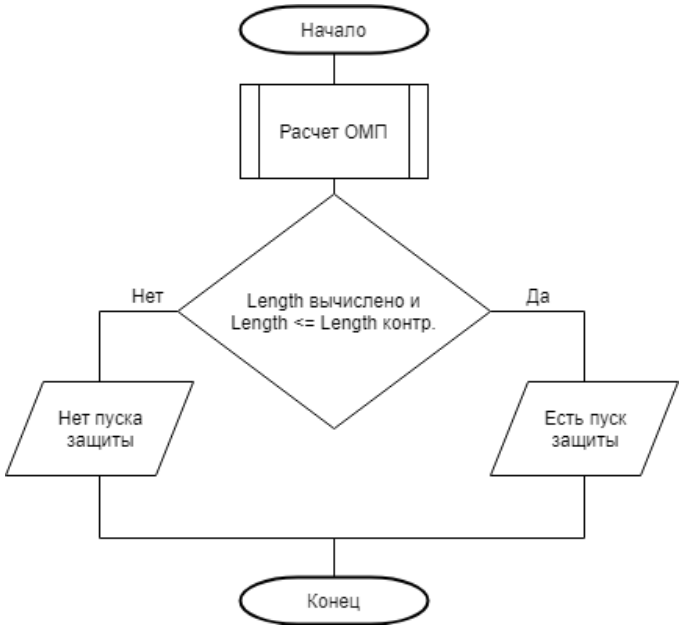


Рис. 10. Алгоритм расчета пуска ДЗ по ОМП

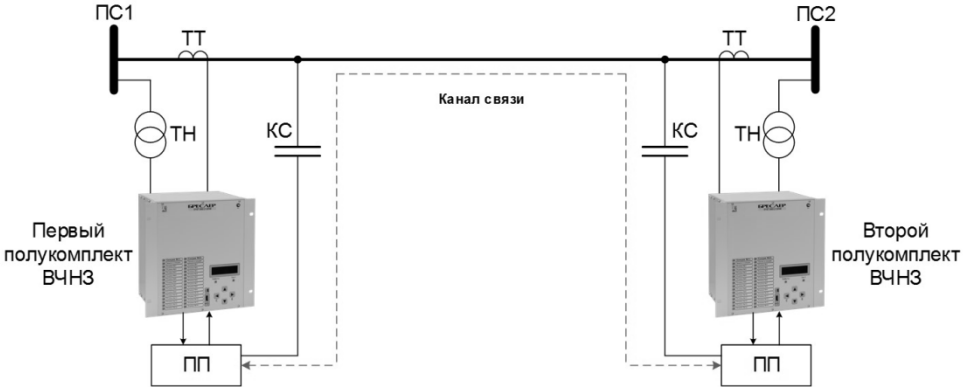


Рис. 11. Принцип работы НВЧЗ

Принцип действия защиты основан на косвенном сравнении направления мощности на концах защищаемой линии с помощью сигналов высокой частоты, передаваемых по каналам связи. При несимметричных КЗ повреждениях мощность обратной последовательности в защищаемой линии направлена к месту установки полукомплектов защиты, а при симметричных повреждениях мощность прямой последовательности направлена, напротив, от шин в линию.

В начальный момент возникновения повреждения срабатывают блокирующие измерительные органы (ИО), обеспечивая ускоренный пуск приёмопередатчика, который посылает блокирующий сигнал на противоположный конец линии. После срабатывания ИО блокирующий сигнал высокой частоты снимается тем полукомплектом защиты, для которого мощность обратной последовательности направлена к шинам в случае несимметричных КЗ, либо мощность прямой последовательности направлена в линию при симметричных КЗ. В случае повреждения на защищаемой линии блокирующие сигналы высокой частоты отсутствуют, и каждый из полукомплектов может действовать на отключение выключателя. При КЗ за пределами линии до подстанции, где стоит устройство ОМП, останова одного из полукомплектов на соответствующем конце линии приёмопередатчика не происходит, из-за чего блокируются оба полукомплекта защиты.

В качестве канала связи выступает сама линия электропередачи. Блокирующие сигналы передаются с помощью высокочастотных приемопередатчиков. Терминалы высокочастотной защиты могут работать совместно с приемопередатчиками разных производителей.

Расчет пуска НВЧЗ начинается с расчета ОМП (рис. 12). Единственным условием пуска НВЧЗ при анализе по ОМП является нахождение места возникновения КЗ (Length) в пределах длины линии (рис. 12).

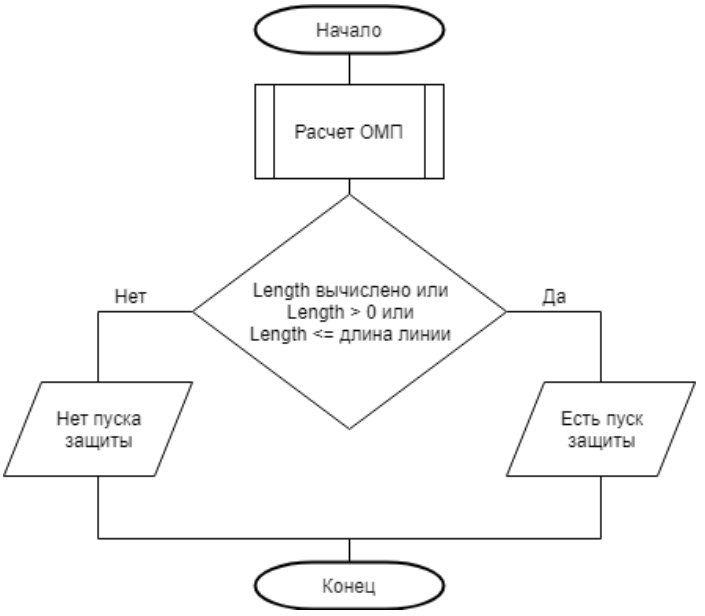


Рис. 12. Алгоритм расчета пуска НВЧЗ по ОМП

Анализ срабатывания НВЧЗ по ОМП осуществляется так же, как и при использовании других видов защиты (см. рис. 5).

Анализ всех вышеназванных функций защит по ОМП не является единственным вариантом контроля их правильной работы. Функции защиты, при-

званные защищать линии электропередачи и подключенное к ним оборудование, также могут быть реализованы в эталонной модели защит. В цифровой модели могут быть реализованы алгоритмы защит, имеющие место в устройствах РЗА. Следует отметить, что алгоритмы работы защит в устройствах разных производителей, даже если они и выполняют одну и ту же функцию, на практике имеют некоторые отличия. Поэтому модель должна быть гибкой в настройке и в ней должны быть реализованы эталонные алгоритмы защиты.

С учетом того, что в существующих энергообъектах активно используется резервирование устройств РЗА, анализ и диагностика функций РЗА также могут быть выполнены на основе сравнения результатов пуска и срабатывания одних и тех же защит на разных физически реализованных устройствах, частично или полностью выполняющих аналогичные функции.

В случае отсутствия резервирования в системе РЗА к существующей традиционной системе РЗА на электромеханических реле может быть параллельно подключено цифровое устройство РЗА, работающее по протоколу IEC 61850. Традиционным системам РЗА в отличие от цифровых систем свойственна персонализация: отдельное устройство, выполняющее отдельную функцию, контролирует отдельный объект [1]. То есть в целях экономической выгоды может быть подключено одно цифровое устройство, которое будет реализовывать все функции защиты, имеющиеся в системе РЗА. В настоящее время на энергообъектах активно внедряются подобные смежные системы РЗА. В случае выхода из строя одного из устройств РЗА есть возможность выявить это посредством сравнения результатов работы устройства РЗА с результатами работы цифрового устройства.

Модель защиты, основанная на результатах ОМП, эталонная модель защиты и механизм сравнения устройств РЗА реализованы в программном комплексе анализа и диагностики комплектов и функций защит.

Выводы. 1. Разработаны алгоритмы анализа работы функций РЗА (максимальная токовая защита, токовая защита нулевой последовательности, защита минимального напряжения, направленная высокочастотная защита, дистанционная защита) на основе ОМП.

2. Создан программный комплекс анализа и диагностики комплектов и функций защит.

3. Проведены исследования, в ходе которых установлено, что разработанные алгоритмы анализа работы функций РЗА на основе ОМП могут быть использованы в реальных электроэнергетических системах.

Литература

1. *Булычев А.В.* РЗА электроэнергетических систем. Технические требования и обоснование инвестиций в НИОКР // Новости электротехники. 2015. № 6. С. 24–26.

2. *Булычев А.В., Васильев Д.С., Козлов В.Н., Силанов Д.Н.* Релейная защита в распределительных сетях 110/35/10 кВ в условиях цифровой трансформации электроэнергетических систем // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 1. С. 71–77.

3. *Бурбело М.И., Мельничук С.М.* Использование реле проводимости для выявления неполнофазных режимов в сетях 110–220 кВ // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2015. № 2(119). С. 40–44.

4. *Евминов Л.И., Селивестров Г.И.* Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого. Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2016. 531 с.

5. *Моисеев Д.В., Галанина Н.А.* Анализ существующих методик построения систем регистрации аварийных событий и диагностики работы устройств РЗА // Состояние и перспективы развития ИТ-образования: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конференции. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. С. 391–396.

6. *Моисеев Д.В., Галанина Н.А.* Использование CIM-моделей энергообъектов в системе диагностики устройств РЗА // Информатика и вычислительная техника: сб. науч. тр. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. С. 151–156.

7. *Моисеев Д.В., Галанина Н.А.* Разработка структурной схемы подсистемы регистрации и диагностики аварийных событий системы релейной защиты и автоматики // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России: сб. материалов IV Всерос. студ. конф. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. С. 80–83.

8. *Моисеев Д.В., Галанина Н.А.* CIM-модель энергообъектов как инструмент интеграции централизованной системы диагностики устройств РЗА // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 13-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. С. 361–362.

9. *Моисеев Д.В., Галанина Н.А., Иванова Н.Н.* Экспрес-анализ и анализ аварийных режимов электрической системы на основе эталонных алгоритмов // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. С. 273–279.

10. *Моисеев Д.В., Галанина Н.А., Иванова Н.Н.* Разработка методики экспресс-анализа аварийных режимов электрической системы // Вестник Чувашского университета. 2019. № 3. С. 167–175.

11. *Рыбаков А.К., Жуков Д.А., Федеров О.А.* Концепция системы анализа аварийных событий и оценки правильности работы устройств РЗА // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 6(51). С. 100–101.

12. *Golub G.M.* Reliability control of failure-free operation of power supply system of railroad and its components by methods of intellectualization and informatization. *Metallurgical and mining industry*, 2017, no. 5, pp. 8–13.

13. *Iskakov U., Breido J.* Settings adaptation system for current protection relay. *Annals of DAAAM & Proceedings*, 2015, vol. 26, iss. 1, pp. 371–377.

МОИСЕЕВ ДЕНИС ВЛАДИМИРОВИЧ – аспирант кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (dnsmsv@gmail.com).

ГАЛАНИНА НАТАЛИЯ АНДРЕЕВНА – доктор технических наук, профессор кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (galaninacheb@mail.ru).

ИВАНОВА НАДЕЖДА НИКОЛАЕВНА – кандидат технических наук, доцент кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (naadeezdaa@rambler.ru).

D. MOISEEV, N. GALANINA, N. IVANOVA

DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR ANALYZING THE OPERATION OF RELAY PROTECTION AND AUTOMATION FUNCTIONS USING FAULT LOCATION DATA

Key words: *relay protection and automation systems (RPA), digital centralized relay protection and automation system, express analysis of emergency conditions, RPA device diagnostics system, digital substation, fault location, RPA function, digital fault recorder.*

One of the promising directions for the development of relay protection technologies is the creation of a centralized relay protection and automation system. At the same

time, the task of developing a hardware-software complex for diagnosing this system, which will improve the selectivity, speed, sensitivity and reliability of relay protection, is also relevant. The purpose of this study is to develop algorithms for analyzing the operation of relay protection and automation functions using the received data on the location of the damage, as well as creating an experimental sample of the software package for implementing express analysis of emergency modes of the power system to determine the location of damage and the formation of protocol on its results. The article provides a diagram of the diagnosis of relay protection and automation devices based on the calculation of the algorithm for determining the location of damage. Taking into account the data obtained as a result of the algorithm for determining the location of damage, the following types of protection were considered and analyzed: 1) maximum current protection; 2) zero sequence current protection; 3) undervoltage protection; 4) distance protection; 5) directional high-frequency protection. Algorithms have been developed for calculating the start-up and operation of these protections to determine the location of damage. The article provides the corresponding block diagrams. The obtained algorithms were used to create a prototype software package for the express analysis of emergency conditions of the power system to determine the location of damage and generate a protocol based on the results of the analysis, which can be used in real electric power systems.

References

1. Bulychev A.V. *RZA elektroenergeticheskikh sistem. Tekhnicheskie trebovaniya i obosnovanie investitsii v NIOKR* [RPA of power systems. Technical requirements and substantiation of investments in R&D]. *Novosti electrotehniki*. 2015. № 6. S. 24–26.

2. Bulychev A.V., Vasil'ev D.S., Kozlov V.N., Silanov D.N. *Releinaya zashchita v raspredelitel'nykh setyakh 110/35/10 kV v usloviyakh tsifrovoi transformatsii elektroenergeticheskikh sistem* [Relay protection in distribution networks 110/35/10 kV in the conditions of digital transfor-mation of electric power systems]. *Releinaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2019, no. 1, pp. 71–77.

3. Burbelo M.I., Mel'nichuk S.M. *Ispol'zovanie rele provodimosti dlya vyyavleniya nepolnofaznykh rezhimov v setyakh 110–220 kV* [Use of the conductivity relay to detect phase conductor breakage in networks 110-220 kV]. *Visnik Vinnits'kogo politekhnichnogo institutu*, 2015, no. 2(119), pp. 40–44.

4. Evminov L.I., Selivestrov G.I. *Releinaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya* [Relay protection and automation of electricity systems]. Gomel, 2016, 531 p.

5. Moiseev D.V., Galanina N.A. *Analiz sushchestvuyushchikh metodik postroeniya sistem registratsii avariinykh sobytii i diagnostiki raboty ustroistv RZA* [Analysis of the existing methods of constructing systems for registration of emergency events and diagnostics of operation of RPA devices]. In: *Sostoyanie i perspektivy razvitiya IT-obrazovaniya: sb. materialov Vseros. nauch.-prakt. konferentsii* [Proc. of Rus. Sci. Conf. «The state and prospects for IT education»]. Cheboksary, Chuvash university Publ., 2019, pp. 391–396.

6. Moiseev D.V., Galanina N.A. *Ispol'zovanie CIM-modelei energoob"ektov v sisteme diagnostiki ustroistv RZA* [Using CIM models of energy objects in the system of RPA devices diagnostics]. In: *Informatika i vychislitel'naya tekhnika: sbornik nauchnykh trudov* [Computer science and computing: a collection of scientific papers]. Cheboksary, Chuvash university Publ., 2019, pp. 151–156.

7. Moiseev D.V., Galanina N.A. *Razrabotka strukturnoi skhemy podsistemy registratsii i diagnostiki avariinykh sobytii sistemy releinoi zashchity i avtomatiki* [Develop a structural scheme of the subsystem for registration and diagnosis of emergency events of the relay protection system and automation]. In: *Inzhenernye kadry – budushchee innovatsionnoi ekonomiki Rossii: sb. materialov IV Vseros. stud. konf.* [Proc. of 4th Rus. Sci. Conf. «Engineering personnel – the future of Russia's innovative economy»]. Ioshkar-Ola, 2018, pp. 80–83.

8. Moiseev D.V., Galanina N.A. *SIM-model' energoob"ektov kak instrument integratsii tsentralizovannoi sistemy diagnostiki ustroistv RZA* [The SIM model of energy objects as a tool to integrate a centralized system of diagnostic devices]. In: *Dinamika nelineinykh diskretnykh elektrotekhnicheskikh i elektronnykh sistem: materialy 13-i Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of 13th

Rus. Sci. Conf. «Dynamics of non-linear discrete electrical and electronic systems»]. Cheboksary, Chuvash university Publ., 2019, pp. 361–362.

9. Moiseev D.V., Galanina N.A., Ivanova N.N. *Ekspres-analiz i analiz avariinykh rezhi-mov elektricheskoi sistemy na osnove etalonnykh algoritmov* [Expres analysis and analysis of emergency modes of the electrical system based on reference algorithms]. In: *Problemy i perspek-tivy razvitiya energetiki, elektrotekhniki i energoeffektivnosti: materialy III Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of 3rd Int. Sci. Conf. «Problems and prospects for energy, electrical engineering and energy efficiency»]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2019, pp. 273–279.

10. Moiseev D.V., Galanina N.A., Ivanova N.N. *Razrabotka metodiki ekspress-analiza avariinykh rezhimov elektricheskoi sistemy* [Development of methods for express analysis of emergency conditions of electrical system]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2019, no. 3, pp. 167–175.

11. Rybakov A.K., Zhukov D.A., Federov O.A. *Kontseptsiya sistemy analiza avariinykh sobytii i otsenki pravil'nosti raboty ustroistv RZA* [The concept of the system of analysis of emergency events and assessment of the correctness of the relay protection system and automation devices]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2018, no. 6(51), pp. 100–101.

12. Golub G.M. Reliability control of failure-free operation of power supply system of railroad and its components by methods of intellectualization and informatization. *Metallurgical and mining industry*, 2017, no. 5, pp. 8–13.

13. Iskakov U., Breido J. Settings adaptation system for current protection relay. *Annals of DAAAM & Proceedings*, 2015, vol. 26, iss. 1, pp. 371–377.

MOISEEV DENIS – Post-Graduate Student of Information Systems Math and Hardware Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (dnsmsv@gmail.com).

GALANINA NATALIYA – Doctor of Technical Sciences, Professor, Information Systems Math and Hardware Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (galaninacheb@mail.ru).

IVANOVA NADEZHDA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Information Systems Math and Hardware Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (naadeezdaa@rambler.ru).

Формат цитирования: *Моисеев Д.В., Галанина Н.А., Иванова Н.Н.* Разработка алгоритмов анализа работы функций релейной защиты и автоматики с использованием данных о месте повреждения // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 97–112.

УДК 621.311.001.57
ББК 31.27

И.Н. МОРОЗОВ, Н.М. КУЗНЕЦОВ,
Л.А. БЕЛОВА, Е.Д. БОРОЗДИНА

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДСТАНЦИИ НАПРЯЖЕНИЕМ 110 кВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ MATLAB

Ключевые слова: *имитационное моделирование, электрическая подстанция, грозозащита, распределительное устройство, Matlab.*

В статье рассмотрен вопрос имитационного моделирования открытых распределительных устройств на примере распределительного устройства 110 кВ электрической подстанции Апатитской ТЭЦ. Для моделирования переходных процессов была выбрана программная среда Matlab, приложение Simulink. Предложены результаты разработки имитационной модели в среде Matlab, позволяющей производить расчеты внешних перенапряжений и анализировать электромагнитные переходные процессы в электрических распределительных устройствах. Разработанная модель позволяет учитывать перенапряжения сети при проектировании новых открытых распределительных устройств подстанций. Для разработки данной модели предложены модели основного силового оборудования распределительного устройства. Приведено описание силового трансформатора ТДГ-60000/110, представляющего собой двухобмоточный силовой трансформатор. В модели рассматривается одна сторона трансформатора (питающая обмотка). При этом все элементы стороны высшего напряжения заменяются синусоидальным источником напряжения. Для создания имитационной модели, необходимой для расчета грозовых перенапряжений, были рассчитаны параметры силового трансформатора. Математическое описание грозового разряда, приведенное в работе, учитывает такие его параметры, как амплитуда, длительность фронта, длительность импульса и скорость дирекции. Для проверки адекватности разработанной модели были смоделированы: удар молнии в грозозащитный трос на ЛЭП-109, удар молнии в одну из фаз линии ЛЭП- 109. Для того, чтобы испытать защиту от внешних перенапряжений по максимуму, в работе моделировался удар грозовым разрядом в одну из фаз не защищённой грозотросом линии. При сопоставлении графиков переходных процессов на ограничителях перенапряжений второй системы шин с первой выявилось отличие в 100 кВ по амплитуде напряжения. Это объяснятся тем, что под ударом молнии оказалось оборудование, присоединённое к первой системе шин. Таким образом, данный подход к имитационному моделированию распределительных устройств можно предложить в качестве дополнительного при проектировании электросетей.

Для проектирования новых электрических сетей, а также для исследования работы существующих необходимо решать ряд задач, связанных с проведением расчетов переходных процессов и режимов эксплуатации как отдельных компонентов сети, так и энергосистемы в целом [1–6]. Среди вышеуказанных задач можно обозначить типовые:

- расчет нагрузок и потоков электроэнергии;
- анализ устойчивости;

– анализ режимов короткого замыкания в сети;
– анализ электромагнитных переходных процессов[1].

Для решения данных задач в работе предлагается использовать программную среду Matlab, приложение имитационного моделирования Simulink. Для составления модели необходимо исследование описания основного силового оборудования распределительного устройства. Целью данной статьи является исследование нестационарных режимов электрической подстанции напряжением 110 кВ. Задачей исследования в данной статье является разработка имитационной модели подстанции (ПС) напряжением 110 кВ в среде Matlab. В качестве объекта исследований было выбрано открытое распределительное устройство (ОРУ) с классом напряжения 110 кВ Апатитской ТЭЦ. Предметом исследований являются нестационарные режимы подстанции – перенапряжения.

Описание силового трансформатора ТДГ-60000/110. В работе рассматриваются три силовых двухобмоточных трансформатора, два из которых работают как повышающие трансформаторы. Модель силового трансформатора изображена на рис. 1 [7].

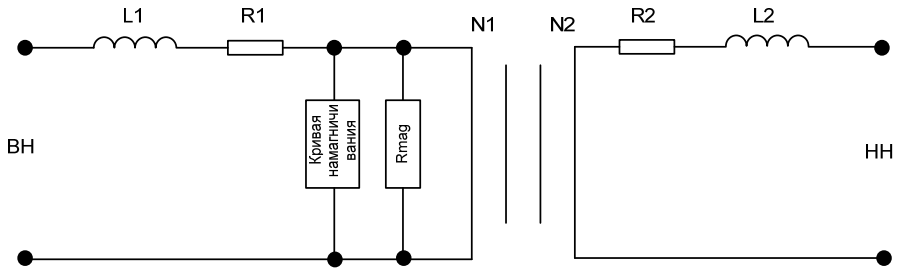


Рис. 1. Модель силового трансформатора

Данные о параметрах схемы замещения (модели) были внесены в программную среду Matlab. Схема замещения состоит из двух частей – двух обмоток (стороны высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений), N_1 и N_2 – числа витков первичной и вторичной обмоток трансформатора, соответственно. Сторона высшего напряжения содержит индуктивный и активный элементы (L_1 и R_1), элемент насыщения трансформатора (кривая намагничивания) и постоянное линейное сопротивление намагничивания (R_{mag}). Сторона низшего напряжения содержит только индуктивный и активный элементы (L_2 и R_2). Также общими для двух сторон будут данные о номинальном напряжении (V) каждой отдельной обмотки трансформатора.

Модель представляет собой двухобмоточный силовой трансформатор. В модели рассматривается одна сторона трансформатора (питающая обмотка). При этом все элементы стороны высшего напряжения заменяются синусоидальным источником напряжения.

[1] РД 153-34.0-15.502-2002. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах общего назначения. Ч. 2. Анализ качества электрической энергии. М., ОРГРЭС, 2000. 56 с.

Таким образом, полученная новая модель силового трансформатора состоит из синусоидального источника напряжения (E), индуктивности (L) и активного сопротивления (R) питающей обмотки (рис. 2).

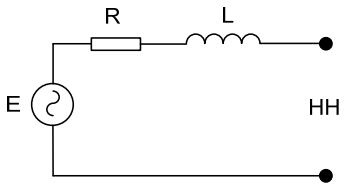


Рис. 2. Используемая для расчетов модель силового трансформатора

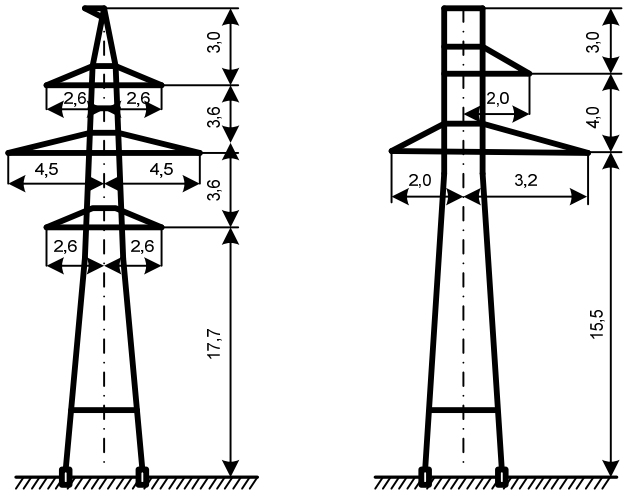
Для создания математической модели, необходимой для расчета грозовых перенапряжений, были рассчитаны параметры силового трансформатора.

Описание линий электропередач. В каждом конкретном случае расчета участка цепи были выявлены следующие данные о ЛЭП: тип линии/кабеля (воздушный, расположенный на поверхности земли или в земле); количество фаз; число линий/кабелей; длина линии; конструкция опор ЛЭП (координаты проводов); марка провода; активное и реактивное сопротивление провода.

Входными величинами для расчета матрицы потенциальных коэффициентов являлись координаты каждого из проводов (x, y), диаметр проводов d, длина линии l и стрела провеса проводов f.

Координаты проводов выбирались в произвольно расположенной прямоугольной системе координат, так как имеют значение только взаимное расположение проводов и их положение относительно земли, которые определяются конкретной конструкцией опор ЛЭП. При определении координат для двухцепной трехфазной линии ось x располагали по поверхности земли перпендикулярно линии, а ось y была направлена вертикально вверх.

В рассматриваемом случае все провода линий, отходящие от ОРУ-110 кВ, имеют марку АС185/110. В целях упрощения создания схемы замещения для отображения двухцепных линий была выбрана опора марки У-6, для отображения одноцепной линий была выбрана опора марки ПБ-29. Выбранные опоры имеют вид, приведённый на рис. 3.



а *б*

Рис. 3. Опоры ЛЭП: *а* – двухцепная опора У-6; *б* – одноцепная опора ПБ-29

Описание грозового разряда. Для расчётов воздействия тока молнии на электрооборудование необходимо было создать грозовой разряд. Источник тока молнии представляли с помощью следующей формулы [8]:

$$i(t) = I_m \cdot [(t/\tau_\varphi)^n /(1+(t/\tau_\varphi)^n)] \cdot \exp(t/\tau),$$

где I_m = 20 000 А – амплитуда тока грозового разряда; $\tau_\varphi = 4 \cdot 10^{-6}$ – длительность фронта импульса тока грозового разряда; $\tau = 1 \cdot 10^{4}$ – длительность импульса тока грозового разряда; n = 5 – коэффициент, корректирующий значение максимума тока грозового разряда.

Модель ОРУ-110 кВ. Соединив схемы замещения каждого из электрооборудования в соответствии с расположением его на ОРУ, получили полную модель данной подстанции, изображённую на рис. 4.

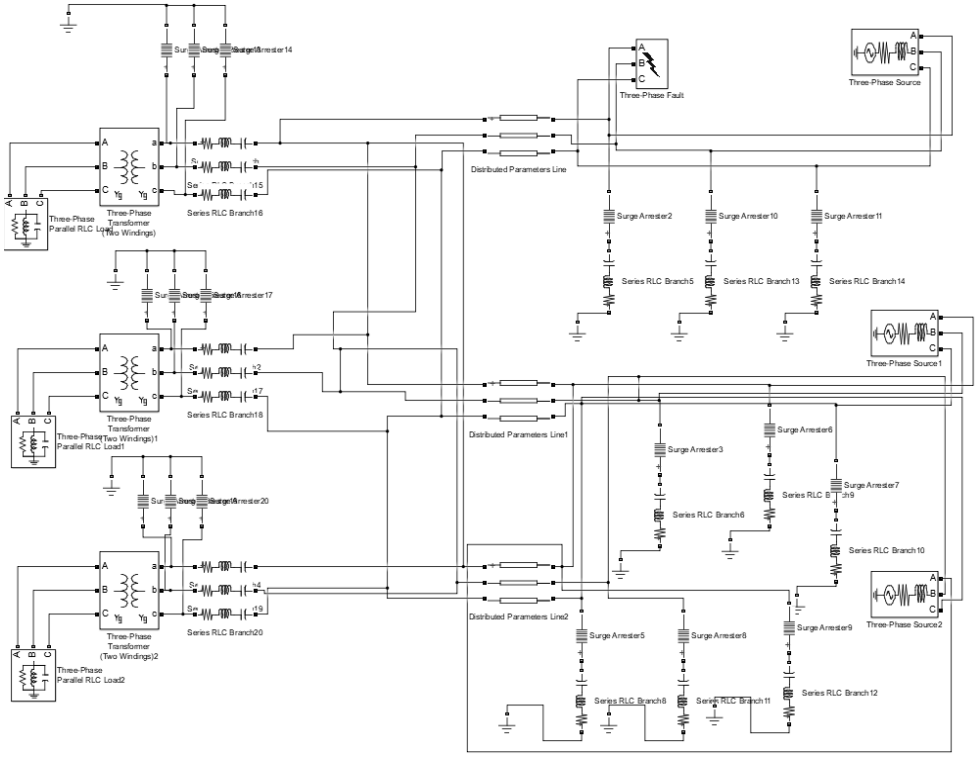


Рис. 4. Модель подстанции в среде Matlab

В данной схеме трансформаторы Т-2 и Т-1 соединены со второй системой шин, а первый трансформатор – с первой системой шин. К первой системе шин подсоединили также линии электропередач Л-109, Л-115, Л-105 и Л-116, остальные линии ЛЭП (Л-107, Л-114, Л-117) – ко второй системе шин. Далее ввели все данные линий электропередач, трансформаторов, ограничителей перенапряжения и опор ЛЭП, а также задали ток молнии (I_m = 20 000 А).

Результаты моделирования

Моделирование удара молнии в грозозащитный трос на ЛЭП-109. Данная линия является одноцепной. Грозозащитный трос имеется на протя-

жении не всей длины, а только в начале и конце – на подходе линий к подстанциям. Так как наибольший интерес представляет максимальное значение перенапряжения на главном электрооборудовании – разряд молнии смоделирован в трос близлежащей к подстанции опоры. В начале линии, при ударе молнии в трос, на ней появляется перенапряжение, большее, чем могло появиться при ударе молнии в конце линии[1].

В ходе работы имитационной модели были получены диаграммы (рис. 5) в интересующих нас точках схемы.

Так как молния ударила в линию, подключённую к первой системе шин, то именно на ней будут наибольшие значения токов и напряжений. Но и на второй системе шин зафиксированы скачки: тока на ОПН – до 75 А (рис. 5, *г*), напряжения на фазах – до 175 кВ.

Из графика, показанного на рис. 5, *а*, видно, что напряжение на фазах первой системы шин не превышает предельно допустимые значения по изоляции ($U_{ДОП} > U_{РАСЧ}$), так как 253 кВ < 480 кВ, которые способны выдержать изоляция.

Диаграмма, представленная на рис. 5, *д*, показывает, насколько высокое напряжение (до 1 МВ) образуется на линии при ударе молнии, что очень пагубно отразилось бы на электрооборудовании ОРУ АТЭЦ, если бы отсутствовали ОПН. Из графиков на рис. 5, *в* и *г* также видно, как ОПН отводит излишний ток даже через неидеальное заземление.

На рис. 5, *е* представлен график, характеризующий поведение тока в модуляторе грозового разряда.

Моделирование удара молнии в одну из фаз линии ЛЭП-109. Для того, чтобы испытать нашу защиту от внешних перенапряжений по максимуму, был смоделирован грозовой разряд в одну из фаз не защищённой грозотросом линии. В этом случае значения напряжений и токов в тех же точках схемы должны превосходить значения, полученные в расчётах при ударе молнии в грозозащитный трос. Это объясняется тем, что при ударе молнии в трос происходит перекрытие изоляции, на что тратится определённый потенциал. А в случае удара молнии в линию эти потери значительно меньше. Таким образом, рассматриваемый способ определения эффективности грозозащиты электрооборудования покажет более реальные возможности системы защиты.

На рис. 6 отображены результаты вычислений предложенной нами имитационной модели.

Из графика, показанного на рис. 6, *а*, видно, что молния попала в фазу «С» первой системы шин, именно на ней показано максимальное значение напряжения на фазах, которое не достигает и 300 кВ. Это также меньше предельно допустимого значения – 480 кВ.

На второй системе шин напряжение значительно меньше – не достигает и 200 кВ. Напряжение на фазе «А» во второй системе шин показано большее в отличие от остальных фаз из-за наложения напряжений.

---

[1] РД 153-34.3-35.129-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. СПб.: Изд-во ПЭИПК, 1999.

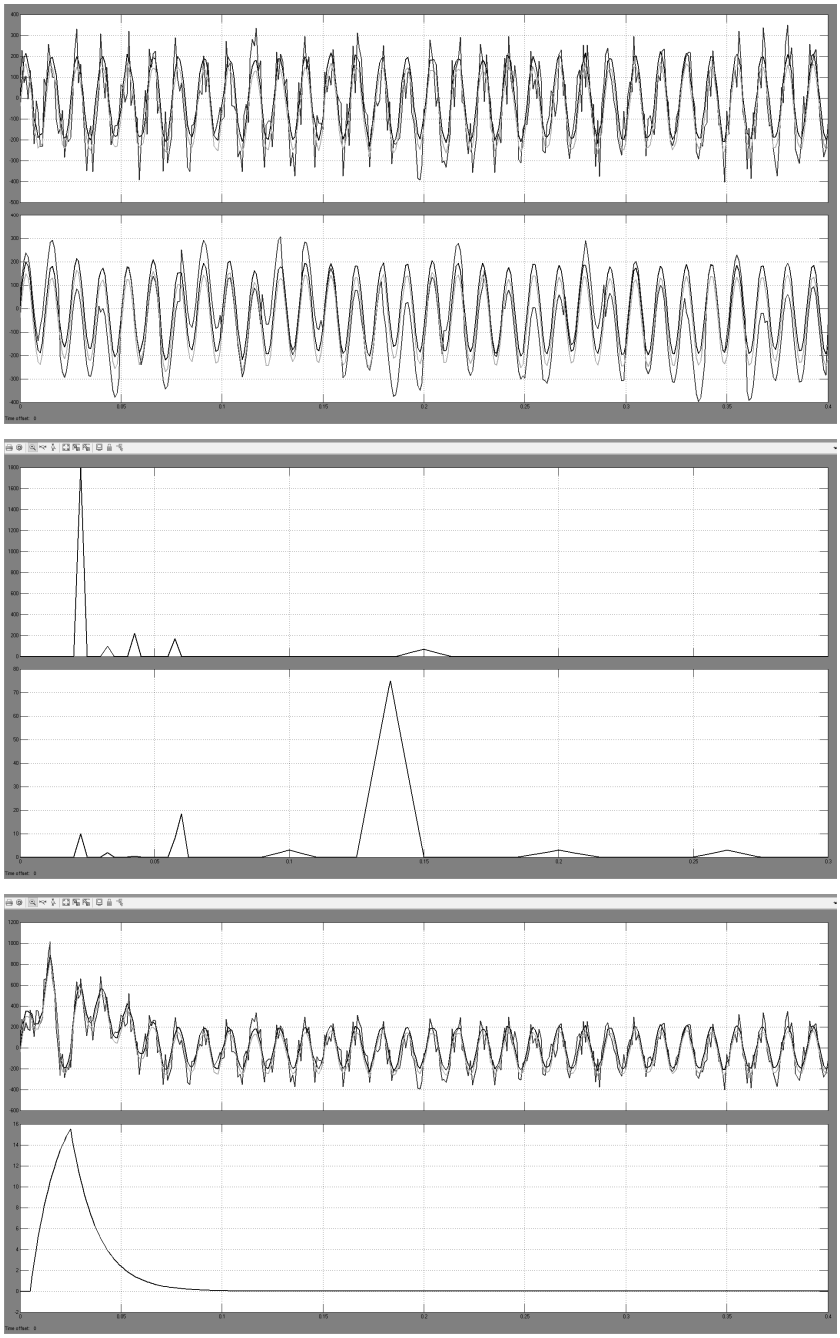


Рис. 5. Диаграммы токов и напряжений при ударе молнии в трос:
а – изменение напряжения во времени на фазах 1-СШ; *б* – изменение напряжения во времени на фазах 2-СШ; *в* – изменение напряжения во времени на ОПН 1-СШ; *г* – изменение напряжения во времени на ОПН 2-СШ; *д* – изменение напряжения во времени на фазах линии рядом с местом удара молнии; *е* – ток молнии

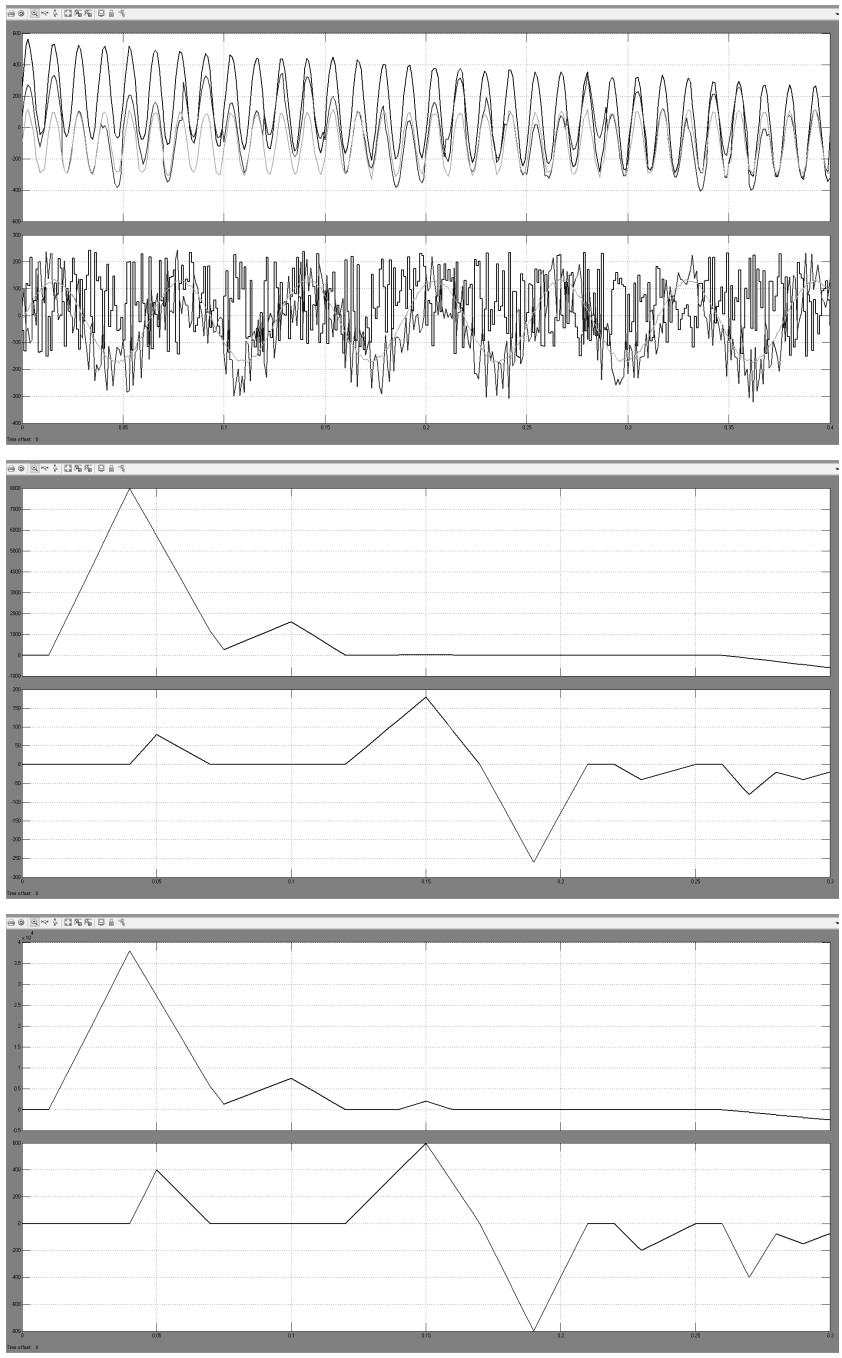


Рис. 6. Диаграммы токов и напряжений при ударе молнии в фазу ЛЭП:
а – изменение напряжения во времени на фазах 1-СШ; *б* – изменение напряжения во времени на фазах 2-СШ; *в* – изменение напряжения во времени на заземлении ОПН 1-СШ; *г* – изменение напряжения во времени на заземлении ОПН 2-СШ; *д* – изменение напряжения во времени на заземлении ОПН 1-СШ; *е* – изменение напряжения во времени на заземлении ОПН 2-СШ

Значение тока на заземлении ограничителя перенапряжений (рис. 6, *в*) довольно велико лишь на одной, оказавшейся под ударом молнии, фазе и достигает почти 8 кА. Максимальное напряжение на этой же фазе составляет 38 кВ (рис. 6, *д*).

Графики, представленные на рис. 6, *г* и *е*, приведены для сопоставления значений токов и напряжений на ограничителях перенапряжений второй системы шин с первой. Отличие значительное, и это объяснятся тем, что под ударом молнии оказалось оборудование, присоединённое к первой системе шин.

Из этих графиков можно сделать вывод, что система защиты от внешних перенапряжений работает оптимально и защищает трансформаторы, являющиеся основным электрооборудованием на ОРУ-110 кВ АТЭЦ.

Выводы. В статье проведены результаты исследования нестационарных режимов подстанции 110 кВ. Для достижения поставленной цели были использованы программная среда Matlab, приложение Simulink. Разработанная имитационная модель позволила получить графики переходных процессов, возникающих в нестационарных режимах работы. При исследовании полученных переходных процессов в линиях в результате возникновения перенапряжений было установлено, что при данной компоновке линий электропередач наблюдается значительное отличие в рассматриваемых точках системы. Тем не менее данное отличие в значениях возникающих перенапряжений не приведет к негативным последствиям. Установленное грозозащитное оборудование эффективно защитит рассматриваемый участок электросетей. Предложенный подход к исследованию работы подстанций в нестационарных режимах с помощью программной среды Matlab может быть использован для определения перенапряжений аналогичных подстанций и оценки эффективности использования грозозащитных средств.

Литература

1. *Веселов А.Е.*, *Ефимов Б.В., Кузнецов Н.М., Невретдинов Ю.М., Токарева Е.А.* Ограничение дуговых перенапряжений в сетях электроснабжения горных предприятий // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2008. № 6. С. 46–51.

2. *Власко Д.И., Востриков А.О., Домонов А.П., Невретдинов Ю.М.* Проблемы и перспективы регистрации грозовых перенапряжений в действующей сети // Труды Кольского научного центра РАН. 2011. № 2(5). С. 54–65.

3. *Ефимов Б.В., Кузнецов Н.М., Невретдинов Ю.М., Фастий Г.П., Ярошевич В.В.* Дуговые перенапряжения при переходе однофазных замыканий на землю в двойные // Электрика. 2008. № 5. С. 8–11.

4. *Ефимов Б.В., Невретдинов Ю.М., Власко Д.И., Востриков А.О.* Регистрация грозовых перенапряжений на подстанции // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. № 5(12). С. 29–38.

5. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений / Ф. Х. Халилов [и др.]. СПб.: Энергоатомиздат, 2002. 272 с.

6. *Морозов И.Н., Кириллов И.Е.* Моделирование вероятности перекрытия гирлянды изоляторов при грозовых ударах в молниеотводы // Промышленная энергетика. 2019. № 9. С. 10–14.

7. *Невретдинов Ю.М., Токарева Е.А., Власко Д.И.* Развитие метода экспериментальных исследований молниезащиты действующих подстанций // Моделирование переходных процессов и установившихся режимов высоковольтной сети: сб. науч. тр. Апатиты, 2008. С. 96–110.

8. *Новикова А.Н., Шмараго О.В., Ефимов Б.В., Данилин А.Н., Невретдинов Ю.М., Селиванов В.Н.* Вопросы грозозащиты воздушных линий в условиях севера Кольского полуострова: требования, опыт эксплуатации ВЛ 110-150 кВ, методика расчета // Труды Кольского научного центра РАН. 2011. № 2(5). С. 9–23.

МОРОЗОВ ИВАН НИКОЛАЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры физики, биологии и инженерных технологий, Мурманский арктический государственный университет, Россия, Мурманск (moroz.84@mail.ru).

КУЗНЕЦОВ НИКОЛАЙ МАТВЕЕВИЧ – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Центр физико-технических проблем энергетики Севера – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Россия, Апатиты (kuzn55@mail.ru).

БЕЛОВА ЛЮБОВЬ АЛЕКСАНДРОВНА – лаборант-исследователь, Центр физико-технических проблем энергетики Севера – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Россия, Апатиты (belowa8998@gmail.com).

БОРОЗДИНА ЕВГЕНИЯ ДМИТРИЕВНА – лаборант-исследователь, Центр физико-технических проблем энергетики Севера – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Россия, Апатиты (zhenya_borozdina@mail.ru).

I. MOROZOV, N. KUZNETSOV, L. BELOVA, E. BOROZDINA

TRANSIENT MODES OF 110 KV ELECTRICAL SUBSTATIONS USING SIMULATION MODELING IN A MATLAB ENVIRONMENT

Key words: *simulation, electrical substation, lightning protection, switchgear, Matlab.*

The article considers the issue of simulation of open switchgears using the example of a 110 kV switchgear of the electrical substation of Apatitskaya Cogeneration Plant. To simulate transients, the Matlab software environment, the Simulink application, was chosen. The developed simulation model in the Matlab environment allows to calculate external overvoltages and analyze electromagnetic transients in electrical switchgears. The developed model makes it possible to take into account the network overvoltage when designing new open switchgear substations. To develop this model, models of the main power equipment of switchgear are proposed. The authors give the description of the power transformer TDG-60000/110. It is a double winding power transformer. The model considers one side of the transformer. In this case, all elements of the higher voltage side are replaced by a sinusoidal voltage source. To create a simulation model which is necessary for calculating lightning overvoltages, the parameters of the power transformer were calculated. The mathematical description of a lightning discharge given in the work takes into account its parameters, such as amplitude, front duration, pulse duration, and directional speed. To check the adequacy of the developed model, the following situations were simulated: a lightning strike into a lightning protection cable on a power transmission line (PTL) 109, a lightning strike into one of the phases of the PTL 109. In order to test maximum protection against external overvoltages, a lightning strike into one of the phases of the line, unprotected by ground wire, was simulated. When comparing the graphs of transients at the surge arresters of the second bus system with the first one, a difference of 100 kV in voltage amplitude was revealed. This is explained by the fact that the equipment attached to the first tire system got struck by lightning. Thus, this approach to the simulation of switchgear can be offered as an additional in the design of power grids.

References

1. Veselov A.E., Efimov B.V., Kuznetsov N.M., Nevretdinov Yu.M., Tokareva E.A. *Ogranichenie dugovykh perenapryazhenii v setyakh elektrosnabzheniya gornykh predpriyatii* [Limitation of arc surges in power networks of mining enterprises]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2008, no. 6, pp. 46–51.

2. Vlasko D.I., Vostrikov A.O., Domonov A.P., Nevretdinov Yu.M. *Problemy i perspektivy registratsii grozovykh perenapryazhenii v deistvuyushchei seti* [Problems and prospects of registration of lightning surges in the existing network]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN,* 2011, no. 2(5), pp. 54–65.

3. Efimov B.V., Kuznetsov N.M., Nevretdinov Yu.M., Fastii G.P., Yaroshevich V.V. *Dugovye perenapryazheniya pri perekhode odnofaznykh zamykanii na zemlyu v dvoinye* [Arc overvoltage during the transition of single-phase earth faults to double]. *Elektrika*, 2008, no. 5, pp. 8–11.

4. Efimov B.V., Nevretdinov Ju.M., Vlasko D.I., Vostrikov A.O. *Registratsiya grozovykh perenapryazhenii na podstantsii* [Registration of lightning surges at substations]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN,* 2012, no. 5(12), pp. 29–38.

5. Khalilov F.X. et al. *Zashchita setei 6-35 kV ot perenapryazhenii* [Surge protection of 6-35 kV networks]. St. Petersburg, Energoatomizdat Publ., 2002, 272 p.

6. Morozov I.N., Kirillov I.E. *Modelirovanie veroyatnosti perekrytiya girlyandy izolyatorov pri grozovykh udarakh v molnieotvody* [Modeling the probability of overlapping insulator lights during lightning strikes in lightning rods]. *Promyshlennaya energetika*, 2019, no. 9, pp. 10–14.

7. Nevretdinov Yu.M., Tokareva E.A., Vlasko D.I. *Razvitie metoda eksperimental'nykh issledovanii molniezashchity deistvuyushchikh podstantsii* [Development of a method for experimental studies of lightning protection of existing substations]. In: *Modelirovanie perekhodnykh protsessov i ustanovivshikhsya rezhimov vysokovol'tnoi seti: sb. nauch. tr.* [Simulation of transients and steady-state modes of a high-voltage network. Collection of scientific papers.]. Apatity, 2008, pp. 96–110.

8. Novikova A.N., Shmarago O.V., Efimov B.V., Danilin A.N., Nevretdinov Yu.M., Selivanov V.N. *Voprosy grozozashchity vozdushnykh linii v usloviyakh severa Kol'skogo poluostrova: trebovaniya, opyt ekspluatatsii vl 110-150 kv, metodika rascheta* [Issues of lightning protection of overhead lines in the north of the Kola Peninsula: requirements, operating experience of 110-150 sq km, calculation procedure]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2011, no. 2(5), pp. 9–23.

MOROZOV IVAN – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Physics, Biology and Engineering Technologies, Murmansk Arctic State University, Russia, Murmansk (moroz.84@mail.ru).

KUZNETSOV NIKOLAY – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Center for Physical and Technical Problems of Energy of the North – Branch of the Federal State Budget Institution of Science of the Federal Research Center «Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences», Russia, Apatity (kuzn55@mail.ru).

BELOVA LUBOV – Laboratory Researcher, Center for Physical and Technical Problems of Energy of the North – Branch of the Federal State Budget Institution of Science of the Federal Research Center «Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences», Russia, Apatity (belowa8998@gmail.com).

BOROZDINA EVGENIYA – Laboratory Researcher, Center for Physical and Technical Problems of Energy of the North – Branch of the Federal State Budget Institution of Science of the Federal Research Center «Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences», Russia, Apatity (zhenya_borozdina@mail.ru).

Формат цитирования: *Морозов И.Н., Кузнецов Н.М., Белова Л.А., Бороздина Е.Д.* Исследование нестационарных режимов электрической подстанции напряжением 110 кВ с использованием имитационного моделирования в среде Matlab // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 113–122.

УДК 621.31
ББК 31.2

А.И. ОРЛОВ, К.М. ВОРОБЬЕВ, И.Х. ГАРИПОВ, К.А. САМОЙЛОВ

СНИЖЕНИЕ СТОИМОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Ключевые слова: *накопитель энергии, алгоритм управления, пиковая нагрузка, контрольные часы, ценозависимое потребление, управление спросом, сглаживание.*

Прогнозная стоимость систем хранения энергии, в частности литий-ионных аккумуляторов, к 2030 г. составит менее 100 долл. Это указывает на перспективность использования накопителей и разработки соответствующих алгоритмов управления с целью снижения стоимости сетевой электроэнергии для потребителей. В настоящее время накопители применяются главным образом совместно с возобновляемыми источниками электроэнергии для сглаживания неравномерной генерации. Большая часть работ по использованию накопителей посвящена общим вопросам их использования, в то время как конкретные алгоритмы управления, направленные на достижение каких-либо целевых показателей, обычно не рассматриваются. Настоящая работа посвящена разработке и анализу способов снижения стоимости электроэнергии для предприятий и организаций, приобретающих электроэнергию по III и IV ценовым категориям. Рассмотрены алгоритмы управления, направленные на снижение пиковой мощности и минимизацию потребления сетевой электроэнергии в контрольные часы. Каждый алгоритм позволяет целенаправленно снижать соответствующую составляющую стоимости электроэнергии в зависимости от особенностей ценообразования для данной ценовой категории. Результаты исследования показывают, что первый алгоритм целесообразно применять при достаточно большой максимально запасаемой энергии (емкости) накопителя, сравнимой с суточным потреблением. Использование второго алгоритма позволяет снизить плату за мощность вплоть до нуля, при этом максимально запасаемая энергия (емкость) накопителя может быть относительно невелика – не выше среднего часового потребления в контрольные часы, что не требует значительных капитальных затрат на внедрение. Кроме снижения затрат для предприятия предлагаемые решения положительно влияют на энергосистему в целом, так как позволяют выравнять ее загрузку в течение суток. Срок окупаемости накопителей электроэнергии при использовании предлагаемых алгоритмов в зависимости от величины максимально запасаемой энергии может составлять 2-5 лет, что делает возможным и целесообразным их практическое использование с целью снижения затрат на электроэнергию для потребителей III и IV ценовых категорий.

Введение. Согласно прогнозу динамики стоимости систем хранения энергии на период до 2025 г., приведенному в концепции развития рынка систем хранения электроэнергии в Российской Федерации, стоимость 1 кВт·ч электроэнергии по отдельным типам систем хранения составит менее 200 долл. [3, 7]. По данным экспертов рынка, стоимость литий-ионных накопителей может снизится до 100 долл. за 1 кВт·ч к 2030 г. Такое снижение стоимости должно привести к широкому распространению систем хранения энергии в ближайшей перспективе, что определяет актуальность разработки алгоритмов, рационально использующих накопители с целью снижения стоимости сетевой электроэнергии для потребителей или достижения иных целевых показателей.

Одним из основных направлений использования накопителей является влияние на график электрических нагрузок источника питания или профиль мощности отдельного потребителя. Существует большое количество работ, посвященных исследованию связанных с этим вопросов. Так, в работе [10], имеющей обзорный характер, дается оценка эффективности использования накопителей электроэнергии в энергосистеме. Автор справедливо отмечает, что важнейшим стимулом использования накопителей является возможность выравнивания графиков нагрузки, и приводит границы экономически целесообразных значений удельных капиталовложений в систему накопления электроэнергии для решения указанной задачи. Этой же проблеме посвящена работа [1], где в обобщенном виде приведен алгоритм управления работой промышленного накопителя. Алгоритм построен на известных оптимальных параметрах стоимости электроэнергии из внешней электрической сети, однако способ определения этих параметров в работе не сообщается. Накопители электроэнергии широко применяются в системах электроснабжения, использующих возобновляемые источники энергии, по причине резкой неравномерности генерации таких источников. Так, в работе [6] в обобщенном виде предложены варианты построения гибридных электротехнических комплексов на основе фотоэлектрических систем при децентрализованном электроснабжении.

Существуют работы, посвященные использованию накопителей в отдельных отраслях экономики. Так, в работе [4] рассматривается применение накопителей на железнодорожном электротранспорте. Суточные графики нагрузок тяговых подстанций имеют резко неравномерный характер, поэтому их выравнивание, как указывают авторы, положительно отражается на снижении потерь электроэнергии.

В настоящей работе рассматривается возможность использования накопителей любой физической природы, расположенных у потребителя, как показано на схеме (рис. 1). Энергопринимающие устройства потребителя П и накопитель энергии НЭ подключены к электрической сети через контроллер К, который управляет потоком энергии накопителя НЭ по заданному алгоритму. Накопитель энергии должен иметь возможность работы в режиме частых и кратковременных зарядов и разрядов. Данное требование является одним из ключевых допущений в отношении применения накопителей с относительно небольшими потребителями, поскольку, как показано в работе [2], реальные кратковременные нагрузки таких потребителей существенно отличаются от усредненных нагрузок. Период дискретизации исходных графиков нагрузок Δt, принятый в настоящей работе, и других величин, изменяющихся во времени, составляет 1 час.

Цель работы состоит в разработке и анализе способов снижения стоимости электроэнергии для предприятий и организаций, приобретающих электроэнергию по III и IV ценовым категориям, на основе учета особенностей ценообразования.

Научная новизна заключается в разработке новых алгоритмов управления накопителями энергии с различной величиной максимально запасаемой

энергии, учитывающих особенности ценообразования; анализе технико-экономического эффекта их применения и определении срока окупаемости.

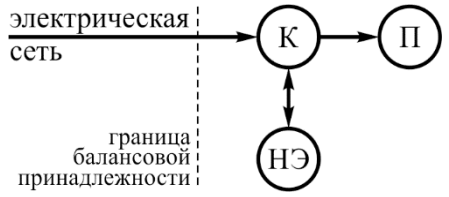


Рис. 1. Схема, демонстрирующая положение накопителя энергии
и направление потока электроэнергии:
П – энергопринимающие устройства потребителя; НЭ – накопитель энергии;
К – контроллер, реализующий алгоритм управления НЭ

Ценообразование для потребителей электроэнергии. В отношении потребителей – юридических лиц – при расчетах за потребленную электрическую энергию и электрическую мощность используется 6 ценовых категорий. Предельные уровни нерегулируемых цен на электроэнергию (мощность), поставляемую потребителям (покупателям), рассчитываются гарантирующими поставщиками электроэнергии[1]. Так, уровни цен ПАО «ТНС энерго Марий Эл», одного из гарантирующих поставщиков электроэнергии в Республике Марий Эл, за август 2019 г. опубликованы на сайте организации [5].

По I и II ценовым категориям может производиться учет электроэнергии для потребителей с максимальной мощностью энергопринимающих устройств ниже 670 кВт. Потребители I ценовой категории оплачивают отпущенную электроэнергию по фиксированной цене в целом за расчетный период. Предельный уровень нерегулируемых цен потребителей II ценовой категории зависит от зоны суток: выделены цены для двух зон суток (день, ночь) или трех зон суток (пик, полупик, ночь). Цены различаются также в зависимости от уровня напряжения, к которому подключен потребитель: НН – 0,4 кВ, СН II – 6 или 10 кВ, СН I – 20 или 35 кВ, ВН – 110 кВ и выше. При подключении потребителя на уровне НН тариф выше уровня ВН на 15–35%.

Для потребителей III ценовой категории стоимость электроэнергии складывается из двух составляющих:

1) стоимости электроэнергии $C_{1(3)}$, определяемой по ставкам $c_{1t(3)}$, руб./(МВт·ч), для фактических почасовых объемов покупки электрической энергии, отпущенных на соответствующем уровне напряжения, для потребителей с максимальной мощностью энергопринимающих устройств до или выше 670 кВт;

[1] Об определении и применении гарантирующими поставщиками нерегулируемых цен на электрическую энергию (мощность): постановление Правительства РФ от 29.12.2011 г. № 1179 // Правительство России: офиц. сайт. URL: http://government.ru/docs/14157/ (дата обращения: 18.12.2019).

2) стоимости мощности $C_{2(3)}$, определяемой по ставке за мощность $c_{2(3)}$, руб./МВт в месяц, приобретаемую потребителем (покупателем), предельного уровня нерегулируемых цен.

Значения почасовых ставок за электроэнергию c_{1t} и ставки за мощность $c_{2(3)}$ за август 2019 г. приведены в [5]. При расчете составляющей (2) ставка применяется к средней мощности в часы максимального совокупного потребления электроэнергии в субъекте Российской Федерации (контрольные часы), которые публикуются АО «Администратор торговой системы» по истечении каждого расчетного периода [9].

Для потребителей IV ценовой категории стоимость электроэнергии определяется суммой трех составляющих. Первые две составляющие стоимости $C_{1(4)}$ и $C_{2(4)}$ аналогичны этим составляющим для потребителей III ценовой категории. Помимо них добавляется плата за содержание электрических сетей $C_{3(4)}$ по ставке $c_{3(4)}$, руб./МВт в месяц, дифференцированной по уровням напряжения. Данная составляющая определяется по максимальной мощности в часы пиковых нагрузок. Плановые часы пиковой нагрузки публикуются АО «Системный оператор Единой энергетической системы» на год вперед [8].

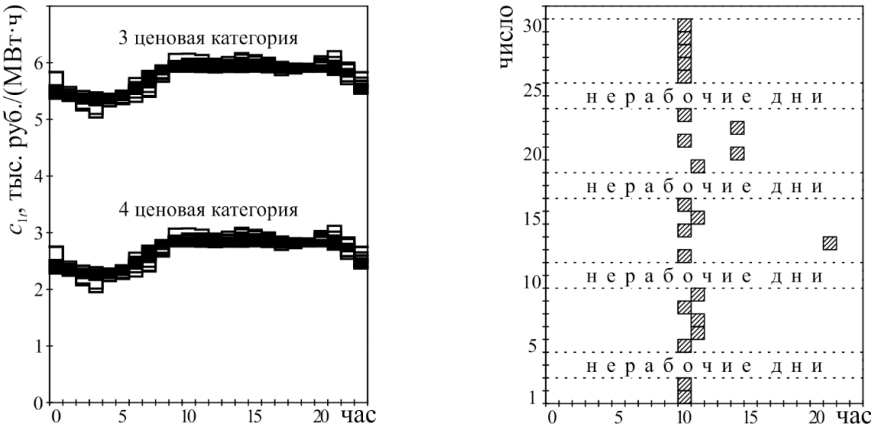
Таким образом, стоимость электроэнергии для потребителей III и IV ценовой категории соответственно равна

$$C_{\Sigma(3)} = C_{1(3)} + C_{2(3)} = \sum_t \left(P_t \cdot \Delta t \cdot c_{1t(3)} \right) + \frac{c_{2(3)}}{n_{t\kappa}} \cdot \sum_{t\kappa} P_{t\kappa} \,,$$

$$C_{\Sigma(4)} = C_{1(4)} + C_{2(4)} + C_{3(4)} = \sum_t \left(P_t \cdot \Delta t \cdot c_{1t(4)} \right) + \frac{c_{2(4)}}{n_{t\kappa}} \cdot \sum_{t\kappa} P_{t\kappa} + c_{3(4)} \cdot \max\left\{ P_{tn} \right\},$$

где P_t – усредненное значение мощности за интервал времени Δt номер t; $P_{t\kappa}$ – усредненное значение мощности за интервал времени Δt в час максимального совокупного потребления электроэнергии в субъекте Российской Федерации (контрольные часы) номер $t\kappa$; P_{tn} – усредненное значение мощности за интервал времени Δt в час пиковой нагрузки номер tn; $t\kappa$ – номер контрольного часа; $n_{t\kappa}$ – количество рабочих дней, за которое производится усреднение, равное количеству контрольных часов в расчетном периоде; tn – номер часа пиковой нагрузки; $\max\{P_{tn}\}$ – максимальное из усредненных значений мощностей в часы пиковых нагрузок.

Значения ставок для фактических почасовых объемов покупки электрической энергии для потребителей III и IV ценовых категорий, отпускаемой на уровне напряжения НН, для потребителей с максимальной мощностью энергопринимающих устройств до 670 кВт за август 2019 г. приведен на рис. 2, *а*. Значения ставок для потребителей III ценовой категории выше ставок потребителей IV ценовой категории приблизительно в 2 раза, так как по III ценовой категории составляющая платы за мощность C_2 единственная, а по IV ценовой категории, помимо составляющей C_2, предусмотрена плата за содержание электрических сетей C_3. Изменение величины ставки в течение суток отражает в целом загрузку энергосистемы: в часы пиковых нагрузок цена на электроэнергию выше.



а *б*

Рис. 2. Ставки для фактических почасовых объемов покупки электрической энергии для потребителей III и IV ценовых категорий (*а*) и контрольные часы (*б*) за август 2019 г.

На рис. 2, *б* показаны часы максимального совокупного потребления электроэнергии (контрольные часы) для Республики Марий Эл за август 2019 г. По средней потребляемой мощности в эти часы рассчитывается плата за мощность. В большинстве случаев контрольные часы приходятся на 10, 11, реже на 14, 17 или 21 час. Учитываются только рабочие дни.

Алгоритмы управления накопителем. Рассматривались следующие два алгоритма управления накопителем.

Алгоритм № 1 направлен на сглаживание пиков потребления электроэнергии. Накопитель энергии разряжается в периоды, когда потребляемая мощность P выше сглаженного значения мощности $P_{\text{ф}}$, т.е. разность $P_d = P - P_{\phi} > 0$. В ином случае при $P_d \le 0$, накопитель заряжается от электрической сети вплоть до максимального значения $W_{\max}$. Предельная мощность в периоды разряда и заряда накопителя ограничена. Мощность, отдаваемая накопителем:

$$P_{\text{н}} = f_c(p),$$

где

$$p = \begin{cases} P_d \cdot w^x \cdot \left(\dfrac{f_{line}(P_d, P_{\lim})}{P_{\lim}} \right), & \text{если } P_d > 0; \\ P_d, \quad \text{если } P_d \le 0, \end{cases} \qquad (1)$$

причем при $P_d > 0$ происходит разряд, а при $P_d \le 0$, – заряд накопителя; разность фактического и сглаженного значения мощности

$$P_d = P - P_{\phi};$$

относительное значение запасенной в накопителе энергии

$$w = \frac{W}{W_{\max}};$$

$f_c(p)$ – функция, ограничивающая заряд накопителя выше максимально запасаемой энергии $W_{\max}$ и разряд накопителя ниже нуля. Если накопитель полностью заряжен, т.е. $W - P_t \cdot \Delta t \ge W_{\max}$, то

$$f_c(p) = \begin{cases} P_t, \text{ если } P_t \geq 0 \\ P_t - \dfrac{W}{\Delta t}, \text{ если } P_t < 0. \end{cases}$$

Если накопитель полностью разряжен, т.е. $W - P_t \cdot \Delta t \leq 0$, то

$$f_c(p) = \begin{cases} \dfrac{W}{\Delta t}, \text{ если } P_t \geq 0 \\ P_t, \text{ если } P_t < 0. \end{cases}$$

В остальных случаях, если запасенная энергия накопителя $0 < (W - P_t \cdot t_h) \leq W_{\max}$,

$$f_c(p) = f_{sigm}(p, P_{\lim}).$$

Линейная f_{line} и сигмоидальная f_{sigm} функции насыщения равны, соответственно:

$$f_{line}(p, P_{\lim}) = \begin{cases} +p, \text{ если } p > P_{\lim} \\ -p, \text{ если } p < P_{\lim} \\ p \text{ в остальных случаях.} \end{cases}$$

$$f_{sigm}(p, P_{\lim}) = P_{\lim} \cdot \frac{\exp\left(\dfrac{2p}{P_{\lim}}\right) - 1}{\exp\left(\dfrac{2p}{P_{\lim}}\right) + 1}.$$

В алгоритме № 1 мощность, отдаваемая накопителем при разряде, нелинейно зависит от разности P_d и запасенной энергии накопителя w. Причем показатель степени $x \in (0; 1)$ служит для ограничения скорости разряда накопителя по мере снижения запаса его энергии. Показатель степени $y > 1$ введен с целью увеличения мощности разряда накопителя по мере роста разности P_d.

Учитывая особенности ценообразования для потребителей III и IV ценовых категорий, можно предложить другой способ снижения затрат на электроэнергию при использовании накопителей. Использование энергии накопителей в контрольные часы вместо энергии из электрической сети позволит значительно снизить плату за мощность – составляющую C_2, вплоть до нуля. Заряд накопителей можно перенести на периоды минимального потребления предприятия и энергосистемы. Максимально запасаемая энергия (емкость) накопителей может быть относительно невелика – не выше среднего часового потребления в контрольные часы, что не требует значительных капитальных затрат на внедрение. Предлагаемое решение положительно влияет на энергосистему в целом, так как позволяет выровнять ее загрузку в течение суток.

Алгоритм № 2 реализует предложенный способ снижения затрат на электроэнергию при использовании накопителей. Разряд накопителя происходит только в контрольные часы $t = t\kappa$, обеспечивая минимизацию потребляемой из сети мощности. От алгоритма № 1 он отличается лишь значением p в формуле (1):

$$p = \begin{cases} P_d, \text{ если } P_d > 0 \text{ и } t = t\kappa \\ P_d, \text{ если } P_d \le 0 \\ p \text{ в остальных случаях.} \end{cases}$$

Эффективность реализации предложенных алгоритмов управления накопителем оценивалась на примере предприятия г. Йошкар-Олы, профиль мощности которого за август 2019 г. представлен на рис. 3 в виде кривой 1. В виде кривой 2 показано сглаженное значение мощности. Кривая 2 получена как среднее арифметическое результатов фильтрации исходной кривой 1 в прямом и обратном направлениях с использованием фильтра Калмана с коэффициентом 0,025. На практике в рассматриваемый момент времени известен только фактический профиль мощности. Получить начальные данные для фильтрации в обратном направлении можно, используя предсказание профиля мощности на сутки вперед с использованием рекуррентной нейронной сети.

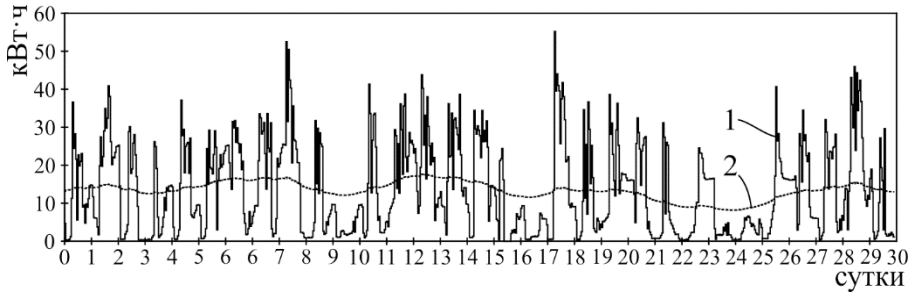


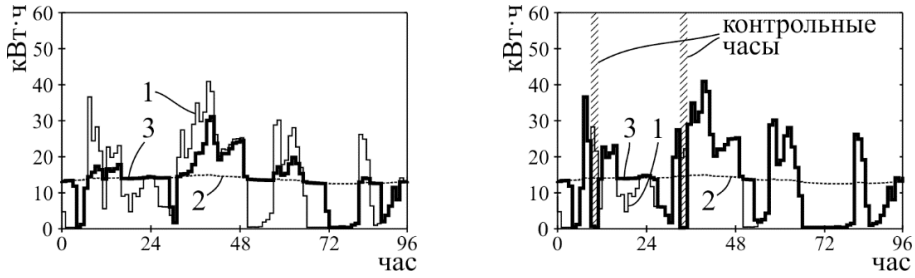
Рис. 3. Профиль мощности предприятия за август 2019 г.:
1 – исходный профиль мощности $P(t)$; 2 – сглаженное значение $P_\phi(t)$

Оценка предложенных алгоритмов выполнена в данной работе с использованием метода компьютерного моделирования. Авторами разработана компьютерная программа, написанная на языке Python 2.7, предназначенная для моделирования работы накопителя на основе приведенных алгоритмов, обработки данных и вывода информации.

Для моделирования принят накопитель с предельно запасаемой энергией 100 кВт·ч, в алгоритме № 1 показатели степени приняты равными $x = 0{,}7$, $y = 2$.

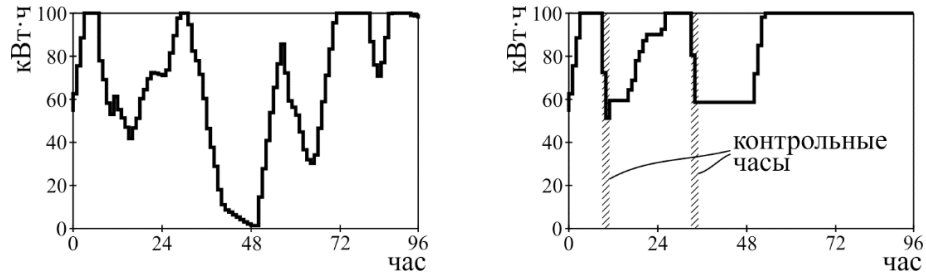
Различие алгоритмов управления демонстрирует рис. 4, на котором приведены фрагменты профиля мощности системы «потребитель – накопитель энергии» в случае применения алгоритмов управления № 1 и № 2.

На рис. 5 показаны соответствующие изменения запасенной энергии накопителя, при условии заряда в начальный момент на 50 кВт·ч. Применение алгоритма № 1 приводит к сглаживанию потребляемой из сети пиковой мощности, как показано на рис. 4, *а*. По рис. 4, *б* и рис. 5, *б*, полученному при использовании алгоритма № 2, видно, что в контрольные часы потребляемая из сети мощность равна нулю, что обеспечивается за счет разряда накопителя. Заряд накопителя происходит только в периоды минимальной загрузки, в остальное время профиль мощности повторяет исходный.



а *б*

Рис. 4. Фрагмент профиля мощности с использованием алгоритмов управления накопителем № 1 (*а*) и № 2 (*б*): 1 – исходный профиль мощности $P(t)$; 2 – сглаженное значение $P_ф(t)$; 3 – профиль мощности при использовании накопителя электроэнергии



а *б*

Рис. 5. Уровень запасенной энергии накопителя при использовании алгоритма управления накопителем № 1 (*а*) и № 2 (*б*)

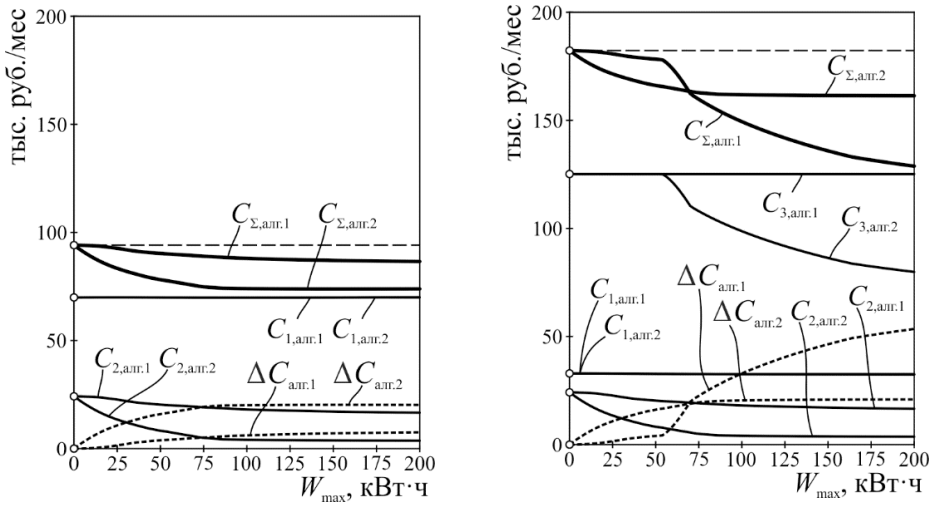
Методом компьютерного моделирования выполнен анализ затрат на электроэнергию при использовании алгоритмов управления № 1 и № 2 в зависимости от максимальной запасаемой энергии накопителя. Так, на рис. 6 приведены зависимости отдельных составляющих затрат при расчете по III (*а*) и IV (*б*) ценовым категориям. Пунктирными линиями показана разница затрат на электроэнергию при использовании накопителей $C_{\Sigma(Wa\neq 0)}$ по сравнению с затратами без использования накопителей $C_{\Sigma(Wa=0)}$:

$$\Delta C = C_{\Sigma(Wa=0)} - C_{\Sigma(Wa\neq 0)}.$$

При расчете по III и IV ценовой категории составляющая стоимости C_1 практически не зависит от емкости накопителя, так как суммарный объем электроэнергии, полученной из электрической сети системой «потребитель – накопитель энергии», одинаков при использовании обоих алгоритмов. Имеет место лишь небольшая выгода, связанная с переносом некоторой части потребления с периода повышенной нагрузки энергосистемы днем (с 7 по 22 час), в которой почасовые ставки на электроэнергию выше, см. рис. 2, *а*, на периоды минимальной загрузки ночью.

С увеличением максимальной запасаемой энергии существенно снижается составляющая стоимости C_2 при расчете как по III, так и по и IV ценовым категориям, что связано со снижением средней мощности в контрольные часы. В алгоритме № 2, ориентированном на минимизацию потребления в эти периоды времени, составляющая стоимости C_2 снижается наиболее значительно.

Составляющая C_3, см. рис. 6, *б*, зависящая от максимальной мощности в часы пиковой нагрузки, при расчете по IV ценовой категории и максимально запасаемой энергии до 55 кВт·ч практически не изменяется. Однако при использовании алгоритма № 1 с увеличением максимальной запасаемой накопителем энергии выше указанного значения начинает проявляться эффект снижения пиковой мощности. В результате составляющая C_3 резко снижается. В случае использования накопителя с максимально запасаемой энергией выше 150 кВт·ч алгоритм № 1 позволяет снизить стоимость электроэнергии почти на треть. Оптимальный выбор коэффициентов x и y в формуле (1) алгоритма № 1 позволяет добиться значительного снижения составляющей C_3 для любой заданной максимально запасаемой энергии накопителя.



а *б*

Рис. 6. Зависимость составляющих затрат на электроэнергию при расчете по III (*а*) и IV (*б*) ценовым категориям от максимальной запасаемой энергии накопителя для алгоритмов управления № 1 и № 2

Таким образом, алгоритм № 1, ориентированный на снижение составляющей C_3 при расчете по IV ценовой категории, дает значительный эффект с накопителями относительно большой максимальной запасаемой энергии. Алгоритм № 2, ориентированный на снижение составляющей C_2, дает наибольший эффект с накопителями относительно малой максимальной запасаемой энергии при расчетах как по III, так и по и IV ценовым категориям.

Для обоснования технико-экономической целесообразности капитальных затрат на установку накопителей энергии выполнена грубая оценка срока окупаемости, которая определялась для соответствующей ценовой категории и применяемого алгоритма управления по формуле

$$T = \frac{W_{max} \cdot Ц_{1кВт·ч}}{\Delta C},$$

где $Ц_{1кВт·ч}$ – цена 1 кВт·ч запасаемой накопителем электроэнергии. Результаты оценки срока окупаемости при $Ц_{1кВт·ч}$ = 15 тыс. руб./кВт·ч показаны на рис. 7. Полученные кривые показывают, что алгоритм № 2 целесообразно применять при относительно небольших емкостях накопителя, сопоставимых со среднечасовым потреблением, в рассматриваемом случае – до 50 кВт·ч. При больших емкостях накопителя при расчете по IV ценовой категории целесообразно применять алгоритм № 1. Срок окупаемости в этих случаях не превышает 2-5 лет. При равных сроках окупаемости более предпочтительно использовать накопители меньшей емкости. Приведенная оценка не учитывает затрат на внедрение накопителей, деградацию параметров накопителей, тенденцию снижения стоимости накопителей со временем, изменения цен на рынке электроэнергии и мощности, инфляцию и другие факторы. Однако приведенные результаты демонстрируют возможность и указывают на целесообразность применения накопителей для снижения стоимости электроэнергии потребителей за счет учета особенностей ценообразования.

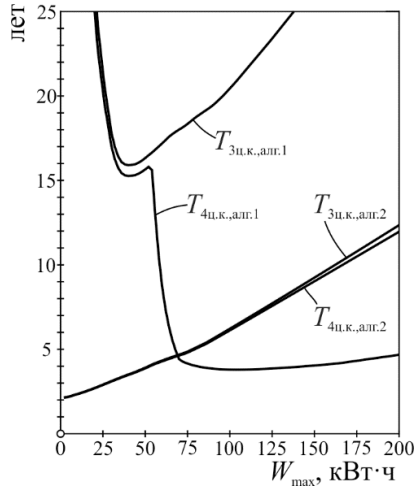


Рис. 7. Зависимость срока окупаемости капитальных затрат на накопители энергии от максимальной запасаемой энергии при расчете по III и IV ценовым категориям для алгоритмов управления № 1 и № 2

Практическая значимость работы заключается в возможности обоснованного выбора максимальной запасаемой энергии накопителя электроэнергии и применения алгоритмов управления, позволяющих эффективно использовать их по критерию минимизации затрат на электроэнергию. Выбор конкретных величин и параметров накопителей должен выполняться в каждом случае в результате технико-экономического обоснования.

Перспективу дальнейших исследований в обозначенном направлении могут составлять оптимизация и развитие предложенных алгоритмов управления по критерию минимизации отдельных составляющих затрат на электроэнергию, в том числе для потребителей, покупающих электроэнергию по V и VI ценовым категориям, а также детальный учет влияющих факторов при определении срока окупаемости.

Выводы. 1. Снижение стоимости накопителей энергии определяет перспективы их использования с целью снижения стоимости сетевой электроэнергии для потребителей.

2. С учетом особенностей ценообразования для потребителей III и IV ценовых категорий предложены 2 алгоритма управления накопителем энергии. Алгоритм № 1 направлен на сглаживание пикового потребления. Алгоритм № 2 рассчитан на сокращение потребления сетевой электроэнергии в часы максимального совокупного потребления в субъекте Российской Федерации (контрольные часы), что позволяет использовать накопитель с относительно небольшим уровнем максимально запасаемой энергии.

3. Срок окупаемости накопителей энергии при использовании алгоритма № 1 или № 2 в зависимости от величины максимально запасаемой энергии может составлять 2-5 лет, что делает возможным и целесообразным их практическое использование с целью снижения затрат на электроэнергию потребителей III и IV ценовых категорий.

Литература

1. *Дзюба А.П.* Использование накопителей электроэнергии в качестве инструментов управления спросом на электропотребление // Вестник Марийского государственного университета. Сер. Сельскохозяйственные науки. Экономические науки. 2019. № 2(18). С. 228–238.

2. *Добрего К.В.* Модель электрической нагрузки жилищно-коммунального объекта для исследования систем «Генератор – накопитель – потребитель» методом Монте-Карло // Наука и техника. 2017. № 2. С. 160–170. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170.

3. Концепция развития рынка систем хранения электроэнергии в Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/9013/74739 (дата обращения: 18.12.2019).

4. *Незевак В.Л., Черемисин В.Т.* Перспективы применения накопителей электрической энергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока // Бюллетень результатов научных исследований. 2015. №1 (14). С. 76–83.

5. Расчет предельных уровней нерегулируемых цен / ПАО «ТНС энерго Марий Эл» [Электронный ресурс]. URL: https://mari-el.tns-e.ru/disclosure/retail-market/raschet-predelnykh/ (дата обращения: 18.12.2019).

6. *Саврасов Ф.В.* Варианты построения автономных систем электроснабжения с использованием фотоэлектрических устройств и алгоритмы их работы [Электронный ресурс] // Вестник евразийской науки. 2013. № 6(19). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/varianty-postroeniya-avtonomnyh-sistem-elektrosnabzheniya-s-ispolzovaniem-fotoelektricheskih-ustroystv-i-algoritmy-ih-raboty (дата обращения: 18.12.2019).

7. Система государственного стимулирования хранения электроэнергии в России [Электронный ресурс]. URL: https://minenergo.gov.ru/node/9013 (дата обращения: 18.12.2019).

8. Плановые часы пиковой нагрузки на 2019 год для территорий, отнесенных к ценовым зонам оптового рынка электрической энергии и мощности, и территорий, отнесенных к неценовым зонам оптового рынка электрической энергии и мощности / АО «СО ЕЭС» [Электронный ресурс]. URL: https://so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/2019/pik_chas2019.pdf (дата обращения: 18.12.2019).

9. Фактические данные для расчета предельных уровней нерегулируемых цен в ценовых зонах. Часы пиковой нагрузки [Электронный ресурс]. URL: https://www.atsenergo.ru/results/market/calcfacthour (дата обращения: 18.12.2019).

10. *Чернецкий А.М.* Оценка экономической эффективности использования накопителей электроэнергии в энергосистеме // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2013. № 4. С. 21–28.

ОРЛОВ АЛЕКСАНДР ИГОРЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой электромеханики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (karlorlov@gmail.com).

ВОРОБЬЕВ КОНСТАНТИН МУХТАРОВИЧ – старший преподаватель кафедры электроснабжения и технической диагностики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола; ведущий специалист ПАО «ТНС Энерго Марий Эл», Россия, Йошкар-Ола (wikonst@gmail.com).

ГАРИПОВ ИЛЬСУР ХАЛИЛЕВИЧ – кандидат технических наук, и.о. заведующего кафедрой электроснабжения и технической диагностики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (ilsur@bk.com).

САМОЙЛОВ КИРИЛЛ АНДРЕЕВИЧ – магистрант электроэнергетического факультета, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (fixator8814@gmail.com).

A. ORLOV, K. VOROBYEV, I. GARIPOV, K. SAMOILOV

ELECTRICITY COST REDUCTION FOR CONSUMERS BY USING ENERGY STORES

Key words: *energy storage, control algorithm, peak load, control hours, price-dependent consumption, demand response, smoothing.*

The estimated cost of energy storage systems, in particular, lithium-ion batteries, by 2030 will be less than $ 100. This indicates the prospects of using energy storages and the development of appropriate control algorithms in order to reduce the cost of network electricity for consumers. Currently, energy storages are mainly used in conjunction with renewable energy sources to smooth out torn generation. Most of the papers on the use of energy storages are devoted to general issues of their use, while specific control algorithms aimed at achieving any targets are usually not considered. This work is devoted to the development and analysis of ways of reducing the cost of electricity for organizations purchasing electricity in III and IV price categories. Control algorithms aimed at reducing peak power, and at minimizing the consumption of mains electricity in the control hours are considered. Each algorithm allows to purposefully reduce the corresponding component of the cost of electricity in accordance with the pricing features for the given price category. The results of the research show that the first algorithm is advisable to use with a sufficiently large maximum stored energy (capacity) of the storage, comparable to the daily consumption. Using the second algorithm allows reducing the power charge down to zero, while the maximum stored energy (capacity) of the storage can be relatively small – not higher than the average hourly consumption in the control hours, which does not require significant capital expenditures for implementation. In addition to reducing costs for the enterprise, the proposed solutions positively affect the energy system as a whole, as they allow to align its load during the day. The payback period of energy storage devices when using the proposed algorithms, depending on the value of the maximum stored energy, can be 2–5 years, which makes it possible and practical to use them in order to reduce electricity costs for consumers of III and IV price categories.

References

1. Dzyuba A.P. *Ispol'zovanie nakopitelei elektroenergii v kachestve instrumentov upravleniya sprosom na elektropotreblenie* [Use of energy storage devices as power demand management tools]. *Vestnik Mariiskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Sel'skokhozyaistvennye nauki. Ekonomicheskie nauki*, 2019, no. 2(18), pp. 228–238.

2. Dobrego K.V. *Model' elektricheskoi nagruzki zhilishchno-kommunal'nogo ob"ekta dlya issledovaniya sistem «Generator – nakopitel' – potrebitel'» metodom Monte-Karlo* [Model for Electric Load of Community Housing Projects to Investigate “Generator – Accumulator – Consumer” System While Using Monte-Carlo Method]. *Nauka i tekhnika*, 2017, no. 2, pp. 160–170. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170.

3. *Kontseptsiya razvitiya rynka sistem khraneniya elektroenergii v Rossiiskoi Federatsii* [The concept of development of the market for electric power storage systems in the Russian Federa-tion]. Available at: https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/9013/74739 (Accessed 18 December 2019).

4. Nezevak V.L., Cheremisin V.T. *Perspektivy primeneniya nakopitelei elektricheskoi energii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka* [Application prospects for electric energy storage devices in traction DC power supply system]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanii*, 2015, no. 1(14), pp. 76–83.

5. *Raschet predel'nykh urovnei nereguliruemykh tsen* [Calculation of marginal levels of unregulated prices]. PJSC «TNS energo Mari El». Available at: https://mari-el.tns-e.ru/disclosure/retail-market/raschet-predelnykh (Accessed 18 December 2019).

6. Savrasov F.V. *Varianty postroeniya avtonomnykh sistem elektrosnabzheniya s ispol'zovaniem fotoelektricheskikh ustroistv i algoritmy ikh raboty* [Variants of the autonomous power supply systems"s design with photovoltaic devices and algorithms for their work]. *Vestnik evraziiskoi nauki*, 2013, no. 6(19). Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/varianty-postroeniya-avtonomnyh-sistem-elektrosnabzheniya-s-ispolzovaniem-fotoelektricheskih-ustroystv-i-algoritmy-ih-raboty (Accessed 18 December 2019).

7. *Sistema gosudarstvennogo stimulirovaniya khraneniya elektroenergii v Rossii* [The system of state incentives for the storage of electricity in Russia]. Available at: https://minener-go.gov.ru/node/9013 (Accessed 18 December 2019).

8. *Planovye chasy pikovoi nagruzki na 2019 god dlya territorii, otnesennykh k tsenovym zonam optovogo rynka elektricheskoi energii i moshchnosti, i territorii, otnesennykh k netse-novym zonam optovogo rynka elektricheskoi energii i moshchnosti* [Scheduled peak hours for 2019 for territories assigned to price zones of the wholesale electricity and capacity market, and territories referred to non-price zones of the wholesale electricity and capacity market] JSC "System Operator of the Unified Energy System". Available at: https://so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/2019/pik_chas2019.pdf (Accessed 18 December 2019).

9. *Fakticheskie dannye dlya rascheta predel'nykh urovnei nereguliruemykh tsen v tsenovykh zonakh. Chasy pikovoi nagruzki* [Actual data for calculating marginal levels of unregulated prices in price zones. Peak hours]. Available at: https://www.atsenergo.ru/results/market/calcfacthour (Accessed 18.12.2019).

10. Chernetskii A.M. *Otsenka ekonomicheskoi effektivnosti ispol'zovaniya nakopitelei elektroenergii v energosisteme* [Assessment of Economic Efficiency Pertaining to Application of Energy Storage Units in Power System]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 2013, no. 4, pp. 21–28.

ORLOV ALEKSANDR – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Acting Head of Electro-Mechanics Department, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (karlorlov@gmail.com).

VOROBYEV KONSTANTIN – Senior Lecturer, Department of Power Supply and Technical Diagnostics, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola; Leading Specialist, PJSC «TNS Energo Mari El», Russia, Yoshkar-Ola (wikonst@gmail.com).

GARIPOV ILSUR – Candidate of Technical Sciences, Acting Head of Power Supply and Technical Diagnostics Department, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (ilsur@bk.com).

SAMOILOV KIRILL – Master's Program Student of Electrical Energy Faculty, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (fixator8814@gmail.com).

Формат цитирования: *Орлов А.И., Воробьев К.М., Гарипов И.Х., Самойлов К.А*. Снижение стоимости электроэнергии для потребителей за счет использования накопителей энергии // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 123–135.

УДК 621.31
ББК 31.2

А.И. ОРЛОВ, И.Х. ГАРИПОВ, К.А. САМОЙЛОВ

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕМ ДЛЯ СГЛАЖИВАНИЯ ПИКОВОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Ключевые слова: *накопитель электроэнергии, алгоритм управления, пиковая нагрузка, ценозависимое потребление, управление спросом, сглаживание, фильтр Калмана.*

Выравнивание профиля мощности потребителей за счет переноса пикового потребления на часы минимальной загрузки энергосистемы обеспечивает более эффективную и дешевую генерацию и распределение электроэнергии. Сглаживание профиля мощности осуществляется за счет применения балансирующих накопителей электроэнергии. В статье рассматривается алгоритм управления накопителем электроэнергии ограниченной емкости и мощности заряда и разряда, направленный на минимизацию затрат при условии нелинейной зависимости цены электроэнергии от потребляемой мощности. Алгоритм основан на сравнении исходного профиля мощности потребителя с его сглаженным значением, полученным путем фильтрации. Исследования алгоритма проводились на примере профиля мощности типичного офисного или коммунально-бытового потребителя путем его статистического анализа и компьютерного моделирования работы балансирующего накопителя. Для фильтрации использовался модифицированный фильтр Калмана, в котором усиление задавалось непосредственно. С уменьшением усиления Калмана снижается динамическое запаздывание сглаженного профиля мощности от исходного, но результат фильтрации становится более грубым. Установлено, что зависимость емкости балансирующего накопителя, способного обеспечить сглаживание исходного профиля мощности, от усиления Калмана близка к квадратичной. Приведен фрагмент профиля мощности и изменения запасенной энергии накопителя, полученные в результате моделирования. Применение алгоритма обеспечивает эффективное снижение пиковой нагрузки при условии наличия запасенной энергии в накопителе. С целью оценки эффективности алгоритма управления рассматривается нелинейная зависимость цены на электроэнергию от потребляемой мощности. Приводится зависимость стоимости электроэнергии за рассматриваемый период времени от величины запасаемой энергии накопителя. В рассматриваемом примере демонстрируется снижение стоимости электроэнергии за расчетный период в результате применения накопителя ограниченной емкости на 16%. Практическая ценность исследования состоит в возможности применения алгоритма управления для определения достаточной величины запасаемой энергии путем моделирования работы участка электроэнергетической системы с накопителем при известном профиле мощности.

Введение. Профиль мощности большинства промышленных или коммунально-бытовых потребителей электроэнергии характеризуется резкой неравномерностью. Пиковая мощность обычно потребляется в дневные и вечерние часы, минимальная – ночью. Спрос на электроэнергию в российских условиях характеризуется низкой эластичностью: потребители вынуждены покупать необходимое количество электроэнергии практически по любой цене. С ростом потребляемой мощности для генерации привлекаются все менее эффективные производители, вырабатывающие более дорогую электроэнергию. Зависимость предложения на рынке электроэнергии нелинейно зависит от объема: цена на

электроэнергию резко возрастает [6]. С распространением современных технологий и устройств в сфере контроля электроэнергии, в частности интервальных счетчиков, появлением соответствующей нормативной базы отдельные потребители приобретают возможность участия в оптовом рынке электроэнергии через агрегаторы управления спросом[1] [2]. Перенося собственное потребление на часы минимальной загрузки энергосистемы, т.е. сглаживая пиковое потребление за счет использования систем с накопителями энергии, потребители имеют возможность снижать затраты на электроэнергию.

Перспектива обеспечения всеобщего доступа к недорогим, надёжным, устойчивым и современным источникам энергии является целью № 7 устойчивого развития ООН [10]. Связанная с этим децентрализация энергетики, применение возобновляемых источников электроэнергии являются важными факторами снижения цены накопителей электроэнергии и также способствуют их широкому распространению. В связи с этим возрастает значимость проблемы эффективного управления накопителями электроэнергии.

Интерес исследователей к проблеме подтверждается большим количеством публикаций в области расчета параметров накопителей и разработки системам управления ими. В статье [4] дается обзор математических методов прогнозирования последовательностей, приводятся модель управления накопителями энергии на основе решения интегральных уравнений Вольтерра и результаты моделирования на примере ЭЭС Германии. В работах [3, 5], предлагается рассчитывать мощность накопителя в энергосистеме как наибольшее значение разности между номинальной мощностью генерации и потребления, а емкость – путем интегрирования этой разности. Аналогичных подход к определению емкости предлагается в работах [8, 9]. Однако вопрос получения профиля баланса мощности накопителя не рассматривается.

В статье [1] на примере железнодорожных потребителей приводится способ определения емкости накопителей по критерию минимума потерь активной мощности. Оптимальный режим работы накопителей предлагается вычислять исходя из усреднения профиля мощности за расчетный период времени в прошлом.

В данной работе рассматривается алгоритм управления балансирующим накопителем электроэнергии, присоединяемым через преобразователь к электрической сети параллельно с потребителем. Использование управляемого балансирующего накопителя обеспечивает сглаживание профиля мощности

[1] О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам функционирования агрегаторов управления спросом на электрическую энергию в Единой энергетической системе России, а также совершенствования механизма ценозависимого снижения потребления электрической энергии и оказания услуг по обеспечению системной надежности: постановление Правительства РФ от 20.03.2019 г. № 287 Электронный ресурс] // Правительство РФ: сайт. URL: http://government.ru/docs/all/121142 (дата обращения: 02.09.2019); План мероприятий («дорожная карта») по совершенствованию законодательства и устранению административных барьеров в целях обеспечения реализации Национальной технологической инициативы по направлению «Энерджинет»: утв. распоряжением Правительства РФ от 28.04.2018 г. № 830-р [Электронный ресурс] // Правительство России: сайт. URL: http://government.ru/docs/all/116445/ (дата обращения: 02.09.2019).

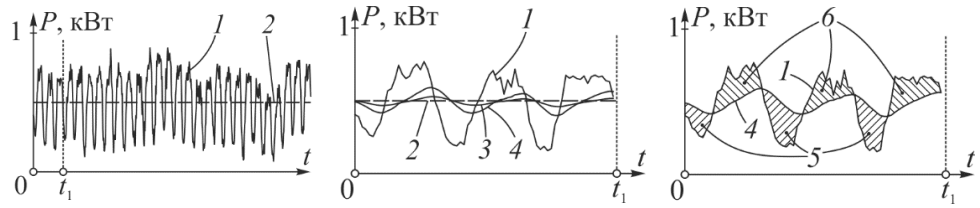
системы «потребитель – накопитель» относительно электрической сети. Рассматриваемый накопитель имеет ограниченную емкость, под которой понимается максимальная величина запасаемой им энергии. Предельные мощности заряда и разряда накопителя также ограничены.

Цель работы состоит в разработке алгоритма управления накопителем электроэнергии, направленного на минимизацию затрат на электроэнергию для потребителей при условии нелинейной зависимости цены электроэнергии от мощности путем сглаживания пиков потребления.

Научная новизна работы заключается в получении зависимостей емкости накопителя от степени сглаживания почасового профиля мощности нагрузки. В работе дается оценка затрат на электроэнергию в случае использования предложенного алгоритма управления накопителем.

Используемые методы включают элементы статистического анализа, линейной фильтрации. Компьютерное моделирование и обработка данных выполнены в разработанных авторами программах на языках Python и JavaScript.

В качестве исходных данных для моделирования выбран почасовой профиль мощности офисного помещения, работающего в круглосуточном режиме, расположенного в г. Йошкар-Ола, за февраль 2018 г. Исходный профиль мощности изображен в виде кривой 1 (рис. 1, *а*). Выбранный профиль мощности является типичным для большинства офисных и коммунально-бытовых потребителей. В течение рассматриваемого периода усредненная в течение часа мощность изменялась от 0,0725 до 0,897 кВт. Среднее месячное значение мощности, показанное линией 2 на рис. 1, *а*, составляет 0,518 кВт.



а *б* *в*

Рис. 1. Исходный почасовой профиль мощности потребителя (*а*);
значения профиля мощности после фильтрации (*б*);
иллюстрация определения емкости накопителя (*в*):
1 – почасовой профиль мощности потребителя;
2 – среднее значение почасового профиля мощности;
3 и 4 – значения профиля мощности после фильтрации при $K = 0{,}025$ и $K = 0{,}075$;
5 и 6 – емкости заряда и разряда накопителя

Предлагаемый алгоритм управления накопителем основан на фильтрации исходного профиля мощности. В работе применялась модификация фильтра Калмана [7]. Специфика данного фильтра требует знания модели потребителя с выходным значением в виде почасовой мощности. При постоянных дисперсиях выходного значения модели потребителя и датчика усиление Калмана K асимптотически приближается к некоторому постоянному

значению. Построение точной модели изменения мощности потребителя осложняется большим количеством влияющих факторов и не всегда возможно, поэтому усиление Калмана K задавалось непосредственно в виде постоянной. Если результат фильтрации в момент времени t известен, то значение в момент времени $t + 1$ определялось по формуле

$$P_{\text{ф}.t+1} = \text{K}_{t+1} \cdot P_{t+1} + (1 - \text{K}_{t+1}) \cdot P_{\text{ф}.t},$$

где P – исходное значение; $P_{\text{ф}}$ – результат фильтрации; K – усиление Калмана.

Результат применения фильтра Калмана к исходному профилю мощности продемонстрирован на рис. 1, *б*. Кривые 3 и 4 соответствуют K = 0,025 и K = 0,075. Используемый фильтр прост в реализации, но результат фильтрации характеризуется динамическим запаздыванием сглаженной кривой от исходной. Запаздывание зависит от величины коэффициента K: при K = 0 результат фильтрации $P_{\text{ф}.t+1} = P_{\text{ф}.t} = P_{\text{ср.}}$, с ростом коэффициента K динамическое запаздывание снижается, но результат фильтрации становится более грубым. Применение других усредняющих фильтров, например, свертки исходного профиля мощности с оконной функцией, дает аналогичный результат, но требует большего количества вычислительных операций.

Минимальная емкость балансирующего накопителя $W_{a.e.\min}$, способного обеспечить сглаживание исходного профиля мощности, определяется путем интегрирования профиля баланса мощности накопителя, который вычисляется как разница исходного профиля мощности и результата его фильтрации (рис. 1, *в*). Площади 5 соответствуют энергии заряда накопителя, 6 – энергии разряда. Для оценки степени фильтрации исходного профиля мощности в работе использована ошибка, полученная по методу наименьших квадратов:

$$e = 0{,}5 \cdot \Sigma_t \, (P_t - P_{\phi.t})^2.$$

Значения ошибки e_* и минимальной емкости $W_{a.e.\min*}$, выраженные в относительных единицах, в зависимости от усиления Калмана K показаны на рис. 2, *а* в виде кривых 1 и 2. В качестве базисных приняты значения при K = 0: $W_{a.e.\min} = 4{,}157$ кВт·ч и $e = 14{,}033$. Минимальная емкость накопителя $W_{a.e.\min*}$ и ошибка e_* практически пропорциональны $(\text{K} - 1)^2$ при $\text{K} \in (0; 1)$, зависимость $W_{a.e.\min*}$ от e_* близка к линейной.

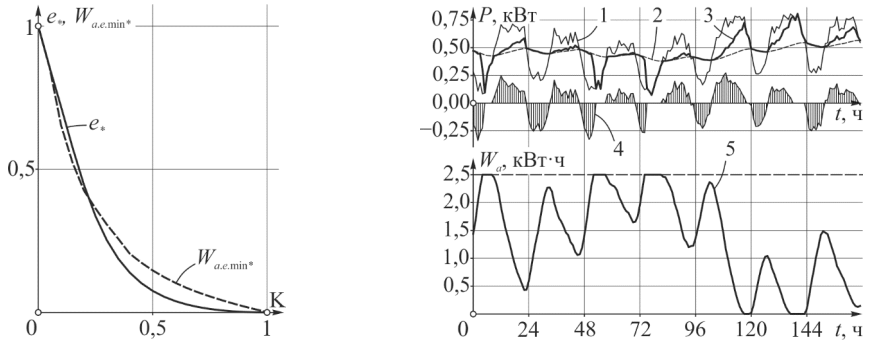
Алгоритм управления накопителями состоит в следующем. В момент времени t определяется разница между фактическим P и сглаженным значением мощности $P_{\text{ф}}$:

$$P_d = P - P_{\phi}.$$

Мощность, отдаваемая накопителем:

$$P_t = \begin{cases} f_s\left(P_d \cdot W_{a*}{}^{x}\right), \text{ если } P_d > 0, \text{ разряд накопителя,} \\ f_s\left(P_d\right), \text{ если } P_d \le 0, \text{ заряд накопителя,} \end{cases}$$

где $W_{a*} = W_a / W_{a.e}$ – запасенная энергия накопителя, о.е.; $W_{a.e}$ – емкость накопителя, кВт·ч; $x \in (0; 1)$ – показатель степени, определяющий мощность разряда накопителя в зависимости от запасенной в нем энергии: с уменьшением x мощность разряда увеличивается. Функция f_s необходима для ограничения мощности заряда или разряда накопителя и принадлежит к классу сигмоид.



а *б*

Рис. 2. Зависимости e_*(K) и $W_{a.e.min*}$(K) (*а*); профили мощности и изменение энергии накопителя во времени (*б*): 1 – исходный профиль мощности; 2 – профиль мощности после фильтрации; 3 – профиль мощности в результате применения алгоритма; 4 – мощность, передаваемая накопителем в сеть; 5 – энергия, запасенная в накопителе

При моделировании в качестве функции f_s использован гиперболический тангенс с асимптотами –1/+1 кВт, показатель степени x принят равным 0,4. Ограниченность емкости накопителя учтена введением функции f_c. Если t_h – шаг по времени в профиле мощности, то мощность, передаваемая накопителем в сеть:

$$P_н = f_c(P_t).$$

При достижении полного заряда $W_a - P_t \cdot t_h \geq W_{a.e}$:

$$P_н = \begin{cases} P_t, \text{ если } P_t \geq 0, \\ P_t - \dfrac{W_a}{t_h}, \text{ если } P_t < 0. \end{cases}$$

При достижении минимума заряда $W_a - P_t \cdot t_h \leq 0$:

$$P_н = \begin{cases} \dfrac{W_a}{t_h}, \text{ если } P_t > 0, \\ P_t, \text{ если } P_t \leq 0. \end{cases}$$

На рис. 2, *б* приведен фрагмент профиля мощности, полученный в результате моделирования потребителя, имеющего исходный профиль мощности, с накопителем емкостью 2,5 кВт·ч. Такая емкость недостаточна для полной компенсации пиков потребления исходного профиля мощности, но демонстрирует особенности предложенного алгоритма управления. Уровень запасенной в накопителе энергии показан на рис. 2, *б* в виде кривой 5, в начальный момент времени в рассматриваемом фрагменте накопитель заряжен на 50%. Кривые 1 и 2 соответствуют исходному профилю мощности и его значению после фильтрации с K = 0,025. Профиль мощности, полученный в результате применения алгоритма управления накопителем, изображен в виде кривой 3; профиль баланса мощности накопителя – 4. Эффективное снижение пиковой нагрузки происходит на всех участках при условии наличия запасенной энергии в накопителе. На участке $96 < t < 144$ ч показан случай,

когда запасенная энергия не достигает полной емкости накопителя, в результате накопитель не обеспечивает полного сглаживания пиков на данном участке. Причиной полного разряда накопителя на данном временном интервале является динамическое запаздывание сглаженной кривой 2 от исходного профиля мощности 1 и, как следствие, превышение энергии, необходимой для сглаживания пиковой нагрузки в период разряда, доступной емкости накопителя. Динамическое запаздывание можно снизить, используя нелинейную фильтрацию.

Оценка эффективности алгоритма управления накопителем выполнялась путем вычисления стоимости электроэнергии за расчетный период при условии нелинейной зависимости цены на электроэнергию Ц, руб./кВт·ч, от уровня потребляемой мощности, P. Для моделирования использовалось зависимость $Ц = 1 + 4 \cdot P^4$, показанная на рис. 3, *а*. В виде гистограмм 1–3 на данном рисунке показаны частоты, с которыми встречаются значения мощности: 1 – в исходном профиле мощности; 2 – в профиле мощности, получаемом в результате применения алгоритма; 3 – в сглаженном профиле мощности.

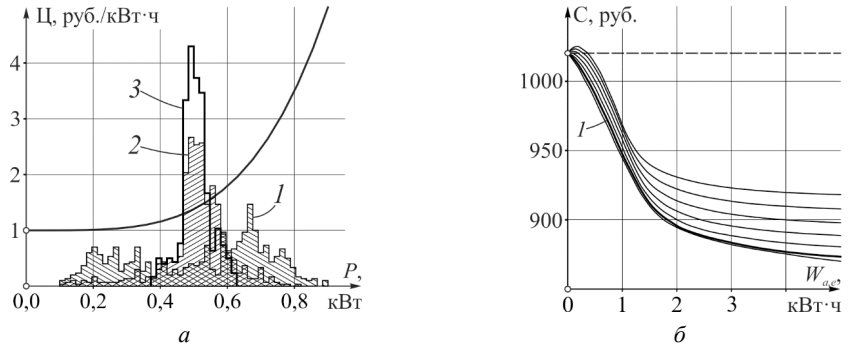


Рис. 3. Зависимость цены на электроэнергию от уровня потребляемой мощности (*а*); зависимость стоимости электроэнергии от емкости накопителя (*б*)

Сравнение гистограмм позволяет отметить, что без использования накопителя значительное количество энергии потребляется по завышенной цене. При использовании предложенного алгоритма стоимость потребленной электроэнергии оказывается ниже. Зависимость стоимости электроэнергии за расчетный период $С = \Sigma_t Ц(P_t)$, руб., от емкости применяемого накопителя изображена на рис. 3, *б* в виде семейства кривых: нижняя кривая соответствует сглаживанию профиля мощности с K = 0, верхняя кривая – K = 0,150. Кривая 1 получена при K = 0,025. Зависимости, показанные на рис. 3, *б*, позволяют оценить оптимальную емкость накопителя, составляющую в рассматриваемом примере 2-3 кВт·ч. Дальнейшее увеличение емкости и связанное с этим увеличение капитальных затрат ведет лишь к незначительному снижению стоимости электроэнергии. При использовании представленного алгоритма управления накопителем емкостью 2,5 кВт·ч стоимость электроэнергии за расчетный период снижается с 1020 до 856 руб. при сглаживании исходного профиля мощности с K = 0,025.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования предложенного алгоритма для определения емкости накопителя электроэнергии, являющегося составной частью устройства сглаживания пиков потребления. Значение емкости накопителя должно определяться в результате технико-экономического обоснования.

Существует возможность совершенствования предложенного алгоритма путем краткосрочного предсказания профиля мощности с использованием искусственной нейронной сети, что составляет перспективу дальнейших исследований по данной теме.

Выводы. 1. Применение балансирующих накопителей электроэнергии позволяет снизить затраты на покупку электроэнергии при нелинейной зависимости цены от мощности за счет переноса пикового потребления на периоды минимальной загрузки, соответствующие минимальной стоимости электроэнергии.

2. Минимальная емкость балансирующего накопителя определяется путем интегрирования профиля баланса мощности накопителя, вычисляемого как разность исходного и сглаженного профиля мощности. Сглаженный профиль мощности находится путем фильтрации исходного профиля мощности.

3. Предложенный алгоритм управления накопителем позволяет эффективно сглаживать пиковое потребление электроэнергии. Алгоритм учитывает ограниченность емкости и мощности заряда/разряда накопителя.

4. Применение предложенного алгоритма управления позволяет снизить стоимость электроэнергии. В рассматриваемых условиях стоимость электроэнергии снизилось на 16% с 1020 до 856 руб.

Литература

1. *Москалев Ю.В.* Определение оптимальной энергоемкости и мощности накопителя энергии для управления графиками нагрузок железнодорожных потребителей // Известия Транссиба. 2014. № 3(19). С. 75–81.

2. Приложение 19.9. Регламент участия на оптовом рынке покупателей с ценозависимым потреблением [Электронный ресурс] // Ассоциация НП Совет рынка: сайт. URL: https://www.np-sr.ru/ru/regulation/joining/reglaments/1992 (дата обращения: 02.09.2019).

3. *Рыбалко А.Я., Дыбрин С.В.* Выбор емкости накопителя энергии для обеспечения снижения максимума потребляемой мощности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 8. С. 356–361.

4. *Сидоров Д.Н., Жуков А.В., Муфтахов И.Р.* Интегральные модели для управления накопителями энергии на основе прогноза нагрузки в ЭЭС с возобновляемыми источниками генерации // Известия Иркутского государственного университета. 2018. Т. 26. С. 162–172.

5. *Сокольникова Т.В., Суслов К.В., Ломбарди П.* Определение оптимальных параметров накопителя для интеграции возобновляемых источников энергии в изолированных энергосистемах с активными потребителями // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 10(105). С. 206–211.

6. Технология ценозависимого потребления [Электронный ресурс] // Акционерное общество «Системный оператор Единой энергетической системы»: сайт. URL: https://so-ups.ru/?id=dr (дата обращения: 02.09.2019).

7. Фильтр Калмана-Бюси: пер. с нем. / Г. Зиффлинг, К. Браммер. М.: Наука; Физматлит, 1982. 200 с.

8. *Aldana N.L.D., Hernández A.C.L., Vasquez J.C., Guerrero J.M.* Energy management system with equalization algorithm for distributed energy storage systems in PV-active generator based low

voltage DC microgrids. In: Proc. of the 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM). IEEE Press, 2015, pp. 293–298.

9. *Klaimi J., Rahim-Amoud R., Merghem-Boulahia L., Jrad A.* Energy management algorithms in smart grids: state of the art and emerging trends. International Journal of Artificial Intelligence and Applications (IJAIA), 2016, vol. 7, no. 4, pp. 25–45.

10. United Nations. Goal 7 Targets: сайт [Электронный ресурс]. URL: http://www.un-energy.org/sdg7/ (дата обращения: 02.09.2019).

ОРЛОВ АЛЕКСАНДР ИГОРЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой электромеханики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (eef@marsu.ru, karlorlov@gmail.ru).

ГАРИПОВ ИЛЬСУР ХАЛИЛЕВИЧ – кандидат технических наук, и.о. заведующего кафедрой электроснабжения и технической диагностики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (eef@marsu.ru, ilsur@bk.ru).

САМОЙЛОВ КИРИЛЛ АНДРЕЕВИЧ – магистрант электроэнергетического факультета, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (fixator8814@gmail.com).

A. ORLOV, I. GARIPOV, K. SAMOILOV

ELECTRIC STORAGE CONTROL ALGORITHM FOR SMOOTHING PEAK ELECTRIC POWER CONSUMPTION

Key words: *electric energy storage, control algorithm, peak load, price-dependent consumption, demand response, smoothing, Kalman filter.*

Smoothing the power profile of consumers by transferring peak consumption to hours of minimum load of the power system provides more efficient and inexpensive generation and distribution of electricity. Smoothing power profile is carried out by the use of balancing electricity storage. The paper considers the control algorithm of an energy storage device of limited capacity and charge and discharge power, aimed at minimizing costs under the condition of non-linear dependence of the price of electricity on power consumption. The algorithm is based on comparison of the original power profile to its smoothed value, obtained by fitering. Algorithm research was carried out on the example of the power profile of a typical office or household consumer by means of its statistical analysis and computer simulation of the balancing electric energy storage. For filtering, a modified Kalman filter was used, in which the gain was set directly. With a decrease in Kalman gain, the dynamic delay of the smoothed power profile from the original one decreases, but the filtering result becomes coarser. It is found out that the dependence of the capacity of the balancing drive, capable of smoothing the initial power profile, on the Kalman gain is close to quadratic. The fragment of the power profile and changes in the stored energy of the drive obtained as a result of simulation are presented. The application of the algorithm provides an effective reduction in peak load, provided that there is stored energy in the electric energy storage. In order to assess the effectiveness of the control algorithm, a nonlinear dependence of the price of electricity on power consumption is considered. The dependence of the cost of electricity for the considered period of time on the value of the stored energy of the electric energy storage is given. This example demonstrates a decrease in the cost of electricity for the billing period as a result of using a limited-capacity electric energy storage by 16%. The practical value of the study lies in the possibility of using a control algorithm to determine a sufficient amount of stored energy by modeling the operation of a section of an electric power system with a drive with a known power profile.

References

1. Moskalev Yu.V. *Opredelenie optimal'noi energoemkosti i moshchnosti nakopitelya energii dlya upravleniya grafikami nagruzok zheleznodorozhnykh potrebitelei* [Determination of optimal energy intensity and energy storage capacity for managing load schedules for railway consumers]. *Izvestiya Transsiba*, 2014, no. 3(19), pp. 75–81.

2. *Prilozhenie 19.9. Reglament uchastiya na optovom rynke pokupatelei s tsenozavisimym potrebleniem* [Appendix 19.9. Rules for participation in the wholesale market of buyers with price-dependent consumption]. Available at: https://www.np-sr.ru/ru/regulation/joining/reglaments/1992 (Accessed 2 Sept. 2019).

3. Rybalko A.Ya., Dybrin S.V. *Vybor emkosti nakopitelya energii dlya obespecheniya snizheniya maksimuma potreblyaemoi moshchnosti* [The choice of energy storage capacity to ensure a reduction in maximum power consumption]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2008, no. 8, pp. 356–361.

4. Sidorov D.N., Zhukov A.V., Muftakhov I.R. *Integral'nye modeli dlya upravleniya nakopitelyami energii na osnove prognoza nagruzki v EES s vozobnovlyaemymi istochnikami generatsii* [Integrated models for energy storage management based on load forecast in EPS with renewable generation sources]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, vol. 26, pp. 162–172.

5. Sokol'nikova T.V., Suslov K.V., Lombardi P. *Opredelenie optimal'nykh parametrov nakopitelya dlya integratsii vozobnovlyaemykh istochnikov energii v izolirovannykh energosistemakh s aktivnymi potrebitelyami* [Determining Optimal Energy Storage Parameters for Renewable Energy Sources Integration in Isolated Energy Systems with Active Consumers]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 10(105), pp. 206–211.

6. *Tekhnologiya tsenozavisimogo potrebleniya* [Price-dependent consumption technology]. Available at: https://so-ups.ru/?id=dr (Accessed 2 Sept. 2019).

7. Brammer K., Siffling G. Kalman-Bucy-Filter: Deterministische Beobachtung und stochastische Filterung. München, Wien, Oldenbourg, 1975 (Russ. ed.: Fil'tr Kalmana-Byusi. Moscow, Nauka Publ., 1982, 200 p.).

8. Aldana N.L.D., Hernández A.C.L., Vasquez J.C., Guerrero J.M. Energy management system with equalization algorithm for distributed energy storage systems in PV-active generator based low voltage DC microgrids. In: Proc. of the 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM). IEEE Press, 2015, pp. 293–298.

9. Klaimi J., Rahim-Amoud R., Merghem-Boulahia L., Jrad A. Energy management algorithms in smart grids: state of the art and emerging trends. International Journal of Artificial Intelligence and Applications (IJAIA), 2016, vol. 7, no. 4, pp. 25–45.

10. United Nations. Goal 7 Targets: сайт [Электронный ресурс]. URL: http://www.un-energy.org/sdg7/ (дата обращения: 02.09.2019).

ORLOV ALEKSANDER – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head of Electrical Mechanics Department, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (eef@marsu.ru, karlorlov@gmail.ru).

GARIPOV ILSUR – Candidate of Technical Sciences, Acting Head of Electricity and Technical Diagnostics Department, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (eef@marsu.ru, ilsur@bk.ru).

SAMOILOV KIRILL – Master's Program Student of Electrical Energy Faculty, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (fixator8814@gmail.com).

Формат цитирования: *Орлов А.И., Гарипов И.Х., Самойлов К.А.* Алгоритм управления накопителем для сглаживания пикового потребления электроэнергии // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 136–144.

УДК 621.313.333:621.372.632
ББК 31.261.63+31.264.5+34.47

Д.И. ПОПОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ НА ПОТЕРИ МОЩНОСТИ ПРИ ИСПЫТАНИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

Ключевые слова: *испытания, асинхронные двигатели, энергоэффективность, взаимная нагрузка, математическое моделирование, отклонение напряжения.*

В статье обозначена проблема разработки электротехнических комплексов для испытания асинхронных двигателей. Отмечена высокая энергетическая эффективность схем испытаний с применением метода взаимной нагрузки, которые условно разделены на два типа: схемы с нагрузочной асинхронной машиной и схемы с нагрузочным генератором постоянного тока. Приведены основные электрические соединения данных типов схем. Выделено одно из актуальных направлений исследований в области разработки электротехнических комплексов для испытаний асинхронных двигателей – исследование влияния внешних факторов на функционирование известных схем испытаний. В качестве внешнего воздействия рассмотрено изменение действующего значения напряжения сети. Исследование проведено путем математического моделирования физических процессов в схеме испытаний с применением известных моделей. Показано, что поддержание на выходе управляемого инвертора действующего значения напряжения первой гармоники, равного 220 В частотой 50 Гц, возможно только в диапазоне значений напряжения сети от 209 В до 242 В; в диапазоне значений напряжения сети от 198 В до 209 В действующее значение первой гармоники инвертированного напряжения оказывается ниже значения 220 В. Выполнено математическое моделирование работы пары электрических машин с номинальной мощностью 0,75 кВт, 5,5 кВт, 215 кВт в схемах испытаний как с нагрузочной асинхронной машиной, так и с нагрузочным генератором постоянного тока без учета параметров статических преобразователей для напряжения сети от 209 В до 242 В. Частота широтно-импульсной модуляции инверторов задавалась равной 4 кГц, действующее значение напряжения на выходе управляемого инвертора, питающего испытуемый двигатель – максимально близким к значению 220 В. В результате математического моделирования для обоих типов схем выявлено значительное снижение их энергоэффективности при отклонении напряжения от номинального значения на 5 ÷ 10%.

Согласно действующим стандартам при выпуске в эксплуатацию и многократно в течение периода эксплуатации после прохождения некоторых видов ремонта асинхронные машины проходят нагрузочные испытания[1]. При нагрузочных испытаниях для снижения потерь электроэнергии, а также для обеспечения питающего напряжения, соответствующего тому, при котором осуществляется эксплуатация асинхронных машин, разработаны различные варианты схем взаимной нагрузки [1–6]. Известные схемы испытаний асинхронных машин, использующие метод взаимной нагрузки, можно разделить на две группы. В первой группе нагрузка на валу испытуемого асинхронного двигателя задается нагрузочной асинхронной машиной (НАМ), работающей в

[1] ГОСТ 11828-86 Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. М.: ИПК «Издательство стандартов», 2003. 31 с.

режиме рекуперативного торможения [1, 2, 5]. Во второй группе нагрузка на валу обеспечивается нагрузочным генератором постоянного тока (НГПТ), отдающим электроэнергию на вход управляемого инвертора напряжения, питающего испытуемый двигатель [3, 4, 6]. Основные силовые агрегаты схем с НАМ и их соединения показаны на рис. 1.

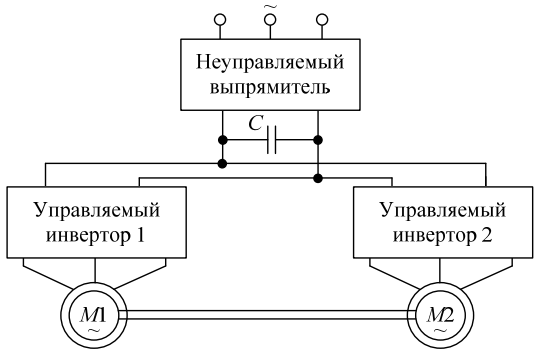


Рис. 1. Основные соединения схемы взаимной нагрузки с нагрузочной асинхронной машиной

В качестве неуправляемого выпрямителя на рис. 1 может выступать пара параллельно соединенных выпрямителей, как, например, в схемах [1, 5]. В таком случае питание обмоток статора асинхронных машин осуществляется двумя преобразователями частоты, каждый из которых имеет в своем составе неуправляемый выпрямитель и управляемый инвертор напряжения (см. рис. 2).

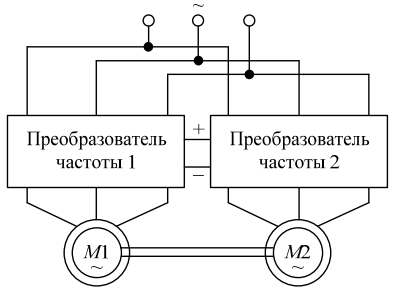


Рис. 2. Основные соединения схемы взаимной нагрузки с нагрузочной асинхронной машиной и двумя преобразователями частоты

Основные силовые агрегаты схем с НГПТ и их соединения показаны на рис. 3.

Одним из актуальных научных вопросов в исследованиях, посвященных применению метода взаимной нагрузки для испытания асинхронных двигателей, является изучение качества функционирования испытательных стендов при наличии внешних воздействий. В качестве основного источника таких воздействий на электрооборудование является питающая сеть, в которой возможны отклонение как частоты напряжения, так и его действующего значения.

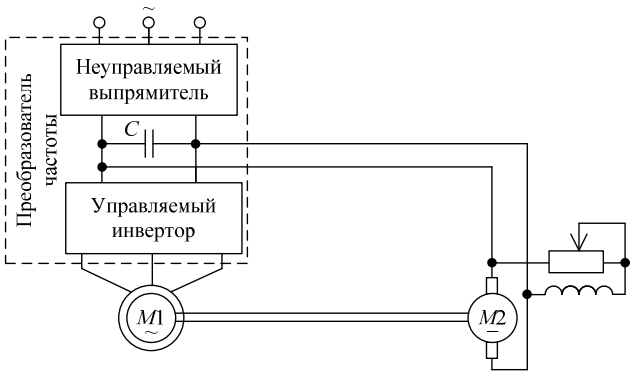


Рис. 3. Основные соединения схемы взаимной нагрузки
с нагрузочным генератором постоянного тока

Отклонения частоты напряжения питающей сети в пределах норм[1] приводят к незначительному изменению периода пульсаций выпрямленного напряжения, подаваемого на вход управляемого инвертора, питающего асинхронный двигатель, и, следовательно, не могут оказать существенного влияния на параметры режима работы машин. Рассмотрим воздействие на функционирование схем взаимной нагрузки (см. рис. 1 и 2) изменения величины действующего значения напряжения сети в пределах ±10% от номинального значения, определенных стандартом[2]. При таких отклонениях от номинального значения 220 В имеем диапазон изменения напряжения сети от 198 В до 242 В.

Моделирование работы инвертора может быть выполнено по следующим выражениям [10]. Напряжение в звене постоянного тока ПЧ

$$u_{\text{вып}}(t) = \sqrt{3}\sqrt{2}U_{\text{ф}} \sin\left[2\pi f_{\text{с}} t - \frac{\pi}{3}\text{Int}\left(6 f_{\text{с}} t\right) + \frac{\pi}{3}\right], \quad (1)$$

где $U_{\text{ф}}$ – действующее значение фазного напряжения в сети; $f_{\text{с}}$ – частота напряжения сети; t – время; Int – функция, выделяющая целую часть аргумента.

Система управления формирует синусоидальный сигнал, задающий частоту напряжения на выходе ПЧ, и пилообразный сигнал, задающий частоту широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Синусоидальный сигнал по фазе «*a*», задающий частоту напряжения ПЧ:

$$u_{\text{з}\,a}(t) = U_{\text{з max}} \sin\left(2\pi f_{\text{з}} t\right), \quad (2)$$

где $U_{\text{з max}}$ – амплитудное значение задающего напряжения; $f_{\text{з}}$ – частота задающего напряжения.

Синусоидальный сигнал, задающий частоту напряжения ПЧ по остальным фазам, формируется аналогично.

---

[1] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

[2] Там же.

Выражение для пилообразного напряжения системы управления:

$$u_{\text{п}}(t)=\begin{cases} U_{\text{п max}}\left(4f_{\text{п}}t-4\,\text{Int}(f_{\text{п}}t)-1\right), \text{ if } 0\le\left(t-\dfrac{\text{Int}(f_{\text{п}}t)}{f_{\text{п}}}\right)<\dfrac{1}{2f_{\text{п}}}; \\ -U_{\text{п max}}\left(4f_{\text{п}}t-4\,\text{Int}(f_{\text{п}}t)-3\right), \text{ if } \dfrac{1}{2f_{\text{п}}}\le\left(t-\dfrac{\text{Int}(f_{\text{п}}t)}{f_{\text{п}}}\right)<\dfrac{1}{f_{\text{п}}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $U_{\text{п max}}$ – амплитудное значение пилообразного напряжения; $f_{\text{п}}$ – частота пилообразного напряжения.

В результате напряжение, подаваемое с ПЧ на фазу «*a*» обмотки статора испытуемого двигателя:

$$u1_a(t)=\begin{cases} \dfrac{2}{3}u_{\text{вып}}(t)\text{sign}\left(u_{\text{з}a}(t)-u_{\text{п}}(t)\right), \text{если sign}\left(u_{\text{з}b}(t)-u_{\text{п}}(t)\right)=... \\ \quad ...=\text{sign}\left(u_{\text{з}c}(t)-u_{\text{п}}(t)\right)\ne\text{sign}\left(u_{\text{з}a}(t)-u_{\text{п}}(t)\right); \\ \dfrac{1}{3}u_{\text{вып}}(t)\text{sign}\left(u_{\text{з}a}(t)-u_{\text{п}}(t)\right), \text{если sign}\left(u_{\text{з}b}(t)-u_{\text{п}}(t)\right)\ne\text{sign}\left(u_{\text{з}c}(t)-u_{\text{п}}(t)\right); \\ 0, \text{ иначе}. \end{cases} \quad (4)$$

Напряжение ПЧ по фазам «*b*» и «*c*» описывается аналогичными выражениями.

Расчетный пример осциллограммы задающих синусоидальных сигналов для 1/4 периода напряжения (5 мс) по фазам «*a*» (красная линия), «*b*» (синяя линия), «*c*» (коричневая линия) с частотой $f_{\text{з}}$ = 50 Гц и пилообразного напряжения (зеленая линия) с частотой $f_{\text{п}}$ = 4 кГц приведены на рис. 4.

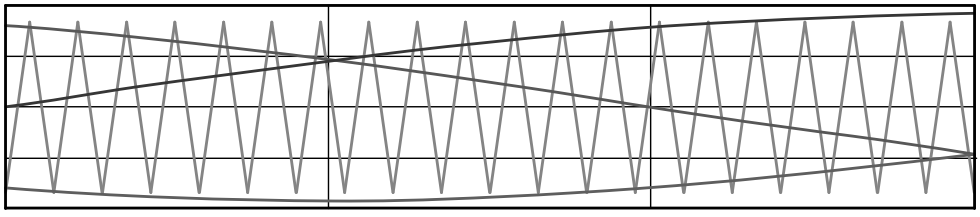


Рис. 4. Расчетные осциллограммы задающих синусоидальных сигналов по фазам с частотой $f_{\text{з}}$ = 50 Гц и пилообразного напряжения с частотой $f_{\text{п}}$ = 4 кГц

Расчетные осциллограммы напряжения на выходе ПЧ по выражению (4) и их первая гармоника приведены на рис. 5.

Анализ расчетов по приведенным выражениям позволяет сделать вывод о том, что поддержание на выходе управляемого инвертора неизменного действующего значения напряжения первой гармоники 220 В частотой 50 Гц возможно только в диапазоне значений напряжения сети от 209 В до 242 В. При этом форма инвертированного напряжения имеет вид, приведенный на рис. 5, *б*, *в*, *г*.

В диапазоне значений напряжения сети от 198 В до 209 В действующее значение первой гармоники инвертированного напряжения оказывается ниже значения 220 В, даже при крайнем случае регулирования – трехступенчатой форме инвертированного напряжения, приведенной на рис. 5, *а*.

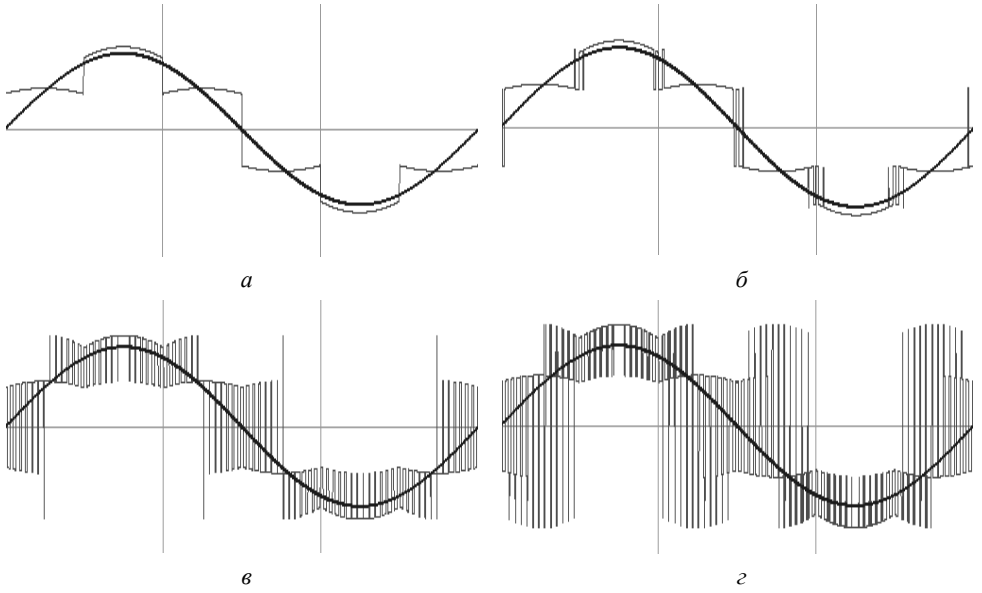


Рис. 5. Расчетные осциллограммы напряжения на выходе преобразователя частоты и их первая гармоника:
а – $U_с$ = 198 В; *б* – $U_с$ = 209 В; *в* – $U_с$ = 220 В; *г* – $U_с$ = 242 В

Моделирование работы пары электрических машин в схеме с НАМ (см. рис. 1) осуществлено по известным уравнениям [7, 8] без учета параметров статических преобразователей для напряжения сети от 209 В до 242 В с шагом по 5,5 В, составляющим 2,5% от номинального значения, равного 220 В. Расчет выполнен с параметрами асинхронных двигателей трех типов: АИР71В4 ($P_н$ = 0,75 кВт), 5АМ112М4 ($P_н$ = 5,5 кВт), 5АМ315МВ2 ($P_н$ = 215 кВт). Частота ШИМ задана $f_з$ = 4 кГц, действующее значение напряжения на выходе ПЧ поддерживается равным или максимально близким величине 220 В путем регулирования параметра $U_{з\,max}$, согласно рис. 5, *а–г*. Количество расчетных точек, приходящихся на 1 с работы схемы, принято 51200 шт. Параметры схемы замещения асинхронных машин определены по методике, приведенной в [9]. В расчете задавались неизменная частота основной гармоники напряжения, подаваемого на испытуемый двигатель $f_1 = f_н$ = 50 Гц, и уменьшенная по сравнению с ней частота основной гармоники напряжения, подаваемого на нагрузочную машину f_2. Разность данных частот $(f_1 - f_2)$ подбиралась такой, чтобы обеспечить неизменную электромагнитную мощность испытуемого двигателя, близкую к его номинальной мощности.

При математическом моделировании имеем переходный электромеханический процесс, устанавливающийся через некоторое время $T_п$. Пример результата расчета скорости вращения от состояния покоя до установившегося режима работы под номинальной нагрузкой для схемы с НАМ при номинальной мощности асинхронных машин 5,5 кВт приведен на рис. 6.

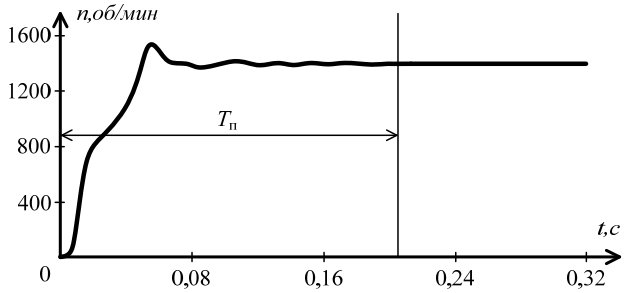


Рис. 6. Расчетная скорость вращения для схемы с нагрузочной асинхронной машиной при номинальной мощности асинхронных машин 5,5 кВт

Расчет параметров режима работы осуществлялся по следующим выражениям.

Установившаяся частота вращения

$$n_у = \frac{1}{\left(N - N_{к.п}\right)} \sum_{i=N_{к.п}}^{N} \left(n_i\right), \tag{5}$$

где N – количество расчетных точек; $N_{к.п}$ – номер расчетной точки, соответствующей окончанию переходного режима; i – номер расчетного момента времени; n_i – расчетная частота вращения в i-й момент времени (по результатам математического моделирования).

Установившийся электромагнитный момент:

$$M_{э.м} = \frac{1}{\left(N - N_{к.п}\right)} \frac{pL_{12}}{\sqrt{3}} \sum_{i=N_{к.п}}^{N} \left(i1_{1ai}\left[i1_{2bi} - i1_{2ci}\right] + ... \right.$$
$$\left. ... i1_{1bi}\left[i1_{2ci} - i1_{2ai}\right] + i1_{1ci}\left[i1_{2ai} - i1_{2bi}\right]\right), \tag{6}$$

где p – число пар полюсов машины; L_{12} – наибольшее значение взаимной индуктивности трехфазной обмотки; $i1_{1a}$, $i1_{1b}$, $i1_{1c}$ – расчетные токи фаз статора испытуемого асинхронного двигателя (по результатам математического моделирования); $i1_{2a}$, $i1_{2b}$, $i1_{2c}$ – расчетные токи фаз ротора испытуемого асинхронного двигателя (по результатам математического моделирования).

Установившееся значение электромагнитной мощности принято равным:

$$P_{э.м} = M_{э.м} n_у \frac{\pi}{30}. \tag{7}$$

Мощность, потребляемая испытуемым двигателем:

$$P_1 = \frac{1}{\left(N - N_{к.п}\right)} \sum_{i=N_{к.п}}^{N} \left(u1_{ai} i1_{1ai} + u1_{bi} i1_{1bi} + u1_{ci} i1_{1ci}\right), \tag{8}$$

где $u1_{a\,i}$, $u1_{b\,i}$, $u1_{c\,i}$ – напряжения, формируемые ПЧ, подаваемые на фазы обмотки статора испытуемого двигателя.

Мощность, вырабатываемая нагрузочной машиной:

$$P_2 = \frac{1}{\left(N - N_{к.п}\right)} \sum_{i=N_{к.п}}^{N} \left(u2_{1ai} i2_{1ai} + u2_{1bi} i2_{1bi} + u2_{1ci} i2_{1ci}\right), \tag{9}$$

где $u2_{a\,i}$, $u2_{b\,i}$, $u2_{c\,i}$ – напряжения, формируемые ПЧ, подаваемые на фазы обмотки статора нагрузочной асинхронной машины.

В качестве критерия энергоэффективности схемы взаимной нагрузки принято отношение суммарной мощности, потребляемой обеими машинами ($P_1 + P_2$), к электромагнитной мощности испытуемого двигателя. С учетом того, что мощность нагрузочной машины имеет отрицательные значения ($P_2 < 0$), суммарная мощность, потребляемая обеими машинами, равна сумме потерь в этих машинах:

$$(P_1 + P_2 = \Delta P_1 + \Delta P_2). \tag{10}$$

Суммарную мощность обеих машин без учета потерь в статических преобразователях можно считать мощностью, потребляемой схемой испытаний из сети ($P_с = P_1 + P_2$). В соответствии с введенным критерием энергоэффективности ($P_с / P_{э.м}$), чем меньше его значение, тем выше энергоэффективность схемы испытаний:

$$\frac{P_с}{P_{э.м}} = \frac{P_1 + P_2}{P_{э.м}} = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2}{P_{э.м}}. \tag{11}$$

В рассматриваемых схемах взаимной нагрузки электромагнитную мощность, которой нагружен испытуемый двигатель, условно можно считать полезной. Таким образом, физический смысл критерия энергоэффективности ($P_с / P_{э.м}$) можно трактовать как удельную величину мощности, затрачиваемую на создание номинальной нагрузки испытуемому двигателю.

Расчетные зависимости, относительных потерь в схеме взаимной нагрузки с НАМ от напряжения сети приведены на рис. 7.

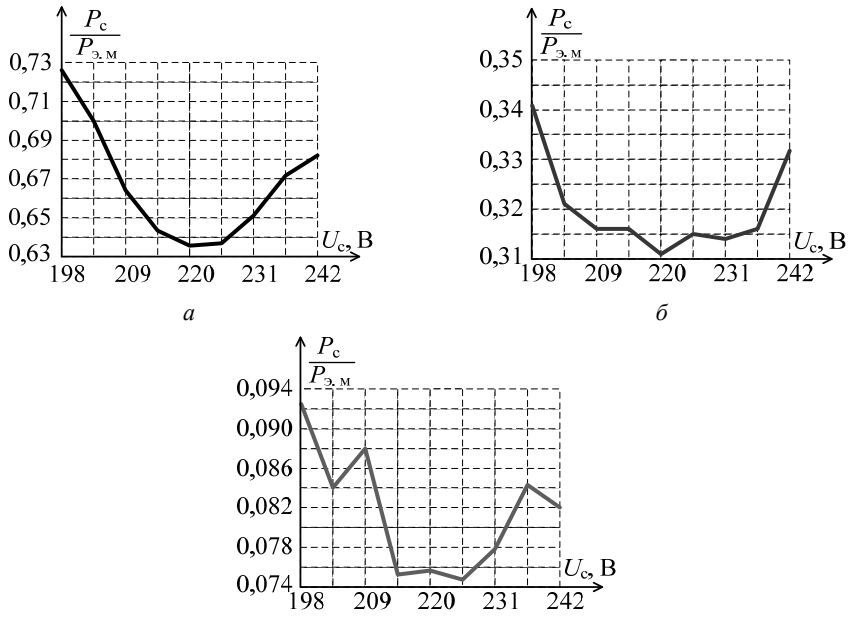


Рис. 7. Относительные потери в схеме взаимной нагрузки с НАМ при испытании асинхронных двигателей различной номинальной мощности: *а* – 0,75 кВт; *б* – 5,5 кВт; *в* – 250 кВт

Анализ результатов расчета (см. рис. 7) показывает, что при напряжении в сети 220 В ±2,5% потери мощности в схеме минимальны. Отклонение напряжения в сети на 5 ÷ 10% может приводить к увеличению мощности, потребляемой из сети более чем на 20%, и, следовательно, снижать энергоэффективность схемы испытаний.

Моделирование работы пары электрических машин в схеме с НГПТ (см. рис. 3) осуществлено по известным уравнениям [7, 8] при тех же параметрах и условиях. В качестве нагрузочных генераторов приняты машины типа: 2ПБ132МУХЛ4 (2,4 кВт), 2ПФ132LУХЛ4 (5,5 кВт), 2ПФ315LУХЛ4 (250 кВт). Магнитный поток НГПТ подбирался такой, чтобы обеспечить неизменную электромагнитную мощность испытуемого двигателя, близкую к его номинальной мощности. Результаты математического моделирования для схемы взаимной нагрузки с НГПТ приведены на рис. 8.

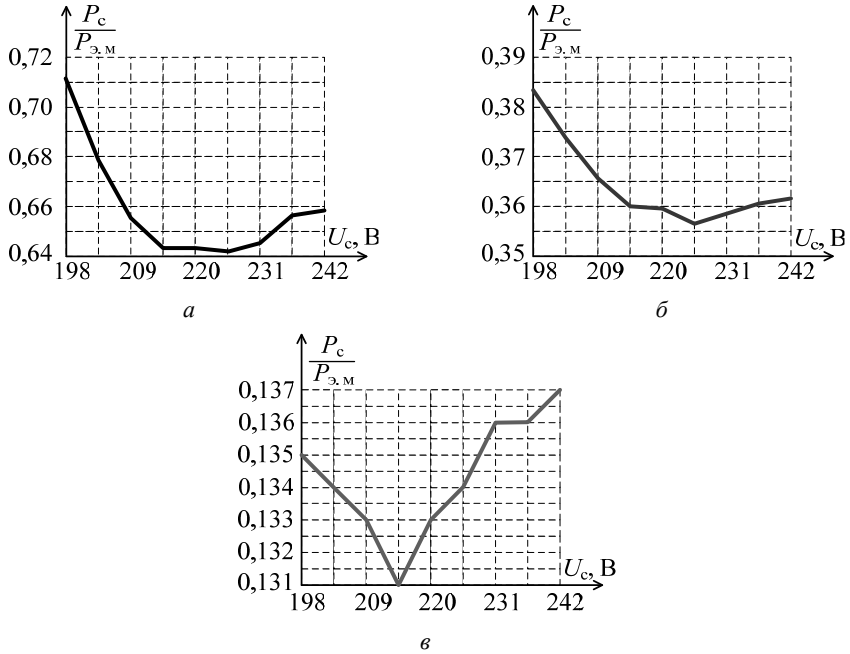


Рис. 8. Относительные потери в схеме взаимной нагрузки с НГПТ при испытании асинхронных двигателей различной номинальной мощности: *а* – 0,75 кВт; *б* – 5,5 кВт; *в* – 250 кВт

Анализ результатов математического моделирования (см. рис. 8) показывает, что при напряжении в сети 220 В ±2,5% потери мощности в схеме с НГПТ так же, как и в схеме с НАМ, оказываются минимальны. Отклонение напряжения в сети на 5 ÷ 10% может приводить к увеличению мощности, потребляемой из сети схемой с НАМ, более чем на 10%.

Выводы. В результате математического моделирования работы схем взаимной нагрузки асинхронного двигателя с нагрузочной асинхронной ма-

шиной и нагрузочным генератором постоянного тока выявлено снижение энергоэффективности схем при отклонении напряжения от номинального значения на 5 ÷ 10%. Диапазон изменения мощности, суммарно потребляемой испытуемой и нагрузочной машинами при изменении напряжения сети от 198 В до 242 В, для рассмотренных схем достигает более 20% от номинальной мощности.

Литература

1. Пат. 140678 РФ, МПК G01R31/34. Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов (РФ). № 2013147519/28; заявл. 24.10.2013; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14. 2 с.

2. Пат. 145998 РФ, МПК G01R31/34. Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, В.В. Харламов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов (РФ). № 2014112920/07; заявл. 02.04.2014; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27. 2 с.

3. Пат. 178716 РФ, МПК G01R31/00. Стенд для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки / В.В. Харламов, Д.И. Попов (РФ). № 2017143232; заявл. 11.12.2017; опубл. 17.04.2018, Бюл. № 11. 5 с.

4. Пат. 2200960 РФ, МПК G01R31/34. Устройство для испытаний бесколлекторных электрических машин переменного тока / А.С. Курбасов, И.Л. Таргонский, Э.А. Долгошеев (РФ). № 2001101213/09; заявл. 12.11.2001; опубл. 20.03.2003, Бюл. № 8. 1 с.

5. Пат. 2433419 РФ, МПК G01R31/34. Способ испытания асинхронных электродвигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, А.И. Володин, В.Т. Данковцев, В.В. Лукьянченко, Е.В. Панькин (РФ). № 2010124307/28; заявл. 15.06.2010; опубл. 10.11.2011, Бюл. № 31. 6 с.

6. Пат. 99186 РФ, МПК G01R31/34. Стенд для испытаний асинхронного тягового электродвигателя / Л.Г. Козлов, С.С. Осипов, В.П. Феоктистов, В.А. Коновалов (РФ). № 2010122670/28; заявл. 04.06.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 31. 2 с.

7. *Попов Д.И.* Математическое моделирование физических процессов в испытательных комплексах электрических машин // Омский научный вестник. 2018. № 4(160). С. 79–84.

8. *Попов Д.И.* Научные основы создания энергоэффективных методов и средств испытаний электрических машин. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2019. 175 с.

9. *Фираго Б.И., Павлячик Л.Б.* Регулируемые электроприводы переменного тока. Минск: Техноперспектива, 2006. 363 с.

10. *Kharlamov V.V., Popov D.I.* Mathematical modeling of physical processes in the complex for testing of induction machines. *MATEC Web Conf.*, 2018, vol. 239, Nov. 27, p. 01055.

ПОПОВ ДЕНИС ИГОРЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и общей электротехники, Омский государственный университет путей сообщения, Россия, Омск (popovomsk@yandex.ru).

D. POPOV

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF SUPPLY VOLTAGE VARIATION ON ENERGY EFFICIENCY OF SCHEMES FOR THE TESTING INDUCTION MOTORS BY THE METHOD OF MUTUAL LOAD

Key words: *testing, induction motor, energy efficiency, mutual load, mathematical modeling, voltage variation.*

The problem of development of electrical systems for testing asynchronous motors is considered. The high energy efficiency of test schemes using the method of mutual load, which are conditionally divided into two types: schemes with load asynchronous machine and schemes with load DC generator, is noted. The basic electrical connections of these types of circuits are given. The paper indicates one of the actual directions of research in

the field of development of electrotechnical complexes for tests of asynchronous motors – research of external factors influence on functioning of known tests schemes. The change in the effective value of the network voltage is considered as an external influence. The study was carried out by mathematical modeling of physical processes in the test scheme using known models. It is shown that maintaining the output of the controlled inverter operating voltage of the first harmonic, equal to 220 V frequency of 50 Hz, is possible only in the range of network voltage values from 209 V to 242 V; in the range of network voltage values from 198 V to 209 V, the operating value of the first harmonic of the inverted voltage is lower than 220 V. The mathematical modeling of a pair of electric machines with a nominal power of 0,75 kW, 5,5 kW, 215 kW in the test circuits both with a load asynchronous machine and a load DC generator without taking into account the parameters of static converters for network voltage from 209 V to 242 V has been carried out. The frequency of pulse width modulation of inverters was set equal to 4 kHz, the effective value of the voltage at the output of the controlled inverter feeding the tested motor was as close to the value of 220 V as possible. Mathematical modeling for both types of circuits revealed a significant decrease in their energy efficiency when the voltage deviation from the nominal value was 5 ÷ 10%.

References

1. Avilov V.D., Popov D.I., Litvinov A.V. *Skhema ispytanii asinkhronnykh dvigatelei metodom ikh vzaimnoi nagruzki* [Scheme of testing of induction motors by their mutual load]. Patent RF, no. 140678, 2014.

2. Avilov V.D., Kharlamov V.V., Popov D.I., Litvinov A.V. *Skhema ispytanii asinkhronnykh dvigatelei metodom ikh vzaimnoi nagruzki* [Scheme of testing of induction motors by their mutual load]. Patent RF, no. 145998, 2014.

3. Kharlamov V.V., Popov D.I. *Stend dlya ispytaniya asinkhronnykh dvigatelei metodom vzaimnoi nagruzki* [Stand for testing induction motors by method of mutual load]. Patent RF, no. 178716, 2018.

4. Kurbasov A.S., Targonskii I.L., Dolgosheev E.A. *Ustroystvo dlya ispytaniy beskollektornykh ehlektricheskikh mashin peremennogo toka* [Facility testing AC brushless electric machines]. Patent RF, no. 2200960, 2001.

5. Avilov V.D., Volodin A.I., Dankovtsev V.T., Luk'yanchenko, Pan'kin E.V. *Sposob ispytaniya asinhronnykh ehlektrodvigatelei metodom ikh vzaimnoi nagruzki* [Back-to-back test method for asynchronous motors]. Patent RF, no. 2433419, 2010.

6. Kozlov L.G., Osipov S.S., Feoktistov V.P., Konovalov V.A. *Stend dlya ispytaniy asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya* [Stand for testing induction traction electromotor]. Patent RF, no. 99186, 2010.

7. Popov D.I. *Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh processov v ispytatel'nykh kompleksakh elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of physical processes in test complexes of electric machines]. *Omskii nauchnyi vestnik* [The Journal Omsk Scientific Bulletin], 2018, no. 4(160), pp. 79–84.

8. Popov D.I. *Nauchnye osnovy sozdaniya energoeffektivnyh metodov i sredstv ispytanij elektricheskih mashin* [Scientific bases of creation of energy efficient methods and means of testing of electric machines]. Omsk, Omsk State Transport Univercity Publ., 2019, 175 p.

9. Firago B.I., Pavlyachik L.B. *Reguliruemye elektroprivody peremennogo toka* [Adjustable AC drives]. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ., 2006, 363 p.

10. Kharlamov V.V., Popov D.I. Mathematical modeling of physical processes in the complex for testing of induction machines. MATEC Web Conf., 2018, vol. 239, Nov. 27, p. 01055.

POPOV DENIS – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University, Russia, Omsk (popovomsk@yandex.ru).

Формат цитирования: *Попов Д.И.* Исследование влияния изменения напряжения сети на потери мощности при испытании асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 145–154.

УДК 621.311.1: 621.315.3: 621.316.1
ББК 31.278

М.Г. ПОПОВ, С.Н. СОЛОВЬЕВА, А.А. ЛАПИДУС,
К.Н. СЕМЕНОВ, А.В. ТЕРЁШКИН, А.В. БОГДАНОВ, О.А. ВАСИЛЬЕВА

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТ ДАЛЬНЕГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДО 1 кВ

***Ключевые слова**: дальнее резервирование, короткое замыкание, автоматический выключатель, кабель, секционирование, невозгорание, чувствительность.*

В настоящее время основной проблемой дальнего резервирования сетей 0,4 кВ является недостаточная чувствительность защитных автоматических выключателей, что является частой причиной возгорания кабельных линий. Технические и схемные решения, избавляющие от этой проблемы, весьма разнообразны. В статье исследуется эффективность секционирования системы шин 0,4 кВ распределительного щита, предлагаемого в качестве одного из решений задачи повышения чувствительности и обеспечения дальнего резервирования. На основе расчетов термической стойкости токоведущих частей и температуры нагрева токопроводящих жил кабелей определяются наиболее опасные участки кабельных линий, на которых возникновение короткого замыкания и отказ основного защитного аппарата приведут к возгоранию изоляции кабеля. Оценивается эффективность предлагаемых схемных решений секционирования, обеспечивающих селективность работы автоматических выключателей и дальнее резервирование защиты низковольтных присоединений электросети 0,4 кВ.

Введение. Вопросам исследования защит и противоаварийной автоматики посвящено много научных работ, в частности [2–5, 13–16] посвящены повышению чувствительности и селективности средств основных (дифференциальных) защит и противоаварийной автоматики электроэнергетических систем. Однако из-за особенностей выполнения сетей 0,4 кВ и применяемых принципов защит низковольтного оборудования ближнее резервирование основных защит в таких сетях обычно не обеспечивается. Это связано прежде всего с конструктивным исполнением автоматического выключателя (АВ), в котором расцепители (тепловой, электромагнитный или электронный) находятся в одном устройстве. Статистика отказов таких защит показывает, что бóльшая доля несрабатывания автоматов происходила из-за повреждения общих элементов выключателя (дугогасительной камеры, главных контактов) или его расцепителей. Поэтому отказ автоматического выключателя присоединения, как правило, не дает возможность обеспечить ближнее резервирование, и надежность схемы будет связана с дальним резервированием.

При возникновении короткого замыкания (КЗ) отказ основной защиты присоединения и затягивание отключения повреждения резервной защитой вышестоящего коммутационного аппарата приводят к повышенному нагреву токоведущих частей и изоляции кабельных линий. Это может вызвать ускоренный износ изоляции, разрыв оболочек, разрушение концевых заделок и возго-

рание кабелей. Поэтому обеспечение невозгораемости низковольтных кабельных линий напрямую связано с обеспечением дальнего резервирования[1] [6].

Анализируя проблему дальнего резервирования в сетях 0,4 кВ можно выделить основные пути ее решения. Во-первых, на данный момент не существует единой, унифицированной методики расчета токов КЗ, тепловых импульсов и температур нагрева токоведущих жил кабелей, учитывающей все особенности электротеплового процесса в сетях до 1 кВ. Разные нормативно-технические документы предъявляют отличающиеся друг от друга требования по одному и тому же вопросу. Отсутствие в настоящее время в них четкой иерархии только усугубляет проблему обеспечения защитными аппаратами условий дальнего резервирования. Все это приводит к значительным затруднениям при проектировании сетей электроснабжения, поскольку проектным организациям не ясно, каким документом следует руководствоваться при выборе (и проверке) электрооборудования.

Совершенствование и унификация различных методик расчета параметров сети и проверок характеристик при выборе электрооборудования приведут к снижению количества отказов автоматических выключателей и возгораний кабелей, обусловленных некорректным выбором уставок защиты или сечений токоведущих частей.

Во-вторых, среди проблем обеспечения дальнего резервирования защит низковольтной электросети следует выделить их недостаточную чувствительность. Как правило, недостаточная чувствительность защит дальнего резервирования обусловлена большим количеством присоединений на секции, которые имеют малые рабочие токи по сравнению с номинальным током вводного автоматического выключателя. Его требуемое быстродействие невозможно обеспечить вследствие необходимости согласования (обеспечения селективности) с защитами ближнего резервирования, а также отстройки от токов пуска и самозапуска асинхронных электродвигателей, входящих в состав нагрузки.

В этой связи в практике проектирования известны способы повышения их чувствительности, основанные на изменении схемы сети. Кроме того, такой подход повышает надежность срабатывания защит ближнего резервирования в системе электроснабжения 0,4 кВ. Существуют также решения по применению резервных, выносных, микропроцессорных защит или защитных аппаратов с дополнительными или улучшенными по чувствительности и селективности характеристиками срабатывания.

С учетом этого *предметом исследований* в данной статье является оценка эффективности секционирования распределительного щита 0,4 кВ с точки зрения обеспечения невозгораемости отходящих кабельных линий и повышения чувствительности, селективности их защит дальнего резервирования. Данное

[1] ГОСТ Р 52736-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. М.: Стандартинформ, 2007. 40 с; Циркуляр № Ц-02-98(э) «О проверке кабелей на невозгорание при воздействии тока короткого замыкания» [Электронный ресурс] / Департамент стратегии развития и научно-технической политики РАО «ЕЭС России». М., 1998. 12 с. URL: http://gostrf.com/normadata/1/4293828/4293828958.pdf.

решение может быть особенно эффективно в случае, когда при отсутствии секционирования распределительного щита на две или более секции в схемах питания потребителей 0,4 кВ не выполняется условие невозгорания кабелей, как следствие, это приводит к возникновению пожаров в кабельных трассах.

Предлагаемый метод заключается в секционировании одной системы сборных шин 0,4 кВ на 2-3 секции с отдельным вводным выключателем на каждую секцию и без коммутационных аппаратов между секциями. Следует отметить очевидный эффект этого решения – суммарные рабочие токи и токи группового самозапуска асинхронных электродвигателей каждой секции уменьшатся, что приведет к повышению чувствительности резервной защиты. Кроме того, появляется возможность равномерного распределения электропотребителей по секциям системы шин, которые получают питание с помощью кабельных линий практически одинакового сечения.

Объектом исследований является схема электроснабжения 0,4 кВ (рис. 1), включая защитно-коммутационную аппаратуру ее электрических присоединений (медные кабели с сечениями 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185 мм^2). Пунктирной линией на рисунке показана аналогичная схема с отсутствием секционирования распределительного щита.

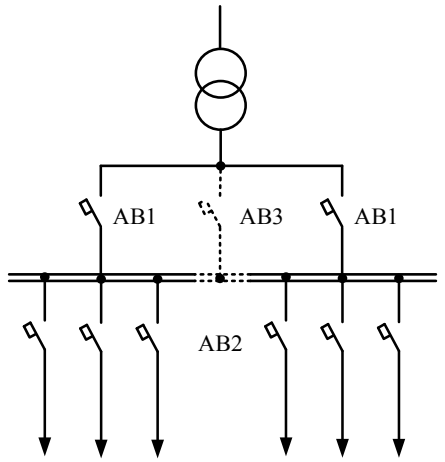


Рис. 1. Схема питания потребителей 0,4 кВ

В исследуемой схеме длины кабельных линий (КЛ) взяты исходя из величины потери напряжения, равной 5%, при питании нагрузки с cosφ = 0,85 [9]. Отметим, что максимальная протяженность КЛ ограничена требованиями показателей качества электроэнергии [1, 12, 17].

Питание электроприемников осуществляется с помощью понижающего трансформатора 6/0,4 кВ марки ТМ-1000 ($u_к$ = 5,5%; $P_к$ = 11,2 кВт). Принимается, что доля асинхронных электродвигателей в составе комплексной нагрузки составляет 30–40%. При отсутствии секционирования выбран автоматический выключатель ввода Compact NS1600N ($I_{ном}$ = 1600 А, $I_{со}$ = 8000 А,

$t_{со}$ = 0,1 с), при наличии секционирования – Compact NS800N ($I_{ном}$ = 800 А, $I_{со}$ = 4000 А, $t_{со}$ = 0,1 с) [18]. Кратность тока срабатывания отсечки $I_{со}$ по отношению к номинальному току автомата $I_{ном}$ выбрана в соответствии с уровнем пусковых токов в сети. Выполним оценку эффективности секционирования системы сборных шин 0,4 кВ исходя из задачи повышения чувствительности и расширения селективности защит дальнего резервирования.

Оценка эффективности секционирования шин системы электроснабжения 0,4 кВ. Оценку эффективности секционирования распределительного щита выполним на основе анализа времятоковых характеристик автоматических выключателей, с использованием которых и осуществляется дальнее резервирование. Если представить двухступенчатые времятоковые характеристики индивидуального (ближайшего к точке КЗ со стороны источника питания) и вводного автоматических выключателей в одной координатной плоскости в схеме с секционированием главного распределительного щита и в схеме при отсутствии секционирования, то на обеих характеристиках по токовой оси будет зона токов КЗ, при которых в случае отказа основного автомата резервный АВ будет работать не электромагнитным (ЭМР), а обратнозависимым расцепителем (ОЗР). В этом случае однозначно гарантировать невозгораемость кабеля нельзя, так как не выполнено основное требование защиты – быстродействие. Назовем зону таких токов критической. Заметим, что для бóльших токов КЗ, не входящих в критическую зону, вероятность возгорания существенно снижается, но тем не менее возможность пожара существует из-за относительно долгого срабатывания резервной защиты. Ширина критической зоны зависит от того, насколько близко друг к другу расположены времятоковые характеристики двух АВ.

Секционирование распределительного щита позволяет сместить влево времятоковые характеристики резервного автоматического выключателя по сравнению со схемой, в которой отсутствует секционирование, и сузить тем самым критическую зону малых токов КЗ. Ток срабатывания электромагнитного расцепителя вводного АВ в этом случае отстраивается не от всей нагрузки щита, а примерно от ее половины. Эффективность секционирования как меры повышения чувствительности и селективной зоны действия защит дальнего резервирования можно оценить процентным уменьшением критической зоны.

Недостатком данного решения являются дополнительные экономические затраты. В случае секционирования на две секции вместо одного вводного автоматического выключателя необходимо установить два АВ схожего исполнения. Кроме капитальных затрат непосредственно на автоматические выключатели следует учесть расходы на увеличение количества ячеек и габаритов комплектного низковольтного устройства.

Анализ результатов расчета. Выполним оценку невозгораемости кабелей при наличии секционирования распределительного щита. Качественная картина зависимостей температуры нагрева от дистанции до точки КЗ $\theta = f(l)$ и времени от тока КЗ $t = f(I)$ зависит от сечений кабельных линий. В расчетах

фиксировались различные сечения кабелей и для каждого случая варьировалось место расположения точки КЗ, одновременно отслеживалось изменение тока во времени[1] [7, 10, 11]. Все расчеты проведены с помощью специализированной программы [8].

На рис. 2, *а* представлены зависимости времени срабатывания АВ от тока КЗ $t = f(I)$ для рассматриваемых сечений 2,5–6 мм^2 при возникновении повреждения в начале кабеля ($l = 0$), а на рис. 2, *б* те же кривые, но при возникновении КЗ на фиксированном расстоянии от вводного щита, отличном от нуля ($l = 10$ м).

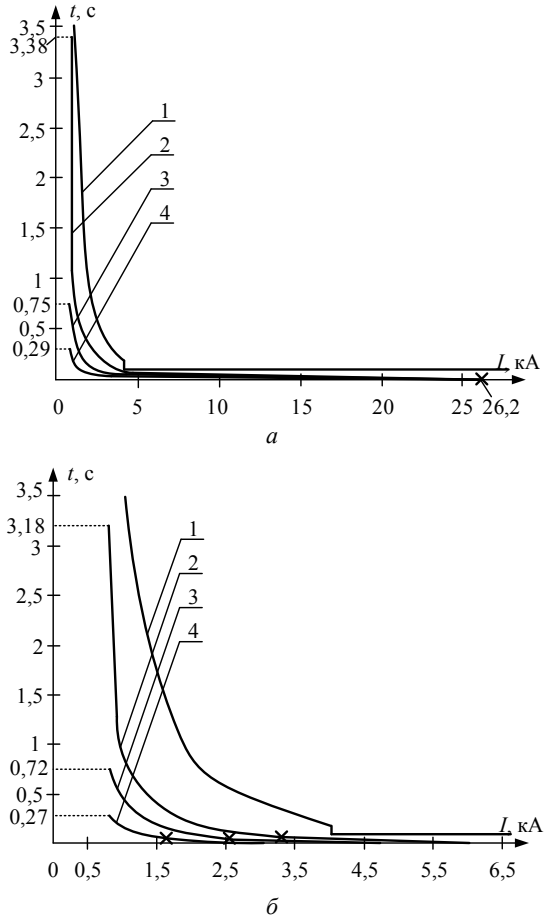


Рис. 2. Зависимости $t = f(I)$ для кабелей сечениями от 2,5 до 6 мм^2:
а – при КЗ в начале линии; *б* – при возникновении КЗ на расстоянии 10 м от щита:
1 – ВТХ, 2 – $S_{КЛ} = 6$ мм^2, 3 – $S_{КЛ} = 4$ мм^2, 4 – $S_{КЛ} = 2{,}5$ мм^2

[1] ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электрических установках. Методы расчета в электрических установках переменного тока напряжением до 1 кВ. Минск, 1993. 63 с.

График $t = f(I)$, совмещенный для наглядности с времятоковой характеристикой резервного защитного аппарата в одной и той же системе координат, позволит наглядно оценить, сработает ли расцепитель АВ, а если сработает, то нарушится ли при этом условие возгорания. В обоих случаях для всех сечений от 2,5 мм^2 до 6 мм^2 включительно наблюдается нарушение условий невозгорания, так как ни один из расцепителей автоматического выключателя, установленного выше сборки, не сработает при возникновении КЗ на любой дистанции кабелей указанных сечений. Поэтому непосредственно отходящие от распределительного щита кабели сечениями S = 2,5; 4; 6 мм^2, как и в случае несекционированной сборки, не удовлетворяют требованию невозгорания на всей протяженности кабельной трассы. На графике момент возгорания кабеля указан знаком «×».

Снижение тока КЗ в течение времени отключения повреждения обусловлено, как правило, тепловым спадом тока. Наличие явления теплового спада тока для кабеля «нулевой» длины можно объяснить тем, что в действительности расстояние до точки КЗ ненулевое, так как КЗ рассматривается непосредственно в кабельной линии. Несмотря на то, что расстояние до точки КЗ очень мало, из-за большого сопротивления жилы кабеля малого сечения наблюдается существенный рост активного сопротивления данного отрезка при нагреве. Это сопротивление при малых сечениях и больших нагревах составляет значительную долю от суммарного сопротивления всех элементов до точки КЗ и сильно ограничивает ток короткого замыкания.

На рис. 3, *а* для фиксированного сечения S = 10 мм^2 показан график $\theta(I)$, из которого видно, что на протяжении КЛ есть два диапазона дистанций, удовлетворяющие требованиям невозгорания. На рис. 3, *б* приведен график $t(I)$, характеризующий работу АВ в зависимости от места возникновения короткого замыкания.

При возникновении КЗ на расстоянии до 16 м от начала кабеля срабатывает ЭМР автоматического выключателя. При коротком замыкании на кабеле вблизи распределительного щита токи КЗ настолько велики, что, несмотря на отключение повреждения за минимальное время, изоляция успеет возгореться. Далее, с удалением расчетной точки КЗ от начала линии и под воздействием теплового спада тока, ток КЗ уменьшается и автомат успевает отключить КЗ до возгорания. Начиная с дистанции 17 м от щита значения токов КЗ снижаются настолько, что ЭМР не чувствителен к ним; в этом случае срабатывает ОЗР, но его быстродействия недостаточно и кабель возгорается. Вследствие термического спада тока при КЗ на участке l = 47–65 м от щита ОЗР успевает отключить кабель до возгорания. При бóльших расстояниях до точки КЗ от шин 0,4 кВ оба расцепителя АВ перестают быть чувствительными к токам КЗ, и повреждение не отключится ни одним из расцепителей.

Следовательно, кабели сечением S = 10 мм^2 частично удовлетворяют требованию невозгорания. Диапазон длин, возникновение повреждения на которых безопасно с точки зрения возгораемости, лежит в пределах: l = (12…16) м и l = (47…65) м.

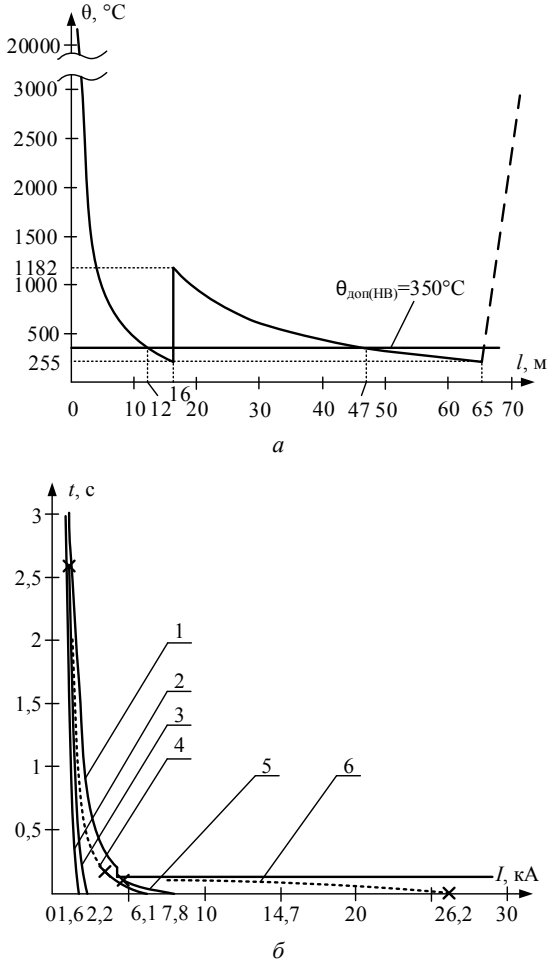


Рис. 3. Зависимости $\theta = f(l)$ (*а*) и $t = f(I)$ (*б*) для кабеля сечением 10 мм^2:
1 – ВТХ, 2 – точка КЗ на расстоянии 65 м от начала КЛ, 3 – 47 м, 4 – 16 м, 5 – 12 м, 6 – 0 м

На рис. 4 для фиксированного сечения $S = 16$ мм^2 показан график $\theta = f(l)$, из которого видно, что при $l = 11{,}3$ м от шин 0,4 кВ кабель удовлетворяет требованиям невозгорания. Однако при возникновении КЗ на меньшем расстоянии от начала КЛ произойдет возгорание, несмотря на отключение автомата за минимальное время.

При $l = 0$ ЭМР чувствителен к короткому замыканию, но, несмотря на это, кабель возгорается практически мгновенно. При росте дистанции начинает себя проявлять ТСТ, что приводит к уменьшению протекающего тока КЗ, и, начиная с $l = 11{,}3$ м, быстродействия ЭМР достаточно для отключения кабеля до возгорания. При дальнейшем удалении расчетной точки КЗ от щита 0,4 кВ до $l = 36$ м ЭМР перестает быть чувствительным и вступает в действие ОЗР. Несмотря на длительность отключения в данном диапазоне длин, кабель не успевает нагреться до критических значений температур и возгорания не происходит.

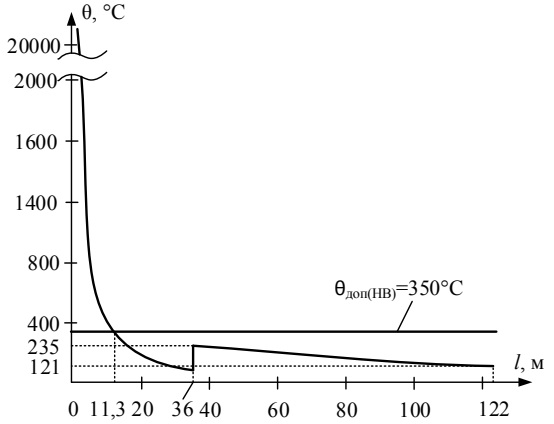


Рис. 4. Зависимость $\theta = f(l)$ для кабеля сечением 16 мм^2

Можно сделать вывод, что кабель сечением $S = 16$ мм^2 удовлетворяет требованию невозгорания частично. Применение КЛ данного сечения возможно в том случае, если вероятность КЗ велика только при его возникновении, начиная с $l = 11{,}3$ м от начала кабеля.

Дальнейшие расчеты показали, что в схеме с секционированием распределительного щита кабельные линии сечением $S = 50$ мм^2 и более полностью удовлетворяют требованиям невозгорания.

Результаты проверки невозгораемости кабелей при наличии секционирования распределительного щита сведены в таблице.

Наиболее опасные участки кабельных линий по возгораемости

Сечение КЛ, мм^2	Максимальная длина КЛ по условию потерь напряжения, м	Наиболее опасные участки КЛ по возгораемости, м	Выполнение условия невозгораемости
≤ 6	70…80	все	отсутствует
10	100	0…13; 16…47; ≥ 65	частичное
≤ 16	120	0…11,2	частичное
25	140	0…9,2	частичное
35	160	0…5,5	частичное
≥ 50	170...230	-	полное

Выводы. 1. Секционирование распределительного щита для повышения чувствительности и расширения зоны селективности защит дальнего резервирования наиболее эффективно в распределительных сетях 0,4 кВ с кабелями сечением до 25 мм^2. В то же время удается сократить количество и протяженность наиболее опасных дистанций возникновения повреждения с точки зрения возможной возгораемости кабельных трасс. Для кабелей сечением 10 мм^2 безопасная по условиям их невозгорания зона при секционировании шин 0,4 кВ существенно расширяется – до 13–26 м и 43–105 м для граничащих с РП 0,4 кВ. Для кабелей сечениями 16 мм^2 и 25 мм^2 опасной с точки зрения возгорания является только зона от 9 до 11 м вблизи шин 0,4 кВ.

2. Показано, что при отсутствии секционирования кабели небольших сечений (до 25 мм^2) не удовлетворяют требованиям невозгораемости. Выявлено, что секционирование сборных шин 0,4 кВ по условиям невозгораемости кабельных линий с сечением более 50 мм^2 не требуется.

3. Секционирование распределительного щита 0,4 кВ на три секции не обладает явными преимуществами по сравнению с секционированием на две секции с точки зрения повышения чувствительности и расширения зоны селективности защит дальнего резервирования. Исключением является схема электроснабжения с тремя секциями сборных шин 0,4 кВ и питанием электроприемников с помощью кабелей сечением 10 мм^2.

Литература

1. *Ванин В.К., Ванин И.В., Попов М.Г.* Повышение точности измерения первичных напряжений в энергосистемах // Вестник Чувашского университета. 2019. № 3. С. 46–52.

2. *Ванин В.К., Горячевский К.С., Забоин В.Н., Попов М.Г., Халилов Ф.Х.* Идентификация параметров силовых трансформаторов в адаптивных средствах их защиты и автоматики // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2018. № 2(79). С. 118–130.

3. *Ванин В.К., Забоин В.Н., Попов М.Г., Гуревич Э.И.* Идентификация параметров силового оборудования в адаптивных средствах защиты и автоматики // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2018. Т. 61, № 6. С. 68–76.

4. *Ванин В.К., Забоин В.Н., Попов М.Г., Сиренко Н.В., Хабаров А.А.* Воспроизведение токов и напряжений измерительных трансформаторов тока // Релейная защита и автоматизация. 2018. № 4(33). С. 42–45.

5. *Ванин В.К., Попов М.Г.* Анализ процессов в силовых и измерительных трансформаторах и коррекция их описания для различных приложений // Релейная защита и автоматизация. 2018. № 1(30). С. 39–45.

6. *Лапидус А.А.* Моделирование и расчет электротеплового процесса в кабелях напряжением до 1000 В при коротких замыканиях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. № 6(70). С. 93–98.

7. *Лапидус А.А.* Расчет нагрева проводников, защищенных автоматическими выключателями // Новости электротехники. 2009. № 2. С. 46–49.

8. *Лапидус А.А., Соловьёва С.Н.* Анализ термического действия токов короткого замыкания в кабельных линиях напряжением 0,4 кВ в зависимости от места повреждения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 3(130). С. 46–50.

9. *Лапидус А.А., Соловьева С.Н.* Влияние расположения расчетной точки короткого замыкания на условия нагрева кабелей 0,4 кВ при реализации дальнего резервирования // Энергобезопасность и энергосбережение. 2010. № 5. С. 8–13.

10. *Лапидус А.А., Соловьева С.Н.* Специфика расчета нагрева проводников // Новости электротехники. 2010. № 2. С. 44–46.

11. *Лапидус А.А., Фишман В.С.* О проверке проводников на термическую стойкость и невозгорание // Новости электротехники. 2009. № 2. С. 50–53.

12. *Попов М.Г.* Автоматизированные системы контроля качества электроэнергии распределительных сетей // Энергетик. 2003. № 12. С. 34–35.

13. *Попов М.Г.* Дифференциальная защита межсистемных линий электропередачи с компенсацией зарядной мощности // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 1. С. 17–26. DOI: 10.18721/JEST.24.1.2.

14. *Попов М.Г., Бессолицын А.В., Хорошинина Е.Н.* Использование численного расчета трехмерного электростатического поля для определения собственных и взаимных емкостей проводов воздушной линии // Научно технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 2. С. 55–59.

15. *Попов М.Г., Ванин В.К.* Анализ процессов в силовых и измерительных трансформаторах и коррекция их описания для различных приложений // Релейная защита и автоматизация. 2018. № 1(30). С. 39–45.

16. *Попов М.Г., Ванин В.К., Попов С.О.* Совершенствование дифференциальной защиты силовых трансформаторов // Релейщик. 2013. № 1(14). С. 38–39.

17. *Попов М.Г., Васильева О.А., Асаинов Д.Н.* Опыт внедрения цифровых технологий на ТЭЦ на базе многофункциональных измерительных приборов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 3. С. 47–58. DOI: 10.18721/JEST.25303.

18. Compact NS. LV circuit breakers from 630 to 3200 A. User manual. Schneider Electric Publisher, 2016.

ПОПОВ МАКСИМ ГЕОРГИЕВИЧ – доктор технических наук, профессор, Высшая школа высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (PopovMG@eef.spbstu.ru).

СОЛОВЬЕВА СВЕТЛАНА НИКОЛАЕВНА – старший преподаватель, Высшая школа высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (s.n.solovjeva@gmail.com).

ЛАПИДУС АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент, Высшая школа высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (lapidus_a_a@mail.ru).

СЕМЕНОВ КОНСТАНТИН НИКОЛАЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент, Высшая школа высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (semenov_k_n@mail.ru).

ТЕРЁШКИН АРТУР ВИКТОРОВИЧ – кандидат технических наук, доцент, Высшая школа высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (arthur.teryoshkin@gmail.com).

БОГДАНОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ – старший преподаватель, Высшая школа высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (al.vl.bogdanov@gmail.com).

ВАСИЛЬЕВА ОЛЬГА АЛЕКСЕЕВНА – кандидат технических наук, доцент, Высшая школа высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (vasilieva_oa@spbstu.ru).

M. POPOV, S. SOLOVJEVA, A. LAPIDUS,
K. SEMENOV, A. TERYOSHKIN, A. BOGDANOV, O. VASILYEVA

IMPROVING EFFICIENCY OF LONG-DISTANCE PROTECTION IN DISTRIBUTION POWER SUPPLY NETWORKS UP TO 1 kV

Key words: *long-distance protection, short circuit, circuit breaker, cable, sectioning, nonflammability, protection sensitivity.*

Currently, the main problem of 0,4 kV long-distance redundancy is the lack of sensitivity of protective circuit breakers, which can lead to cable lines fire. The technical and scheme solutions to the problem are very diverse. The article investigates the efficiency of sectioning of the 0,4 kV bus system of the switchboard as one of the proposed solutions to the problem of increasing sensitivity and ensuring long-distance redundancy. On the basis of the analysis of the results of computational studies to determine the thermal resistance of live parts and assess the heating temperatures of conductive cable conductors during a fire test, the most dangerous sections of cable lines were identified where a short circuit and a failure of the main protective device would lead to a fire in the cable insulation. The results of evaluating the effectiveness of the proposed circuit solutions for partitioning to ensure the selective operation of circuit breakers providing long-range redundancy protection of low-voltage power connections of 0,4 kV are presented.

References

1. Vanin V.K., Vanin I.V., Popov M.G. *Povyshenie tochnosti izmereniya pervichnykh napryazhenii v energosistemakh* [Improving the accuracy of measurement of the primary voltage in power systems]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2019, no. 3, pp. 46–52.

2. Vanin V.K., Goryachevskii K.S., Zaboin V.N., Popov M.G., Khalilov F.Kh. *Identifikatsiya parametrov silovykh transformatorov v adaptivnykh sredstvakh ikh zashchity i avtomatiki* [Identification parameters of power transformers in an adaptive protection and automatics]. *Izvestiya NTTs Edinoi energeticheskoi sistemy*, 2018, no. 2(79), pp. 118–130.

3. Vanin V.K., Zaboin V.N., Popov M.G., Gurevich E.I. *Identifikatsiya parametrov silovogo oborudovaniya v adaptivnykh sredstvakh zashchity i avtomatiki* [Identification of parameters of electrical power in an adaptive protection and emergency automatics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2018, vol. 61, no. 6, pp. 68–76.

4. Vanin V.K., Zaboin V.N., Popov M.G., Sirenko N.V., Khabarov A.A. *Vosproizvedenie tokov i napryazhenii izmeritel'nykh transformatorov toka* [Reproduction of currets and voltage in measuring current transformers] *Releinaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2018, no. 4(33), pp. 42–45.

5. Vanin V.K., Popov M.G. *Analiz protsessov v silovykh i izmeritel'nykh transformatorakh i korrektsiya ikh opisaniya dlya razlichnykh prilozhenii* [Analysis of the processes in power and measurement transformers and correction of their description for various applications]. *Releinaya zashchita i avtomatizatsiya,* 2018, no. 1(30), pp. 39–45.

6. Lapidus A.A. *Modelirovanie i raschet elektroteplovogo protsessa v kabelyakh napryazheniem do 1000 V pri korotkikh zamykaniyakh* [Modelling and electrothermal process computing in cables designed for voltage up to 1000 V under short circuits]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2008, no. 6(70). pp. 93–98.

7. Lapidus A.A. *Raschet nagreva provodnikov, zashchishchennykh avtomaticheskimi vyklyuchatelyami* [Calculation of heating conductors protected by circuit breakers]. *Novosti electrotehniki*, 2009, no. 2, pp. 46-49.

8. Lapidus A.A., Solovjeva S.N. *Analiz termicheskogo deistviya tokov korotkogo zamykaniya v kabel'nykh liniyakh napryazheniem 0,4 kV v zavisimosti ot mesta povrezhdeniya* [The analysis of thermal action of currents of short circuit in cable lines voltage 0,4 kV depending on the damage place]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2011, no 3(130), pp. 46–50.

9. Lapidus A.A., Solovjeva S.N. *Vliyanie raspolozheniya raschetnoi tochki korotkogo zamykaniya na usloviya nagreva kabelei 0,4 kV pri realizatsii dal'nego rezervirovaniya* [Influence of an arrangement of a settlement point of short circuit on conditions of heating of cables 0,4 kV at realisation of distant reservation]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*, 2010, no. 5, pp. 8–13.

10. Lapidus A.A., Solovjeva S.N. *Spetsifika rascheta nagreva provodnikov* [Specificity of calculation of heating conductors]. *Novosti elektrotekhniki*, 2010, no. 2, pp. 44–46.

11. Lapidus A.A., Fishman V.S. *O proverke provodnikov na termicheskuyu stoikost' i nevozgoranie* [On checking conductors for thermal stability and non-ignition]. *Novosti elektrotekhniki*, 2009, no. 2, pp. 50–53.

12. Popov M.G. *Avtomatizirovannye sistemy kontrolya kachestva elektroenergii raspredelitel'nykh setei* [Automated power quality control systems of distribution networks]. *Energetik*, 2003, no. 12, pp. 34–35.

13. Popov M.G. *Differentsial'naya zashchita mezhsistemnykh linii elektroperedachi s kompensatsiei zaryadnoi moshchnosti* [Differential protection of inter-system transmission lines with charge capacity compensation]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 17–26. DOI: 10.18721/JEST.24.1.2.

14. Popov M.G., Bessolitsyn A.V., Khoroshinina E.N. *Ispol'zovanie chislennogo rascheta trekhmernogo elektrostaticheskogo polya dlya opredeleniya sobstvennykh i vzaimnykh emkostei provodov vozdushnoi linii* [Use of numerical calculation of three-dimensional electrostatic field for determination of natural and mutual capacitances of overhead line wires]. *Nauchno tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2010, no. 2, pp. 55–59.

15. Popov M.G., Vanin V.K. *Analiz protsessov s silovykh i izmeritel'nykh transformatorakh i korrektsiya ikh opisaniya dlya razlichnykh prilozhenii* [Analysis of the processes in power and meas-

urement transformers and correction of their description for various applications]. *Releinaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2018, no. 1(30), pp. 39–45.

16. Popov M.G., Vanin V.K., Popov S.O. *Sovershenstvovanie differentsial'noi zashchity silovykh transformatorov* [Improvement of differential protection of power transformers]. *Releishchik*, 2013, no. 1(14), pp. 38–39.

17. Popov M.G., Vasil'eva O.A., Asainov D.N. *Opyt vnedreniya tsifrovykh tekhnologii na TETs na baze mnogofunktsional'nykh izmeritel'nykh priborov* [Introductance experience of digital technologies on the basis of multifunctional measuring meters at power station]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 47–58. DOI: 10.18721/JEST.25303.

18. Compact NS. LV circuit breakers from 630 to 3200 A. User manual. Schneider Electric Publisher, 2016.

POPOV MAKSIM – Doctor of Technical Sciences, Professor, Higher School of High Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (popovmg@eef.spbstu.ru).

SOLOVJEVA SVETLANA – Senior Lecturer, Higher School of High Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (s.n.solovjeva@gmail.com).

LAPIDUS ALEKSANDR – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Higher School of High Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (lapidus_a_a@mail.ru).

SEMENOV KONSTANTIN – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Higher School of High Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (semenov_k_n@mail.ru).

TERYOSHKIN ARTUR – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Higher School of High Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (arthur.teryoshkin@gmail.com).

BOGDANOV ALEKSANDR – Senior Lecturer, Higher School of High Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (al.vl.bogdanov@gmail.com).

VASILYEVA OLGA – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Higher School of High Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (vasilieva_oa@spbstu.ru).

Формат цитирования: *Попов М.Г., Соловьева С.Н., Лапидус А.А., Семенов К.Н., Терёшкин А.В., Богданов А.В., Васильева О.А.* Повышение эффективности защит дальнего резервирования в распределительных сетях электроснабжения до 1 кВ // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 155–166.

УДК 621.313.3: 621.314.5: 621.316.5
ББК 31.277

М.Г. ПОПОВ, М.Д. ТАРАСЕВИЧ, А.В. БОГДАНОВ,
А.А. ЛАПИДУС, К.Н. СЕМЕНОВ, А.В. ТЕРЁШКИН, О.А. ВАСИЛЬЕВА

АЛГОРИТМ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЦЕПЯХ ТИРИСТОРНОЙ СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Ключевые слова: *тиристорная система возбуждения, повреждение тиристорного выпрямительного преобразователя, алгоритм выявления повреждений в тиристорном выпрямительном преобразователе.*

В работе исследуется алгоритм выявления повреждений в преобразовательном мосту тиристорной системы возбуждения, основанный на контроле фазных токов до тиристорного моста и выпрямленного тока ротора синхронной машины. Для идентификации повреждений используются следующие признаки аварийных ситуаций: изменение нормального порядка чередования фазных токов, увеличение длительности протекания фазного тока в контролируемом направлении, превышение уровня фазных токов и тока моста заданных параметров срабатывания (уставок), а также контроль свободных составляющих в фазных токах. Предлагаемый авторами алгоритм защиты цепей системы возбуждения с тиристорными статическими преобразователями позволяет выявить пробой и обрыв тиристора (группы тиристоров), а также короткое замыкание на полюсах моста.

Введение. Анормальная работа систем возбуждения синхронных машин ухудшает качество электроэнергии, приводит к непредусмотренному перераспределению потоков мощности в электрических сетях и, как следствие, к возможному нарушению устойчивости параллельной работы генераторов электрических станций или отдельных частей единой энергосистемы [8, 15–18].

Для выявления повреждений в системе возбуждения синхронных машин традиционно применяются специализированные схемы и методы контроля замыкания в цепи ротора в одной точке[1] [20, 21]. Это обусловлено особенностями протекания переходных процессов и растекания токов в цепях с релейно-импульсными источниками.

Для защиты от короткого замыкания обмотки ротора в двух точках, как правило, применяется отдельный комплект, который подключается к цепям системы возбуждения по факту выявления замыкания в одной точке. Такой подход имеет определенный недостаток – отсутствие требуемого быстродействия при коротких замыканиях обмотки ротора в двух точках. В этой связи в современной практике проектирования систем защиты и автоматики мощных синхронных генераторов актуально создание систем непрерывного контроля состояния цепей их статических (тиристорных) систем возбуждения.

Ещё одним вариантом контроля повреждения выпрямителя является контроль появления чётных гармоник в выпрямленном напряжении [7].

[1] ГОСТ 21558-2000. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. Общие технические условия. М., 2003.

Этот метод также не позволяет определить повреждённый элемент или вид повреждения.

Однако при этом возникают трудности измерения и контроля электрических сигналов в таких гибридных электрических системах переменного и постоянного (выпрямленного) тока, которые обусловлены наличием методических и, как следствие, инструментальных погрешностей [1–6, 9]. Их влияние наиболее ярко проявляется в нестационарных режимах работы синхронной машины [10–14, 19], являющихся следствием внутренних или внешних нарушений электрических цепей ротора, статора машины. Следует отметить, что значительные методические и инструментальные погрешности при описанном выше подходе по защите цепей возбуждения не позволяют выявить такие повреждения, как пробой и обрыв тиристора (группы тиристоров) основного (тиристорного) возбудителя. В связи с этим традиционный подход в создании этого рода защит ограничивается устранением коротких (двойных) замыканий в цепях ротора, не выявляя при этом аварийные режимы работы основного (тиристорного) возбудителя.

С учетом этого в данном исследовании разработаны новые методы и алгоритмы выявления режимов короткого замыкания на полюсах тиристорного моста, а также нестационарных режимов работы системы возбуждения, обусловленных пробоем тиристоров или обрывом цепи группы тиристоров. Предлагаемые в работе методика и алгоритм выявления повреждений в тиристорном возбудителе являются принципиально новыми и позволяют повысить качество и надежность эксплуатации статических систем возбуждения синхронных машин.

Описание объекта и методики исследований. Объектом исследования является тиристорная система возбуждения (включая автоматический регулятор) синхронного генератора G1, коммутируемого к обмотке низшего напряжения блочного трансформатора расчетной эквивалентной двухмашинной схемы электропередачи (рис. 1). Модель эквивалентной расчетной схемы электропередачи также включает в себя воздушную линию электропередачи протяженностью 200 км и номинальным напряжением 330 кВ, математическая модель которой описывается алгебраическими дифференциальными уравнениями.

Трансформаторы T1 и T2 с номинальной мощностью 125 МВА моделируются комплексным сопротивлением (включая параметры намагничивания) и идеальным коэффициентом трансформации. Нагрузка замещается шунтом постоянного сопротивления с коэффициентом мощности $\cos\varphi = 0{,}92–0{,}93$.

Номинальные параметры эквивалентного генератора энергосистемы G2: $\cos\varphi_{ном} = 0{,}85$; $x_d = x_q = 2{,}32$; $x'_d = 0{,}36$; $x''_d = 0{,}22$; $x'_q = 0{,}65$; $x''_q = 0{,}22$; $T_J = 5{,}95$ с; $T_{d0} = 8{,}00$ с; $T''_d = 0{,}04$ с; $T''_q = 0{,}03$ с.

Исследуемым объектом является тиристорный выпрямитель, выполненный по схеме трехфазного мостового выпрямителя. Модель использует стандартные блоки из библиотеки Matlab/Simulink – Thyristor (тиристор) [22].

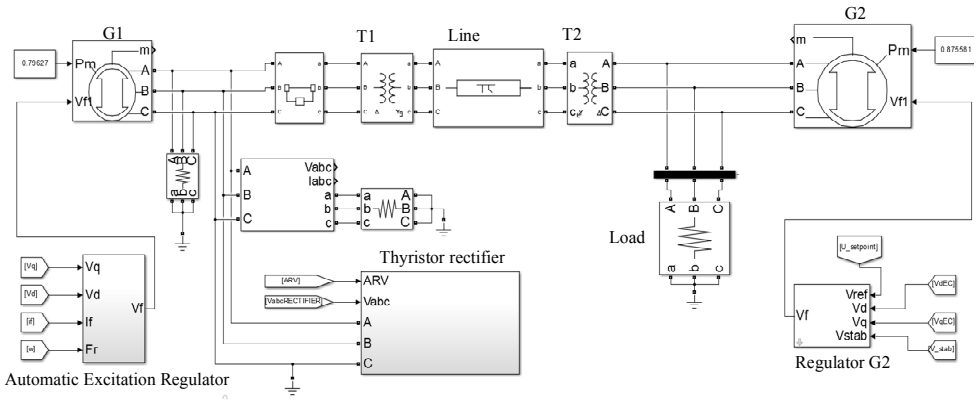


Рис. 1. Исследуемая схема двухмашинной электропередачи

Параметры систем возбуждения с автоматическими регуляторами[1], имеющими в своем составе каналы стабилизации, приняты равными[2]:

k_{0u} = 50 ед. возб. ном. / ед. напр. стат.;

k_{1u} = 3,6 ед. возб. ном. / (ед. напр. стат.·с);

$k_{0\omega}$ = 1,5 ед. возб. ном. / (рад/с);

$k_{1\omega}$ = 3,5 ед. возб. ном. / (рад/с^2);

k_{1if} = 1,25 ед. возб. ном. / ед. тока возб.

Рассмотрим наиболее характерные виды повреждений тиристорного выпрямителя. К ним прежде всего следует отнести пробои тиристора, обрыв плеча или цепи управления, сопровождающиеся электрическим разрывом плеча моста из-за неоткрытия тиристоров.

При пробое тиристора происходит увеличение фазных токов. Величина фазных токов в этом режиме может достигать 5–10 кратностей номинального тока. Максимум тока соответствует нулевой разности фазных ЭДС коммутируемого контура «фаза–фаза», при этом напряжение моста становится равным нулю. Основным признаком пробоя тиристора является многократное увеличение величины фазных токов по сравнению с выпрямленным током. Если использовать знаки фазных токов, то по ним можно определить тиристор (группу), в котором произошел пробой.

В свою очередь, обрыв цепи плеча может произойти вследствие перегорания плавкого предохранителя. При этом исчезают полуволны фазного тока в анормальной фазе и появляются гармоники частоты 50 Гц и выше на сторо-

[1] IEEE 421.5-2005. Recommended practice for excitation system models for power system stability studies. IEEE Power Engineering Society, New York, USA, 2006;
СТО 59012820.29.160.20.001-2012. Стандарт организации Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов (в ред. изменения, введенного в действие приказом ОАО «СО ЕЭС» от 14.07.2015 г. № 225). М., 2012.

[2] Ед. возб. ном. – единица напряжения возбуждения номинальная; ед. напр. стат. – единица напряжения статора; ед. тока возб. – единица тока возбуждения номинальная.

не постоянного тока, изменяется порядок чередования блоков фазного тока по сравнению с порядком при нормальной коммутации. Дополнительным признаком такого повреждения является тот факт, что длительность прохождения тока через тиристоры будет различной при пробое и обрыве. Таким образом, отличительным признаком является временной интервал.

Основные признаки анормальных и аварийных режимов тиристорного возбудителя. Начальным этапом разработки алгоритма выявления повреждений в тиристорном возбудителе является выбор контролируемых сигналов, которые позволяют однозначно определить тип повреждения. Наиболее надежными сигналами для распознавания аварийных ситуаций в преобразовательном мосту являются фазные токи и выпрямленный ток моста.

В синтезируемом авторами алгоритме используются следующие признаки анормальных и аварийных режимов:

- нарушение нормального порядка чередования фазных токов;
- увеличение длительности протекания фазного тока;
- увеличение фазных токов (в любой комбинации) свыше уставки;
- увеличение амплитуды тока моста свыше уставки.

Нормальный порядок чередования фазных токов можно записать как ($+ i_a$ и $- i_c$), ($+ i_b$ и $- i_c$), ($+ i_b$ и $- i_a$), ($+ i_c$ и $- i_a$), ($+ i_c$ и $- i_b$), ($+ i_a$ и $- i_b$), ($+ i_a$ и $- i_c$). Таким образом, если в устройстве запоминать комбинации токов, существующих в данный момент, и сравнить их с новой, то, используя известную нормальную последовательность токов, можно выявить сам факт нарушения нормальной последовательности и зафиксировать возникшую при нарушении последовательность фазных токов.

В отличие от предыдущего признак увеличения длительности протекания фазного тока изменяется непрерывно, поэтому для использования его необходимо ввести некоторые области изменения, каждая из которых будет характеризовать некоторую совокупность нарушений работы моста. На данной стадии разработок было решено для простоты ввести только одну градацию данного признака, а именно: сравнивать реальную длительность протекания полуволны тока с уставкой, равной 160 электрическим градусам.

Признак увеличения амплитуды фазных токов используется для выявления нарушений, сопровождающихся сверхтоками. В совокупности с другими признаками и при правильном выборе уставки это обеспечивает однозначность распознавания вида повреждения. В работе уставка выбрана равной двукратному номинальному значению тока (обеспечение удвоенной кратности возбуждения по требованиям ПУЭ [20]).

Признак увеличения амплитуды выпрямленного тока непрерывно изменяется. Однако при правильном выборе уставки он позволяет однозначно разграничивать повреждения внутри моста и повреждения вне моста, сопровождаемые сверхтоками. Поэтому данный признак можно использовать в качестве «блокировки». В этом случае величина уставки должна быть несколько ниже уставки предыдущего признака. Однако в дальнейшем для краткости везде принимается, что эта уставка просто равна двукратному номинальному значению.

Описание алгоритма с помощью логических функций. В предыдущем разделе были описаны основные признаки анормальных и аварийных режимов

работы статической системы возбуждения с тиристорным возбудителем. Математическое описание пускового органа защиты для выявления ранее указанных видов повреждений выполнено с использованием элементарных логических операций и функций логического состояния. Такой подход к описанию алгоритма удобен при создании быстродействующих устройств защиты на основе PLC. Схема, описывающая алгоритм распознавания повреждений, представлена на рис. 2. Как видно из структурной схемы алгоритма, анализ аварийного процесса осуществляется с помощью ниже описанных логических операций.

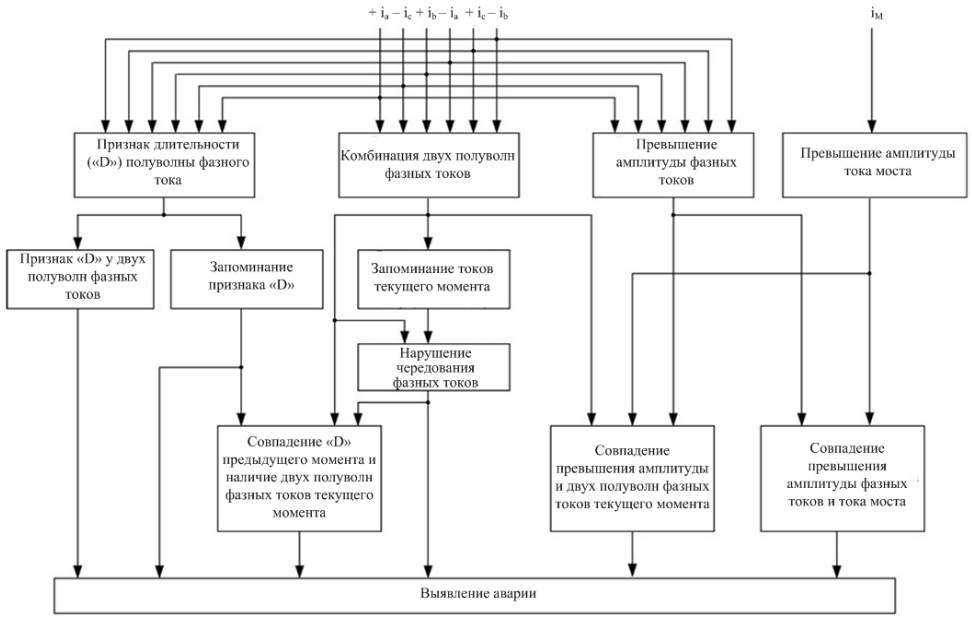


Рис. 2. Схема распознавания повреждений

Входными величинами для алгоритма являются полуволны фазных токов и ток моста. Обозначим эти переменные так: $+i_a$, $-i_c$, $+i_b$, $-i_a$, $+i_c$, $-i_b$; $i_м$. Тогда признак наличия двух фазных токов текущего момента (F_i):

$$F_1 = y_1 \cdot \overline{y_6} = (+i_a) \cdot (-i_c) \cdot [\overline{(+i_a) \cdot (-i_b)}], \quad (1)$$

$$F_2 = y_2 \cdot \overline{y_1} = (+i_b) \cdot (-i_c) \cdot [\overline{(+i_a) \cdot (-i_c)}], \quad (2)$$

$$F_3 = y_3 \cdot \overline{y_2} = (+i_b) \cdot (-i_a) \cdot [\overline{(+i_b) \cdot (-i_c)}], \quad (3)$$

$$F_4 = y_4 \cdot \overline{y_3} = (+i_c) \cdot (-i_a) \cdot [\overline{(+i_b) \cdot (-i_a)}], \quad (4)$$

$$F_5 = y_5 \cdot \overline{y_4} = (+i_c) \cdot (-i_b) \cdot [\overline{(+i_c) \cdot (-i_a)}], \quad (5)$$

$$F_6 = y_6 \cdot \overline{y_5} = (+i_a) \cdot (-i_b) \cdot [\overline{(+i_c) \cdot (-i_b)}], \quad (6)$$

где y_i – функции, описывающие наличие двух полуволн тока для текущего момента.

Так как при работе преобразовательного моста во время коммутации тиристоров ток протекает одновременно по трем фазам, это может приводить к тому,

что две функции y_i, могут одновременно принимать значение «1». Для однозначности в выражения функций F_1–F_6 были введены «блокировки», выделяющие в каждый момент времени наличие только двух полуволн фазных токов.

Определение признака «наличия комбинации двух токов предшествующего момента» заключается в операции запоминания переменных F_1–F_6 и описывается нижеследующими выражениями вида (показано на примере одной F_I из шести комбинаций):

$$F_I = (F_1 + F_I') \cdot (\overline{F}_2 \cdot \overline{R}), \tag{7}$$

где R – функция сброса.

Из системы уравнений вида (7) следует, что комбинация токов текущего момента будет запоминаться только до момента времени, пока не выявится комбинация токов последующей очередной комбинации или не организуется сигнал, соответствующий переменной сброса R.

Логическая операция выявления признака «нарушения чередования фазных токов» описывается следующими функциями (представлены только три функции из двадцати четырёх, остальные записываются аналогично):

$$S_1 = F_1 \cdot F_{II}, \tag{8}$$

$$S_{22} = F_6 \cdot F_{II}, \tag{9}$$

$$S_{24} = F_6 \cdot F_{IV} \tag{10}$$

Функции S_i описывают пропуск открытия тиристоров (S_1 – VS4, VS6; S_2 – VS5, VS6; S_3 – VS6; S_5 – VS1, VS5; S_6 – VS6, VS1; S_7 – VS1; S_{10} – VS6, VS2; S_{11} – VS1, VS2; S_{12} – VS2; S_{13} – VS3; S_{14} – VS1, VS3; S_{15} – VS2, VS3; S_{17} – VS3, VS4; S_{18} – VS4; S_{20} – VS2, VS4; S_{21} – VS3, VS5; S_{22} – VS4, VS5; S_{23} – VS5).

Выявление признака «длительности» (далее – D), т.е. превышения полуволной фазного тока длительности 160 электрических градусов (функции D_1–D_6), можно разбить на две последовательные логические операции. Одна заключается в задержке входных сигналов $+ i_a$, $- i_c$, $+ i_b$, $- i_a$, $+ i_c$, $- i_b$ на время, равное 160 электрических градусов. Обозначим переменные этой операции как t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6. Другая операция является конъюнкцией переменных, соответствующих полуволнам фазных токов ($+ i_a$, $- i_c$, $+ i_b$, $- i_a$, $+ i_c$, $- i_b$), и переменных, являющихся инверсией функций t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6.

Следовательно, функции D_1 и D_4 описываются следующим образом:

$$D_1 = (+i_a) \cdot \overline{t_1}, \tag{11}$$

$$D_4 = (+i_a) \cdot \overline{t_4}. \tag{12}$$

Выражения представлены для полуволн фазы A, выражения для полуволн токов фазы B (функции D_2, D_5) и фазы C (функции D_3, D_6) аналогичны.

Логические операции запоминания признаков нарушения длительности D_{I}–D_{IV} происходят сразу после появления признаков D_1–D_6 и существуют до момента следующей по очереди комбинации токов или до сигнала, соответствующего переменной R:

$$D_N = (D_k + D_N') \cdot (\overline{F_q} \cdot \overline{R}), \tag{13}$$

где индексы N, k и q в выражении (13) принимают те же значения, что и в выражениях вида (7).

Фактор пропуска открытия двух тиристоров соответствует совпадению признаков нарушения длительности у двух полуволн фазных токов и описывается для фаз *A* и *C* следующими функциями (выражения для других комбинаций полуволн фазных токов аналогичны):

$$S_{25} = D_1 \cdot D_2 = (+i_a) \cdot (-i_c) \cdot \overline{t_1} \cdot \overline{t_2}, \tag{14}$$

$$S_{28} = D_4 \cdot D_5 = (-i_a) \cdot (+i_c) \cdot \overline{t_4} \cdot \overline{t_5}, \tag{15}$$

Функции S_i описывают пропуск открытия тиристоров (S_{25} – VS3, VS4; S_{26} – VS4, VS5; S_{27} – VS5, VS6; S_{28} – VS6, VS1; S_{29} – VS1, VS2; S_{30} – VS2, VS3).

Пробой тиристорного преобразователя характеризуется появлением признака превышения амплитуды (далее *B*) и выявлением полуволн фазных токов текущего момента:

$$S_{30+k} = F_k \cdot B_{out}, \tag{16}$$

где k =1, 2, ..., 6; S_{31}, S_{32}, S_{33}, S_{34}, S_{35}, S_{36} – функции, описывающие пробой тиристоров VS1, VS2, VS3, VS4, VS5, VS6, соответственно; B_{out} – операция «запрета», равная

$$B_{out} = B_{iF} \cdot B_{iM} \cdot \overline{R}, \tag{17}$$

где B_{iM} – функция, описывающая увеличение выпрямленного тока выше уставки; B_{iF} – функция, описывающая выявление признака превышения амплитуды фазных токов и заключающаяся в решении следующих уравнений:

$$B_{iF} = \begin{cases} 0, \text{ если } i_F < 2i_{F\text{ном}}; \\ 1, \text{ если } i_F > 2i_{F\text{ном}}, \end{cases} \tag{18}$$

где i_F – амплитуда какого-либо фазного тока.

Запаздывание открытия тиристоров соответствует комбинации наличия признака «нарушения длительности в предыдущий момент» и признака «наличия комбинации двух полуволн фазных токов текущего момента»:

$$S_{36+k} = D_k \cdot \overline{D} \cdot F_k, \tag{19}$$

где k = 1, 2, ..., 6; D – функция, описывающая дизъюнкцию переменных D_{I}, D_{II}, D_{III}, D_{IV}, D_{V} и D_{VI}; $D_M = (D + D') \cdot \overline{R}$ – операция памяти функции D; S_{37}, S_{38}, S_{39}, S_{40}, S_{41}, S_{42} – функции, описывающие запаздывание открытия тиристоров VS2, VS3, VS4, VS5, VS6, VS7, соответственно.

Короткое замыкание на полюсах выпрямительного моста описывается конъюнкцией признаков *B* фазных токов и тока моста:

$$S_{43} = B_{iF} \cdot B_{iM}. \tag{20}$$

С помощью данного алгоритма распознается и запоминается первопричина нарушения, а также вся последовательность нарушений. Следовательно, очень важно своевременное восстановление схемы в исходное состояние после выдачи какой-либо информации. Для этого в алгоритм вводится функция сброса *R*, назначение которой – обнуление всех ячеек памяти, т.е. восстановление схемы в исходное состояние.

Функциональная схема разработанного алгоритма, описываемая логическими выражениями (1)–(20), изображена на рис. 3.

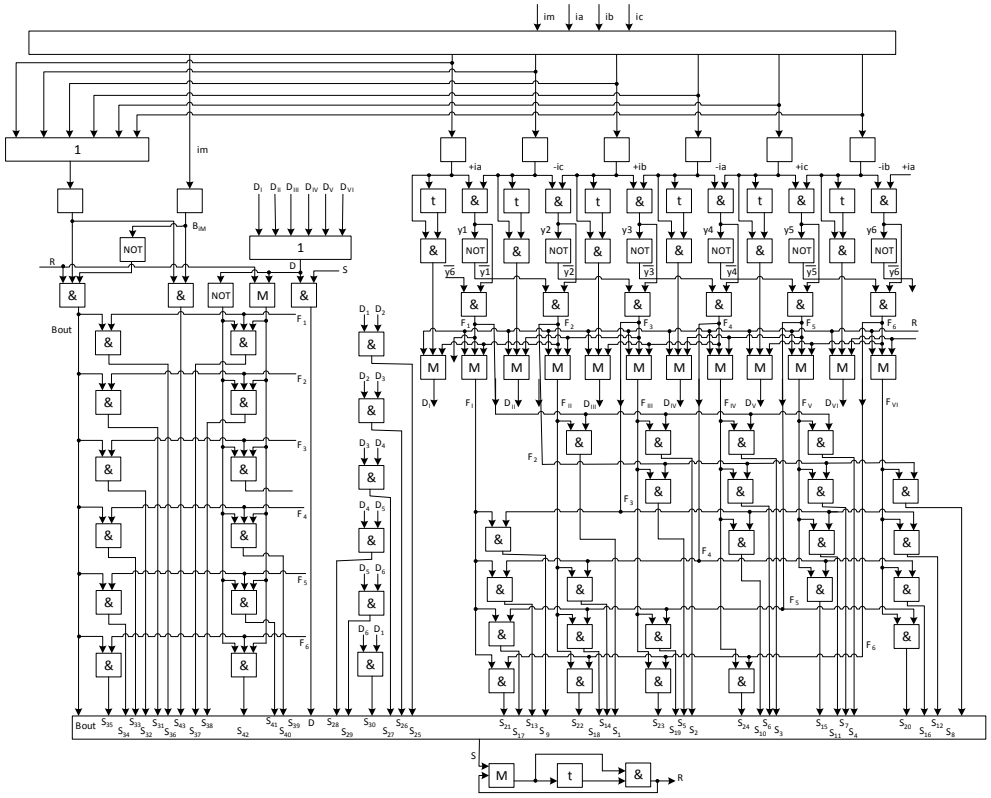


Рис. 3. Функционально-логическая схема алгоритма

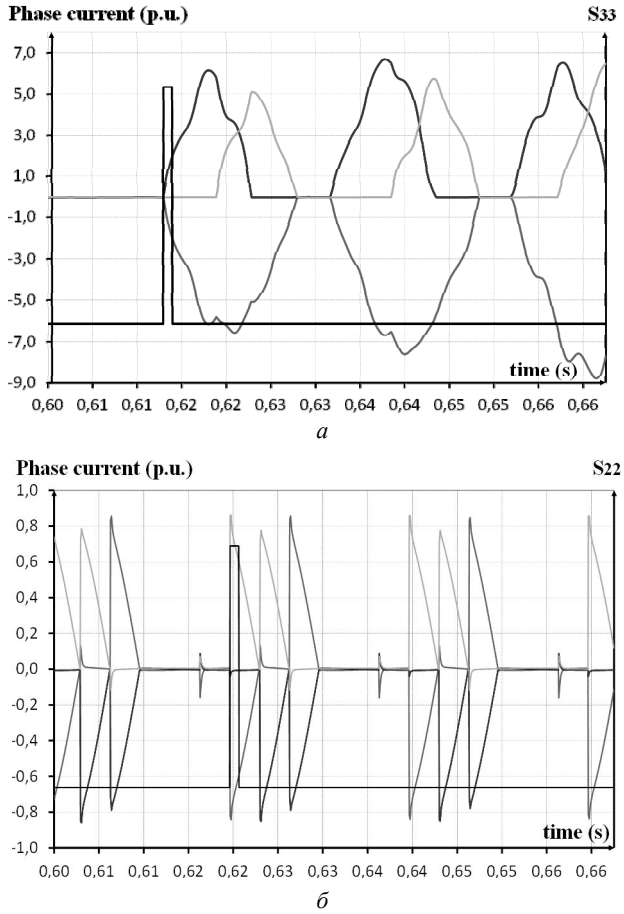
Результаты исследования алгоритма в нестационарных режимах. Исследование алгоритма (рис. 3) произведем с помощью модели, разработанной в программе Matlab/Simulink. Выходным сигналом алгоритма является вектор из 43 логических элементов, где ненулевое значение имеет выявленный признак, описываемый выражениями (1)–(25).

Рассмотрим два наиболее характерных аварийных режима работы тиристорного выпрямителя, обусловленных пробоем тиристора VS3 (рис. 4, *а*), а также обрывом тиристоров VS3 и VS4 (рис. 4, *б*) на расчётных интервалах времени с 0,6 по 0,8 с.

Из анализа осциллограммы фазных токов в аварийном режиме пробоя тиристора (рис. 4, *а*) следует, что в момент пробоя тиристора происходит увеличение фазных токов $+ i_c$ и $- i_b$, что соответствует ранее описанным признакам для случая пробоя тиристора VS3. При этом пусковым органом защиты спустя 5 мс было зафиксировано событие S_{33}, соответствующее пробою тиристора VS3.

В свою очередь, анализ расчетной осциллограммы фазных токов (рис. 4, *б*) в нестационарном режиме работы системы возбуждения, обусловленном обрывом тиристоров, показал, что на расчётном интервале времени с 0,6 по 0,8 с

после обрыва происходит пропадание токов через тиристоры VS3 и VS4. Этот признак S_{22} был зафиксирован пусковым органом защиты от повреждений в цепях тиристорного возбудителя в течение 25 мс относительно начала аварийного события. В обоих расчетных случаях благодаря оригинальному математическому описанию алгоритма функционирования измерительного и пускового органов защиты её быстродействие составляет не более 30 мс.



а

б

Рис. 4. Осциллограммы фазных токов и выходной логический сигнал защиты при пробое тиристора VS3 (*а*) и обрыве тиристоров VS3 и VS4 (*б*)

Следует отметить, что однократность срабатывания пускового органа защиты, как это показано на вышеприведенных на рис. 4, *а* и *б*, обусловлена исходной постановкой задачи – выявление первоначальной причины аварийного режима работы тиристорного возбудителя. Однократность срабатывания также позволяет использовать для выявления повреждения схемы с «классическими» фазными электромагнитными трансформаторами тока. Фиксация повреждения происходит до момента их насыщения. Для повышения надеж-

ности функционирования защиты может быть рекомендовано применение расширенной фиксации обнаруженных признаков аварийного состояния тиристоров (тиристорных групп моста) с сохранением их в журнале аварийных событий микропроцессорного устройства контроля, защиты и автоматики.

Выводы. В работе предлагаются и обосновываются методика и алгоритм пускового органа защиты цепей системы возбуждения с тиристорным возбудителем. Алгоритм описан с помощью элементарных логических операций и элементов комбинаторной логики с целью упрощения его внедрения в программируемые контроллеры PLC.

Разработана математическая модель пускового органа защиты и на ней проверена работа алгоритма в характерных аварийных режимах работы статической системы возбуждения с тиристорным возбудителем. Установлено, что реакция проектируемой системы защиты и автоматики в аварийном режиме составляет не более 30 мс.

Во всех исследуемых режимах подтверждена достоверность работы измерительных и пусковых органов при однократной фиксации признака аварийного состояния тиристорного возбудителя. Повышение надежности функционирования защиты возможно при фиксации всех, а не первичных обнаруженных признаков аварийного состояния тиристоров (тиристорных групп моста) с последующим сохранением их списка в журнале аварийных событий микропроцессорного устройства контроля, защиты и автоматики.

Литература

1. *Ванин В.К., Ванин И.В., Попов М.Г.* Повышение точности измерения первичных напряжений в энергосистемах // Вестник Чувашского университета. 2019. № 3. С. 46–52.

2. *Ванин В.К., Горячевский К.С., Забоин В.Н., Попов М.Г., Халилов Ф.Х.* Идентификация параметров силовых трансформаторов в адаптивных средствах их защиты и автоматики // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2018. № 2(79). С. 118–130.

3. *Ванин В.К., Забоин В.Н., Попов М.Г., Гуревич Э.И.* Идентификация параметров силового оборудования в адаптивных средствах защиты и автоматики // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2018. Т. 61, № 6. С. 68–76.

4. *Ванин В.К., Забоин В.Н., Попов М.Г., Сиренко Н.В., Хабаров А.А.* Воспроизведение токов и напряжений измерительных трансформаторов тока // Релейная защита и автоматизация. 2018. № 4(33). С. 42–45.

5. *Ванин В.К., Попов М.Г.* Анализ процессов в силовых и измерительных трансформаторах и коррекция их описания для различных приложений // Релейная защита и автоматизация. 2018. № 1(30). С. 39–45.

6. *Ванин В.К., Попов М.Г., Попов С.О., Амбросовская Т.Д.* Повышение достоверности работы измерительных цепей релейной защиты // Электрические станции. 2015. № 11. С. 30–35.

7. *Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е.* Промышленная электроника / под ред. В.А. Лабунцова. М.: Энергоатомиздат, 1988.

8. *Захарова Е.В., Попов М.Г.* Исследование статической устойчивости кольцевых объединенных энергосистем на основе структурных критериев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 3. С. 15–21.

9. Пат. 2684169 РФ. Способ фильтрации тока намагничивания и воспроизведения вторичных токов многообмоточных силовых трансформаторов / Ванин В.К., Попов М.Г. № 2017123292 заявл. 30.06.2017 г.; опубл. 04.04.2019 г., Бюл. № 10.

10. *Попов М.Г.* Автоматизированные системы контроля качества электроэнергии распределительных сетей // Энергетик. 2003. № 12. С. 34–35.

11. *Попов М.Г.* Система релейной защиты управляемой межсистемной электропередачи // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 22(100). С. 11–19.

12. *Попов М.Г., Богданов А.В.* Исследование электрических процессов статических систем возбуждения синхронных машин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2010. № 2(спецвыпуск). С. 25–28.

13. *Попов М.Г., Васильева О.А., Асаинов Д.Н.* Опыт внедрения цифровых технологий на ТЭЦ на базе многофункциональных измерительных приборов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 3. С. 47–58. DOI: 10.18721/JEST.25303.

14. *Попов М.Г., Гараева Н.Р., Медина Гарай К.Э.* Разработка методики синтеза усовершенствованных математических моделей авторансформатора // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2010. № 2(спецвыпуск). С. 28–30.

15. *Попов М.Г., Захарова Е.В.* Исследование устойчивости объединенных энергосистем на основе структурного подхода // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 3(178). С. 110–117.

16. *Попов М.Г., Захарова Е.В.* Обобщенный анализ статической устойчивости объединенных энергосистем произвольной структуры // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 5-6. С. 65–73.

17. *Попов М.Г., Захарова Е.В.* Поисковые исследования структурных критериев статической устойчивости сложных объединенных энергосистем // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 1(537). С. 37–43.

18. *Попов М.Г., Захарова Е.В., Синянский И.В., Горячевский К.С.* Исследование статической устойчивости сложных объединенных энергосистем произвольной структуры // Электрические станции. 2015. № 11. С. 61–69.

19. *Попов М.Г., Козырев А.В., Орсоева А.А.* Исследование асинхронного режима гидрогенераторов Бурейской ГЭС при потере возбуждения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2010. № 2(спецвыпуск). С. 30–33.

20. Правила устройства электротехнических установок. 7-е изд. М.: Энергия, 2002.

21. *Савченко Е.В.* Системы возбуждения мощных синхронных генераторов и компенсаторов. М., 1990. 67 с.

22. *Черных И.В.* Моделирование электротехнических устройств в Matlab. SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с.

ПОПОВ МАКСИМ ГЕОРГИЕВИЧ – доктор технических наук, профессор, Высшая школа высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (PopovMG@eef.spbstu.ru).

ТАРАСЕВИЧ МИХАИЛ ДМИТРИЕВИЧ – аспирант, Высшая школа высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (tarasevichmikhail93@gmail.com).

БОГДАНОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ – старший преподаватель, Высшая школа высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (al.vl.bogdanov@gmail.com).

ЛАПИДУС АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент, Высшая школа высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (lapidus_a_a@mail.ru).

СЕМЕНОВ КОНСТАНТИН НИКОЛАЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент, Высшая школа высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (semenov_k_n@mail.ru).

ТЕРЁШКИН АРТУР ВИКТОРОВИЧ – кандидат технических наук, доцент, Высшая школа высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (arthur.teryoshkin@gmail.com).

ВАСИЛЬЕВА ОЛЬГА АЛЕКСЕЕВНА – кандидат технических наук, доцент, Высшая школа высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург (vasilieva_oa@spbstu.ru).

**M. POPOV, M. TARASEVICH, A. BOGDANOV,
A. LAPIDUS, K. SEMENOV, A. TERYOSHKIN, O. VASILYEVA**

**ALGORITHM OF FAULT DETECTING IN CIRCUITS
OF THE THYRISTOR EXCITATION SYSTEM**

Key words: *thyristor excitation system; fault of a thyristor rectifier converter; algorithm of detecting fault in a thyristor rectifier converter.*

The study considers the algorithm of detection of faults in a converter bridge of thyristor excitation system. The algorithm is based on the control of phase currents before a thyristor bridge and control of rectified rotor current. To identify the fault, the following fault features are used: phase disruption, increasing duration of phase current flow in the controlled direction, increasing phase currents and bridge current above pickup values (set points) and control of free components in phase currents. The suggested algorithm of protection of circuits of the excitation system with a static thyristor rectifier allows to detect the breakdown and the fault of a thyristor (group of thyristors), and a short circuit at the bridge poles.

References

1. Vanin V.K., Vanin I.V., Popov M.G. *Povyshenie tochnosti izmereniya pervichnykh napryazhenii v energosistemakh* [Improving the accuracy of measurement of the primary voltage in power systems]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2019, no. 3, pp. 46–52.

2. Vanin V.K., Goryachevskii K.S., Zaboin V.N., Popov M.G., Khalilov F.Kh. *Identifikatsiya parametrov silovykh transformatorov v adaptivnykh sredstvakh ikh zashchity i avtomatiki* [Identification parameters of power transformers in an adaptive protection and automatics]. *Izvestiya NTTs Edinoi energeticheskoi sistemy*, 2018, no. 2(79), pp. 118–130.

3. Vanin V.K., Zaboin V.N., Popov M.G., Gurevich E.I. *Identifikatsiya parametrov silovogo oborudovaniya v adaptivnykh sredstvakh zashchity i avtomatiki* [Identification of parameters of electrical power in an adaptive protection and emergency automatics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2018, vol. 61, no. 6, pp. 68–76.

4. Vanin V.K., Zaboin V.N., Popov M.G., Sirenko N.V., Khabarov A.A. *Vosproizvedenie tokov i napryazhenii izmeritel'nykh transformatorov toka* [Reproduction of currets and voltage in measuring current transformers]. *Releinaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2018, no. 4(33), pp. 42–45.

5. Vanin V.K., Popov M.G. *Analiz protsessov v silovykh i izmeritel'nykh transformatorakh i korrektsiya ikh opisaniya dlya razlichnykh prilozhenii* [Analysis of the processes in power and measurement transformers and correction of their description for various applications]. *Releinaya zashchita i avtomatizatsiya,* 2018, no. 1(30), pp. 39–45.

6. Vanin V.K., Popov M.G., Popov S.O., Ambrosovskaya T.D. *Povyshenie dostovernosti raboty izmeritel'nykh tsepei releinoi zashchity* [Enhancing the reliability of the relay protection circuits measurement]. *Elektricheskie stantsii*, 2015, no. 11, pp. 30–35.

7. Gorbachev G.N., Chaplygin E.E. *Promyshlennaya elektronika* [Indastrial electronics]. Moscow, 1988, Energoatom-izdat, 320 p.

8. Zakharova E.V., Popov M.G. *Issledovanie staticheskoi ustoichivosti kol'tsevykh ob"edinennykh energosistem na osnove strukturnykh kriteriev* [Study of static stability of ring united power systems based on structural criterias]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2014, no. 3, pp. 15–21.

9. Vanin V.K., Popov M.G *Sposob fil'tratsii toka namagnichivaniya i vosproizvedeniya vtorichnykh tokov mnogoobmotochnykhsilovykh transformatorov* [Method of filtering magnetization current and reproducing secondary currents of multi-winding transformers]. Patent RF, no. 2684169, 2019.

10. Popov M.G. *Avtomatizirovannye sistemy kontrolya kachestva elektroenergii raspredelitel'nykh setei* [Automated systems of power quality control of distribution networks]. *Energetik*, 2003, no. 12, pp. 34–35.

11. Popov M.G. *Sistema releinoi zashchity upravlyaemoi mezhsistemnoi elektroperedachi* [Relay protection system for controlled intersystem power transmission]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2010, no. 22(100), pp. 11–19.

12. Popov M.G., Bogdanov A.V. *Issledovanie elektricheskikh protsessov staticheskikh sistem vozbuzhdeniya sinkhronnykh mashin* [Study of electrical processes of static excitation systems of synchronous machines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2010, no. 2(Special Iss.), pp. 25–28.

13. Popov M.G., Vasil'eva O.A., *Asainov D.N. Opyt vnedreniya tsifrovykh tekhnologii na TETS na baze mnogofunktsional'nykh izmeritel'nykh priborov* [Introductance experience of digital technologies on

the basis of multifunctional measuring meters at power station]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 47–58. doi: 10.18721/JEST.25303.

14. Popov M.G., Garaeva N.R., Medina Garai K.E. *Razrabotka metodiki sinteza usovershenstvovannykh matematicheskikh modelei avtoransformatora* [Development of a synthesis methodology for advanced mathematical models of autotransformer]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika,* 2010, no. 2(spetsvypusk), pp. 28–30.

15. Popov M.G., Zakharova E.V. *Issledovanie ustoichivosti ob'edinennykh energosistem na osnove strukturnogo podkhoda* [Stability study of power grids based on structured approach]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2013, no. 3(178), pp. 110–117.

16. Popov M.G., Zakharova E.V. *Obobshchennyi analiz staticheskoi ustoichivosti ob"edinennykh energosistem proizvol'noi struktury* [Static stability study of power grids different structure]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki,* 2014, no. 5-6, pp. 65–73.

17. Popov M.G., Zakharova E.V. *Poiskovye issledovaniya strukturnykh kriteriev staticheskoi ustoichivosti slozhnykh ob"edinennykh energosistem* [Study of structural criteria of steady state stability of complex integrated power systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2015, no. 1(537), pp. 37–43.

18. Popov M.G., Zakharova E.V., Sinyanskii I.V., Goryachevskii K.S. *Issledovanie staticheskoi ustoichivosti slozhnykh ob"edinennykh energosistem proizvol'noi struktury* [Research of static stability of united power systems of any structure] *Elektricheskie stantsii*, 2015, no. 11, pp. 61–69.

19. Popov M.G., Kozyrev A.V., Orsoeva A.A. *Issledovanie asinkhronnogo rezhima gidrogeneratorov Bureiskoi GES pri potere vozbuzhdeniya* [Study of the asynchronous regime of hydro generators of the Bureyskaya hydroelectric station in case of the loss of excitation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2010, no. 2(spetsvypusk), pp. 30–33.

20. *Pravila ustroistva elektrotekhnicheskikh ustanovok. 7-e izd* [Electrical Installation Rules. 7th ed.]. Moscow, Energiya Publ., 2002.

21. Savchenko E.V. *Sistemy vozbuzhdeniya moshchnykh sinkhronnykh generatorov i kompensatorov* [Excitation systems of powerful synchronous generators and compensators]. Moscow, 1990, 67 p.

22. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskih system v Matlab. SimPowerSystems I Simulink* [Modeling of electrical systems in Matlab. SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, 2007, DMK Press, 288 p.

POPOV MAKSIM – Doctor of Technical Sciences, Professor of Higher School of High Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (popovmg@eef.spbstu.ru).

TARASEVICH MIKHAIL – Post-Graduate Student, Higher School of High Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (tarasevichmikhail93@gmail.com).

BOGDANOV ALEKSANDR – Senior Lecturer, Higher School of High Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (al.vl.bogdanov@gmail.com).

LAPIDUS ALEKSANDR – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Higher school of High Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (lapidus_a_a@mail.ru).

SEMENOV KONSTANTIN – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Higher School of High Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (semenov_k_n@mail.ru).

TERYOSHKIN ARTUR – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Higher School of High Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (arthur.teryoshkin@gmail.com).

VASILYEVA OLGA – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Higher School of High Voltage Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg (vasilieva_oa@spbstu.ru).

Формат цитирования: *Попов М.Г., Тарасевич М.Д., Богданов А.В., Лапидус А.А., Семенов К.Н., Терёшкин А.В., Васильева О.А.* Алгоритм выявления повреждений в цепях тиристорной системы возбуждения // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 167–179.

УДК 621.311.1
ББК 31.282

Ю.И. СОЛУЯНОВ, А.И. ФЕДОТОВ,
Д.Ю. СОЛУЯНОВ, А.Р. АХМЕТШИН

АКТУАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК МНОГОКВАРТИРНЫХ ЖИЛЫХ ДОМОВ

Ключевые слова: *система электроснабжения, расчетная электрическая нагрузка, удельное энергопотребление, суточные профили мощности.*

Проектные организации для расчета мощности, потребляемой жилыми и общественными зданиями, используют нормативные удельные значения электрических нагрузок, которые не пересматривались с прошлого века. Практика строительства и эксплуатации систем городского электроснабжения показала, что в большинстве случаев реальные нагрузки меньше расчетных. Проведенные Ассоциацией «Росэлектромонтаж» исследования электрических нагрузок в течение 4 лет в более чем 5200 многоквартирных домах с последующей статистической обработкой показали, что фактические электрические нагрузки для Республики Татарстан в месяцы максимального электропотребления в 1,5–2,5 раза ниже, чем представленные в СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа». Недавно построенные кабельные сети и трансформаторные подстанции 0,4/10 кВ по факту оказываются недогруженными. Причем эта недогрузка такая, что большая часть трансформаторов редко работает на 30% от своей мощности в часы максимального электропотребления. Расчет электрической нагрузки – основа проектирования системы электроснабжения любого объекта капитального строительства. От величины электрической нагрузки зависят стоимость капитальных затрат и плата за технологическое присоединение. Причина существенной разницы между реальной и расчетной нагрузками состоит, в том числе, из того, что за два прошедших десятилетия значительно изменилось электропотребление бытовыми приборами. Причем в сторону уменьшения потребления электроэнергии. Современный бытовой прибор, будь то холодильник или стиральная машина, это прибор с обязательно обозначенным классом энергопотребления. И чем выше класс, тем прибор конкурентоспособнее. Также приняты новые требования по энергетической эффективности зданий, строений, сооружений, приводящие к улучшению показателей удельного расхода тепловой и электроэнергий.

Расчет электрической нагрузки – основа проектирования системы электроснабжения любого объекта капитального строительства. От величины электрической нагрузки зависят структура системы, мощность и, соответственно, стоимость закладываемого электрооборудования [1–4]. Стоимость технологического подключения к действующим электрическим сетям определяется, главным образом, значением мощности, которую потребитель просит в своей заявке.

В настоящее время для расчета нагрузок жилых и общественных зданий используют нормативно-технический документ (НТД)[1]. Как показали оценочные расчеты специалистов Ассоциации «Росэлектромонтаж» (далее Ассоциация), нормативы, указанные в НТД, существенно завышены по сравне-

[1] СП 256.1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200139957.

нию с реальными значениями [10]. Замеры по трансформаторным подстанциям (ТП) представлены на рис. 1.

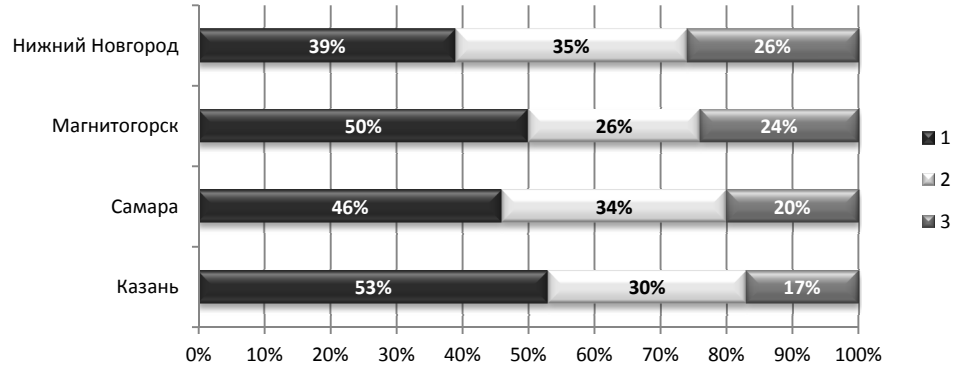


Рис. 1. Загрузка трансформаторных подстанций (kз):
1– kз ≤ 15%; 2 – 15% < kз ≤30%; 3 – 30% < kз ≤ 85%

Из вышепредставленной диаграммы можно сделать вывод, что порядка 80% трансформаторов загружены менее чем на 30%, следовательно, трансформаторы работают с низким КПД [5–7] и большими потерями относительно передаваемой электроэнергии от 2 до 12% при загрузке ТП от 5 до 30% (рис. 1).

Потери для двухобмоточных трансформаторов определялись по формуле

$$\Sigma\Delta P\text{тр} = n \cdot \Delta P\text{хх} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P\text{кз} \cdot \frac{(k\text{зт} \cdot S_{\text{ном}})^2}{S_{\text{ном}}^2}\ , \text{кВт},$$

где n – число параллельно работающих трансформаторов; ΔPхх – активные потери холостого хода (потери в стали трансформатора, не зависящие от величины нагрузки), кВт; ΔPкз – активные потери короткого замыкания в обмотках трансформатора, кВт; kзт – коэффициент загрузки трансформатора; Sном – номинальная мощность трансформатора, кВА.

Потери в зависимости от коэффициента загрузки определялись по формуле

$$\Sigma\Delta P\text{ткзт} = \left(\Sigma\Delta P\text{тр} \Big/ \left(k\text{зт} \cdot S_{\text{ном}} \cdot \cos\phi\right) \right) \cdot 100\%,$$

где $\cos\phi$ – коэффициент мощности принимаем равным 0,95.

На рис. 2. представлен график потерь в трансформаторах в зависимости от коэффициента загрузки.

Из рис. 2 видно, что чем меньше загружен трансформатор, тем больше потерь относительно передаваемой мощности. Так как порядка 50% трансформаторов загружены менее 15%, потери в них составляют от 2 до 4%.

За последнее десятилетие электропотребление бытовыми приборами за счет использования новых технологий изменилось в сторону уменьшения [8, 9, 11]. Современный бытовой прибор – это прибор с обязательно обозна-

ченной категорией энергосбережения. И чем выше класс, тем прибор конкурентоспособнее. Кроме того, для освещения улиц и дворов всё чаще применяются светодиодные светильники, в квартирах применяются энергосберегающие лампы. А так как растет стоимость 1 кВт·ч, жильцы действительно экономят электроэнергию [10].

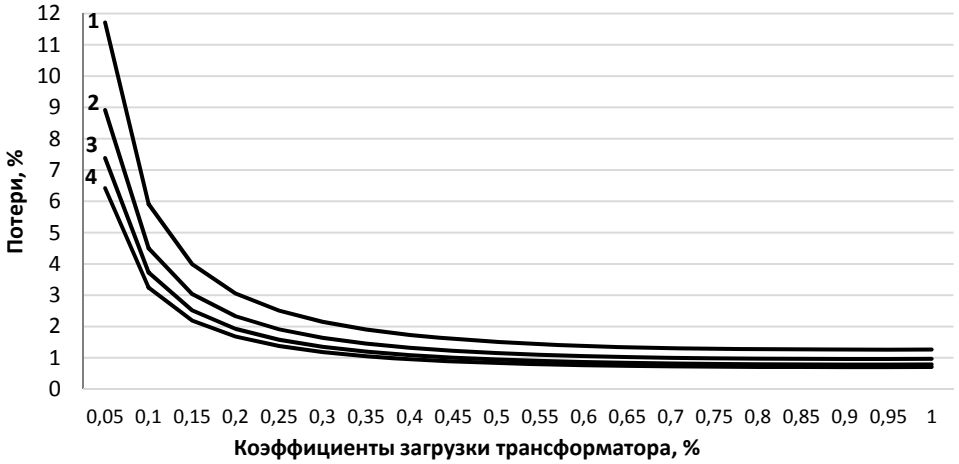


Рис. 2. Потери в трансформаторах в зависимости от коэффициента загрузки:
1 – ТМ 250/10; 2 – ТМ 630/10; 3 – ТМ 1250/10; 4 – ТМ 2500/10

С 2023 г. показатели удельного расхода тепловой и электроэнергии должны быть улучшены на 40%, а с 2028 г. – на 50%[1].

Классы энергетической эффективности многоквартирных жилых домов (МКД)[2] представлены в табл. 1.

Таблица 1

Классы энергетической эффективности

Обозначение класса энергетической эффективности	**Наименование класса энергетической эффективности**	**Величина отклонения значения фактического удельного годового расхода энергетических ресурсов от базового уровня, %**
A++	высочайший	–60 включительно и менее
A+	высочайший	от –50 включительно до –60
A	очень высокий	от –40 включительно до –50
B	высокий	от –30 включительно до –40
C	повышенный	от –15 включительно до –30
D	нормальный	от 0 включительно до –15

[1] Об утверждении Требований энергетической эффективности зданий, строений, сооружений: приказа Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 17.11.2017 г. № 1550/пр [Электронный ресурс] // Гарант: информ.-прав. портал. URL: https://base.garant.ru/ 71868640.

[2] Об утверждении правил определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов: приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 06.06.2016 г. № 399/пр [Электронный ресурс] // Гарант: информ.-прав. портал. URL: https://base.garant.ru/ 71462244.

Специалистами Ассоциации был проведен анализ информации электропотребления МКД по городам Республики Татарстан. Представим в графическом виде результаты расчетов по городам: Альметьевск, Бугульма, Елабуга, Казань, Набережные Челны (рис. 3). Как показали расчеты, наибольшее электропотребление в РТ наблюдается в г. Казань. В [10] говориться, что имеют место региональные отличия в части электропотребления.

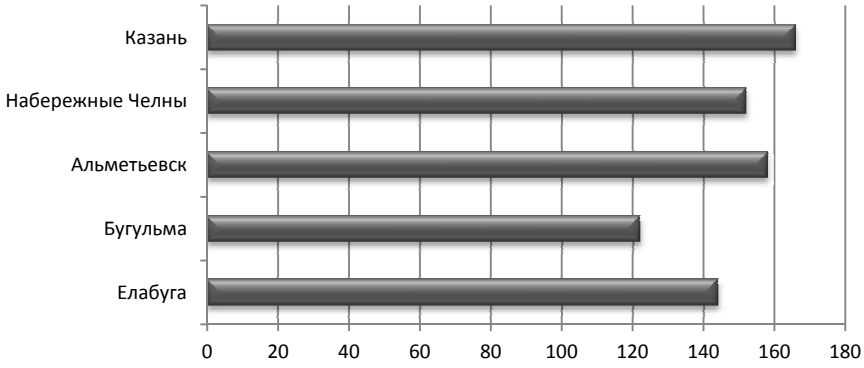


Рис. 3. Удельное электропотребление
в Республике Татарстан по городам, кВт·ч/квартира (далее – кВт/кв.)

На рис. 4 в качестве иллюстрации представлены профили мощности для трех групп МКД г. Казань. В зависимости среднего удельного электропотребления домов были рассмотрены три группы для г. Казань:

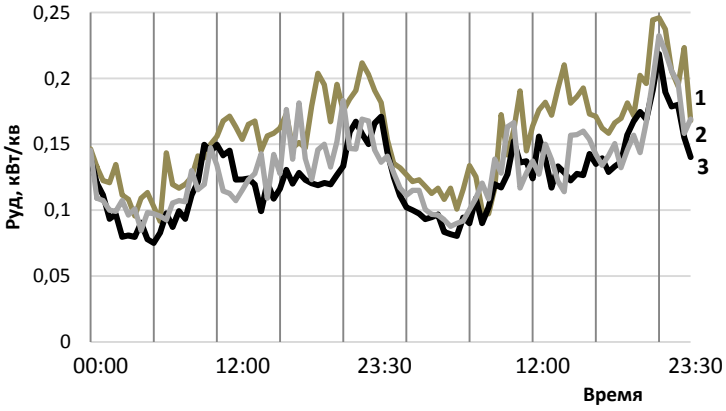
– к 1-й группе относятся жилые здания без лифтов с газовыми плитами;
– ко 2-й группе относятся жилые здания с лифтами с газовыми плитами;
– к 3-й группе относятся жилые здания с лифтами и с электрическими плитами.

Анализ профилей мощности (по данным ОАО «Сетевая компания») по МКД показал, что их характер качественно одинаковый и имеет место устойчивый максимум нагрузки в вечерние часы.

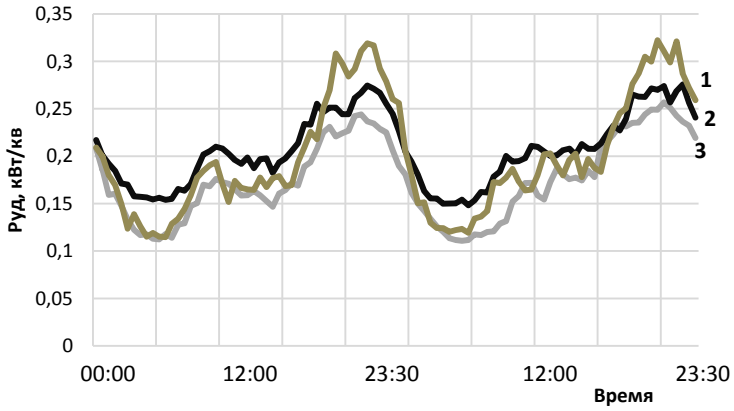
Расчеты показали, что фактические значения потребляемой мощности в периоды максимальной нагрузки ниже значений, приведенных в НТД, на 30–223%.

На рис. 5 (по данным ОАО «Сетевая компания») представлен сведенный суточный график (кривая 1) для 14-этажного МКД на 94 квартиры (кривая 2), детского сада на 180 мест (кривая 3), среднеобразовательной школы на 500 мест (кривая 4), из которого видно, что профиль для одинаковых категорий потребителей мощности изменяется по одному закону, а часы максимумов для различных категорий смещены.

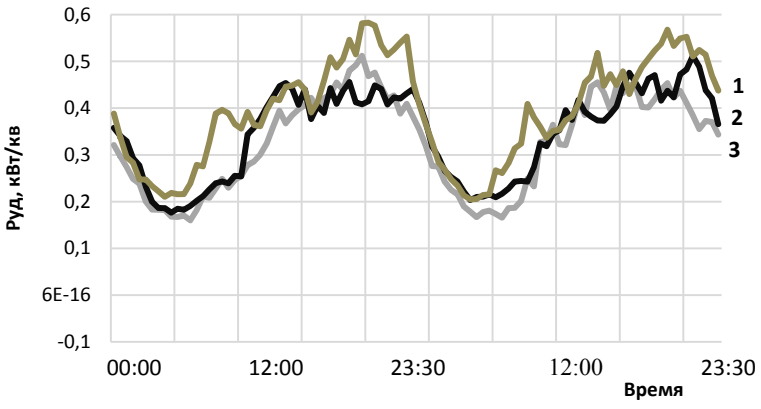
Экономическая эффективность актуализации удельных нормативов потребляемой электрической мощности МКД определяется снижением значений их заявленной мощности, а соответственно, и мощностей (количества) силовых трансформаторов городских трансформаторных подстанций, снижением сечений питающих кабелей, а следовательно, и капитальных затрат при строительстве и эксплуатации.



а



б



в

Рис. 4. Профили мощности для трех групп МКД г. Казань:
а – 1-я группа МКД (1 – с 48 квартирами; 2 – с 105 квартирами; 3 – с 44 квартирами);
б – 2-я группа МКД (1 – с 281 квартирой; 2 – с 210 квартирами; 2 – с 118 квартирами);
в – 3-я группа МКД (1 – с 82 квартирами; 2 – с 93 квартирами; 2 – с 106 квартирами)

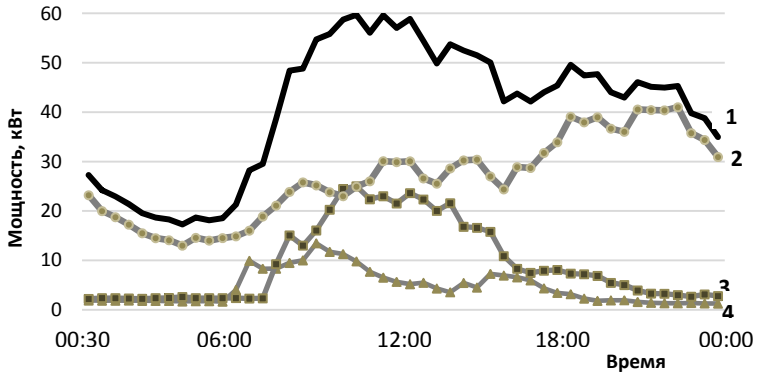


Рис. 5. Суточный график мощности потребителей

Для инвестора-застройщика главная выгода актуализации значений удельных электрических нагрузок заключается в снижении величины заявленной мощности и, следовательно, платы за технологическое присоединение.

В табл. 2 и на рис. 6 и приведено сравнение значений удельной электрической нагрузки по НТД и оценочным расчетам Ассоциации.

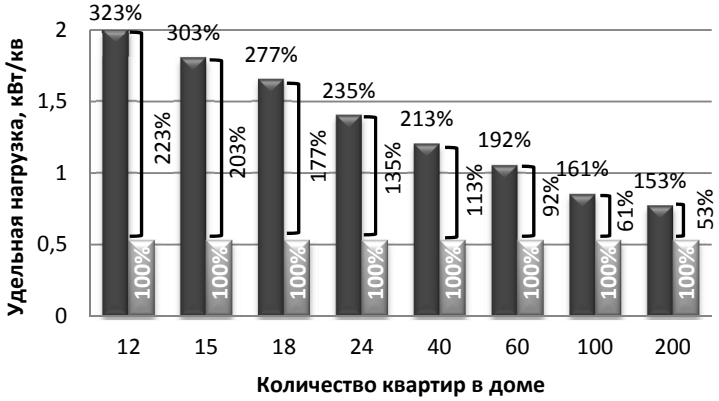
Таблица 2

Значения удельной электрической нагрузки в зависимости от количества квартир в МКД по типовым проектам, кВт/кв.

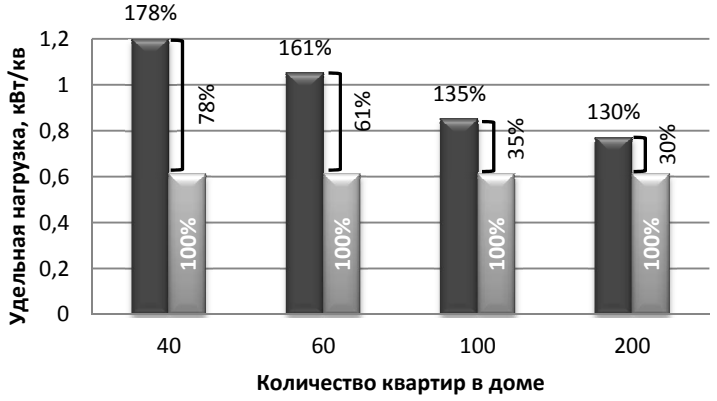
Группа МКД	Показатели	Количество квартир								
		12	15	18	24	40	60	100	200	400
1-я	Оценочные расчеты Ассоциации*	-	-	-	-	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53
	СП 256.1325800.2016 Расчетная электрическая нагрузка**	2	1,8	1,65	1,4	1,2	1,05	0,85	0,77	0,71
2-я	Оценочные расчеты Ассоциации*	-	-	-	-	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
	СП 256.1325800.2016 Расчетная электрическая нагрузка**	2	1,8	1,65	1,4	1,2	1,05	0,85	0,77	0,71
3-я	Оценочные расчеты Ассоциации*	-	-	-	-	-	0,81***	0,81	0,81	0,81
	СП 256.1325800.2016 Расчетная электрическая нагрузка**	3,2	2,8	2,6	2,2	1,95	1,7	1,5	1,36	1,27

Примечание. * – удельные нагрузки включают в себя лифтовую нагрузку, нагрузку ИТП и нагрузку освещения МОП; ** – удельные нагрузки не включают в себя лифтовую нагрузку, нагрузку ИТП и нагрузку освещения МОП (ОДН); *** – данный показатель рассчитан для количества квартир, равного 65.

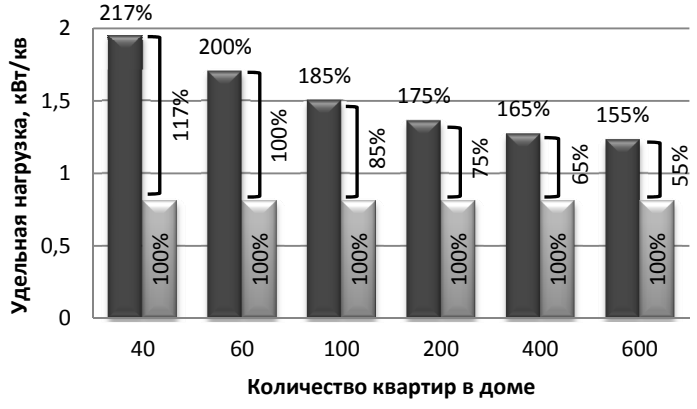
Для г. Казань специалистами Ассоциации были проанализированы несколько вариантов строительства жилого комплекса с использованием НТД и фактических значений, полученных экспериментальным путем, 8-й квартал жилого комплекса «Салават Купере», рис. 7.



а



б



в

Рис. 6. Сравнение значений удельной электрической нагрузки с СП 256.1325800.2016 (■) и расчетами Ассоциации (□): *а* – МКД 1-й группы; *б* – 2-й группы; *в* –3-й группы

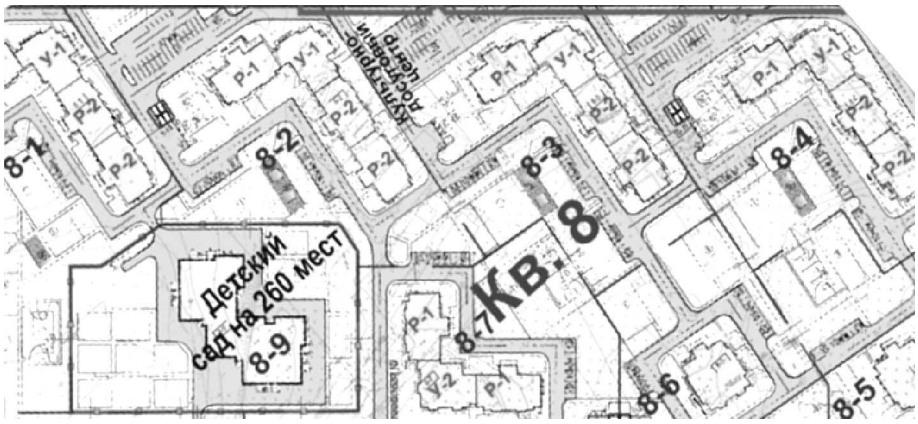


Рис. 7. Квартал 8-й жилого комплекса «Салават Купере»

Основные данные, используемые для расчета:

– жилые дома, обозначенные п. 8-1, п. 8-2, п. 8-3, п. 8-4 – 340 квартир в каждом доме, с лифтами и электроплитами;

– жилые дома (п. 8-5, п. 8-6) – 102 квартиры в каждом доме, с лифтами и электроплитами;

– жилой дом, обозначенный п. 8-7 – 255 квартир с лифтами и электроплитами;

– жилой дом, обозначенный п. 8-8 – 425 квартир с лифтами и электроплитами;

– детский сад, обозначенный п. 8-9 – 260 мест.

Результаты расчетов показали, что при расчете по СП 256.1325800.2016 заявленная мощность составит 3 019,27 кВт, а при расчете с использованием оценочных расчетов Ассоциации – 1 889,46 кВт, экономический эффект составит более 21 млн руб. Внедрение позволяет существенно снизить расходы на электроснабжение вводимых застроек. Ожидаемый экономический эффект в РТ составит порядка 1 млрд руб. в год при сохранении существующих темпов строительства.

Выводы. 1. Актуализация расчетных удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов принесет значительный экономический эффект.

2. Необходим пересмотр удельных электрических значений нагрузки для каждого региона в отдельности.

3. Выбор количества и мощности ТП с учетом фактических нагрузок обеспечит экономически выгодную эксплуатацию ТП.

Литература

1. *Надтока И.И., Павлов А.В.* Повышение точности расчета электрических нагрузок многоквартирных домов с электроплитами // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2015. № 2. С. 45–48.

2. *Надтока И.И., Павлов А.В.* Расчеты электрических нагрузок жилой части многоквартирных домов с электрическими плитами, основанные на средних нагрузках квартир // Известия вузов. Электромеханика. 2014. № 3. С. 36–39.

3. *Надтока И.И., Павлов А.В., Новиков С.И.* Проблемы расчета электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей микрорайонов мегаполисов // Известия вузов. Электромеханика. 2013. № 1. С. 136–139.

4. *Ополева Г.Н.* Электроснабжение промышленных предприятий и городов. М.: ИНФРА-М, 2017. 416 с.

5. *Beccali M., Cellura M., Lo Brano V., Marvuglia A.* Forecasting daily urban electric load profiles using artificial neural networks. *Journal on Energy Conversion and Management*, 2004, vol. 45, no. 18, pp. 2879–2900.

6. *Farhoodnea M., Mohamed A., Shareef H., Zayandehroodi H.* Power Quality Analysis of GridConnected Photovoltaic Systems in Distribution Networks. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2013, no. 2, pp. 208–213.

7. *Jardini J.A., Tahan C.M.V., Gouvea M.R., Ahn S.U., Figueiredo F.M.* Daily load profiles for residential, commercial and industrial low voltage consumers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, vol. 15, no. 1, pp. 375–380.

8. *José J., De G., Agüera-Pérez A., Palomares-Salas J.C., Sierra-Fernández J.M., Moreno-Muñoz A.* A novel virtual instrument for power quality surveillance based in higher-order statistics and case-based reasoning. *Mesurement*, 2012, vol. 45, pp. 1824–1835.

9. *Muscas C.* Power quality monitoring in modern electric distribution systems. *IEEE Instrum.Meas. Mag.*, 2010, vol. 13, no. 5, pp. 19–27.

10. *Soluyanov Y.I., Fedotov A.I., Ahmetshin A.R.* Calculation of electrical loads of residential and public buildings based on actual data. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, vol. 643, article no. 012051.

11. *Tatietse T.T., Villeneuve P., Ngundam J., Kenfack F.* Contribution to the analysis of urban residential electrical energy demand in developing countries. *Energy*, 2002, vol. 27, no. 6, pp. 591–606.

СОЛУЯНОВ ЮРИЙ ИВАНОВИЧ – доктор технических наук, профессор, президент ассоциации «Росэлектромонтаж», Россия, Москва (info@roselmon.ru).

ФЕДОТОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник инжинирингового центра «Компьютерное моделирование и инжиниринг в области энергетики и энергетического машиностроения», Казанский государственный энергетический университет, Россия, Казань (fed.ai@mail.ru).

СОЛУЯНОВ ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ – генеральный директор, АО «Татэлектромонтаж», Россия, Казань (info@tatem.ru).

АХМЕТШИН АЗАТ РИНАТОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры энергетического машиностроения, Казанский государственный энергетический университет, Россия, Казань (ahmetshin.ar@mail.ru).

Yu. SOLUYANOV, A. FEDOTOV, D. SOLUYANOV, A. AKHMETSHIN

ACTUALIZATION OF ELECTRICAL LOADS OF MULTI-APARTMENT RESIDENTIAL HOUSES

Key words: *power supply system, calculated electric load, specific energy consumption, daily power profiles.*

Design organizations, to calculate the power consumed by residential and public buildings, use the standard specific values of electrical loads, which have not been reviewed since the last century. The practice of building and operating urban power supply systems has shown that in most cases real loads are less than calculated ones. The study of electrical loads conducted by Roselectromontazh Association for 4 years in more than 5,200 apartment buildings with subsequent statistical processing showed that the actual electrical loads for the Republic of Tatarstan in the months of maximum power consumption are 1,5–2,5 times lower than those presented in the joint venture 256.1325800.2016 "Electrical installations of residential and public buildings. Design and installation rules". Recently constructed cable networks and transformer substations of 0,4/10 kV in fact turn out to be underloaded. Moreover, this underload is such that most of the transformers rarely operate at 30% of their capacity during hours of maximum power consumption. Calculation of electrical load is the basis for designing the power supply system of any capital construction facility. The cost of capital costs and the payment for technological connection depend on the magnitude of the electric load. The reason for the significant difference between the real and the calculated load is that over the past two decades, the power consumption of household appliances has changed significantly. Moreover,

the changes are in the direction of reducing electricity consumption. A modern household appliance, whether it be a refrigerator or a washing machine, is an appliance with a necessarily designated energy class. And the higher the class, the more competitive the device. Also, new requirements have been adopted for the energy efficiency of buildings, structures, constructions, leading to improved indicators of specific consumption of heat and electricity.

References

1. Nadtoka I.I., Pavlov A.V. *Povyshenie tochnosti rascheta elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh domov s elektroplitami* [Improving the accuracy of calculating the electrical loads of apartment buildings with electric stoves]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tekhniche-skie nauki* [University News. North Caucasus region. Technical science], 2015, no. 2, pp. 45–48.

2. Nadtoka I.I., Pavlov A.V. *Raschety elektricheskikh nagruzok zhiloi chasti mnogokvartirnykh domov s elektricheskimi plitami, osnovannye na srednikh nagruzkakh kvartir* [Calculations of the electrical loads of the residential part of apartment buildings with electric stoves, based on the average loads of apartments]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [University News. Electromechanics], 2014, no. 3, pp. 36–39.

3. Nadtoka I.I., Pavlov A.V., Novikov S.I. *Problemy rascheta elektricheskikh nagruzok kommunal'no-bytovykh potrebitelei mikroraionov megapolisov* [Problems of calculating the electrical loads of household consumers of microdistricts of megacities]. *Izvestiya vuzov. Elektrome-khanika* [University News. Electromechanics], 2013, no. 1, pp. 136–139.

4. Opoleva G.N. *Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriyatii i gorodov* [Power supply of industrial enterprises and cities]. Moscow, INFRA-M Publ., 2017, 416 p.

5. Beccali M., Cellura M., Lo Brano V., Marvuglia A. Forecasting daily urban electric load profiles using artificial neural networks. *Journal on Energy Conversion and Management*, 2004, vol. 45, no. 18, pp. 2879–2900.

6. Farhoodnea M., Mohamed A., Shareef H., Zayandehroodi H. Power Quality Analysis of GridConnected Photovoltaic Systems in Distribution Networks. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2013, no. 2, pp. 208–213.

7. Jardini J.A., Tahan C.M.V., Gouvea M.R., Ahn S.U., Figueiredo F.M. Daily load profiles for residential, commercial and industrial low voltage consumers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, vol. 15, no. 1, pp. 375–380.

8. José J., De G., Agüera-Pérez A., Palomares-Salas J.C., Sierra-Fernández J.M., Moreno-Muñoz A. A novel virtual instrument for power quality surveillance based in higher-order statistics and case-based reasoning. *Mesurement*, 2012, vol. 45, pp. 1824–1835.

9. Muscas C. Power quality monitoring in modern electric distribution systems. *IEEE Instrum.Meas. Mag.*, 2010, vol. 13, no. 5, pp. 19–27.

10. Soluyanov Y.I., Fedotov A.I., Ahmetshin A.R. Calculation of electrical loads of residential and public buildings based on actual data. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, vol. 643, article no. 012051.

11. Tatietse T.T., Villeneuve P., Ngundam J., Kenfack F. Contribution to the analysis of urban residential electrical energy demand in developing countries. *Energy*, 2002, vol. 27, no. 6, pp. 591–606.

SOLUYANOV YURI – Doctor of Technical Sciences, Professor, President, Association «Roselectromontazh», Russia, Moscow (info@roselmon.ru).

FEDOTOV ALEXANDER – Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher of the Engineering Center «Computer Modeling and Engineering in the Field of Power Engineering and Power Engineering», Kazan State Power Engineering University, Russia, Kazan (fed.ai@mail.ru).

SOLUYANOV DMITRY – General Director, JSC «Tatelectromontazh», Russia, Kazan (info@tatem.ru).

AKHMETSHIN AZAT – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Engineering, Kazan State Energy University, Kazan, Russia (ahmetshin.ar@mail.ru).

Формат цитирования: *Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Солуянов Д.Ю., Ахметшин А.Р.* Актуализация электрических нагрузок многоквартирных жилых домов // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 180–189.

УДК 629.423.1
ББК 31.27-05

Е.А. ТРЕТЬЯКОВ, Н.Н. МАЛЫШЕВА

УПРАВЛЕНИЕ СПРОСОМ АКТИВНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Ключевые слова: *активные потребители, распределительные электрические сети, график нагрузки, оптимизация, управление спросом.*

Представлены подходы к управлению спросом активных потребителей путем формирования заданного графика потребления мощности в требуемый период времени на основе решения оптимизационной задачи в виде максимизации мощности подключенных управляемых электроприемников различных типов. Обоснована модель управления спросом со стороны активных потребителей с учетом чувствительности нагрузки по присоединению трансформаторной подстанции к изменению нагрузки потребителя, приоритета нагрузки, согласованных уровней сокращения нагрузки с гибким регулированием производительности и мощности и допустимым набором электроприемников в соответствии с технологическим процессом, сетевым графиком работ, прочими логическими условиями.

Разработан алгоритм ограничения мощности со стороны активных потребителей на основе широкого использования цифровых технологий обработки данных, современных технических средств измерений, управления и коммутации конечных потребителей в реальном времени (advanced metering infrastructure – AMI). Разработан метод управления спросом со стороны активных потребителей в нормальном режиме распределительных электрических сетей путем управления ограничением включения (отключения) и плавным изменением мощности контролируемых электроприемников в реальном времени.

Представленные результаты исследований свидетельствуют об обоснованности метода управления спросом активных потребителей в нормальном режиме распределительных электрических сетей и возможности его практической реализации на промышленном предприятии с привязкой к технологическому процессу.

Введение. Многие авторы рассматривают управление спросом активных потребителей исходя из экономических интересов генерации, распределения и потребления электроэнергии, развивая различные рыночные модели их взаимодействия [1, 4]. В Российской Федерации в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 20.07.2016 г. № 699 «О внесении изменений в Правила оптового рынка электрической энергии и мощности»[1] развивается ценозависимое снижение потребления электроэнергии и мощности крупными потребителями оптового рынка, а также потребителями розничного рынка электроэнергии с участием организаций-агрегаторов.

Для обеспечения совокупного объема ценозависимого снижения потребления мощности промышленные и другие сопоставимые предприятия должны иметь соответствующие подходы к гибкому изменению технологических процессов без ущерба для своей деятельности.

[1] О внесении изменений в Правила оптового рынка электрической энергии и мощности: Постановлением Правительства РФ от 20.07.2016 г. № 699 [Электронный ресурс]. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/regulations/reg699-200716.pdf.

В ряде работ предлагается универсальная модель управления спросом активных потребителей на основе агрегативного моделирования возможной и предельной длительности отключения для всех наборов присоединений на время начала отключения [6, 7]. При этом отключение присоединений потребителей рассматривается с вероятностной точки зрения в виде дискретных случайных величин. Практическая реализация указанного подхода представляется несколько затруднительной в реальном времени.

В перспективе методы вероятностного управления активными потребителями будут вытесняться подходами на основе полной наблюдаемости и управляемости в реальном времени в рамках концепций промышленного интернета вещей и энергии [10]. В этом случае присоединения таких потребителей к электрическим сетям должны быть полностью управляемыми с помощью коммутационных аппаратов и (или) регулируемых устройств сопряжения и оборудованы автоматизированной системой учета электроэнергии, мощности и прочим, а взаимодействие между активными потребителями и участниками рынка электроэнергии целесообразно выполнять в единой аппаратно-программной среде.

Производственные и технологические процессы активных потребителей также должны контролироваться (управляться) автоматизированной системой. Цифровизация производственных и технологических процессов предприятий и организаций является основой для получения необходимой информации о ретроспективных, текущих и прогнозных данных со всех электроприемников и их взаимосвязи как для повышения эффективности производственного процесса, так и для целей управления активными потребителями в реальном времени.

Данное исследование связано с разработкой возможных подходов к управлению спросом со стороны активных потребителей в распределительных электрических сетях.

Теоретическая часть. Для активного потребителя основной задачей является изменение потребляемой мощности по присоединениям на некоторую величину или в требуемых пределах с какого-то момента времени на заданную продолжительность без негативных последствий и тем более ущерба для себя. При этом очевидно, что основным мотивом активного потребителя участвовать в балансировке мощности электроэнергетической системы является материальная выгода в виде скидки к тарифу за потребленную электроэнергию или мощность, а также возможные другие выгодные условия от гарантирующего поставщика электроэнергии, например, увеличение договорной мощности, исключение ограничений потребления с учетом категорийности и прочее.

Все электроприемники потребителя с точки зрения возможного изменения потребляемой мощности можно условно разделить на группы:

- неотключаемые (в нормальном и аварийном режимах);
- неотключаемые (в нормальном режиме);
- отключаемые;

– с возможностью уменьшения потребляемой активной мощности в пределах $\Delta P_{\min} - \Delta P_{\max}$ (в нормальном режиме);

– с возможностью уменьшения потребляемой активной мощности в пределах $\Delta P'_{\min} - \Delta P'_{\max}$ (в аварийном режиме).

В ряде случаев управление частью нагрузок может быть передано системному оператору (агрегатору).

Задача формирования оптимального графика потребления электроэнергии бытовых и промышленных потребителей во многих работах рассматривается буквально, т.е. как сумма отдельных нагрузок с учетом продолжительности включения по условию минимума затрат на электропотребление [3]. В этом случае, не учитывается взаимосвязь электроприемников по функциональному признаку, что соответствует бытовым потребителям. В работах [2, 5, 9, 15, 17, 19] представлена модель активного потребителя по минимуму затрат на электропотребление на основе задания планируемых графиков нагрузки со своими коэффициентами выгодности и учета изменения стоимости электроэнергии в течение расчетного периода при наличии собственной генерации. Многие работы также связаны с определением оптимального графика электропотребления по минимуму затрат для MicroGrid [12, 14, 18], для группы разнородных потребителей в целом [11], а также по минимуму коэффициента формы графика нагрузки [16].

Для управления спросом активных потребителей электроэнергетических систем для балансирования мощности в нормальном и аварийном режимах необходимо руководствоваться не только возможными стоимостными механизмами стимулирования снижения спроса на электроэнергию, которые имеют вероятностный характер, но и договорными обязательствами системного оператора (агрегатора) и потребителя.

В нормальном режиме работы электроэнергетических систем планирование потребления мощности потребителем в пиковые часы осуществляется заблаговременно и может быть снижено, например, за счет:

– пересмотра и изменения сетевого графика технологических и производственных процессов;

– пересмотра и осуществления сдвига по времени работы электроприемников с переменной нагрузкой, зависящей от объема выполняемых работ;

– изменения режимов работы электроприемников с гибким регулированием производительности и мощности на период прохождения пиков нагрузки (электротермического, холодильного, насосного, вентиляционного оборудования и т.п.);

– ввода в работу генерирующих мощностей и (или) систем накопления электроэнергии и др.

В данном исследовании рассматриваются возможные подходы к ограничению мощности активного промышленного потребителя до заданного значения для реализации договорных отношений с системным оператором (агрегатором) без учета собственной генерации и изменения стоимости электроэнергии по времени.

Электроприемники (ЭП) различных групп технологических процессов, установок и административных зданий территориально распределены между различными источниками питания и не могут управляться по одному присоединению, фидеру, линии, КТП и ТП. На рис. 1 представлена типовая принципиальная электрическая схема электроснабжения потребителей промышленного предприятия.

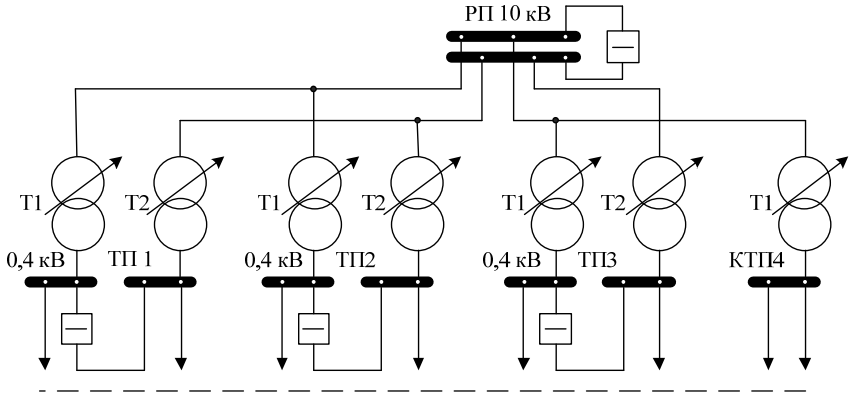


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема электроснабжения потребителей

Предлагаемый алгоритм ограничения мощности со стороны активных потребителей (рис. 2) может быть реализован в аппаратно-программном комплексе на основе широкого использования цифровых технологий обработки данных и современных технических средств измерений, управления и коммутации в распределительных электрических сетях. В частности, все присоединения с крупными электроприемниками и технологическими установками, участвующими в отключении/снижении активной мощности, должны быть оборудованы электроизмерительными устройствами и управляемыми коммутационными аппаратами. Технологические установки с гибким регулированием производительности и мощности (электротермическое, холодильное, насосное, вентиляционное оборудование и т.п.) должны иметь каналы связи с аппаратно-программным комплексом.

В качестве исходных данных для управления ограничением мощности выступают измеренные сигналы мощности, включения/отключения, технологических параметров с электроприемников и база данных, описывающая допустимые режимы, ограничения, технологические связи электрооборудования и прочее.

Связи различных электроприемников целесообразно описывать матрицей или списками смежности на основе теории графов [13]:

– списками смежности для описания связей электроприемников, входящих в технологическую операцию, процесс или электроустановку;

– списками смежности для описания электрических связей электроприемников с питающими центрами;

– списками смежности для описания связей между технологическими операциями, процессами или электроустановками.

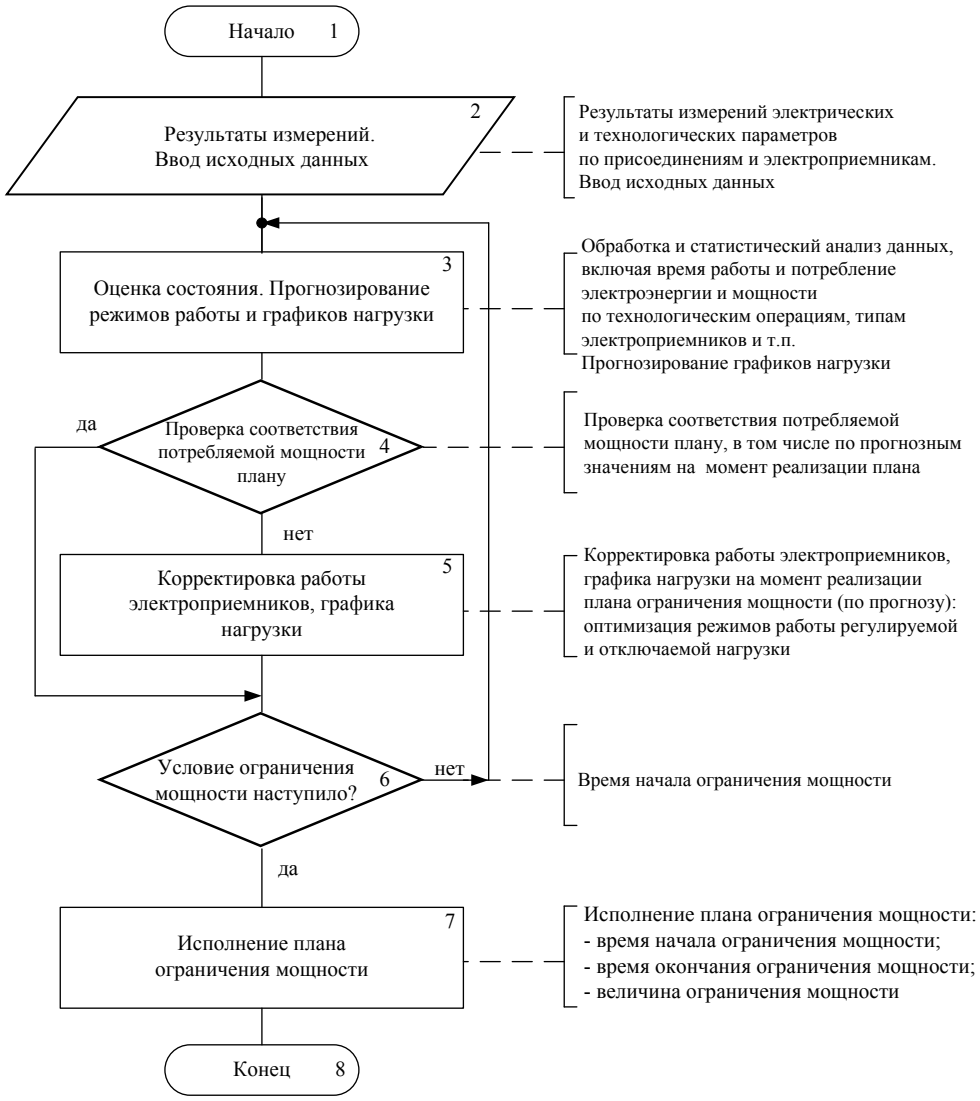


Рис. 2. Алгоритм ограничения мощности со стороны активных потребителей

Аналогично формируются списки смежности для описания электрических связей электроприемников с центрами питания, а также между технологическими операциями, процессами или электроустановками.

На основе выстроенной структуры электроприемников (по спискам смежности) с указанием электрических, технологических и прочих связей выполняется статистический анализ данных в реальном времени (с частотой дискретизации несколько раз в секунду), включая время работы (реальный сетевой график технологических процессов), потребление электроэнергии и мощности по технологическим операциям, типам электроприемников, направлениям использования, присоединениям и т.п.

На следующем этапе алгоритма (блок 4, рис. 2) до момента ограничения мощности выполняется проверка соответствия прогнозируемой потребляемой мощности плану. В качестве плана, полученного заблаговременно от системного оператора (агрегатора), рассматривается суммарный график нагрузки, отвечающий заданным ограничениям по потреблению мощности:

$$P \cdot k \le P_{op}, \quad P_{op} = f(t), \quad t \in (t_1 - t_2), \tag{1}$$

P – суммарная прогнозируемая потребляемая мощность в момент времени t; k – коэффициент запаса; P_{op} – опорный план, соответствующий заданным ограничениям мощности в период времени $t_1 - t_2$.

Прогнозирование графика нагрузки на сутки вперед осуществляется с частотой дискретизации, соответствующей периодичности получения данных с информационно-измерительных систем (несколько раз в секунду). По мере приближения к периоду времени с заданным ограничением мощности точность прогноза возрастает. Коэффициент запаса учитывает случайность характера нагрузки, не участвующей в управлении спросом, а также погрешность методов прогнозирования и управления электропотреблением.

В случае невыполнения условия (1) осуществляется автоматическая корректировка работы электроприемников, графика нагрузки на момент реализации плана ограничения и мощности (по прогнозу): оптимизация режимов работы регулируемой и отключаемой нагрузки (блок 5, рис. 2).

График нагрузки активной мощности для рассматриваемых целей можно представить в виде суммы контролируемых (управляемых) индивидуальных графиков, оборудованных индивидуальной системой учета и коммутации, и неконтролируемых (случайных стационарных):

$$P = \sum_{i=1}^{n} p_{1i} + \sum_{i=1}^{n} p_{2i} + .. + \sum_{i=1}^{n} p_{mi} + m_p + \Phi(\beta)\sigma_p, \tag{2}$$

где $\sum_{i=1}^{n} p_{1i}$ – контролируемые электроприемники технологического процесса, операции; $\sum_{i=1}^{n} p_{2i}$ – контролируемые электроприемники с гибким регулированием производительности и мощности; $\sum_{i=1}^{n} p_{mi}$ – контролируемые условно-постоянные электроприемники, в том числе неотключаемые; m_p – математическое ожидание неконтролируемых случайных стационарных процессов изменения нагрузки; $\Phi(\beta)$ – функция, обратная интегралу вероятности β закона распределения (например, для нормального закона распределения $\Phi(0{,}95) = 1{,}64$); σ_p – среднеквадратическое отклонение мощности неконтролируемой нагрузки.

Статистические характеристики неконтролируемых графиков нагрузки активной мощности были рассчитаны на основании обработки ретроспективных и прогнозных данных, полученных путем вычитания из общего графика нагрузки по присоединению контролируемых графиков нагрузки отдельных электроприемников по сведениям измерительных систем.

Целевую функцию спроса для присоединения ТП с активными (управляемыми) потребителями при заданных ограничениях мощности системным оператором (агрегатором) в период времени $t \in (t_1 - t_2)$ можно записать в виде максимизации мощности подключенных активных потребителей: отключаемых и с гибким регулированием производительности и мощности в момент времени t:

$$F = \sum_{i=1}^{n} p_{1i} \cdot \nu_i \cdot \Delta\omega_i \cdot x_i + \sum_{k=1}^{m} p_{2k} \cdot \nu_k \cdot \Delta\omega_k \cdot y_k \to \max,$$
$$x_i = (0, 1), \qquad (3)$$
$$y_{k\min}, y_{k\max} \in [0; 1]$$

при ограничениях:

$$P^t \cdot k_t \le P^t_{op}, \quad t \in (t_1 - t_2),$$
$$\sum_{i=1}^{n} x_i = a, \; y_{k\min} \le y_k < y_{r\max},$$
$$\Delta P_{k\min} \le p_{2k} \cdot y_k \le y_{k\max},$$
$$p_{1i}, \; x_i \in B; G,$$

где v_i, v_k − приоритет нагрузки, определяется путем ранжирования потребителей по важности нагрузки (в диапазоне 0 − 1); $\Delta\omega_i$, $\Delta\omega_k$, − чувствительность нагрузки по присоединению ТП к изменению нагрузки потребителя (в диапазоне 0 − 1); x_i − двоичная переменная (0 или 1); y_k − непрерывная переменная − коэффициент изменения мощности нагрузки от минимальной до максимальной (в диапазоне 0 − 1); a – целое число, определяющее статус отключаемых электроприемников; n, m − количество электроприемников с возможностью их отключения и с гибким регулированием мощности, соответственно; $\Delta P_{k\min}$, $\Delta P_{k\max}$ − согласованные уровни сокращения нагрузки с гибким регулированием производительности и мощности; B – допустимый набор электроприемников в соответствии технологическим процессом, сетевым графиком работ, прочих логических условий, соответствующий спискам смежности; G – список смежности, описывающий связи электроприемников, входящих в технологическую операцию, процесс или электроустановку.

По итогам решения задачи смешанного целочисленного программирования (3) определяется подходящий набор электроприемников из допустимых, а также величина сокращения мощности электроприемников с гибким регулированием производительности с учетом заданных ограничений для обеспечения соответствия суммарного графика нагрузки по присоединению заданному значению.

Практическая часть. Рассмотрим реализацию представленных подходов к управлению спросом со стороны активного потребителя путем формирования заданного графика потребления мощности в требуемый период времени на примере электровозоремонтного завода. На рис. 3 представлены связи контролируемых (активных) электроприемников, входящих в технологическую операцию, процесс или электроустановку (на примере одного цеха).

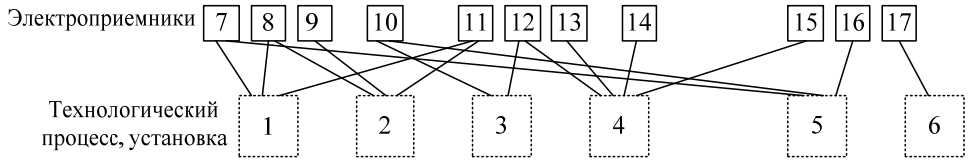


Рис. 3. Связи электроприемников, входящих в технологическую операцию, процесс или электроустановку (направление использования)

Список смежности G для описания связей электроприемников, входящих в технологическую операцию, процесс или электроустановку имеет вид (например, для рис. 3)

$$G = \begin{array}{llll} 1\rightarrow & 7\rightarrow & 8\rightarrow & 11; \\ 2\rightarrow & 8\rightarrow & 9\rightarrow & 11; \\ 3\rightarrow & 10\rightarrow & 12; & \\ 4\rightarrow & 12\rightarrow & 13\rightarrow & 14; \\ 5\rightarrow & 7\rightarrow & 10\rightarrow & 16; \\ 6\rightarrow & 17; & & \end{array} \quad \begin{array}{lll} 7\rightarrow & 1\rightarrow & 5; \\ 8\rightarrow & 1\rightarrow & 2; \\ 9\rightarrow & 2; & \\ 10\rightarrow & 3\rightarrow & 5; \\ 11\rightarrow & 1\rightarrow & 2; \\ 12\rightarrow & 3\rightarrow & 4; \end{array} \quad \begin{array}{ll} 13\rightarrow & 4; \\ 14\rightarrow & 4; \\ 15\rightarrow & 4; \\ 16\rightarrow & 5; \\ 17\rightarrow & 6. \end{array}$$

Автоматизированная система управления спросом выполняет обработку и статистический анализ измеренных и введенных данных в реальном времени. Измерение электрических и прочих контролируемых параметров электроприемников позволяет иметь обширные сведения о ходе технологического процесса, его соответствия сетевому графику, включая время работы и потребление электроэнергии и мощности по технологическим операциям, типам электроприемников и т.п.

На рис. 4 представлена структура потребления мощности по технологическим операциям и группам электроприемников в определенный момент времени по электромашинному цеху. Группы электроприемников 1–5, 8, 9 являются контролируемыми и управляемыми, среди которых 3, 4 – с гибким регулированием производительности и мощности.

На основе современных интеллектуальных методов прогнозирования выполняется формирование графика нагрузки в пределах предстоящих суток, когда задано ограничение мощности активных потребителей, для оценки его соответствия планируемой потребляемой мощности. При этом учитываются ретроспективные данные по графикам нагрузки, указанные списки смежности, сетевой график выполнения технологических операций, температура окружающего воздуха, производственные блокировки, ограничения, логические условия и прочие данные, обеспечивающие повышение точности прогнозирования.

Решение оптимизационной задачи смешанного целочисленного программирования (10) выполнялось методом ветвей и границ программными средствами для каждого учитываемого момента времени с учетом данных, представленных в таблице.

Результатом решения задачи (3) являются множества $x_i = \{x_1, x_2, x_3, .., x_n\}$, $x_i = (0, 1)$ и $y_k = \{y_1, y_2, y_3, .., y_m\}$, $y_k \in [0; 1]$, в соответствии с которыми осуществляется управление контролируемыми электроприемниками, в том числе за счет сдвига технологических операций по времени.

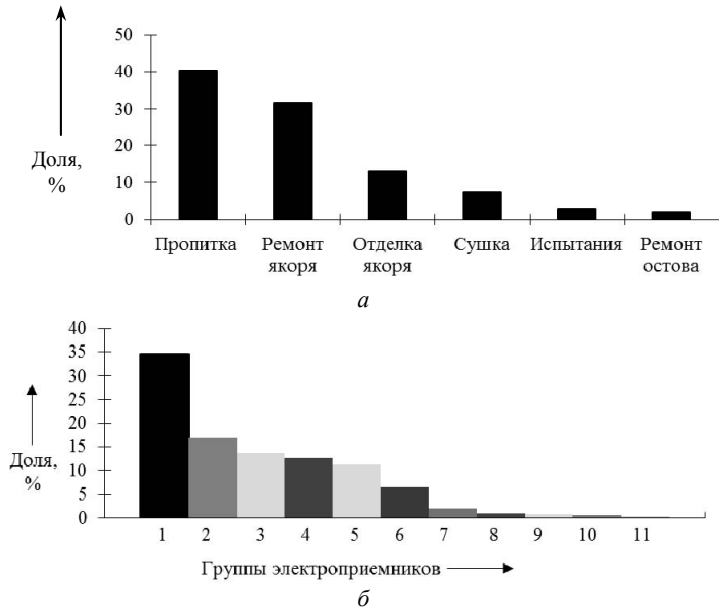


Рис. 4. Структура потребления мощности по технологическим операциям (*а*) и группам электроприемников (*б*): 1 – электропечи, калориферы; 2 – электропривод, станки; 3 – холодильное оборудование, вентиляция; 4 – компрессоры, насосы; 5 – моечные машины; 6 – освещение; 7 – бытовая и оргтехника; 8 – сварочное оборудование; 9 – грузоподъемные механизмы; 10 – прочее; 11 – стенды

Основные данные

Показатель	Значение для электроприемников										
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**….**	**307**
v_i	1	–	0,3	0,95	1	0,6	0,7	–	–	….	0,8
v_k	–	0,9	–	–	–	–	–	0,8	–	….	–
$\Delta\omega_i$	0,99	–	0,99	0,97	0,98	0,95	0,97		–	….	0,99
$\Delta\omega_k$	–	0,95	–	–	–	–	–	0,99	–	….	–
$\Delta P_{k\,\min}$, кВт	–	4	–	–	–	–	–	5	–	….	–
$\Delta P_{k\,\max}$, кВт	–	10	–	–	–	–	–	25	–	….	–
p_{1i}, кВт	34		7	34	56	14	8		–	….	18
P_{2i}, кВт	–	12	–	–	–	–	–	25	–	….	–
m_p / σ_p, кВт	–	–	–	–	–	–	–	–	12/3	….	–

На рис. 5 представлены графики нагрузок групп электроприемников и суммарный, полученные на основе решения оптимизационной задачи управления спросом активного потребителя (для периода времени с ограничением мощности).

Здесь $\Delta P_1 = \sum_{i=1}^{n} p_{1i} x_i$, $\Delta P_2 = \sum_{k=1}^{m} p_{2k} y_k$ – расчетное снижение активной мощности отключаемых электроприемников и с гибким регулированием производительности в указанный момент времени соответственно. Ограничение мощности принималось P_{op} = 460 кВт, коэффициент запаса k = 1,1. Выборка графика нагрузки представлена по 170 точкам во времени с 08:00 до 18:00.

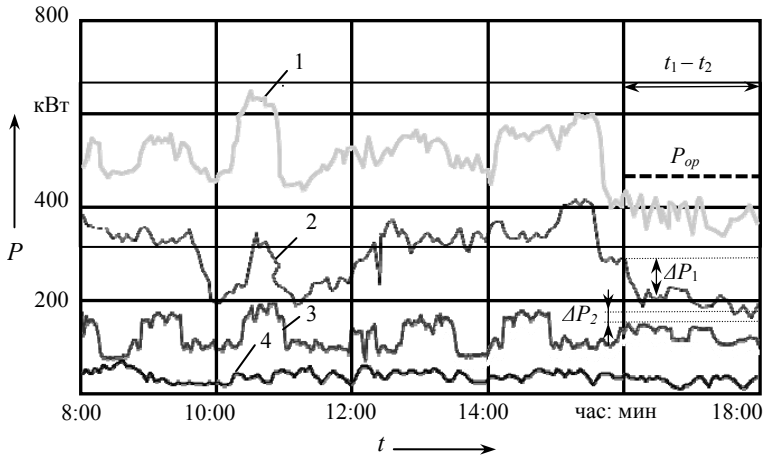


Рис. 5. Графики активной мощности:
1 – суммарный с учетом ограничения мощности; 2 – отключаемых электроприемников;
3 – электроприемников с гибким регулированием мощности;
4 – неконтролируемых и (или) неотключаемых электроприемников

Указанные графики нагрузок являются расчетными, в том числе на основе измеренных параметров мощности отдельных электроприемников, группируемых по заданным условиям, и неконтролируемых (случайных стационарных) в соответствии с выражением (2). Нестационарные случайные включения нагрузок можно учитывать корректировкой величины коэффициента запаса.

Для ограничения мощности сетевой график был сдвинут по времени в пределах допустимых ограничений, заданных исходных логических условий.

Заключение. На основе представленного алгоритма разработан метод управления спросом со стороны активных потребителей в нормальном режиме интеллектуальных электроэнергетических систем, отличительными признаками которого являются:

– анализ данных электропотребления и режимов работы осуществляется на основе применения современных технических средств измерений, управления и коммутации электроприемников (advanced metering infrastructure – AMI);

– оптимальный график нагрузки формируется не на основе прогнозируемых наборов комбинаций мощности электроприемников, а путем управления ограничением включения (отключением) и плавным изменением мощности контролируемых электроприемников в реальном времени;

– в модели потребления мощности нагрузка разделяется на контролируемую (отключаемую и с гибким регулированием мощности) и неконтролируемую, в том числе случайную.

Представленные результаты реализации рассматриваемого подхода к управлению спросом со стороны активного потребителя на примере одного цеха завода позволяют говорить о возможности решения подобной задачи программными средствами в целом по крупному предприятию с привязкой к технологическому процессу по нескольким присоединениям к электроэнергетической системе.

При необходимости представленное выражение (3) можно перевести в минимизацию затрат на электропотребление путем включения сомножителя со стоимостью электроэнергии в каждый момент времени и (или) дополнить собственную генерацию (накопление) мощности с переменной стоимостью, что является предметом дальнейших исследований авторов.

В данной работе была сделана попытка на основе развития перспективных технических средств измерений, управления и коммутации конечных потребителей связать потребляемую мощность различных типов электроприемников с ограничениями инфраструктуры в конкретные моменты (периоды) времени.

Литература

1. *Бушуев В.В., Кучеров Ю.Н.* Инновационное развитие электроэнергетики как важнейший приоритет стратегического развития России // Электро. 2016. № 1. С. 45–52.

2. *Воденников Д.А.* Взаимодействие электроснабжающей организации и активного потребителя при управлении электропотреблением // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2019. № 8. С. 77–83.

3. *Волкова И.О., Губко М.В., Сальникова Е.А.* Активный потребитель: задача оптимизации потребления электроэнергии и собственной генерации // Проблемы управления. 2013. № 6. С. 53–61.

4. *Волкова И.О., Сальникова Е.А., Шувалова Д.Г.* Активный потребитель в интеллектуальной энергетике // Академия энергетики. 2011. № 2(40). С. 50–57.

5. *Гальперова Е.В., Гальперов В.И.* Моделирование поведения активного потребителя на основе агентного подхода // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. № 4(8). С. 28–38.

6. *Куликов А.Л., Шарыгин М.В.* Использование внутренних производственных резервов потребителей для ликвидации дефицитов электрической мощности // Электрические станции. 2017. № 4. С. 36–43.

7. *Куликов А.Л., Шарыгин М.В.* К вопросу о мотивации аварийно-активных промышленных потребителей электроэнергии к управлению своей нагрузкой // Промышленная энергетика. 2017. № 11. С. 2–10.

8. *Кучеров Ю.Н., Иванов А.В., Корев Д.А., Уткин Н.А., Жук А.З.* Развитие технологий активного потребителя и их интеграция в электрическую сеть общего пользования // Энергетическая политика. 2018. № 5. С. 73–86.

9. *Роженцова Н.В. Регир О.С., Коцюбинский А.В.* Многоагентный подход к моделированию активных потребителей // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11, № 2(42). С. 47–55.

10. *Старченко А.Г., Дзюбенко В.В., Ряпин И. Ю.* Интернет энергии: будущее электроэнергетики уже наступило // Энергетическая политика. 2018. № 5. С. 17–24.

11. *Стенников В.А. Барахтенко Е.А., Соколов Д.В., Шелехова В.Б.* Активное участие потребителя в управлении своим энергоснабжением // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 11-12. С. 88–100.

12. *Benysek G.* et al. Decentralized Active Demand Response (DADR) system for improvement of frequency stability in distribution network. *Electric Power Systems Research*, 2016, vol. 134, pp. 80–87.

13. *Diestel R.* Graph Theory. Springer, 2005, 410 p.

14. *Furukakoi M. et al.* Multi-objective optimal operation with demand management and voltage stability. In: Proc. 2017 17th Int. Conf. on Control, Automation and Systems (ICCAS), IEEE, 2017, pp. 383–388.

15. *Jhala K., Natarajan B., Pahwa A.* Prospect theory-based active consumer behavior under variable electricity pricing. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, vol. 10, pp. 2809–2819.

16. *Jordehi A.R.* Optimisation of demand response in electric power systems, a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 103, pp. 308–319.

17. *Lee S.J. et al.* Supply and demand management system based on consumption pattern analysis and tariff for cost minimization. In: Proc. 2016 18th Int. Conf. on Advanced Communication Technology (ICACT), IEEE, 2016, pp. 652–658.

18. *Lin C.M., Chen M.T.* Design and implementation of a smart home energy saving system with active loading feature identification and power management. In: Proc. 2017 IEEE 3rd Int. Future Energy Electronics Conf. and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia), IEEE, 2017, pp. 739–742.

19. *Ordehi A. R.* Optimisation of demand response in electric power systems, a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2019, vol. 103, pp. 308–319.

ТРЕТЬЯКОВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения, Россия, Омск (eugentr@mail.ru).

МАЛЫШЕВА НАДЕЖДА НИКОЛАЕВНА – кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики, Нижневартовский государственный университет, Россия, Нижневартовск (malyshevann@list.ru).

E. TRETYAKOV, N. MALYSHEVA

MANAGING THE DEMAND OF ACTIVE CONSUMERS IN DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS

Key words: *active consumers, distribution electric networks, load schedule, optimization, demand management.*

The paper presents the approaches to managing the demand of active consumers by forming a given schedule of power consumption in the required period of time based on the solution of the optimization problem in the form of maximizing the power of connected controlled electric receivers of various types. It justifies the model of demand management by active consumers, taking into account the sensitivity of the load on connecting the transformer substation to the change in the consumer load, the priority of the load, the agreed levels of load reduction with flexible regulation of productivity and power and an acceptable set of power consumers in accordance with the technological process, network schedule, and other logical conditions.

An algorithm has been developed to limit the power on the part of active consumers based on the widespread use of digital data processing technologies, modern technical measuring instruments, control and switching of end consumers in real time (advanced metering infrastructure – AMI). A method has been developed for demand management by active consumers in the normal mode of distribution electric networks by controlling the on / off limitation and the smooth change in the power of monitored power receivers in real time.

The presented research results indicate the validity of the method of managing the demand of active consumers in the normal mode of distribution electric networks and the possibility of its practical implementation in an industrial enterprise with reference to the technological process.

References

1. Bushuev V.V., Kucherov Yu.N. *Innovatsionnoe razvitie elektroenergetiki kak vazhneishii prioritet strategicheskogo razvitiya Rossii* [Innovative development of the electric power industry as the most important priority of the strategic development of Russia]. *Elektro* [Electro], 2016, no. 1, pp. 45–52.

2. Vodennikov D.A. *Vzaimodeistvie elektrosnabzhayushchei organizatsii i aktivnogo potrebitelya pri upravlenii elektropotrebleniem* [The interaction of the power supply organization and the active consumer in the management of power consumption]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: operation and repair], 2019, no. 8, pp. 77–83.

3. Volkova I.O., Gubko M.V., Sal'nikova E.A. *Aktivnyi potrebitel': zadacha optimizatsii potrebleniya elektroenergii i sobstvennoi generatsii* [Active consumer: the task of optimizing electricity consumption and own generation]. *Problemy upravleniya* [Management issues], 2013, no. 6, pp. 53–61.

4. Volkova I.O., Sal'nikova E.A., Shuvalova D.G. *Aktivnyi potrebitel' v intellektual'noi energetike* [Active consumer in smart energy]. *Akademiya energetiki*, 2011, no. 2(40), pp. 50–57.

5. Gal'perova E.V., Gal'perov V.I. *Modelirovanie povedeniya aktivnogo potrebitelya na osnove agentnogo podkhoda* [Modeling the behavior of an active consumer based on an agent approach]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii*, 2017, no. 4 (8), pp. 28–38.

6. Kulikov A.L., Sharygin M.V. *Ispol'zovanie vnutrennikh proizvodstvennykh rezervov potrebitelei dlya likvidatsii defitsitov elektricheskoi moshchnosti* [Using domestic production reserves of consumers to eliminate shortages of electric capacity]. *Elektricheskie stantsii*, 2017, no. 4, pp. 36–43.

7. Kulikov A.L., Sharygin M.V. *K voprosu o motivatsii avariino-aktivnykh promyshlennykh potrebitelei elektroenergii k upravleniyu svoei nagruzkoi* [On the issue of motivation of emergency-active industrial electricity consumers to manage their load]. *Promyshlennaya energetika*, 2017, no. 11, pp. 2–10.

8. Kucherov Yu.N., Ivanov A.V., Korev D.A., Utkin N.A., Zhuk A.Z. *Razvitie tekhnologii aktivnogo potrebitelya i ikh integratsiya v elektricheskuyu set' obshchego pol'zovaniya* [The development of active consumer technologies and their integration into the public electricity network]. *Energeticheskaya politika*, 2018, no. 5, pp. 73–86.

9. Rozhentsova N.V. Regir O.S., Kotsyubinskii A.V. *Mnogoagentnyi podkhod k modelirovaniyu aktivnykh potrebitelei* [Multi-agent approach to modeling active consumers]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2019, vol. 11, no. 2 (42), pp. 47–55.

10. Starchenko A.G., Dzyubenko V.V., Ryapin I. Yu. *Internet energii: budushchee elektroenergetiki uzhe nastupilo* [Internet energy: the future of electricity has come]. *Energeticheskaya politika*, 2018, no. 5, pp. 17–24.

11. Stennikov V.A. Barakhtenko E.A., Sokolov D.V., Shelekhova V.B. *Aktivnoe uchastie potrebitelya v upravlenii svoim energosnabzheniem* [Active consumer participation in managing their energy supply]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2017, vol. 19, no. 11–12, pp. 88–100.

12. Benysek G. et al. Decentralized Active Demand Response (DADR) system for improvement of frequency stability in distribution network. *Electric Power Systems Research*, 2016, vol. 134, pp. 80–87.

13. Diestel R. *Graph Theory*. Springer Publ., 2005, 410 p.

14. Furukakoi M. et al. Multi-objective optimal operation with demand management and voltage stability. In: Proc. 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), IEEE, 2017, pp. 383–388.

15. Jhala K., Natarajan B., Pahwa A. Prospect theory-based active consumer behavior under variable electricity pricing. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, vol. 10, pp. 2809–2819.

16. Jordehi A.R. *Optimisation of demand response in electric power systems, a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 103, pp. 308–319.

17. Lee S.J. et al. Supply and demand management system based on consumption pattern analysis and tariff for cost minimization. In: Proc. 2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), IEEE, 2016, pp. 652–658.

18. Lin C.M., Chen M.T. Design and implementation of a smart home energy saving system with active loading feature identification and power management. In: Proc. 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia), IEEE, 2017, pp. 739–742.

19. Ordehi A.R. *Optimisation of demand response in electric power systems, a review. Renewable and sustainable energy reviews*, 2019, vol. 103, pp. 308–319.

TRETYAKOV EVGENIY – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electric Railway Railways Rolling Stock, Omsk State Transport University, Russia, Omsk (eugentr@mail.ru).

MALYSHEVA NADEZHDA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Energy, Nizhnevartovsk State University, Russia, Nizhnevartovsk (malyshevann@list.ru).

Формат цитирования: *Третьяков Е.А., Малышева Н.Н.* Управление спросом активных потребителей в распределительных электрических сетях // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 190–202.

УДК 621.316.13
ББК 31.27-082

А.И. ФЕДОТОВ, Р.Ш. БАСЫРОВ, Г.В. ВАГАПОВ

ЦИФРОВОЙ КОНТРОЛЬ ПРЕДЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРОВОДОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ*

Ключевые слова: *гололедная и ветровая нагрузки, нагрузки на провод линии электропередачи, математическая модель работы провода в пролете.*

В статье рассматриваются теоретический подход и практическая реализация к определению текущих действующих механических нагрузок на провод в пролете воздушной линии электропередачи. Предложено разделение нагрузок на вертикальную и горизонтальную с одновременным выделением составляющей на скручивание. Подобное разделение на составляющие позволяет более точно определять механические нагрузки, действующие на провод воздушной линии электропередачи, в том числе ветровые и гололедные. В качестве источника первичной информации возможно использование различных датчиков, установленных непосредственно на провода, таких как датчики угла наклона провода и т.д. Предлагаемый подход позволит осуществлять цифровой контроль текущего состояния провода в пролете и не допускать достижения критических значений механического напряжения в проводе при наличии установленных датчиков на проводе.

Введение. Электрические сети напряжением 110 кВ и выше являются важной компонентой электроэнергетической системы и направлены на передачу и распределение электроэнергии от электрических станций и в ряде случаев до конечного потребителя. Данное обстоятельство обуславливает необходимость непрерывного развития технологий повышения надежности функционирования электрических сетей рассматриваемых классов напряжений. Вторым немаловажным фактором повышения надежности функционирования электросетевых компаний выступает необходимость постоянного улучшения показателей *SAIFI*, *SAIDI* и *CAIDI*. Аварийные отключения электроэнергии, в свою очередь, негативным образом сказываются как на вышеприведенных показателях, так и на других показателях надежности. Электрические сети рассматриваемых классов напряжений преимущественно выполнены воздушными линиями (ВЛ) с применением грозозащитных тросов (ГЗТ). В качестве одного из основных неблагоприятных факторов, приводящих к аварийным отключениям ВЛ, можно выделить негативное влияние климатических воздействий. Так, по данным министерства энергетики РФ [2], в ПФО на значения показателей надежности *SAIDI* и *SAIFI* в первой половине 2018 г. в большей степени повлияли погодные факторы. Такие климатические воздействия, как ветровая нагрузка или гололедно-изморозевые отложения (ГО), приводят преимущественно к механическим перенапряжениям в проводах и ГЗТ ВЛ и в ряде случаев к их схлестыва-

* Работа выполнена в рамках проекта темы научного исследования «Методы повышения надежности систем электроснабжения и качества электроэнергии на основе электрохимических накопителей и цифрового мониторинга состояния распределительных электрических сетей» (мнемокод 0672-2020-0007, №FZSW-2020-0007).

нию, что в конечном итоге является причиной коротких замыканий и обрывов. Подобный эффект обуславливает резкое ухудшение показателей *SAIFI* и *SAIDI*. Таким образом, проблема повышения надежности функционирования воздушных линий электропередачи, как одного из важных компонентов энергосистемы, не теряет своей актуальности.

Обзор текущего состояния проблемы. Рассматриваемой проблеме посвящены многочисленные публикации в литературных источниках, которые представляют различные теоретические подходы к решению вышеобозначенной проблемы. Наибольший интерес с точки зрения улучшения показателей *SAIFI* и *SAIDI* представляют теоретические подходы, имеющие практическую реализацию в действующих энергосистемах. Одним из представленных теоретических направлений является применение локационного метода (ЛМ), основанного на распространении электромагнитной волны [1]. Данный метод позволяет контролировать степень вытяжки проводов ВЛ и ГЗТ под воздействием ГО. В качестве аспекта ЛМ для дальнейшего проведения исследований выделяется, например, необходимость разделения нагрузок от ГО и ветра.

Не менее перспективным является контроль с помощью систем, оборудованных видео камерами [3]. Данный метод вкупе с использованием тензометрических датчиков позволяет осуществлять полный цикл мониторинга каждого пролета ВЛ. Метод требователен к каналу передачи данных, поскольку требуется передача существенного массива данных, в том числе и видео информации.

Одновременно имеет место быть способ обнаружения механических воздействий на основе весовых датчиков. Существуют Методические указания по применению сигнализаторов ГО на основе весовых датчиков[1]. В качестве недостатка использования весовых датчиков можно выделить отсутствие возможности разделения горизонтальной и вертикальной нагрузок на провод и ГЗТ.

Также широко распространен способ определения механических воздействий на основе измерения угла провеса провода [5, 7, 10]. Данный способ имеет различные вариации в зависимости от производителя.

Одновременно имеет распространение способ прогнозирования воздействий ГО на основе метеорологических моделей, учитывающих различные климатические факторы и статистические данные прошлых лет. Подобный подход представлен в многочисленных работах, например в [12].

Несмотря на существенное количество теоретических подходов и различных вариантов практической реализации, проблема ранней диагностики ГО полностью не решена. Таким образом, задача определения текущего состояния провода и ГЗТ не теряет своей актуальности.

Теоретическое определение нагрузок. Приведенные выше различные подходы показали вариативность технической реализации определения со-

[1] СТО 56947007-29.240.55.113-2012. Методические указания по применению сигнализаторов гололеда (СГ) и прогнозированию гололедоопасной обстановки [Электронный ресурс]. URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO56947007-29.240.55.113-2012.pdf.

стояния провода в пролете. Подавляющее большинство подходов основываются на классическом уравнении цепной линии [6], преобразованном к виду

$$y = a\left(2 \cdot \mathrm{sh}^2 \frac{x}{2 \cdot a}\right), \tag{1}$$

где a – параметр канонического уравнения цепной линии.

Стрела провеса f провода в пролете ВЛ рассчитывается по уравнению

$$f = a\left(\mathrm{ch}\frac{x_a}{a} - 1\right). \tag{2}$$

Параметр h определяется как

$$h = a\left(\mathrm{ch}\frac{x_a}{a} - \mathrm{ch}\frac{l - x_a}{a}\right). \tag{3}$$

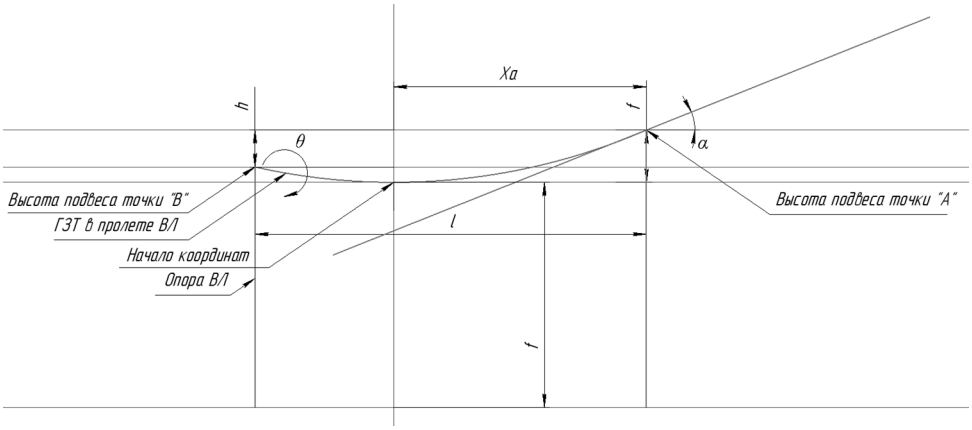


Рис. 1. Угол наклона касательной в точке крепления:
A и B – координаты точек подвеса ГЗТ на опорах в пролете ВЛ;
x_a – расстояние между координатой точки A и осью ординат; f – стрела провеса провода ВЛ;
l – расстояние между опорами в пролете ВЛ; h – расстояние по вертикали точек подвеса провода; α – угол наклона касательной; θ – угол кручения провода

Уравнение параметра h содержит: одно известное значение h, которое определяется проектной документацией или результатами натурного обследования, и два неизвестных, а именно: значение x_a и параметр a. Для однозначного нахождения искомых значений необходимо второе уравнение с аналогичными неизвестными. В качестве второго уравнения может быть использовано уравнение тангенса угла наклона касательной в точке подвеса провода. Рис. 1 иллюстрирует графически угол наклона касательной в точке крепления провода и ГЗТ. Математическое выражение зависимости угла наклона касательной от параметров a и x_a представлено уравнением

$$\mathrm{tg}(\alpha) = \mathrm{sh}\frac{x_a}{a}. \tag{4}$$

В формуле (4) неизвестны параметры a, x_a и значение тангенса угла наклона касательной. Соответственно, при условии известного значения угла

наклона касательной и объединении формул (3) и (4) в систему уравнений возможно нахождение однозначных численных значений параметра a и x_a. Определение значения угла наклона касательной будет представлено ниже.

$$\begin{cases} \operatorname{tg}\alpha = \operatorname{sh}\dfrac{x_a}{a}; \\ h = a\cdot\left(\operatorname{ch}\dfrac{x_a}{a} - \operatorname{ch}\dfrac{l-x_a}{a}\right). \end{cases} \tag{5}$$

Система уравнений (5) является нелинейной.

Численные значения параметр a и x_a предоставляют возможность определить геометрическую длину провода и ГЗТ L в пролете ВЛ по следующему уравнению:

$$L = a\left(\operatorname{sh}\frac{x_a}{a} + \operatorname{sh}\frac{l-x_a}{a}\right).$$

Одновременно со значением длины провода и ГЗТ возможно определение стрелы провеса f по формуле (2).

Определение поправок на кручение провода при расчете влияния бокового ветра. Анализ полученных экспериментальных данных с действующей ВЛ напряжением 110 кВ показал изменение поперечного угла кручения провода при отсутствии ветрового давления. Данное изменение угла обусловлено температурной вытяжкой проводов [5]. Соответственно, необходим учет данного фактора при определении механического напряжения в проводе.

Рис. 2 иллюстрирует разделение воздействий векторов собственной массы провода и бокового ветра.

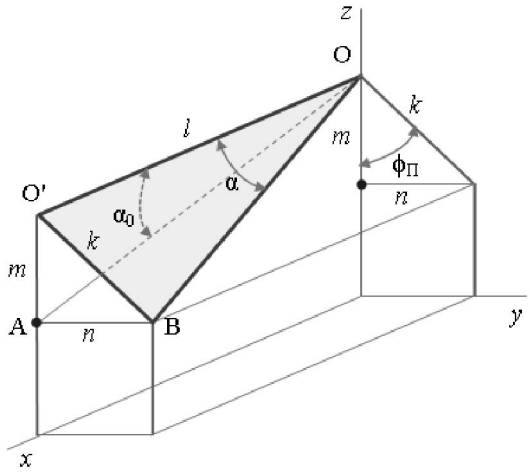


Рис. 2. Угол наклона касательной в точке крепления ГЗТ:
O'A– вектор воздействия массы провода; *AB* – вектор воздействия ветровой нагрузки;
OB – кривая провеса провода и ГЗТ; *Z* – ось установки опоры ВЛ

Следует учесть, что значения стрел провеса f_n и f_m рассчитываются на основе решения уравнения (2), в котором при наличии ветра угол τ уже не тот, что

измеряется сенсором с чувствительным элементом, основанным на гравитационном принципе. Это положение раскрывается на рис. 2, где для наглядности провод подвешен на опорах в точках O и O' без перепада высот, т.е. $h = 0$. Плоскость, в которой будет располагаться провод после его поворота под действием ветра на угол $\varphi_п$ вокруг оси $O - O'$, образуется прямоугольным треугольником $OO'B$, где линия OB соответствует касательной к кривой провисания провода в точке O. Вертикальная весовая составляющая чувствительного элемента сенсора покажет угол τ_0 в треугольнике OAB, который является проекцией треугольника $OO'B$ на плоскость xz. Искомым же является значение угла τ.

В соответствии с рис. 2 искомое значение угла τ определяется следующим образом:

$$\mathrm{tg}\tau = \frac{k}{l};\ \ k = \frac{m}{\cos\varphi_п};\ \ m = l \cdot \mathrm{tg}\tau_0.$$

Тогда

$$\mathrm{tg}\tau = \frac{\mathrm{tg}\tau_0}{\cos\varphi_п}.$$

Если имеет место перепад высот подвеса провода в пролете, аналогично рис. 2, то поворот провода под действием ветра будет происходить по отношению к оси, также расположенной в плоскости xz, но которая уже не параллельна оси x. Осуществляя соответствующие построения, аналогично выполненным на рис. 2, получаем

$$\tau = \tau' + \varphi,$$

где

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{h}{l},\ \ tg\tau' = \mathrm{tg}\tau_0 \sqrt{\frac{\cos^2\varphi}{\cos^2\varphi_п} + \sin^2\varphi}.$$

Представленный подход позволяет осуществлять учет влияния бокового ветра в математической модели, что существенно повышает точность определения на провод и ГЗТ ВЛ действующих нагрузок. Переход от определения геометрических параметров к определению физических параметров представлен во многих публикациях [5, 6]. Реализация предложенного теоретического подхода по определению нагрузок на провод и ГЗТ ВЛ с учетом предложенных поправок была осуществлена в виде цифрового контроля предельных напряжений проводов ВЛ.

Реализация цифрового контроля предельных напряжений проводов высоковольтных воздушных линий. Цифровой контроль предельных напряжений проводов ВЛ по вышепредставленной методике был реализован в виде программного обеспечения (ПО) для компьютеров стационарного варианта исполнения [11] и варианта для мобильных устройств. Необходимость разработки последнего была выявлена в ходе тестовой эксплуатации ПО для компьютеров стационарного варианта исполнения и обусловлена возможностью оперативного получения информации без необходимости пребывания обслуживающего ВЛ персонала около компьютера с ПО для стационарного исполнения.

Цифровой контроль предельных напряжений проводов и ГЗТ ВЛ реализован с помощью ПО для мобильных устройств. Основное диалоговое окно представлено на рис. 3. Диалоговое окно предоставляет информацию в виде трех столбцов: первый – информация дата и время, второй – механическое напряжение в процентах от максимально возможного, третий – толщина стенки гололеда.

На рис. 4 представлена визуализация диалогового окна с текущими параметрами значений углов отклонения сенсоров в двух плоскостях. Данные значения углов содержат в себе погрешности, обусловленные отклонениями от нулевых значений при монтаже, поскольку достаточно сложно обеспечить точное позиционирование сенсора на проводе и ГЗТ на текущий момент. Однако подобная проблема была решена математически нахождением среднего значения нуля поперечного отклонения при большом количестве измерений.

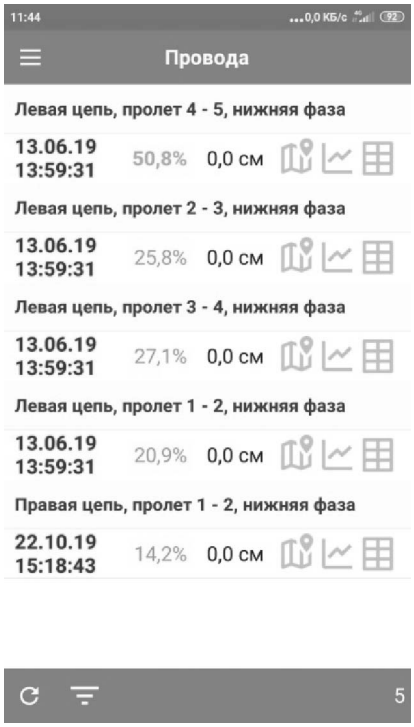


Рис. 3. Визуализация основного диалогового окна

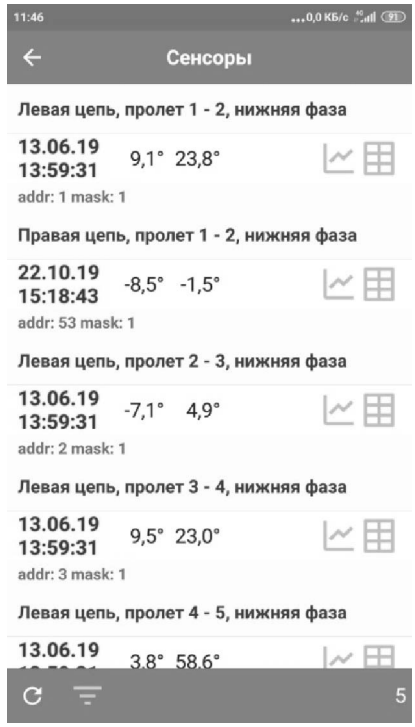


Рис. 4. Визуализация диалогового окна с текущими параметрами значений углов отклонения сенсоров

Визуализация диалогового окна с местоположением сенсоров с привязкой к местности представлена на рис. 5. Встроенное меню данной вкладки позволяет определить пролет с повреждением на карте в режиме реального времени.

В ПО для мобильных устройств также реализована функция просмотра статистических данных. Пример визуализации диалогового окна просмотра истории статистических данных представлен на рис. 6.

Рис. 5. Визуализация диалогового окна с местоположением сенсоров с привязкой к местности

Рис. 6. Пример визуализации диалогового окна статистических данных с возможностью просмотра истории

Выводы. Представленная методика определения механических напряжений позволяет в режиме реального времени производить цифровую оценку механических нагрузок на провода и ГЗТ ВЛ.

Безусловно, требуется дальнейшее развитие предлагаемой методики в рамках моделирования взаимодействий как отдельных проволок проводов и ГЗТ, так и отдельных повивов в проводах и ГЗТ.

Литература

1. *Минуллин Р.Г.* Локационный метод обнаружения гололеда на проводах воздушных ЛЭП // Электроэнергия. Передача и распределение. 2014. № 1(22). С. 74–82.

2. Подготовка и прохождение ОЗП 2018–2019 годов (19.04.2019, г. Москва) [Электронный ресурс] / Миниэнерго Росии: офиц. сайт. URL: https://minenergo.gov.ru/node/11896 (дата обращения: 10.01.2020).

3. *Сацук Е.И.* Программно-технические средства мониторинга воздушных линий электропередачи и управления энергосистемой в экстремальных погодных условиях: дис. ... д-ра техн. наук. Новочеркасск, 2011. 314 с.

4. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS № 2019613034. Контроль основных параметров проводов и грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи / *Федотов А.И., Чернов А.Б., Чернова Н.В., Басыров Р.Ш., Вагапов Г.В.* Заявка № 2019611863 от 26.02.2019. Опубл. 06.03.2019.

5. *Федотов А.И., Басыров Р.Ш., Абдуллазянов Р.Э., Вагапов Г.В.* Практическая реализация мониторинга и плавки гололеда на проводах ВЛ 110–220 кВ на основе угла провеса провода // Электрические станции. 2019. № 6(1055). С. 24–32.

6. Fischer R., Kiessling F. Freileitungen: Planung, Berechnung, Ausfiihrung. Berlin, Springer, 1993. DOl: 10.1007/978-3-642-97924-8.

7. *Guo-Ming Ma, Cheng-Rong Li, Chen-Ping Meng*. Ice Monitoring on Overhead Transmission Lines with FBG Tension Sensor. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf., 2010 DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5448665.

8. *Kozlovskyi O., Trushakov D., Rendzinyak S.* Icing sensor on the overhead powerlines wires. 16th Int. Conf. on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 2015. DOI: 10.1109/CPEE.2015.7333345.

9. *Motlis Y., Barrett J.S., Davidson G.A. et al.* Limitations of the ruling span method for overhead line conductors at high operating temperatures. Power Delivery, IEEE Transactions on. 14, 1999, pp. 549–560. DOI: 10.1109/61.754102.

10. *Qiangliang Guo, Xiaoguang Hu*. Power line icing monitoring method using binocular stereo vision. 12th IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2017. DOI: 10.1109/ICIEA.2017.8283149.

11. Sag-tension Calculation Methods for Overhead Lines: CIGRE Technical Brochure. Study Committee B2, 2007.

12. *Savadjiev K., Farzaneh M*. Modeling of icing and ice shedding on overhead power lines based on statistical analysis of meteorological dataModeling of icing and ice shedding on overhead power lines based on statistical analysis of meteorological data. *IEEE Transactions on Power Delivery,* 2004, vol. 19, iss. 2. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.822527.

ФЕДОТОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела НИОКР, Казанский государственный энергетический университет, Россия, Казань (fed.ai@mail.ru).

БАСЫРОВ РАФИК ШАЙХОЛОВИЧ – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технической физики, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань (rafikbasyrov@mail.ru).

ВАГАПОВ ГЕОРГИЙ ВАЛЕРИЯНОВИЧ – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела НИОКР, Казанский государственный энергетический университет, Россия, Казань (vagapov@list.ru).

A. FEDOTOV, R. BASYROV, G. VAGAPOV

DIGITAL CONTROL OF LIMITING MECHANICAL STRESSES OF HIGH VOLTAGE OVERHEAD POWERLINES

Key words: *ice and wind loads, loads on the wire of a power line, mathematical model of the wire in the span.*

The paper shows the theoretical approach and practical implementation to determining the existing mechanical loads on the wire in the span of an overhead power line. It proposes to separate the loads into vertical, horizontal, and torsional components. Such separation into components makes it possible to more accurately determine the mechanical loads acting on the wire of an overhead power line including ice and wind. As a source of primary information, it is possible to use various sensors installed directly on the wires, such as wire angle sensors, etc. The proposed approach will allow digital monitoring of the current state of the wire in the span and prevent critical values of mechanical stress in the wire if sensors are installed on the wire.

References

1. Minullin R.G. *Lokatsionnyi metod obnaruzheniya gololeda na provodakh vozdushnykh LEP* [Location method of detecting ice on air power lines wires]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2014, no. 1(22), pp. 74–82.

2. *Podgotovka i prokhozhdenie osennoe-zimnego perioda 2018–2019 godov (19.04.2019, g. Moskva)* [Preparation and passage of the winter-winter period 2018–2019 (19.04.2019, Moscow)]. Available at: https://minenergo.gov.ru/node/11896.

3. Satsuk E.I. *Programmno-tekhnicheskie sredstva monitoringa vozdushnykh linii elektroperedachi i upravleniya energosistemoi v ekstremal'nykh pogodnykh usloviyakh: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Software and technology means of monitoring air transmission lines and controlling the power grid in extreme weather conditions. Doct. Diss.]. Novocherkassk, 2011, 314 p.

4. Fedotov A.I., Chernov A.B., Chernova N.V., Basyrov R.Sh., Vagapov G.V. *Kontrol' osnovnykh parametrov provodov i grozozashchitnykh trosov vozdushnykh linii elektroperedachi* [Control of the main parameters of wires and thunderstorm-protective cables of power lines]. Certificate of registration of the program for computers RUS № 2019613034, 2019.

5. Fedotov A.I., Basyrov R.Sh., Abdullazyanov R.E., Vagapov G.V. *Prakticheskaya realizatsiya monitoringa i plavki gololeda na provodakh VL 110–220 kV na osnove ugla provesa provoda* [Practical implementation of monitoring and ice melting on overhead lines of 110–220 kV based on the sag angle of the wire]. Elektricheskie stantsii, 2019, no. 6(1055), pp. 24–32.

6. Fischer R., Kiessling F. Freileitungen: Planung, Berechnung, Ausfiihrung. Berlin, Springer, 1993. DOl: 10.1007/978-3-642-97924-8.

7. *Guo-Ming Ma, Cheng-Rong Li, Chen-Ping Meng*. Ice Monitoring on Overhead Transmission Lines with FBG Tension Sensor. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf., 2010 DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5448665.

8. *Kozlovskyi O., Trushakov D., Rendzinyak S.* Icing sensor on the overhead powerlines wires. 16th Int. Conf. on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 2015. DOI: 10.1109/CPEE.2015.7333345.

9. *Motlis Y., Barrett J.S., Davidson G.A. et al.* Limitations of the ruling span method for overhead line conductors at high operating temperatures. Power Delivery, IEEE Transactions on. 14, 1999, pp. 549–560. DOI: 10.1109/61.754102.

10. *Qiangliang Guo, Xiaoguang Hu*. Power line icing monitoring method using binocular stereo vision. 12th IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2017. DOI: 10.1109/ICIEA.2017.8283149.

11. Sag-tension Calculation Methods for Overhead Lines: CIGRE Technical Brochure. Study Committee B2, 2007.

12. *Savadjiev K., Farzaneh M.* Modeling of icing and ice shedding on overhead power lines based on statistical analysis of meteorological dataModeling of icing and ice shedding on overhead power lines based on statistical analysis of meteorological data. *IEEE Transactions on Power Delivery,* 2004, vol. 19, iss. 2. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.822527.

FEDOTOV ALEXANDER – Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher of Research and Development Department, Kazan State Power Engineering University, Russia, Kazan (fed.ai@mail.ru).

BASYROV RAFIK – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Technical Physics Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Russia, Kazan (rafikbasyrov@mail.ru).

VAGAPOV GEORGII – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Scientific of Research and Development Department, Kazan State Power Engineering University, Russia, Kazan (vagapov@list.ru).

Формат цитирования: *Федотов А.И., Басыров Р.Ш., Вагапов Г.В.* Цифровой контроль предельных напряжений проводов высоковольтных воздушных линий // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 203–211.

УДК 681.586.48
ББК 31.235

С.В. ЯНКЕВИЧ, Г.В. МАЛИНИН

ОБЗОР СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СИЛОВОЙ ЧАСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Ключевые слова: *ультразвуковой генератор, пьезоэлектрический излучатель, магнитострикционный излучатель, подмагничивание, смещение, автономный последовательный резонансный инвертор, индукция.*

В статье рассмотрены тиристорные и транзисторные генераторы ультразвуковых колебаний, работающие на магнитострикционную и пьезоэлектрическую нагрузку. Среди тиристорных генераторов на повышенных частотах находят применение тиристорные резонансные инверторы. Однако применение тиристорных инверторов в качестве источников питания электроакустических преобразователей ограничено из-за низких частотных свойств тиристоров и сложности схемы управления, вследствие чего их преимущества перед транзисторными генераторами проявляются только при большой выходной мощности (выше 4 кВт). Наиболее перспективными являются генераторы на транзисторах вследствие их высокого быстродействия и малой мощности управления. Классические транзисторные генераторы строятся по полумостовой и мостовой схеме. В магнитострикционном преобразователе напряженность магнитного поля пропорциональна току, в пьезоэлектрическом преобразователе – приложенному напряжению. Генераторы в классическом исполнении не способны обеспечить большую акустическую мощность магнитострикционной нагрузки вследствие характера зависимости амплитуды колебаний от изменения магнитной индукции магнитострикционного излучателя. Поэтому для увеличения акустической мощности необходимо использовать либо свойства колебательного контура, в котором конденсатор является источником энергии, увеличивающим ток через магнитострикционную нагрузку, либо корректировать точку покоя на кривой изменения линейной деформации магнитострикционного материала от изменения магнитной индукции. Авторами обосновано применение подмагничивания магнитострикционного преобразователя, которое позволяет сместить точку покоя характеристики магнитострикции от магнитной индукции и обеспечить раскачку магнитострикционного излучателя симметричным переменным током. Предложен один из вариантов схемной реализации мостового транзисторного преобразователя с подмагничиванием силовой части.

Ультразвуковые генераторы предназначены для преобразования тока промышленной частоты в ток высокой частоты и применяются для питания электроакустических преобразователей. По типу преобразовательного устройства они делятся на ламповые, полупроводниковые (транзисторные и тиристорные) и машинные. В настоящее время новые ультразвуковые генераторы выполняются в основном на полупроводниковых приборах – транзисторах и тиристорах. В данной статье рассматриваются преимущества и недостатки полумостовых и мостовых схем построения силовой части ультразвуковых генераторов с применением транзисторов и тиристоров.

В зависимости от длины волны и частоты ультразвук обладает специфическими особенностями излучения, приёма, распространения и применения. Диапазон ультразвуковых частот удобно подразделять на три поддиапазона: низкие ультразвуковые частоты ($1{,}5 \cdot 10^4$–10^5 Гц), средние (10^5–10^7 Гц) и высо-

кие (10^7–10^9 Гц). Ультразвуковые генераторы, работающие на средних и высоких частотах, нашли свое применение в эхолокации, медицинской диагностике, ультразвуковой дефектоскопии, устройствах по обработке твердых тел, акустических преобразователях сигналов и т.д. Генераторы, работающие в низкочастотном ультразвуковом поддиапазоне, применяются в очистке от отложений в теплоэнергетике [10], для воздействия на химические и электрохимические процессы, жидкие среды с целью интенсификации, а также для эмульгирования, диспергирования, коагуляции, кристаллизации жидкой среды. Например, в настоящее время в пищевой промышленности широкое применение нашли ультразвуковые генераторы, работающие в низкочастотном поддиапазоне, в частности при производстве крахмала, белка [3], инулина [9], пастеризации молока, пива, соков [4].

Транзисторные генераторы. Ультразвуковые генераторы на транзисторах строятся по схеме с независимым возбуждением, самовозбуждением, автоматической подстройкой частоты. Каждый каскад усиления таких генераторов работает в режиме переключения. Часто в генераторах на транзисторах используется двухтактная схема, применяемая при мощностях 50–150 Вт. В ней напряжение питания выбирается из условия $E \le U_{\text{С.доп}}/2$, где $U_{\text{С.доп}}$ – допустимое напряжение сток-исток [5].

При мощностях 100–250 Вт более приемлема полумостовая схема (рис. 1). Здесь источник питания Е подключается к мосту, в котором транзисторы включаются между точками *в* и *г*, а выходной трансформатор – между точками *а* и *б*. Управление транзисторами VT1 и VT2 осуществляется системой управления (СУ) в противофазе. В данной схеме к закрытому транзистору прикладывается все напряжение Е, которое выбирается из условия $E \le U_{\text{С.доп}}$.

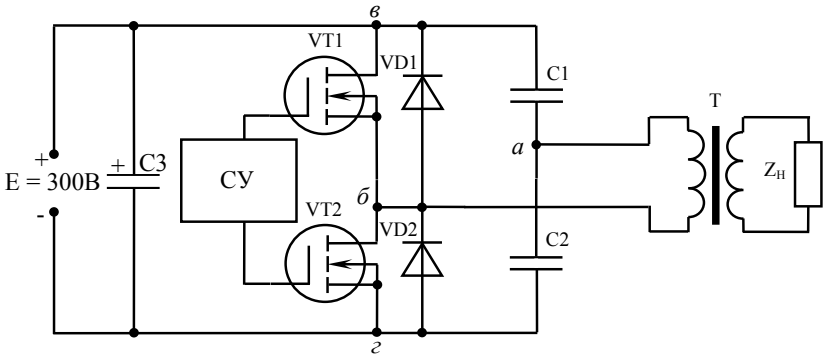


Рис. 1. Структурная схема полумостового транзисторного инвертора

Мостовая схема генератора (рис. 2) состоит из четырех транзисторов. Источник питания включен в диагональ *аб*, а нагрузка – в диагональ *вг*. Плечи моста составлены из транзисторов VT1–VT4. Управление подается на диагональные транзисторы в противофазе. Конденсаторы С1–С4 служат для

«мягкого» переключения транзисторов VT1 – VT4. Для защиты транзисторов VT1 – VT4 от перенапряжений, обусловленных индуктивным характером нагрузки, необходимы диоды VD1 – VD4. Эти диоды, как правило, интегрированы внутрь самого MOSFET транзистора. Конденсаторы C3 и C6 в схемах на рис. 1 и 2, соответственно, играют роль емкостного накопителя энергии и стоят на выходе выпрямительного диодного моста (на рис. 1 и 2 не показан).

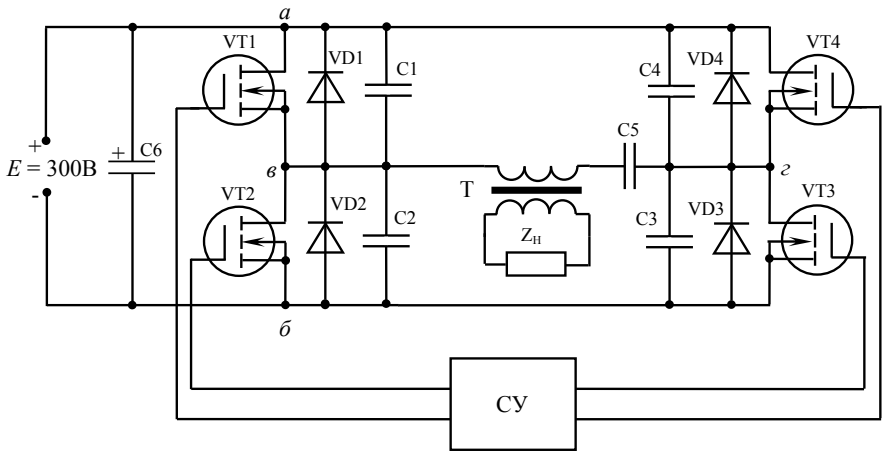


Рис. 2. Структурная схема мостового транзисторного инвертора

Напряжение питания, так же как и в полумостовой схеме, определяется из условия $E \le U_{\text{С.доп}}$. Основное преимущество мостовой схемы перед полумостовой заключается в том, что мощность, выделяемая в нагрузке, в два раза превышает мощность, отдаваемую полумостовой схемой.

Известно, что в магнитострикционном преобразователе напряженность магнитного поля пропорциональна току, в пьезоэлектрическом преобразователе, наоборот, напряженность электрического поля пропорциональна приложенному напряжению [6], поэтому пьезоэлектрические ультразвуковые излучатели возбуждаются переменным напряжением, а магнитострикционные ультразвуковые излучатели – переменным током. Магнитострикционные излучатели по сравнению с пьезоэлектрическими имеют бóльшую индуктивность, и вследствие этого «раскачать» до максимальной амплитуды магнитострикционный излучатель, представленный нагрузкой Z_H, мостовым или полумостовым транзисторным инвертором, невозможно. Это видно из рис. 3, где представлена зависимость изменения линейной деформации δ магнитострикционного излучателя от изменения индукции B при воздействии симметричным переменным током, формируемым мостовым или полумостовым транзисторным инвертором [1].

Вследствие этого использование силовых схем, представленных на рис. 1 и 2, при построении ультразвуковых генераторов, работающих на магнитострикционную нагрузку, не имеет смысла, так как амплитуда колебания торца магнитострикционного преобразователя будет незначительной. Показан-

ные схемы имеет смысл использовать только при построении ультразвуковых генераторов, работающих на пьезоэлектрическую нагрузку, так как там не требуется большой ток на «раскачку» излучателя.

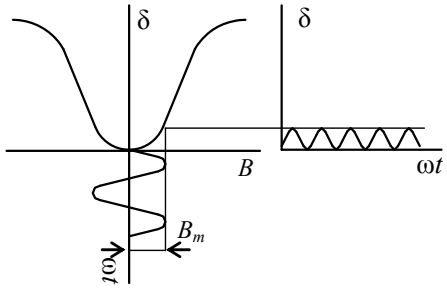


Рис. 3. Изменение линейной деформации δ от изменения индукции в магнитострикционном материале при воздействии симметричным переменным током

Тиристорные генераторы. Наиболее перспективными для применения на повышенных частотах являются тиристорные резонансные инверторы. В них элементы схемы выбираются таким образом, чтобы собственная частота резонансной цепи превышала частоту управления, вследствие чего выключение проводящего тиристора происходит до момента включения отпираемого тиристора [2].

По своему схемному построению автономные инверторы делятся на параллельные и последовательные. Недостатком параллельного резонансного инвертора является скачкообразный переход от рабочего режима к режиму с меньшим углом восстановления управляющих свойств тиристора, что может иметь место при неправильно выбранных параметрах схемы, изменении параметров нагрузки или изменении собственной частоты электроакустического преобразователя [5]. Использование параллельного инвертора, работающего на переменную нагрузку, возможно только при автоматической подстройке частоты.

Последовательные резонансные инверторы без обратных диодов могут выполняться по полумостовой, мостовой или трансформаторной схемам. Эти схемы утрачивают свое доминирующее значение для создания ультразвуковых генераторов повышенной частоты из-за невозможности обеспечения режима холостого хода и существенной зависимости режима работы от параметров нагрузки. В этом частотном диапазоне преобладают схемы транзисторных или тиристорных резонансных инверторов с обратными диодами, у которых нет ограничений, связанных с обеспечением времени на восстановление управляющих свойств силовых ключей после интервала их проводимости.

Примерами ультразвуковых тиристорных генераторов являются ультразвуковые устройства серии USP [7]. В них ультразвуковые генераторы выполнены по трансформаторной схеме тиристорного автономного последовательного резонансного инвертора с удвоением выходной частоты (рис. 4).

Повышенная акустическая мощность магнитострикционной нагрузки в таком генераторе обеспечивается за счет разрядного тока конденсатора коле-

бательного контура. Однако при этом и конденсатор С2, и тиристоры должны быть выбраны на значительное допустимое напряжение.

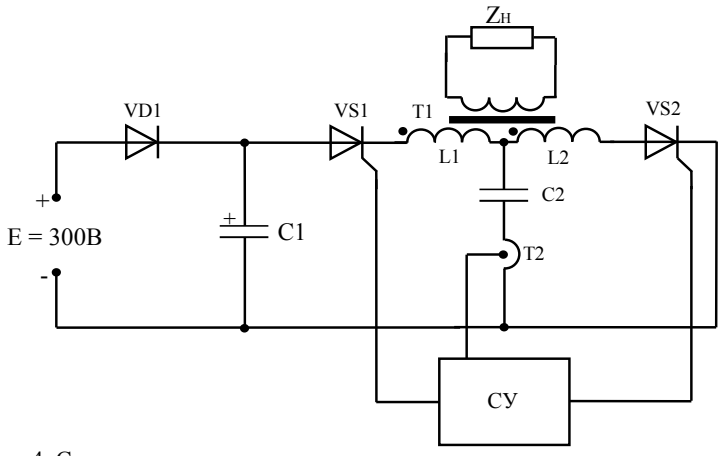


Рис. 4. Структурная схема тиристорного автономного последовательного резонансного инвертора

Основными недостатками такого тиристорного ультразвукового генератора является следующее:

1) время включения и выключения тиристора (у современных высоковольтных быстродействующих тиристоров время включения находится в пределах 0,4–10 мкс, а время выключения – в пределах 5–63 мкс; такие характеристики позволяют использовать тиристоры только на частотах до 20 кГц [8]);

2) низкая граничная частота тиристоров и сложность построения системы управления (СУ) тиристорами;

3) большое потребление энергии цепью управления;

4) сильная чувствительность схемы к параметрам элементов С2, L1, L2, Z_H;

5) узкое использование различных моделей ультразвуковых магнитострикционных излучателей, подключаемых к такому тиристорному генератору (к нему можно подключать только один тип магнитострикционного преобразователя).

Таким образом, использование классических транзисторных схем ультразвуковых генераторов имеет смысл только при использовании пьезоэлектрической нагрузки, а применение тиристорных генераторов оправдано только при больших мощностях. Актуальным является построение транзисторного ультразвукового генератора, который по эффективности акустической мощности сравним с тиристорным генератором, а его функциональные возможности включали бы работу на разную ультразвуковую нагрузку (пьезоэлектрическую и магнитострикционную). Очевидно, что из двух транзисторных схем, представленных на рис. 1 и 2, для проектирования нового ультразвукового генератора предпочтительна силовая схема, представленная на рис. 2, так как ее мощность в два раза выше.

Известно, что для работы на более крутом участке кривой изменения линейной деформации от изменения индукции (рис. 3) и получения бóльшей амплитуды колебаний торца магнитострикционного излучателя должно осуществляться смещение положения рабочей точки на кривой $\delta(B)$, что может быть достигнуто за счет введения источника постоянного магнитного поля, создающего подмагничивание магнитострикционного излучателя [1].

При воздействии постоянным током постоянная магнитная индукция B_0 выбирается посередине петли гистерезиса магнитострикционного материала (рис. 5) [1]. В этом случае на магнитострикционный излучатель должно воздействовать два силовых поля:

1) переменное электрическое поле, возбуждаемое силовым инвертором, построенным по схеме на рис. 2;

2) постоянное магнитное поле, возбуждаемое внешним независимым источником питания или постоянным магнитом, обеспечивающее постоянный ток подмагничивания.

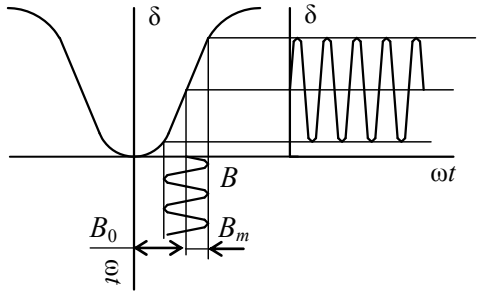


Рис. 5. Изменение линейной деформации δ от изменения индукции в магнитострикционном материале при воздействии симметричным переменным током с подмагничиванием магнитострикционного материала

Таким образом, ток магнитострикционного излучателя содержит две составляющие, обеспечивающие «раскачку» магнитострикционного излучателя до максимальной амплитуды. Необходимо отметить, что для каждого конкретного магнитострикционного излучателя силовой ток инвертора и ток подмагничивания генератора настраиваются индивидуально так, чтобы излучатель не вошел в насыщение. Настройка на резонанс в схеме производится независимо от элементов самой схемы генератора, что затруднительно в тиристорных генераторах.

Один из вариантов введения подмагничивания в силовую схему на рис. 2 представлен на рис. 6. Здесь E1 – это независимый источник питания, гальванически изолированный от сети переменного тока, на выходе которого включены разделительный диод VD5 и накопитель на конденсаторе C7. Мощность такого источника может быть незначительной, главное, чтобы поддерживался необходимый ток подмагничивания в пределах порядка 10÷40 А.

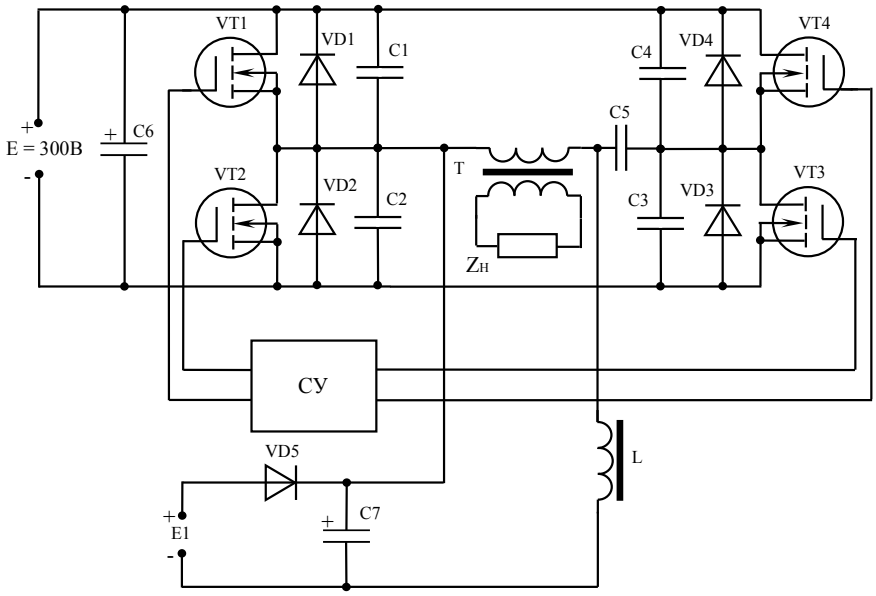


Рис. 6. Структурная схема мостового транзисторного инвертора с подмагничиванием

Силовой дроссель L подключен параллельно нагрузке $Z_н$ и вместе с источником питания E1 переводит входную цепь подмагничивания в режим источника постоянного тока. Настройка ультразвукового генератора для каждого магнитострикционного излучателя происходит при неизменных параметрах колебательного контура (C5, Zн, T) путем подбора частоты управляющих импульсов транзисторов VT1-VT4. Данное техническое решение опробовано на практике и показало свою состоятельность [3,4].

Другой способ введения подмагничивания в силовую часть мостового транзисторного инвертора представлен в зарубежной литературе [11], за счет чего мощность транзисторного генератора удалось увеличить до 2 кВт, что уже сравнимо с тиристорными генераторами.

Выводы. Рассмотрены основные схемотехнические решения построения силовых схем ультразвуковых генераторов на полупроводниковых элементах, применяемых на сегодняшний день в промышленности, и указаны их основные недостатки. Предложено новое техническое решение применения подмагничивания в мостовом транзисторном ультразвуковом генераторе для улучшения технических характеристик генератора и расширения области применения такого генератора в ультразвуковой технике.

Литература

1. *Афанасьев В.А., Янкевич С.В.* Магнитострикционные преобразователи и способы воздействия на колебательные системы // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы IX Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. С. 38–42.

2. *Бальян Р.Х.* Тиристорные генераторы и инверторы. Л.: Энергоиздат, 1982. 223 с.

3. *Гольдштейн В.Г.* Определить технологические параметры экстракции белков из гороховой муки с применением ультразвука: отчет о НИР. Красково, 2019.

4. *Давадов Ф.Д.* Исследование влияния ультразвука на качество непастеризованного пива // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2019. № 2(46), т. 8. С. 136–139.

5. *Донской А.В.* Ультразвуковые электротехнологические установки. Л.: Энергоиздат, 1982. 208 с.

6. *Кикучи Е.* Ультразвуковые преобразователи. М.: Мир, 1972. 424 с.

7. *Николаев А.А.* Моделирование тиристорного автономного последовательного резонансного инвертора с магнитострикционной ультразвуковой колебательной системой в качестве нагрузки // Вестник Чувашского университета. 2009. № 2. С. 223–231.

8. Тиристоры быстродействующие частотно-импульсные: каталог продукции ООО «Алексма-ПРО» [Электронный ресурс]. URL: http://alexma.ru/diody-tiristory-i-moduli/tiristory/tiristory-bystrodejstvuyushchie-chastotno-impulsnye.html (дата обращения 30.12.2019).

9. *Шепелева Н.С., Кареткин Б.А.* Интенсификация выделения инулина из клубней топинамбура с помощью ультразвука // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Т. XXI, № 5(73). М.: Изд-во РХТУ имени Д.И. Менделеева, 2007.

10. *Jun Xu, Helai Li, Bo You*. Design of Ultrasonic Scaler Based on Embedded Microcontroller. *The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments ICEMI'2009*, 2009, vol. 2, pp. 184–188. DOI: 10.1109/ICEMI.2009.5274603.

11. *Qiang Peng, Haixia Wang, Xuecheng Su, Xiao Lu*. A New Design of the High-power Ultrasonic Generator. *Chinese Control and Decision Conference (CCDC 2008)*, 2008, pp. 3800–3803. DOI: 10.1109/CCDC.2008.4598042.

ЯНКЕВИЧ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – аспирант кафедры промышленной электроники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ds3617@mail.ru).

МАЛИНИН ГРИГОРИЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (malgrig6@mail.ru).

S. YANKEVICH, G. MALININ

SCHEMATIC SOLUTIONS OVERVIEW FOR CONSTRUCTION OF ULTRASONIC GENERATORS POWER UNIT

Key words: *ultrasonic generator, piezoelectric transducers, magnetostrictive transducers, magnetic biasing, shift, autonomous serial resonance inverter, induction.*

The paper considers thyristor and transistor generators of ultrasonic vibrations operating on a magnetostrictive and piezoelectric load. Thyristor resonant inverters find their application among thyristor generators at high frequencies. However, the use of thyristor inverters as power sources for electro-acoustic transducers is limited due to the low frequency properties of thyristors and the complexity of the control circuit. Therefore, their advantages over transistor generators are manifested only with a large output power (above 4 kW). The most promising are transistor generators because of their high speed and low control power. Classic transistor generators are built on a half-bridge and full-bridge circuit. In a magnetostrictive transducer, the magnetic field is proportional to the current and in a piezoelectric transducer – to the applied voltage. Classical generators are not able to provide a large acoustic power of the magnetostrictive load due to the nature of the dependence of the oscillation amplitude on the change in the magnetic induction of magnetostrictive transducer. Therefore, to increase the acoustic power, it is necessary to use either the properties of the oscillatory circuit, in which the capacitor is an energy source that increases the current through the magnetostrictive load, or adjust the quiescent point on the curve of the linear deformation of the magnetostrictive material from changes in magnetic induction. The authors substantiated the use of magnetic biasing magnetostrictive transducer, which allows to shift the resting point of the magnetostriction characteristics from magnetic induction and provide a large excitation of oscillations of the magnetostrictive transducer with symmetrical alternating current. One of the variants of the circuit implementation of a full-bridge transistor converter with magnetic biasing of the power circuit is proposed.

References

1. Afanas'ev V.A., Yankevich S.V. *Magnitostriktsionnye preobrazovateli i sposoby vozdeistviya na kolebatel'nye sistemy* [Magnetostrictive transducers and methods of action on oscillating systems]. In: *Informatsionnye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike: materialy IX Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Proc of 9th Russ. Conf. «Information technologies in electronics and power»]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2014, pp. 38–42.

2. Bal'yan R.Kh. *Tiristornye generatory i invertory* [Thyristor generators and inverters]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982, 224 p.

3. Gol'dshtein V.G. *Opredelit' tekhnologicheskie parametry ekstraktsii belkov iz gorokhovoi muki s primeneniem ul'trazvuka: otchet o NIR* [Determine process parameters of protein extraction from pea flour using ultrasound. Research report]. Kraskovo, 2019.

4. Davadov F.D. *Issledovanie vliyaniya ul'trazvuka na kachestvo nepasterizovannogo piva* [Study the ultrasound effect on unpasteurized beer quality]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus*, 2019, vol. 8, no. 2(46), pp. 136–139.

5. Donskoi A.V. *Ul'trazvukovye elektrotekhnologicheskie ustanovki* [Ultrasonic electrofabrication systems]. St. Petersburg, Energoizdat Publ., 1982, 208 p.

6. Kikuchi E. *Ul'trazvukovye preobrazovateli* [Ultrasonic transducers]. Moscow, Mir Publ., 1972, 424 p.

7. Nikolaev A.A. *Modelirovanie tiristornogo avtonomnogo posledovatel'nogo rezonansnogo invertora s magnitostriktsionnoi ul'trazvukovoi kolebatel'noi sistemoi v kachestve nagruzki* [Modeling of a thyristor autonomous resonant inverter with magnetostrictive ultrasonic oscillating system as burden]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2009, no. 2, pp. 223–231.

8. *Tiristory bystrodeistvuyushchie chastotno-impul'snye* [Thyristors are high-speed pulse-frequency]. Available at: http://alexma.ru/diody-tiristory-i-moduli/tiristory/tiristory-bystrodejstvuyushchie-chastotno-impulsnye.html (Accessed 30 December 2019).

9. Shepeleva N.S., Karetkin B.A. *Intensifikatsiya vydeleniya inulina iz klubnei topinambura s pomoshch'yu ul'trazvuka* [Intensification of inulin release from girasol tubers by ultrasound]. In: *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii: sb. nauch. tr. Tom XXI. №5 (73)* [Collection of scientific papers «Advances in Chemistry and Chemical Technology», vol. XXI, no. 5 (73)]. Moscow, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia Publ., 2007.

10. Jun Xu, Helai Li, Bo You. Design of Ultrasonic Scaler Based on Embedded Microcontroller. *The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments ICEMI'2009*, 2009, vol. 2, pp. 184–188. DOI: 10.1109/ICEMI.2009.5274603.

11. Qiang Peng, Haixia Wang, Xuecheng Su, Xiao Lu. A New Design of the High-power Ultrasonic Generator. *Chinese Control and Decision Conference (CCDC 2008)*, 2008, pp. 3800–3803. DOI: 10.1109/CCDC.2008.4598042.

YANKEVICH SERGEY – Post-Graduate Student of Industrial Electronics Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (ds3617@mail.ru).

MALININ GRIGORIY – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Industrial Electronics Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (malgrig6@mail.ru).

Формат цитирования: *Янкевич С.В., Малинин Г.В.* Обзор схемотехнических решений при построении силовой части ультразвуковых генераторов // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 212–220.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Вестник Чувашского университета» просит авторов руководствоваться нижеприведенными правилами.

1. Авторские оригиналы представляются на бумажном и электронном носителях. Авторский текстовый оригинал должен быть пронумерован и подписан авторами на титульном листе с указанием даты.

2. К статьям, направляемым в редакцию, прилагаются:

1) заявление автора на имя главного редактора;

2) анкета авторов;

3) две внешние рецензии;

4) ходатайство научного руководителя;

5) экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

3. Авторы должны указать рубрику, в которой следует поместить статью.

4. Оформление статьи:

1) классификационные индексы Универсальной десятичной классификации (УДК), Библиотечно-библиографического классификатора (ББК);

2) инициалы и фамилия авторов;

3) название статьи;

4) ключевые слова;

5) аннотация статьи;

6) название статьи, инициалы и фамилия автора на английском языке;

7) ключевые слова на английском языке;

8) аннотация на английском языке;

9) текст статьи;

10) пристатейный библиографический список;

11) транслитерированный библиографический список References;

11) сведения об авторе.

Авторские оригиналы подготавливаются с помощью компьютера в среде Microsoft Word (файлы типа doc). Формат бумаги А4, поля: справа и слева 4 см, сверху 4,5 см, снизу 5,7 см, от края до верхнего колонтитула 3 см, красная строка 0,75 см. Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размера 11 пт через 1 интервал.

Текст статьи представляется в двух экземплярах с приложением файла в электронном виде.

5. Рисунки. Количество рисунков не более 4. На рисунки должны быть ссылки. Рисунки должны быть внедрены в режиме Вставка Объект Рисунок Microsoft Word. Подрисуночные подписи выполняются шрифтом размера 9 пт.

6. Формулы и буквенные обозначения по тексту. Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation. Шрифт для греческих букв – Symbol, для всех остальных – Times New Roman, основной размер 11 пт, крупный индекс 7 пт, мелкий 5 пт.

Латинские буквы набираются курсивом, буквы греческого алфавита и кириллицы – прямым шрифтом, обозначения матриц, векторов, операторов – прямым полужирным шрифтом.

Формулы располагаются по центру страницы. Номер формулы ставится у правого края. Нумеруются лишь те формулы, на которые имеются ссылки.

При выборе единиц физических величин рекомендуется придерживаться международной системы единиц СИ.

7. Таблицы. Текст в таблицах набирается шрифтом размером 9 пт, заголовок выделяется полужирным шрифтом. На таблицы должны быть ссылки.

8. Список литературы. Список строится по алфавиту, записи рекомендуется располагать сначала на языке издания, в которое включен список, затем на других языках. Источники набираются шрифтом Times New Roman размера 9 пт. При оформлении списка литературы необходимо руководствоваться ГОСТом Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила оформления».

Ссылки на источники в тексте даются в квадратных скобках, например [1], [1. С. 5].

9. Список References. Транслитерацию русского текста в латиницу следует производить в соответствии со стандартом BSI.

10. Сведения об авторах набираются полужирным шрифтом размера 10 пт ***на русском и английском языках в именительном падеже*** по следующей форме*: Фамилия, имя, отчество – ученая степень, должность, место работы, страна, город. Контактная информация (e-mail).*

11. Статьи, оформленные без соблюдения этих правил, возвращаются без рассмотрения. Возвращение рукописи автору на доработку не означает, что статья принята к печати. После получения доработанного текста рукопись вновь рассматривается редколлегией. Доработанный текст автор должен вернуть вместе с первоначальным экземпляром статьи, а также ответами на все замечания. Датой поступления считается день получения редакцией окончательного варианта статьи.

12. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

13. В одном номере журнала может быть опубликовано, как правило, не более двух статей одного автора, в том числе в соавторстве.

ВЕСТНИК ЧУВАШСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

2020 **№ 1**

СОДЕРЖАНИЕ

VESTNIK CHUVASHSKOGO UNIVERSITETA

ELECTRICAL TECHNOLOGY AND POWER ENGINEERING

2020 **№ 1**

CONTENTS

ВЕСТНИК ЧУВАШСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Электротехника и энергетика

№ 1 2020

Редактор ***Н.И. Завгородняя***
Технический редактор ***Н.Н. Иванова***

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзоре)
Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-66541 от 21.07.2016 г.

Сдано в набор 10.01.2020. Подписано в печать 13.03.2020. Выход в свет 25.03.2020.
Формат 70×100/16. Бумага писчая. Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 18,22. Уч.-изд. л. 18,19.
Тираж 200 экз. Заказ № 313. Свободная цена.

Адрес редакции и издателя
428015, Чебоксары, Московский просп., 15

Типография Чувашского университета
428015, Чебоксары, Московский просп., 15