

УДК 62-83

**А. В. БУБНОВ**  
**С. В. БИРЮКОВ**  
**А. Н. ЧЕТВЕРИК**

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИНХРОННО-СИНФАЗНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЛОГИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА СРАВНЕНИЯ С КОСВЕННЫМ ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ОШИБКИ ПО УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Синхронно-синфазный электропривод, построенный на основе электропривода с фазовой синхронизацией, широко используются в тепловизионных и лазерных сканирующих системах благодаря высоким точностным и динамическим характеристикам в широком диапазоне регулирования угловой скорости. Целью статьи является анализ возможностей улучшения динамики электропривода с фазовой синхронизацией и синхронно-синфазного электропривода на основе использования методов косвенного определения ошибки по угловой скорости, реализованных на основе многофункционального логического устройства сравнения. Предложены классификации методов косвенного определения ошибки по угловой скорости (вариантов построения блока определения частотного рассогласования сравниваемых импульсных последовательностей) и способов организации управления электроприводом с использованием блока определения частотного рассогласования сравниваемых импульсных последовательностей.

**Ключевые слова:** электропривод с фазовой синхронизацией, синхронно-синфазный электропривод, логическое устройство сравнения, дискриминатор.

*Работа выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований. Проект № 16-08-00325а «Разработка и исследование способов управления синхронно-синфазным электроприводом, реализованных на основе комплексного подхода к обеспечению высоких показателей качества регулирования в широком диапазоне угловых скоростей в режимах стабилизации и слежения».*

Синхронно-синфазные электроприводы (ССЭ), построенные на основе электропривода с фазовой синхронизацией (ЭПФС), применяются в узлах оптико-механической развертки обзорно-поисковых и сканирующих систем, в том числе в системах лазерного сканирования, в системах технического

зрения современных робототехнических комплексов, видеозаписывающей аппаратуры, в копировальных установках, что обусловлено их высокими точностными и динамическими показателями в широком диапазоне регулирования угловой скорости [1 – 10].



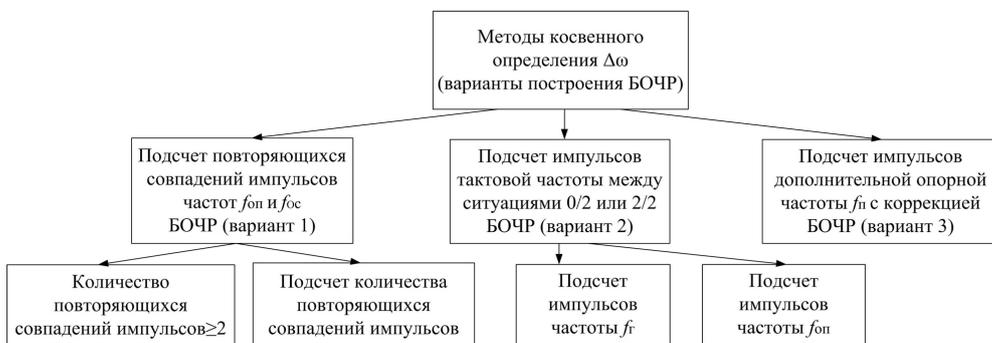


Рис. 2. Классификация методов косвенного определения ошибки по угловой скорости

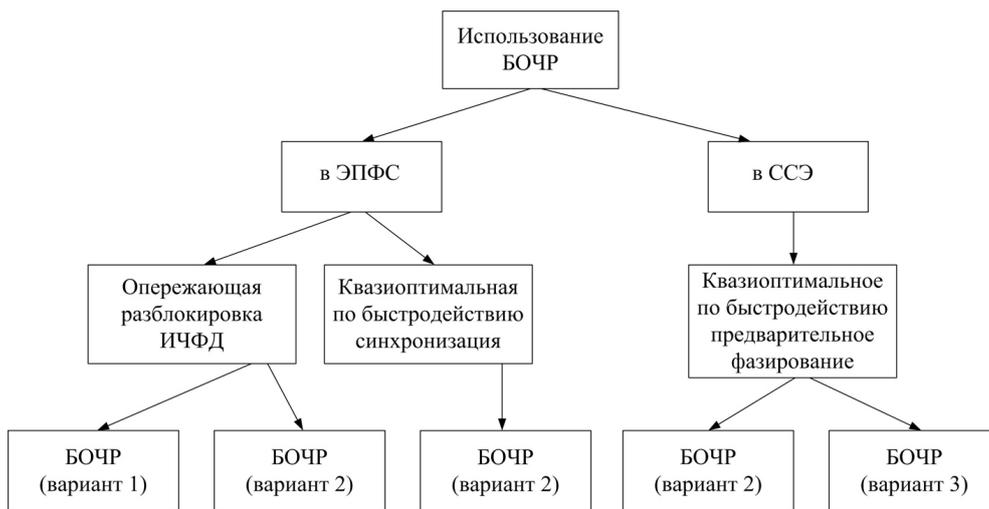


Рис. 3. Классификация способов управления ЭПФС и ССЭ, реализованных на основе МЛУС

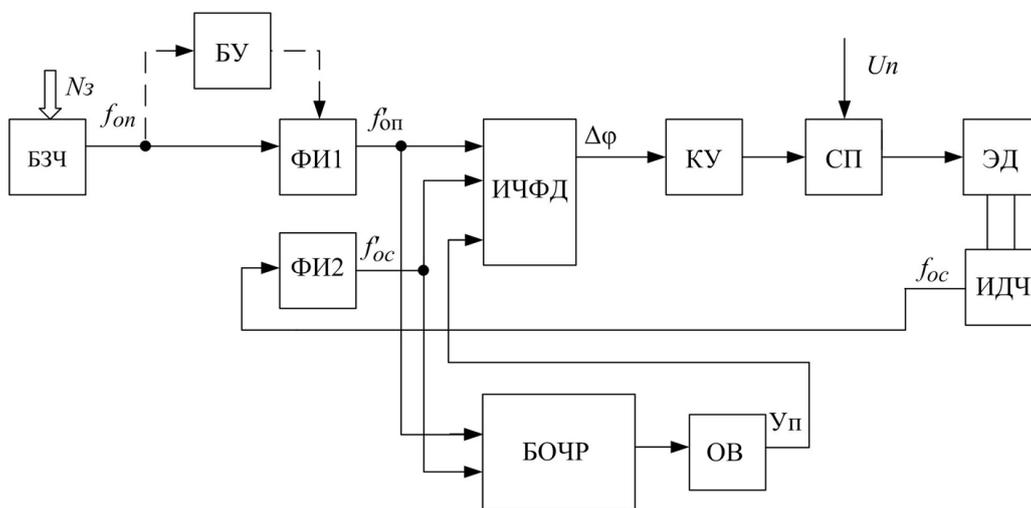


Рис. 4. Функциональная схема ЭПФС с опережающей разблокировкой ИЧФД (первый вариант БОЧР)

импульсов подсчитывается количество повторяющихся совпадений импульсов и по полученному значению вычисляется текущее значение ошибки по угловой скорости.

Во втором варианте построения БОЧР осуществляется подсчет импульсов тактовой частоты между двумя ситуациями 0/2 или 2/2. В качестве источника тактовой частоты может быть использован неза-

висимый генератор импульсов или БЗЧ, формирующий импульсы частоты  $f_{on}$  [11].

В третьем варианте построения БОЧР формируется дополнительная опорная последовательность импульсов с частотой  $f_n$ , близкой к текущему значению частоты следования импульсов в канале обратной связи  $f_{oc}$  [13]. На основе данной частоты определяется значение ошибки по угловой скорости,



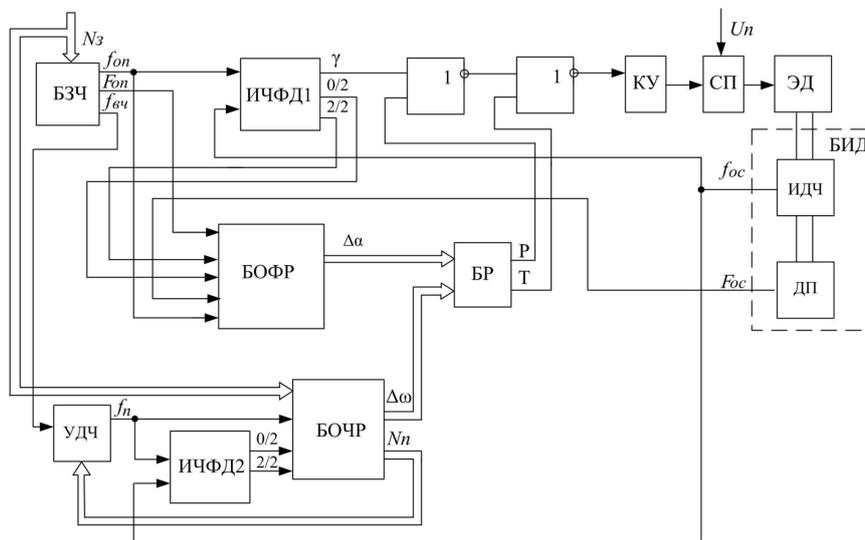


Рис. 8. Функциональная схема ССЭ с квазиоптимальным по быстродействию предварительным фазированием (третий вариант БОЧР)

жающей разблокировкой ИЧФД (первый вариант БОЧР) приведена на рис. 4, где БЗЧ — блок задания частоты, БУ — блок управления, ФИ — формирователь импульсов, БОЧР — блок определения частотного рассогласования, ОВ — одновибратор.

Функциональная схема ЭПФС с опережающей разблокировкой ИЧФД (второй вариант БОЧР) приведена на рис. 5, где пунктирной линией показан один из возможных вариантов задания тактовой частоты. Для организации квазиоптимальной по быстродействию синхронизации ЭПФС используются второй вариант построения БОЧР [11]. Функциональная схема ЭПФС с квазиоптимальной по быстродействию синхронизацией приведена на рис. 6, где УК — управляемый ключ.

Для организации квазиоптимального по быстродействию режима предварительного фазирования ССЭ используются второй вариант построения БОЧР и третий вариант построения БОЧР [13]. Функциональная схема ССЭ с квазиоптимальным по быстродействию предварительным фазированием (второй вариант БОЧР) приведена на рис. 7, где БР — блок регулирования.

Функциональная схема ССЭ с квазиоптимальным по быстродействию предварительным фазированием (третий вариант БОЧР) приведена на рис. 8, где УДЧ — управляемый делитель частоты. Данная схема обеспечивает более широкий диапазон регулирования ССЭ по угловой скорости.

Рассмотренные варианты построения МЛУС (БОЧР) могут быть эффективно использованы при построении ЭПФС и ССЭ с улучшенными динамическими показателями, которые обеспечиваются организацией управления электроприводом с использованием опережающей разблокировки ИЧФД и квазиоптимальных по быстродействию режимов синхронизации и фазирования.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании современных ССЭ для сканирующих и обзорно-поисковых систем.

#### Библиографический список

1. Трахтенберг Р. М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением. М.: Энергоиздат, 1982. 168 с.

2. Hsieh G. C. and Hung J. C. Phase-locked loop techniques. A survey // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1996. Vol. 43, no. 6, P. 609–615 с. DOI: 10.1109/41.544547.

3. Best R. E. Phase-Locked Loops: Design, Simulation, and Applications. Sixth Edition. Taipei, Taiwan, R.O.C.: McGraw-Hill, 2003. P. 109–114. ISBN 9780071493758.

4. Wu Y., Zhao H. and Zhao N. PLL Control System Based on FPGA for Brushless DC Motor // Proc. of the 33rd Chinese Control Conf. Nanjing, China, 2014. P. 7897–7902. DOI: 10.1109/ChiC.2014.6896319.

5. Pan C.-T. and Fang E. A Phase-Locked-Loop-Assisted Internal Model Adjustable-Speed Controller for BLDC Motors // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55, no. 9. P. 3415–3425. DOI: 10.1109/TIE.2008.922600.

6. Zhang J., Zhao H., Ma K. Phase-Locked Loop in Constant Speed Control for the Flywheel Motor // Recent Advances in Computer Science and Information Engineering. 2012. Vol. 6. P. 323–330. DOI: 10.1007/978-3-642-25778-0\_45.

7. Lanza P. T., Shtessel Y. B., Stensby J. L. Improved Acquisition in a Phase-Locked Loop Using Sliding Mode Control Techniques // J. of the Franklin Inst. 2015. Vol. 352 (10). P. 4188–4204. DOI: 10.1016/j.jfranklin.2015.06.001.

8. Nondahl T., Liu J., Schmidt P., Royak S., Dai J. and Al-Nabi E. Transition Scheme for Position Sensorless Control of AC Motor Drives. US Patent 2016/0056740; filed Decembe 10nd, 2014; published February 25nd, 2016.

9. Xue F. [et al.]. Passivity-Based Control for Phase-Locked Loop Induction Motor Drive // IEEE Int. Symp. on Ind. Electron. Proc. Pusan, Korea, 2001. P.1130–1134. DOI: 101109/ISIE.2001.931636.

10. Yu W., Luo Y., Chen Y.-Q, Pi Y.-G. Frequency Domain Modelling and Control of Fractional-Order System for Permanent Magnet Synchronous Motor Velocity Servosystem // IET Control Theory & Applicat. 2016. Vol. 10, issue 2. P. 136–143. DOI: 10.1049/iet-cta.2014.1296.

11. Бубнов А. В., Чудинов А. Н. Улучшение динамики электропривода сканирующих систем на основе косвенных методов измерения ошибки по угловой скорости: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. 100 с.

12. Bubnov A. V., Gokova M. V., Chetverik A. N. Features of constructing a logical device for comparing systems with a frequency phase-locked loop // Measurement Techniques. USA. N. Y. Springer US. 2016. Vol. 59, no 9. P. 985–989.

13. Пат. 2608177 РФ, МПК H02P 6/06, 7/06, 21/06. Способ фазирования вращающегося вала электродвигателя и устройство для его осуществления / Бубнов А. В., Емашов В. А.,

Чудинов А. Н. № 2015122321; заявл. 10.06.2015; опубл. 17.01.2017, Бюл. № 2. 12 с.

14. Пат. 2475932 РФ, МПК H02P 5/52, G05D 13/62 (2006.01). Способ фазирования вращающегося вала электродвигателя и устройство для его осуществления / Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Емашов В. А. № 2011137915/07; заявл. 14.09.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5. 2 с.

**БУБНОВ Алексей Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрическая техника».

Адрес для переписки: bubnov-av@bk.ru  
**БИРЮКОВ Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Физика».

**ЧЕТВЕРИК Алина Наилевна**, старший преподаватель кафедры «Электрическая техника».  
Адрес для переписки: alina.an@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.05.2017 г.

© А. В. Бубнов, С. В. Бирюков, А. Н. Четверик

УДК 621.431:621.43.06

**В. Р. ВЕДРУЧЕНКО**  
**А. Л. ИВАНОВ**  
**В. А. БОРИСОВ**  
**П. В. ЛИТВИНОВ**

Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

Сибирский государственный  
автомобильно-дорожный университет,  
г. Омск

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

Институт проблем переработки  
углеводородов СО РАН,  
г. Омск

## АНАЛИЗ ПУТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В статье представлен подробный анализ путей образования оксидов азота, окиси углерода, углеводородов, альдегидов, сажи и твердых частиц в отработавших газах поршневых двигателей. Приведен обзор влияния данных веществ на экологию и представлены результаты для нахождения путей снижения концентрации вредных веществ в отработавших газах поршневых двигателей для улучшения энергоэффективности.

**Ключевые слова:** поршневые двигатели, отработавшие газы, процесс сгорания, оксиды азота, оксиды углерода, углеводороды, твердые частицы.

**Введение.** В настоящее время одной из основных задач является недопущение ухудшения экологической обстановки на Земле. В атмосферу выбрасывается огромное количество оксидов углерода ( $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ ), азота ( $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ ), несгоревших углеводородов ( $\text{CH}$ ) и прочих вредных веществ, поскольку около 90 % энергии человечество получает от сжигания углеродсодержащих топлив. В первую очередь это касается различных транспортных средств, выполняющих свои функции непосредственно в местах обитания людей — в городах. С целью ограничения вредных выбросов на транспорте мировым сообществом вводятся предписания, устанавливающие меры ограничения выбросов вредных газообразных веществ и взвешенных частиц из двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенных для ис-

пользования как на транспорте, так и в стационарных режимах, и из двигателей с принудительным зажиганием, работающих на бензине, природном газе, сжиженном нефтяном газе и предназначенных для использования в тех же целях.

Требования к выбросам вредных веществ транспортными средствами в России устанавливает Технический Регламент Таможенного Союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств», базирующийся на правилах ЕЭК-ООН, стандартах Евро-4, Евро-5 и Евро-6. Введение новых стандартов ожидается в 2020 и 2025 годах, в которых будут регулироваться нормы выбросов различных вредных веществ [1–4].

Очистка отработавших газов (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС) от окиси углерода,

оксидов азота, углеводородов, сажи и альдегидов является одной из актуальных проблем. Перечисленные вещества оказывают воздействие как на рабочий персонал транспортных предприятий, так и на население крупных городов.

В частности, каждая частица пыли, копоти, аэрозоля или сажи, выбрасываемая передвижными и стационарными источниками загрязнений, адсорбирует на своей поверхности множество различных микроорганизмов. Количество микробов в воздухе растёт при увеличении концентрации пыли, дыма и сажи. Несмотря на то, что воздух не является благоприятной средой для развития микроорганизмов, даже относительно короткое пребывание патогенных или условно патогенных бактерий в воздухе бывает вполне достаточно, чтобы обеспечить развитие заболеваний и даже эпидемий [5].

Исходя из этого можно сделать вывод, что снижение выбросов вредных веществ в отработавших газах автомобилей является одной из приоритетных задач в двигателестроении. Для разработки мероприятий по снижению вредных выбросов будет логичным изучение путей и механизмов образования и воздействия на данные вещества, что и будет отражено в данной работе.

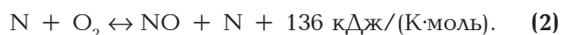
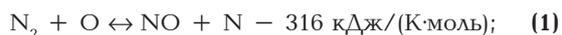
**Образование оксидов азота в двигателях.** Азот содержится в естественном состоянии в атмосферном воздухе (примерно 78 %), а также в химически связанном состоянии в компонентах жидкого топлива (до 5 % по объёму топлива, или около 0,5 % по массе). Оксиды азота образуются при окислении азота во время процесса сгорания топлива [6].

NO на порядок токсичнее CO, поскольку при попадании на почву, растительность, в водные источники, на поверхности зданий и сооружений, а также другие объекты жизнедеятельности человека образуют азотистую и азотную кислоту, вредное действие которых на фауну и флору широко известно [4].

Изменение объёма камеры сгорания (КС) (из-за движения поршня), относительная неоднородность топливно-воздушной смеси (ТВС), движение ТВС в КС, распад на составные элементы продуктов сгорания, неравномерность распределения топлива по цилиндрам, а также цикловая неравномерность усложняет исследование процесса образования оксидов азота в цилиндре ДВС [7].

Оксиды азота образуются при протекании термохимических реакций окисления азота, содержащегося в атмосферном воздухе и частично в топливе. Основными азотсодержащими компонентами в топливе являются пиридин и его производные [6].

При нахождении температуры в цилиндре в пределах 1800...2800 К, азот и кислород вступают в химическое взаимодействие по следующему механизму, называемому цепным [8, 9]:



Первая реакция является определяющей, так как ее скорость зависит от концентрации атомарного кислорода. При сгорании в цилиндрах ДВС образуется главным образом оксид азота NO, который составляет свыше 95 % количества данных оксидов. В двигателях с принудительным воспламенением смеси окисление азота и образование NO происходит за фронтом пламени в зонах достижения наивысших температур. Образование NO сильно

увеличивается с ростом температуры газов и концентрации кислорода. В случае наличия свободного кислорода в системе выпуска отработавших газов происходит частичное доокисление оксида азота до диоксида [6, 8, 9].

Существует несколько путей образования оксидов азота. В процессе горения углеводородных топлив «быстрый» NO образуется вследствие столкновения углеводородных радикалов с молекулами азота в зоне реакций горения при наличии пульсаций температуры, «топливный» NO — вследствие окисления азотсодержащих соединений топлива при низкой температуре, «термический» NO — при высоком температурном окислении атмосферного азота [7].

Быстрое окисление азота происходит при кратковременном процессе, в результате чего зона образования NO локализована на небольшом участке фронта ламинарного пламени (10 % его ширины). При этом выход NO слабо зависит в большей степени от коэффициента избытка воздуха, чем от температуры сгорания.

Топливные оксиды азота образуются при сгорании азотсодержащего топлива, причём данный вид азота вступает в реакцию окисления легче, чем атмосферный. Процесс не является лимитирующим по скорости из-за быстрой протекания реакций образования топливных оксидов азота. По мере роста концентрации азота в топливе уменьшается степень перехода в NO азотсодержащих соединений. При этом установлена слабая зависимость выхода топливных NO<sub>x</sub> от температуры продуктов сгорания. Вид азотсодержащего соединения и содержание кислорода в топливе не оказывают влияния на выход топливных NO<sub>x</sub>. Также следует отметить, что в ДВС с принудительным воспламенением топливной смеси образование NO<sub>x</sub> обусловлено лишь окислением азота кислородом, так как азотные соединения при перегонке нефти остаются в тяжелых фракциях [6, 10, 11].

Термические оксиды азота образуются во время процесса окисления азота, осуществляемого за фронтом пламени атмосферным кислородом. Их образование не зависит от химического состава топлива, если оно не содержит азота, а целиком и полностью определяются максимальной температурой сгорания. При высокой скорости охлаждения продуктов сгорания выбросы NO<sub>x</sub> снижаются. В бедных ТВС концентрация NO<sub>x</sub> определяется максимальной температурой сгорания, в богатых — выход NO<sub>x</sub> определяется кинетикой разложения. При максимальной температуре сгорания не наблюдается превышение равновесной концентрации данных выбросов. На количество образовавшихся NO<sub>x</sub> существенно влияет неравномерность распределения температуры в зоне продуктов сгорания бедных ТВС и незначительно — в зоне богатых [7, 12].

**Образование окиси и оксида углерода.** Карбоксигемоглобин, блокирующий перенос кислорода к органам и тканям, образуется, когда окись углерода связывает гемоглобин крови человека и животных. Тяжелые отравления наступают при концентрации в 0,2 % по объёму, а летальный исход — при превышении 1 % [5, 6].

Окись углерода (CO) образуется в ходе холодно-пламенных реакций в двигателях с воспламенением от сжатия во время сгорания при недостатке кислорода, или диссоциации CO<sub>2</sub> в двигателях с принудительным воспламенением топлива. Состав смеси в данных двигателях оказывает основное влияние

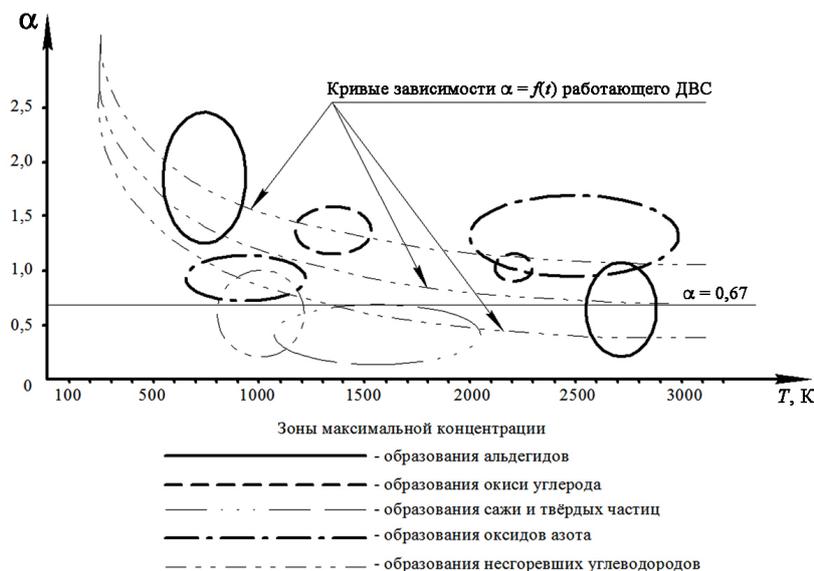


Рис. 1. Диаграмма «Коэффициент избытка воздуха — температура в цилиндре ДВС с зонами образования вредных веществ»

на образование СО: концентрация СО выше при богатой смеси. В дизелях образовавшийся СО затем окисляется до  $\text{CO}_2$ , поэтому концентрация СО в ОГ мала и зависит от качества процесса смесеобразования [9].

Также СО образуется в дизелях при избытке воздуха в условиях высокой температуры сгорания топлива под влиянием локального определенного соотношения между топливом и воздухом в камере сгорания.

**Образование углеводородов.** Различные виды углеводородов вызывают заболевания нервной, дыхательной и сердечно-сосудистой систем, а также являются канцерогеном [5, 6].

Углеводороды (СН) появляются в ОГ вследствие затухания пламени вблизи сравнительно холодных стенок КС, в «защемленных» объемах, находящихся в вытеснителях и в зазоре над верхним компрессионным кольцом между поршнем и цилиндром.

При пиролизе молекул топлива в переобогащенных зонах СН образуются и попадают в ОГ при недостаточном количестве кислорода. СН выбрасываются в атмосферу вследствие нарушения герметичности системы вентиляции картера или выпускного клапана, пропусков воспламенения, а также из-за испарения топлива в топливном баке или системе впрыска [9, 11].

**Образование альдегидов.** В ДВС, работающих на дизельных, бензиновых и газовых топливах, могут образоваться альдегиды, если процесс сгорания частично протекает при низких для него температурах (не более 500...800 К). В двигателях с послойным смесеобразованием это наблюдается в конце процесса сгорания при охлаждении смеси холодными поверхностями камеры сгорания или при сгорании обедненной смеси ( $\alpha = 0,7...0,9$ ). Одним из главных источников первичных альдегидов в цилиндре дизельного ДВС служат остаточные газы. По своему происхождению альдегиды, выделяемые с ОГ, не связаны непосредственно с процессом основного сгорания в цилиндре дизеля, а образуются при выпуске отработавших газов в конце процесса расширения. Источниками альдегидов в этом случае могут быть топливо, подтекающее из распылителя после отсечки; ТВС, находящаяся у стенок цилиндра.

Главным же источником альдегидов является пленка смазочного масла, остающаяся на стенках цилиндра при движении поршня в ходе такта расширения [13].

Альдегиды в ходе непосредственной реакции с кислородом образуют гидроперекиси, дающие радикалы путем разрыва перекисной связи. Получившиеся при этом цепи, в свою очередь, увеличивают концентрацию альдегидов до достижения некоторого равновесия между образующимися и разрушающимися альдегидами. Образование альдегидов проходит при 530...660 К. В ОГ ДВС образуются следующие альдегиды: ацетальдегид, акролеин, бензальдегид, формальдегид, толуальдегид, фурфурол). В целом содержание альдегидов в ОГ бензиновых двигателей может достигать 240 мг/м<sup>3</sup>, а в ОГ дизельных двигателей — 30 мг/м<sup>3</sup>.

**Образование сажи.** Частицы сажи представляют собой агломерат кристаллов, состоящих из набора отдельных сеток графитовых шестиугольников. Образование сажи является объемным процессом пиролиза углеводородов в газовой фазе при сильном недостатке окислителя. Оно наблюдается при нагревании выше 1300...1800 К в зонах КС во время разложения углеводородов топлива при недостатке кислорода. Для дизельного двигателя диапазон  $\alpha$ , при котором происходит наиболее интенсивное образование сажи, равен 0,33...0,7. Ускоренное образование сажи наблюдается в КС при температуре 2050 К, а максимальная концентрация — при 2200 К. Количество сажи в ОГ уменьшается при более высоких температурах, когда скорость окисления сажи превышает скорость ее образования [13].

Выделение сажи происходит в три этапа. Первым этапом является образование зародыша, вторым — рост зародыша в частице фазы, третьим — коагуляция (поверхностный рост) первичных сажевых частиц. При этом предполагается, что порядка 95 % сажи образуется во время третьего этапа, а не первого.

Выбросы частиц сажи при работе бензиновых ДВС ниже, чем при работе дизельных двигателей. Тем не менее данные частицы обнаруживаются даже в выхлопе бензиновых ДВС с непосредственным впрыском топлива. Поэтому есть предложения

по ограничению предельного содержания частиц в ОГ автомобилей.

На диаграмме «коэффициент избытка воздуха — температура в цилиндре ДВС» (рис. 1), предложенной в работе [13], представлены зоны максимальной концентрации вредных веществ.

Данная диаграмма дает наглядное представление зон максимальной концентрации рассмотренных выше вредных веществ. При этом данная диаграмма не дает полного представления о характере образования вредных выбросов, поскольку не учитывает давление в цилиндре.

При использовании модифицированных поршней, таких как с керамическим, корундовым или каталитическим покрытием, происходит изменение температуры в цилиндре [4, 14–17].

При этом использование поршней с каталитическим покрытием способствует сокращению эмиссии углеводородов и окиси углерода, а также оказывает незначительное влияние на выбросы альдегидов и оксидов азота [4, 14]. С учетом использования данных модификаций поршней, области концентрации данных веществ изменят свой вид и местоположение из-за изменения характеристик рабочего процесса.

**Выводы.** Обобщение и анализ путей образования вредных выбросов в ОГ ДВС позволяет подробнее рассмотреть возможные пути их снижения. При этом становится возможным выбор способа уменьшения выбросов не только для конкретных веществ, но и в целом для всех вредных выбросов. При этом установлено, что произойдет сокращение зон максимальной концентрации образования вредных веществ. В дальнейших исследованиях будут представлены и подробно рассмотрены пути снижения выбросов вредных веществ.

#### Библиографический список

1. Единообразные предписания, касающиеся подлежащих принятию мер по ограничению выбросов загрязняющих газообразных веществ и твердых частиц из двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенных для использования на транспортных средствах, а также выбросов загрязняющих газообразных веществ из двигателей с принудительным зажиганием, работающих на природном газе или сжиженном нефтяном газе и предназначенных для использования на транспортных средствах: Правила ООН № 49. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

2. О безопасности колесных транспортных средств: технический регламент таможенного союза ТР ТС 018/2011 от 09.12.2011 № 877. URL: [http://rosavtostransport.ru/netcat\\_files/58/59/O\\_BEZOPASNOSTI\\_KOLESNYH\\_TRANSPORTNYH\\_SREDSTV.pdf](http://rosavtostransport.ru/netcat_files/58/59/O_BEZOPASNOSTI_KOLESNYH_TRANSPORTNYH_SREDSTV.pdf) (дата обращения: 07.05.2016).

3. Ведрученко В. Р., Литвинов П. В. Анализ требований к нормативам выбросов вредных веществ // Архитектура, строительство, транспорт: материалы междунар. науч.-практ. конф. URL: <file:///C:/Users/user/Downloads/Анализ%20требований%20к%20нормативам%20выбросов.pdf> (дата обращения: 07.05.2016).

4. Ведрученко В. Р., Иванов А. Л., Борисов В. А., Литвинов П. В. Влияние материала поршня на процесс сгорания топлива в двигателе // Вестник СибАДИ. 2016. № 5 (51). С. 61–68.

5. Чиркова А. И., Литвинов П. В. Зеленые насаждения как метод защиты от шума и вредных выбросов двигателей внутреннего сгорания в сельской местности // Молодой учёный. 2017. № 11 (145). С. 173–176.

6. Шароглазов Б. А., Шишков В. В. Поршневые двигатели: теория, моделирование и расчет процессов. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2011. 525 с.

7. Дерячев А. Д. Эмпирическая модель оценки концентрации оксидов азота при добавке водорода в ТВС двигателей с искровым зажиганием: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. Тольятти. 2015. 150 с.

8. Шатров М. Г. [и др.]. Автомобильные двигатели / под ред. М. Г. Шатрова. 2-е изд., испр. М.: Издат. центр Академия, 2011. 464 с.

9. Луканин В. Н., Морозов К. А. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов / под ред. В. Н. Луканина. М.: Высш. шк., 1995. 369 с.

10. Eberius H. [et al.]. Konversion von brennstoffgebundenem Stickstoff am Beispiel von dotierten Propan-Luft-Flammen // VDI-Berichte. 1987. Vol. 645. P. 626–645.

11. Звонов В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1981. 160 с.

12. Зельдович Я. Б. [и др.]. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 478 с.

13. Лашко В. А., Привальцев И. Ю. Образование выбросов отработавших газов и управление процессом сгорания в поршневом двигателе // Учёные заметки ТОГУ. 2014. Т. 5, № 1. С. 324–337.

14. Ведрученко В. Р., Иванов А. Л., Борисов В. А., Литвинов П. В. Обоснование выбора каталитического покрытия камеры сгорания поршневого двигателя // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации: материалы междунар. науч.-практ. конф. Омск: Изд-во СибАДИ, 2016. С. 654–660. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28180358> (дата обращения 24.03.2017).

15. Ciniviz M. [et al.]. Ceramic Coating Applications and Research Fields for Internal Combustion Engines // Ceramic Coatings – Applications in Engineering. 2012. ISBN 978-953-51-0083-6. DOI: 10.5772/29993. URL: <http://www.intechopen.com/books/ceramic-coatings-applications-in-engineering/ceramic-coating-applications-and-research-fields-for-internal-combustion-engines> (дата обращения: 03.10.2016 г).

16. Hu Z, Ladommatos N. In-Cylinder Catalysts – A Novel Approach to Reduce Hydrocarbon Emissions from Spark-Ignition Engines // SAE Technical Paper 952419. 1995. DOI 10.4271/952419.

17. Zeng W., Xie M. A novel approach to reduce hydrocarbon emissions from the HCCI engine // Chemical engineering journal. 2008. Vol. 139, Issue 2. P. 380–389.

**ВЕДРУЧЕНКО Виктор Родионович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Теплоэнергетика» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС).

Адрес для переписки: [vedruchenkovr@mail.ru](mailto:vedruchenkovr@mail.ru)

**ИВАНОВ Александр Леонидович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Тепловые двигатели и автотракторное электрооборудование» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ).

Адрес для переписки: [alsib07@yandex.ru](mailto:alsib07@yandex.ru)

**БОРИСОВ Вадим Андреевич**, кандидат химических наук, научный сотрудник Института проблем переработки углеводородов СО РАН; старший преподаватель кафедры «Химическая технология и биотехнология» Омского государственного технического университета.

Адрес для переписки: [borisovtiger86@mail.ru](mailto:borisovtiger86@mail.ru)

**ЛИТВИНОВ Павел Васильевич**, аспирант кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС; инженер кафедры «Тепловые двигатели и автотракторное электрооборудование» СибАДИ.

Адрес для переписки: [p\\_vasilich55@mail.ru](mailto:p_vasilich55@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 15.05.2017 г.

© В. Р. Ведрученко, А. Л. Иванов, В. А. Борисов,

П. В. Литвинов

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ТИХОХОДНЫХ ДЛИННОХОДОВЫХ БЕССМАЗОЧНЫХ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТУПЕНЕЙ НА БАЗЕ ВЕРИФИЦИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

Расчетно-параметрический анализ эффективности рабочего процесса воздушной бесшмазочной тихоходной длинноходовой ступени компрессорного агрегата среднего давления выполнен на базе верифицированной методики расчета. В статье рассмотрено влияние на температуру нагнетания, индикаторный КПД и коэффициент подачи основных конструктивных и режимных параметров ступени. Расчеты показали, что такие параметры, как время цикла, диаметр цилиндра и ход, оказывают существенное влияние на экономичность рабочего процесса и температурный режим ступени и могут являться параметрами оптимизации при разработке поршневой ступени такого типа.

**Ключевые слова:** тихоходный поршневой компрессор; рабочие процессы; теплообмен; температура нагнетания, индикаторная диаграмма, температурная диаграмма, математическое моделирование, среднее давление

*Прикладные научные исследования и экспериментальные разработки проводятся при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57715X0203.*

Повышенные требования к уровню шума и вибрации компрессорного оборудования, а также необходимость снижения температуры нагнетания в поршневых компрессорных агрегатах при средних и высоких давлениях привели к необходимости поиска альтернативных конструкций компрессорных агрегатов, одной из которых является компрессор на базе тихоходной длинноходовой поршневой ступени с интенсивным внешним охлаждением цилиндра [1–3]. Предварительные теоретические и экспериментальные исследования, проведенные при некоторых фиксированных конструктивных и режимных параметрах ступени, подтвердили реальную возможность повышения давления в одной ступени с атмосферного до среднего (степень повышения давления до 30) при температуре нагнетания, существенно ниже допустимой величины, принятой для ступеней со стандартной степенью повышения давления (2...5) [4–9]. При этом для существующих конструкций такие показатели эффективности рабочего процесса, как КПД и коэффициент пода-

чи, резко падали при увеличении степени повышения давления, что неприемлемо для практической реализации такого варианта исполнения поршневой компрессорного агрегата. В связи с этим актуальной становится задача анализа эффективности работы тихоходной длинноходовой поршневой ступени с интенсивным внешним охлаждением цилиндра при различных сочетаниях диаметра цилиндра, хода поршня и времени рабочего цикла, а также оценки перспектив применения ступеней такого типа в компрессорных агрегатах среднего давления.

Расчетный анализ рабочих процессов длинноходовой тихоходной ступени проводился при следующих условиях однозначности: геометрические условия — диаметр цилиндра; ход поршня; геометрические параметры клапанов; граничные условия — температура газа на всасывании — 293 К, давление всасывания — 0,1 МПа, давление нагнетания — до 10 МПа, температура охлаждающей среды — 293 К, коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности рабочей камеры — 10...2000 Вт/м<sup>2</sup>·К;

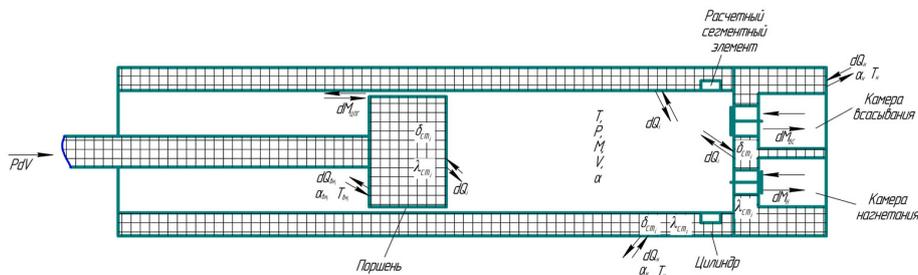
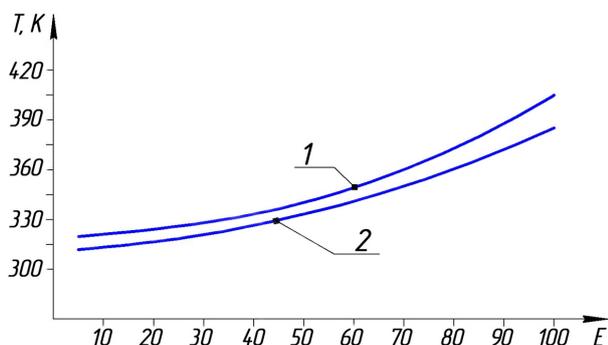
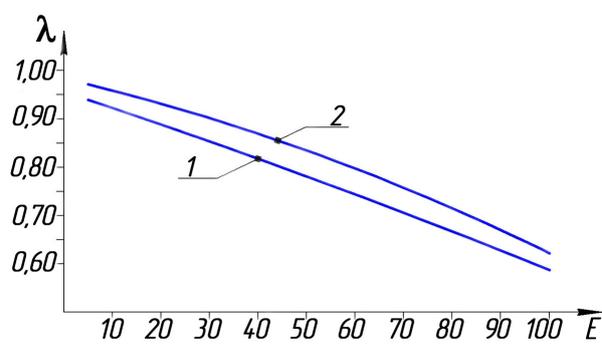


Рис. 1. Расчетная схема

Рис. 2. Изменение средней температуры нагнетаемого газа от степени повышения давления при времени цикла  $\tau = 0,25$  с: 1 — при охлаждении воздухом; 2 — при охлаждении водойРис. 3. Изменение коэффициента подачи от степени повышения давления при времени цикла  $\tau = 0,25$  с: 1 — при охлаждении воздухом; 2 — при охлаждении водой

физические условия: сжимаемый газ — воздух; начальные условия: параметры состояния газа в нижней мертвой точке.

Расчетная схема объекта исследования подробно описана в [1] и представлена на рис. 1.

Описание расчетной методики подробно представлено в ранее опубликованных работах авторов [1]. Основные допущения, принятые при выполнении расчетного анализа [7, 9, 10]: газовая среда непрерывна и гомогенна; моделируемые процессы обратимы, равновесны и квазистатичны; параметры состояния рабочего газа изменяются одновременно по всему объему рабочей камеры (ячейки); изменение потенциальной и кинетической энергии газа пренебрежимо мало; теплота трения поршневых уплотнений не подводится к газу; параметры состояния в полостях всасывания и нагнетания постоянны; течение рабочего газа через газораспределительные органы и конструктивные зазоры принимается адиабатным и квазистационарным; теплообмен между газом и стенками рабочих полостей конвективный и может быть описан формулой Ньютона — Рихмана; теплообмен на внешних поверхностях стенок деталей, формирующих рабочую камеру, определяется при постоянном по времени коэффициенте теплоотдачи, выбранном для рассматриваемого участка теплообменной поверхности; в стенках рабочей камеры отсутствуют внутренние источники тепла.

Определение нестационарных граничных условий на внутренних поверхностях стенок рабочей камеры ступени производятся путем расчета рабочего цикла ступени поршневого компрессора с использованием математической модели рабочих процессов этого цикла, базирующейся на общепринятой системе упрощающих допущений и основных расчетах уравнений, включающих уравнение закона сохранения энергии для тела переменной

массы, уравнение массового баланса, уравнение состояния, следствие закона Джоуля для внутренней энергии газа, уравнения расхода газа через клапан и конвективного теплообмена между газом и стенками рабочей камеры. Математические модели компрессорной ступени такого типа классифицируются как модели второго уровня и широко применяются в практике исследования и проектирования компрессоров объемного принципа действия [11–15].

Уравнение конвективного теплообмена между рабочим газом и стенками рабочей камеры, используемое применительно к внутренним поверхностям расчетных элементов, формирующих поверхности стенок рабочей камеры, определяет величину нестационарного циклического теплового потока между этими поверхностями и рабочим газом и, следовательно, взаимозависимые процессы теплопроводности через отдельные участки стенок рабочей камеры, параметры состояния рабочего газа и интегральные характеристики рабочего цикла. Для определения коэффициента теплоотдачи применяется известная формула Прилуцкого И. К. [16].

Граничные условия на внешней поверхности стенок рабочей камеры носят слабопеременный характер, обусловленный малой амплитудой изменения температуры стенок за время рабочего цикла [5, 14, 17, 18] и практически постоянными параметрами охлаждающей среды. Комплексным параметром, характеризующим условия внешнего теплоотвода, является приведенный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{np}$ , а также температура охлаждающей среды.

В общем случае анализ формирования нестационарных температурных полей в стенках рабочей камеры ступени может быть проведен путем решения заданной задачи теплопроводности для системы конструктивных элементов, формирующих рабочую камеру ступени, со взаимозависимыми быстроизменяющимися граничными условиями

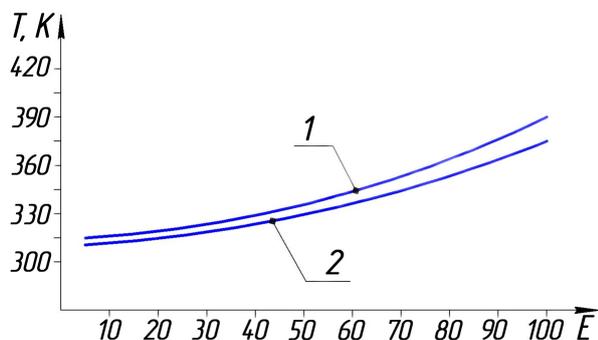


Рис. 4. Изменение средней температуры нагнетаемого газа от степени повышения давления при времени цикла  $\tau = 0,5$  с: 1 — при охлаждении воздухом; 2 — при охлаждении водой

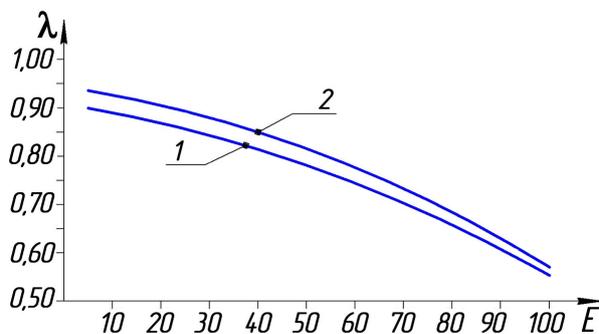


Рис. 5. Изменение коэффициента подачи от степени повышения давления при времени цикла  $\tau = 0,5$  с: 1 — при охлаждении воздухом; 2 — при охлаждении водой

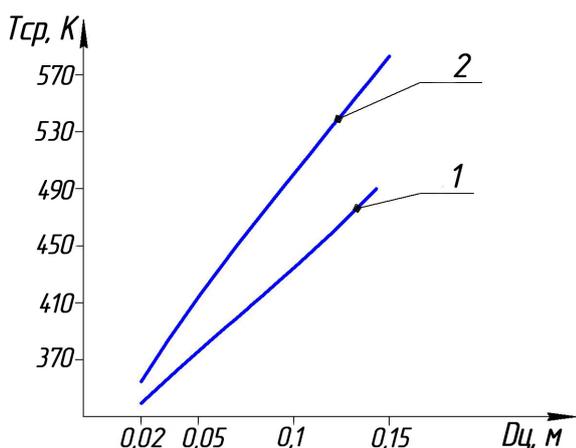


Рис. 6. Зависимость средней температуры газа от диаметра цилиндра (ход поршня 0,2 м) при времени цикла: 1 —  $\tau = 0,5$ ; 2 —  $\tau = 0,25$

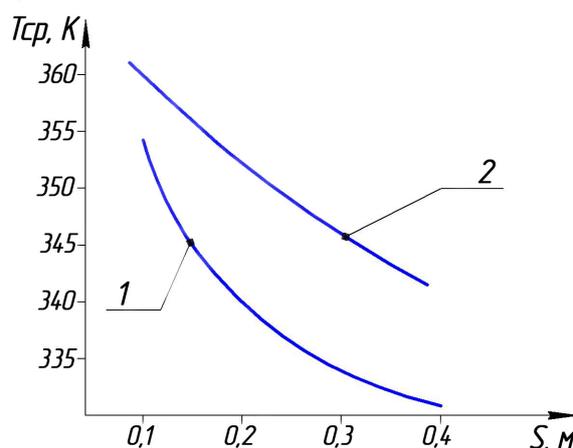


Рис. 7. Зависимость средней температуры газа от хода поршня ( $D_{ц} = 0,02$  м) при времени цикла: 1 —  $\tau = 1$ ; 2 —  $\tau = 0,5$ ; 3 —  $\tau = 0,25$

на внутренней поверхности стенок рабочей камеры, обусловленные характером изменения параметров состояния, поверхностей и теплофизических свойств газа, и с нестабильно изменяющимися граничными условиями внешней поверхности стенок рабочей камеры [2, 6]. Разработанная методика расчёта реализована в программном пакете PASCAL.

На рис. 2–7 представлены результаты расчета температуры нагнетания и коэффициента подачи тихоходной длинноходовой поршневой ступени с интенсивным внешним охлаждением цилиндра в зависимости от степени повышения давления воздуха в ступени и времени рабочего цикла. Расчет производился для диаметра цилиндра 0,02 м и хода поршня 0,2 м; внешнее охлаждение — вода или воздух.

Из результатов, представленных на рис. 2, 4, видно, что при повышении давления воздуха в одной тихоходной ступени с атмосферного до давлений, близких к 10 МПа, средняя температура нагнетания не превышает 390 К при водяном охлаждении и 420 К при интенсивном воздушном охлаждении цилиндра. Уместно отметить, что в настоящее время такие температурные режимы характерны для отдельных ступеней воздушных многоступенчатых компрессорных агрегатов, степень повышения давления в каждой из которых обычно не превышает 4–6. Это открывает перспективы применения одноступенчатых схем для получения сжатых газов среднего давления, в том числе без дополнительно-

го теплообменного оборудования. Важно отметить и то, что в ряде случаев возможно применение воздушного охлаждения, при котором температурный режим ступени по сравнению с водяным охлаждением ухудшается на 5...30 К. Это позволит дополнительно упростить систему охлаждения компрессорного агрегата. Однако при увеличении степени повышения давления резко падает коэффициент подачи (и, соответственно, индикаторный КПД), что во многом объясняется влиянием неплотностей в рабочей камере ступени. Так, при степени повышения давления в ступени до 30...40 эффективность рабочего процесса можно считать приемлемой для практической реализации, однако для режимов с и более высокими давлениями нагнетания необходимо искать пути повышения эффективности рабочего процесса. Как видно из результатов, представленных на рис. 3, 5 одним из таких путей является уменьшение времени рабочего цикла.

Еще одним направлением совершенствования ступени является рациональный выбор ее основных конструктивных размеров. На рис. 6–9 представлены результаты расчёта температуры нагнетания, КПД и коэффициента подачи тихоходной длинноходовой поршневой ступени с интенсивным внешним охлаждением цилиндра в зависимости от диаметра цилиндра и хода поршня. Расчет производился для давления всасывания 0,1 МПа, давления нагнетания 10,0 МПа; внешнее охлаждение цилиндра — водяное.

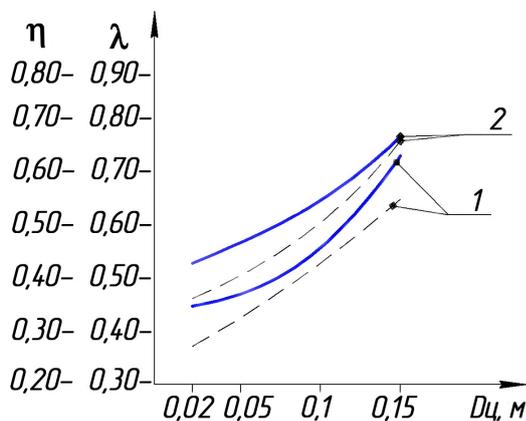


Рис. 8. Зависимость коэффициента подачи изотермического кпд от диаметра цилиндра ( $S = 0,2$  м):  
1 — время цикла  $\tau = 0,5$  с; 2 — время цикла  $\tau = 0,125$  с  
— коэффициент подачи;  
----- изотермический кпд

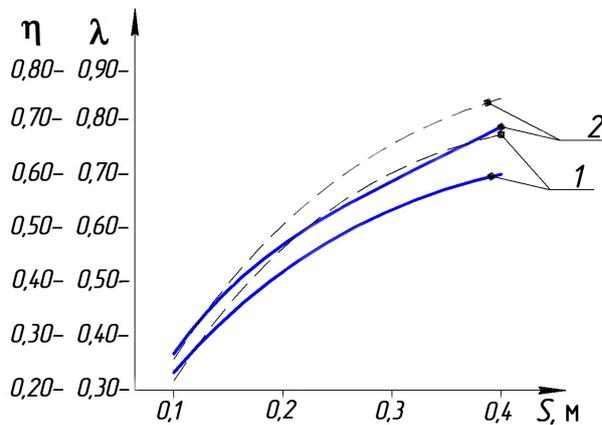


Рис. 9. Зависимость коэффициента подачи изотермического кпд от хода поршня ( $D_c = 0,02$  м):  
1 — время цикла  $\tau = 0,5$  с;  
2 — время цикла  $\tau = 0,25$  с;  
— коэффициент подачи;  
----- изотермический кпд

Как видно из представленных результатов (рис. 6, 8), увеличение диаметра цилиндра позволяет существенно повысить эффективность рабочего процесса ступени: в рассматриваемом диапазоне диаметров абсолютное увеличение индикаторного КПД и коэффициента подачи составило 30...35 %; однако при этом наблюдается рост средней температуры нагнетания на 100...200 К, что является существенным ограничением возможного диапазона применяемых диаметров цилиндра. Применительно к величине хода поршня теоретически нет ограничений по выбору его величины: как видно из результатов, представленных на рис. 7, 9, при увеличении хода поршня в рассматриваемом диапазоне наблюдался рост индикаторного КПД и коэффициента подачи при одновременном снижении средней температуры нагнетания

Проведенный теоретический анализ эффективности рабочего процесса воздушной бесшмазочной тихоходной длинноходовой ступени компрессорного агрегата среднего давления, обеспечивающей повышение давления воздуха с атмосферного на всасывании до близких к 10,0 МПа на нагнетании, показал, что при рациональном сочетании основных размеров и параметров такой ступени возможно достижение требуемых показателей эффективности рабочего процесса (индикаторного КПД и коэффициента подачи) при обеспечении низкой температуры нагнетаемого газа. Несмотря на преимущественно качественный характер полученных теоретических результатов, можно с большой долей оптимизма предположить, что при грамотных конструкторских решениях компрессорные агрегаты среднего давления на базе бесшмазочных тихоходных длинноходовых ступеней смогут составить конкуренцию существующим серийно выпускаемым мембранным и многоступенчатым поршневым агрегатам.

#### Библиографический список

1. Yusha V. L., Dengin V. G., Karagusev V. I., Busarov S. S. Theoretical analysis of the working process of the superlow rotary low expense piston compressor with the increased piston stroke // 8th International Conference on Compressors and Coolants. Papiernicka. 2013. Slovakia: Book of abstracts. P. 22.

2. Yusha V. L., Dengin V. G., Busarov S. S., Nedovenchanyi A. V., Gromov A. Yu.. The estimation of thermal conditions of highly-cooled long-stroke stages in reciprocating compressors // International Conference on Oil and Gas Engineering. OGE-2015. Procedia Engineering: Elsevier BV. 2015. Vol. 113. P. 264–269.

3. Yusha V. L., Busarov S. S., Goshlyu R. Yu., Nedovenchanyi A. V., Sazhin B. S., Chizhikov M. A., Busarov I. S. The experimental research of the thermal conditions in slow speed stage of air reciprocating compressor // International Conference on Oil and Gas Engineering. OGE-2016. Procedia Engineering: Elsevier BV. 2016. Vol. 152. P. 297–302.

4. Пластинин П. И. Расчет и исследование поршневых компрессоров с использованием ЭМВ // Итоги науки и техники. Сер. Насосостроение и компрессоростроение. М.: ВИНТИ, 1981. Т. 2. 168 с.

5. Пластинин П. И. Теория и расчет поршневых компрессоров. М.: Агропромиздат, 1987. 271 с.

6. Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 1. Теория и расчет. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 2000. 456 с. ISBN 510003525.

7. Фотин Б. С. Поршневые компрессоры. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 372 с.

8. Френкель М. И. Поршневые компрессоры. Теория, конструкции и основы проектирования. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1969. 744 с.

9. Хрусталёв Б. С. Математическое моделирование рабочих процессов в объемных компрессорах для решения задач автоматизированного проектирования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1999. 58 с.

10. Пластинин П. И., Твалчрелидзе А. К. Введение в математическое моделирование поршневых компрессоров. М.: Изд-во МВТУ им. Баумана, 1976. 78 с.

11. Воронков С. С. Математическая модель рабочего процесса высокооборотного двухступенчатого поршневого компрессора с учетом нестационарных явлений в коммуникациях: дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛПИ, 1982.

12. Науменко А. И. Исследование теплообмена в поршневых компрессорах: дис. ... канд. техн. наук. М., 1974. 180 с.

13. Самарский А. А. Теория разностных схем. 3-е изд., испр. М.: Наука, 1989. — 616 с.

14. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 364 с.

15. Самарский А. А., Николаев Е. С. Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978. 592 с.

16. Прилуцкий А. И., Прилуцкий И. К., Иванов Д. Н., Демаков А. С. Теплообмен в ступенях машин объемного дей-

ствия. Современный подход // Компрессорная техника и пневматика. 2009. № 2. С. 16–23.

17. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1980. 535 с.

18. Михлин С. Г. Приближенные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений. М.: Наука, 1965. 384 с.

**БУСАРОВ Сергей Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

**ВАСИЛЬЕВ Владимир Константинович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

**БУСАРОВ Игорь Сергеевич**, ассистент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

**САЖИН Богдан Сергеевич**, магистрант группы Хм-151 факультета «Элитное образование и магистратура».

**ПАНИН Юрий Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология».

Адрес для переписки: bssi1980@mail.ru

Статья поступила в редакцию 03.06.2017 г.

© С. С. Бусаров, В. К. Васильев, И. С. Бусаров, Б. С. Сажин, Ю. Н. Панин

УДК 697.341

**С. В. ГЛУХОВ**  
**М. В. ГЛУХОВА**  
**С. В. ЧИЧЕРИН**

Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

## О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОТЕЛЬНОЙ НА ВОЗОБНОВЛЯЕМОМ ТОПЛИВЕ (БЫТОВОМ МУСОРЕ) В СИСТЕМЕ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА ОМСКА

Проведен анализ оптимального расположения площадки термической утилизации бытового мусора (или подготовленного топлива на его основе) с определением тепловой мощности установки, исходя из величины замещаемых тепловых нагрузок, а также конкурентной стоимости одной Гкал отпущенной тепловой энергии. Утвержденные тарифы на отпуск тепловой энергии отопительных котельных превышают предельный уровень стоимости, рассчитанный по методу «альтернативной котельной» для источника на RDF-топливе. После обобщения имеющихся сведений начата работа над новой научно обоснованной, применимой в отечественных реалиях и пригодной для автоматизированной обработки последовательности действий. Предложен алгоритм для решения данной задачи, а также создания необходимого методологического аппарата.

**Ключевые слова:** теплоснабжение, мусоросжигание, твердые бытовые отходы, источник, тариф, топливо.

Наступивший 2017-й год в Российской Федерации объявлен Указом Президента Российской Федерации Годом экологии.

Сложная экологическая ситуация в нашей стране предопределила ужесточение проводимой государственной экологической политики и, в частности, в области обращения с отходами. По оценке профильных ведомств ежегодный объем образующегося в РФ мусора достигает 60 млн тонн [1], причем на долю такого крупного города, как Омск, приходится порядка 0,6 млн тонн в год.

Традиционным способом использования отходов является их захоронение на полигонах, однако с принятием «Концепции долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2020 года» и «Основ государственной политики в области

экологического развития РФ до 2030 года» в качестве основного способа обращения с отходами принята их утилизация, в т.ч. с внедрением новых эффективных технологий производства электрической и тепловой энергий.

В настоящее время в регионах принимаются программы обращения с отходами, направленные на внедрение схем утилизации и раздельного сбора мусора.

В городе Омске вопрос утилизации отходов стоит особенно остро, поскольку на начало 2017 года не принято решение о строительстве заводов по утилизации отходов. Вместе с тем последние два десятилетия на ряде областных форумов активно обсуждается возможность строительства мусоросжигательного завода.

Различными авторами указывается ряд негативных тенденций размещения данного объекта в Омской области в частности и в целом в городской среде (вблизи населенных пунктов), однако мировой опыт [2] и результаты инженерно-экологической экспертизы подобных проектов в Московской области и Республике Татарстан говорят о том, что технологии очистки при сжигании и утилизации бытового мусора существуют и активно внедряются. Регламентируется возможность включения в схему теплоснабжения населенного пункта источника теплоснабжения на возобновляемом виде топлива и в последней редакции [3].

Вместе с тем в литературе подчеркивается [4, 5], что приемлемая себестоимость термической утилизации одной тонны бытового мусора может быть достигнута только путем реализации тепловой энергии как попутного продукта при внедрении технологии. С учетом этого проведен анализ оптимального расположения площадки термической утилизации бытового мусора (или подготовленного топлива на его основе) с определением тепловой мощности установки, исходя из величины замещаемых тепловых нагрузок, а также конкурентной стоимости одной Гкал отпущенной тепловой энергии.

Очевидно, что за рубежом накоплен куда больший опыт строительства и эксплуатации предприятий утилизации отходов, что позволило, обобщив имеющиеся сведения [6], начать работу над новой, научно обоснованной, применимой в отечественных реалиях и пригодной для автоматизированной обработки последовательности действий. Таким образом, для решения данной задачи, а также создания необходимого методологического аппарата, авторами предложен следующий комплексный алгоритм:

1. Обобщение законодательных ограничений и нормативно-технической документации.
2. Оценка ключевых рисков влияния на окружающую среду.
  - 2.1. Выбросы в воздух и сбросы в поверхностные источники водоснабжения.
  - 2.2. Строительно-монтажные риски.
  - 2.3. Шум и вибрация.
  - 2.4. Потребление материально-технических и энергетических ресурсов в процессе строительства.
3. Выбор технологии.
  - 3.1. Сбор, подготовка и хранение топлива:
    - твердые коммунальные отходы (ТКО);
    - промышленные отходы;
    - иловый осадок.
  - 3.2. Оценка стоимости производства 1 т у. т. подготовленного топлива.
  - 3.3. Этап термической переработки:
    - слоевое сжигание;
    - сжигание в простых горелочных устройствах;
    - сжигание с использованием циркулирующего кипящего слоя;
    - предварительный пиролиз и газификация;
    - другие технологии.
  - 3.4. Этап рекуперации энергии.
4. Определение мощности перспективного источника на выбранном топливе и площадки его размещения.
  5. Оценка выбросов и потребления.
    - 5.1. Выбросы в атмосферу.
    - 5.2. Вредные сбросы в воду.
    - 5.3. Энергетическая эффективность предприятия:

— удельная теплота сгорания подготовленного топлива;

— количество полезно использованной энергии топлива;

— потребление теплоты на собственные нужды;

— полезный отпуск тепловой энергии.

5.4. Оценка уровня шума;

5.5. Потребление прочих ресурсов (подпиточная вода, сжиженный или природный газ, электроэнергия).

6. Оценка капитальных затрат, стоимости производства тепловой энергии и окупаемости внедрения теплоисточника.

7. Доступные технологии повышения эффективности и безопасности технологических процессов при реконструкции завода по утилизации отходов.

7.1. Сортировка и частичная переработка поступающих отходов.

7.2. Средства увеличения турбулизации движения потоков, охлаждения рабочих элементов и контроля за сжиганием.

7.3. Рекуперация энергии посредством охлаждения уходящих газов со снижением потерь и применением тепловых насосов.

7.4. Обработка уходящих газов.

7.5. Снижение золошлаковых выбросов.

7.6. Снижение кислотосодержащих выбросов, в т. ч.  $SO_2$  и  $NO_x$ .

7.7. Снижение ртути содержащих выбросов.

7.8. Контроль качества воды и пара.

7.9. Утилизация несгораемого остатка.

Упрощенное решение задачи в рамках одного населенного пункта можно представить как совокупность решений ряда лишь основных подзадач, к которым можно отнести:

1. Определение мощности перспективной котельной на возобновляемом топливе (бытовом мусоре) на территории г. Омска и площадки ее размещения.

2. Оценка стоимости производства 1 т у. т. подготовленного топлива.

3. Оценка капитальных затрат, стоимости производства тепловой энергии и окупаемости внедрения теплоисточника.

Решение данных подзадач взаимосвязано и представляет собой задачу оптимизации, т.к. увеличение мощности теплоисточника снижает удельные капитальные затраты, но при этом увеличивает себестоимость отпуска тепловой энергии из-за увеличения транспортного плеча доставки топливного сырья (бытового мусора).

**Определение мощности перспективной котельной на возобновляемом топливе (бытовом мусоре) на территории г. Омска и площадки ее размещения.** Система теплоснабжения города Омска имеет высокую степень централизации с преимущественно комбинированной выработкой тепловой энергии. Однако значительная протяженность города по обоим берегам р. Иртыша и строительство районов комплексной застройки на городских окраинах, вдали от существующих ТЭЦ, в последнее время несколько снижают процент использования тепловой энергии выработанной в комбинированном цикле.

При выборе площадки размещения перспективной котельной авторами рассмотрены варианты нахождение поблизости теплоисточников, имеющих высокий износ основных фондов с одновременно высоким тарифом на подачу тепловой энергии и теплоносителя, а также перспективные микрорайоны,

Технико-экономические показатели источников тепловой энергии

Показатель	Наименование теплоисточника		
	котельная МП г. Омска «ТК»	котельная МП г. Омска «ТК»	котельная ООО «СМТ Стройбетон»
Адрес	п. Крутая Горка, ул. Российская, 4а	п. Береговой	ул. Байдукова, 25
Тариф на ТЭ, руб./Гкал	1650,75	1650,75	2107,55
Установленная мощность, Гкал/ч	29,07	27,08	28,38
Подключенная тепловая нагрузка, Гкал/ч	18,20	14,10	22,70*
Годовой отпуск тепла, Гкал	59 509	58 065	62 200*
Годовой расход усл. топлива, т у. т.	9628	9372	9870*

\* — данные приняты оценочно из-за отсутствия в схеме теплоснабжения г. Омска

Таблица 2

Показатели перспективной тепловой нагрузки в зоне действия котельной ООО «СМТ Стройбетон»

№ п/п	Год ввода	Тепловая нагрузка, Гкал/ч			
		на отопление	на вентиляцию	на ГВС	суммарная
1	2017	0,867	0,257	0,043	1,156
2	2019	4,803	0,234	0,937	5,974
3	2020	4,871	1,520	0,757	7,148
4	2022	7,756	1,484	1,277	10,517
5	2023	0,611	0,183	0,030	0,824
6	2024	4,074	0	1,059	5,133
7	2025	12,729	2,139	2,745	17,613
За период до 2025 года		35,711	5,817	6,848	48,365

в которых, согласно действующей схеме теплоснабжения г. Омска, предлагается строительство блочных-модульных локальных котельных.

Планируется учитывать составляющую изменения объемов потребления тепловой энергии и теплоносителя за счет ввода в эксплуатацию новых объектов и снятия (отключения) тепловой нагрузки. Так, жилой фонд 30–50-х годов постройки имеет в 2–2,5 раза выше удельную отопительную нагрузку, чем панельные дома типовых серий, а величина теплопотребления жилого объекта слабо коррелирует с его этажностью и материалом ограждающих конструкций с учетом фактического состояния и может быть точно определена лишь в результате теплотехнического расчета. Проводимый капитальный ремонт систем отопления и ГВС сопровождается установкой автоматических устройств, что несколько уменьшает суммарную тепловую нагрузку здания. При этом дома 30–50-х годов постройки с большим теплопотреблением в основном и определяют перспективу снятия нагрузки в связи с действием региональной адресной программы по переселению граждан из аварийного жилищного фонда. Значительная часть таких потребителей в настоящее время подключена по открытой схеме присоединения системы ГВС, что приводит к увеличению расхода сетевой воды [7].

В результате анализа существующих теплоисточников на предмет их износа, территориального расположения и величины тарифа на отпускаемую тепловую энергию было решено провести исследование возможности замещения существующих мощностей для теплоисточников представленных в табл. 1, на основе данных [8, 9].

Дополнительный анализ строительства в городе перспективных микрорайонов показал, что для обеспечения их тепловых нагрузок (на основе схемы теплоснабжения города) требуется ввод в эксплуатацию локальных газовых котельных (табл. 2).

По каждому из представленных в табл. 1 был проведен анализ размещения площадки котельной на возобновляемом топливе (бытовом мусоре) с учетом требований [10] и розы ветров, предлагаемые места размещения представлены на рис. 1–3.

Для каждого из представленных мест расположения перспективных котельных было рассчитано «плечо доставки» подготовленного топлива из места его предполагаемого получения Надеждинского полигона, эксплуатируемого ООО «ЖКХ «Сервис», которое составило: для котельной по ул. Байдукова — 31 км, котельной пос. Береговой — 11 км, котельной пос. Крутая Горка — 23 км.

**Оценка стоимости производства 1 т у. т. подготовленного топлива.** В качестве топлива для

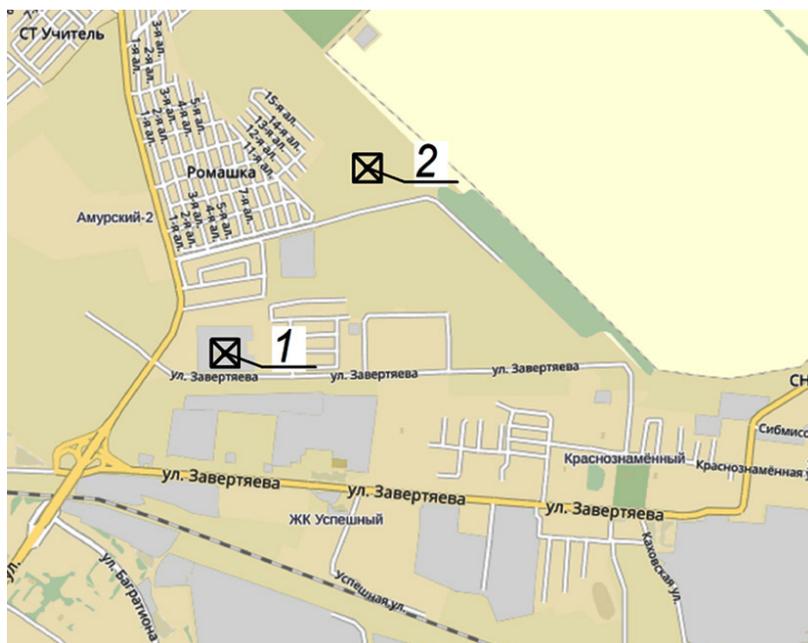


Рис. 1. Место расположения существующего (1) и перспективного (2) источника тепловой энергии по ул. Байдукова в г. Омске

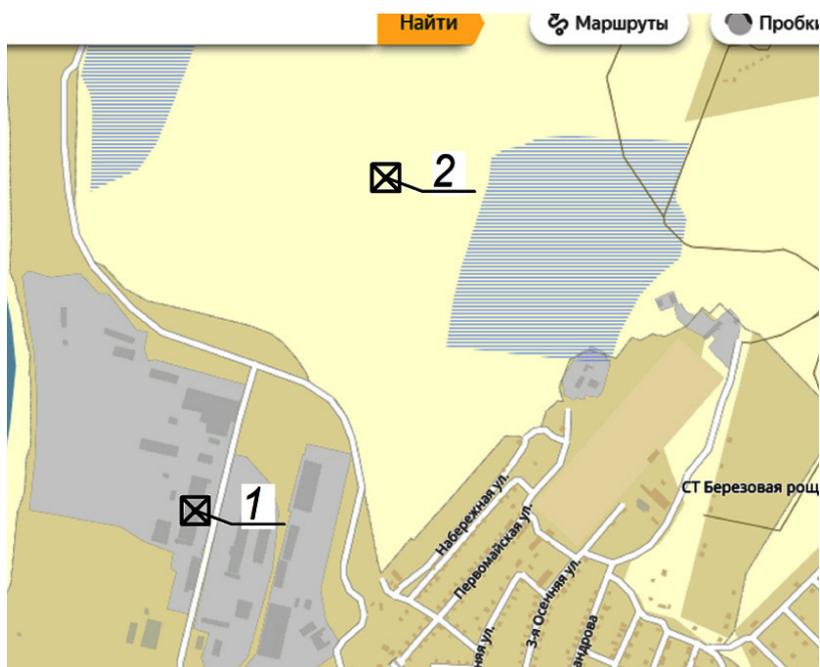


Рис. 2. Место расположения существующего (1) и перспективного (2) источника тепловой энергии в пос. Береговой

рассматриваемых перспективных котельных предлагается использовать топливо, полученное из отходов (ТПО) (по международной классификации — RDF-топливо), имеющее низшую теплоту сгорания в пределах 4200–5200 ккал/кг с рабочей влажностью в пределах  $W_p = 7,0 - 25,5 \%$  и зольностью  $A_p = 14,0 - 17,3 \%$ .

Текущие потребности трех рассматриваемых теплоисточников в топливе оцениваются на уровне 29 тыс т у.т. с перспективой роста потребления до 40 тыс т у. т.

Производительность линии по подготовке RDF-топлива с учетом коэффициента загрузки на уровне 0,8 потребления топлива в отопительном сезоне

и готовности к работе в течение 300 дней в году оценивается на уровне 9 тонн/час.

Данная производительность может быть покрыта установкой полуавтоматической линии сортировки ТБО производительностью 35 т/ч по сырью, имеющей выход RDF-топлива на уровне 25 % и вторсырья на уровне 15 % с совокупной стоимостью строительно-монтажных работ на уровне 200 млн руб. и стоимостью линии сортировки на уровне — 370 млн руб. [5].

При общем энергопотреблении завода на уровне 0,5–1,5 МВт с водопотреблением по химочищенной воде на уровне 70 куб. м/сут. и технической воды на уровне 50 куб. м/сут. себестоимость производ-



Рис. 3. Место расположения существующего (1) и перспективного (2) источника тепловой энергии в пос. Крутая Горка

Таблица 3

Оценка установленной мощности перспективных котельных и капитальных затрат

№ п/п	Наименование перспективного теплоисточника	Установленная мощность, Гкал/ч	Годовое потребление RDF-топлива, т н. т.	Ожидаемые капзатраты, млн руб.
1	котельная в пос. Крутая Горка	24	14 300	574
2	котельная в пос. Береговой	20	13 800	556
3	котельная по ул. Байдукова	36	29 780	1197

Таблица 4

Расчет предельной стоимости тепловой энергии по методу альтернативной котельной

Наименование составляющей предельного уровня цены	Наименование перспективного теплоисточника		
	котельная в пос. Крутая Горка	котельная в пос. Береговой	котельная по ул. Байдукова
— обеспечивающая компенсацию расходов на топливо, руб./Гкал	276,6	268,3	283,69
— обеспечивающая возврат капитальных затрат*, руб./Гкал	964,6	957,5	910,1
— обеспечивающая компенсацию расходов на уплату налогов, руб./Гкал	110,64	107,33	113,48
— обеспечивающая компенсацию прочих расходов, руб./Гкал	240,6	233,4	246,8
— обеспечивающая создание резерва по сомнительным долгам, руб./Гкал	39,3	38,1	40,3
Предельный уровень цены на тепловую энергию, руб./Гкал	1631,7	1604,7	1594,4
Разница с существующим тарифом, руб./Гкал	19,0	46,0	513,2
Срок окупаемости, лет	9,8	9,5	6,4

\* — период возврата инвестиций принят в расчете 10 лет.

ства 1 т RDF-топлива в ценах 2015 года составляет 500 руб./т, а отпускная цена на уровне 900–1100 руб./т.

Удельная стоимость транспортировки RDF-топлива составляет 3 руб./т·км [11]. Таким образом, с учетом затрат на транспортировку стоимость одной тонны подготовленного топлива составит: для котельной по ул. Байдукова — 1200 руб./т, котельной пос. Береговой — 1135 руб./т, котельной пос. Крутая Горка — 1170 руб./т.

**Оценка капитальных затрат, стоимости производства тепловой энергии и окупаемости внедрения теплоисточника.** На основе текущей и перспективной тепловой нагрузки рассматриваемых теплоисточников (табл. 1, 2), с учетом требований [12] и имеющихся потерь в тепловых сетях [7] был произведен анализ установленной мощности перспективных теплоисточников на ТБО, в результате получены следующие данные (см. табл. 3).

Капитальные затраты получены на основе используемых в странах ЕС технологий утилизации бытовых отходов исходя из удельных капитальных затрат 670 долл./т н.г. в год.

Оценка предельного уровня стоимости тепловой энергии была произведена в соответствии с [13] и сведена в табл. 4.

Таким образом, предельный уровень цены на тепловую энергию, выработанную перспективными котельными на возобновляемом топливе, будет ниже, чем текущий тариф от рассматриваемых котельных, при сохранении которого окупаемость внедрения составит менее 10 лет.

#### Выводы.

1. Имеющиеся технологии подготовки топлива из бытового мусора позволяют осуществлять производство RDF-топлива с теплотой сгорания, соизмеримой с бурями углями по меньшей стоимости с учетом транспортной доставки.

2. Утвержденные тарифы на отпуск тепловой энергии отопительных котельных превышают предельный уровень стоимости тепловой энергии, рассчитанной по методу альтернативной котельной для источника на RDF-топливе.

3. Замещение существующих теплоисточников котельными на RDF-топливе должно производиться только после проведения необходимой инженерно-экологической экспертизы.

#### Библиографический список

1. Пути отходов / Инфографика // Вокруг света. 2012. № 7 (2862). С. 22.
2. Ulloa P. Potential for combined heat and power and district heating and cooling from waste-to-energy facilities in the US — learning from the Danish experience: thesis. Columbia University, 2007. URL: [http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/ulloa\\_thesis.pdf](http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/ulloa_thesis.pdf) (дата обращения: 03.05.2017).
3. О требованиях к схемам теплоснабжения, порядку их разработки и утверждения: постановление Правительства РФ от 22 февраля 2012 г. № 154 (с изм. и доп.). Доступ из справ.-правовой системы «Консультант плюс».

4. Тугов А. Н. Перспективы использования твердых бытовых отходов в качестве вторичных энергетических ресурсов в России // Теплоэнергетика. 2013. № 9. С. 56–61.

5. Кайгородов О. Переработка ТБО — сочетание многих технологий // The Chemical Journal. 2015. № 1–2. С. 66–71.

6. Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques for Waste Treatments Incineration. European Commission, 2006. URL: [http://eippcb.jrc.es/europa.eu/reference/BREF/wt\\_bref\\_0806.pdf](http://eippcb.jrc.es/europa.eu/reference/BREF/wt_bref_0806.pdf) (дата обращения: 03.03.2017).

7. Чичерин С. В. Анализ единичной структуры существующего и перспективного потребления системы централизованного теплоснабжения // Инженерный вестник Дона. 2017. № 1. URL: [http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_80\\_Chicherin.pdf\\_97a961d9fa.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_80_Chicherin.pdf_97a961d9fa.pdf) (дата обращения: 03.04.2017).

8. Схема теплоснабжения города Омска на период до 2030 года (актуализация на 2016 год). URL: <http://admomsk.ru/web/guest/government/divisions/35/heat-supply-scheme> (дата обращения: 03.04.2017).

9. Тарифы на коммунальные услуги по городу Омску на 2016 год. URL: <http://www.admomsk.ru/web/guest/progress/rates/people/info-2016> (дата обращения: 12.03.2017).

10. О введении в действие новой редакции санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» (с изм. и доп.: постановление гл. гос. санитарного врача РФ от 25.09.2007 № 74. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант плюс».

11. Концепция создания мощностей по производству альтернативного топлива из твердых коммунальных отходов и его использования. Утверждено постановлением Совета министров Республики Беларусь. Прил. 4. URL: <http://www.government.by/ru/solutions/2598> (дата обращения: 03.02.2017).

12. СП 89.13330.2012. Котельные установки. Актуализированная редакция СНиП II-35-76: свод правил. М., 2012. 110 с. URL: <http://atriumn.com/assets/files/zakonodatelstvo/sp-89.13330.2012-aktualizirovannaya-redakciya-snip-ii-35-76-kotelnye-ustanovki.-normy-proektirovaniya.pdf> (дата обращения: 20.02.2017).

13. Об утверждении правил определения в ценовых зонах теплоснабжения предельного уровня цены на тепловую энергию (мощность), технико-экономических параметров работы котельных и тепловых сетей, используемых для расчета предельного уровня цены на тепловую энергию (мощность), включая правила индексации предельного уровня цены на тепловую энергию (мощность): проект постановления Правительства РФ (подготовлен Минэнерго России 05.02.2016). Доступ из справ.-правовой системы «Консультант плюс».

**ГЛУХОВ Сергей Витальевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика».

**ГЛУХОВА Мария Викторовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика».

**ЧИЧЕРИН Станислав Викторович**, аспирант кафедры «Теплоэнергетика».

Адрес для переписки: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Статья поступила в редакцию 24.04.2017 г.

© С. В. Глухов, М. В. Глухова, С. В. Чичерин

## НОВЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ СИСТЕМАМИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

В статье рассмотрены основные группы систем централизованного теплоснабжения в малых населенных пунктах с целью выявления общих сценариев развития по каждой группе в зависимости от внешних факторов. Для упрощения выбора наиболее оптимального направления модернизации предложен перечень типовых энергосберегающих мероприятий. Обоснована необходимость создания структурной единицы, отвечающей за разработку схем теплоснабжения, технических заданий на составление инвестиционных программ, программ повышения энергетической эффективности, при органах муниципальной власти.

**Ключевые слова:** система централизованного теплоснабжения, энергетическая эффективность, схема теплоснабжения, ресурсосбережение, энергетический менеджмент.

Изменение структуры экономики страны в последние десятилетия оказывает существенное влияние на потоки внутренней миграции населения и области его трудовой деятельности. Начиная с 2014 года государственная политика поддержки села получила особую значимость [1, 2]. Перед отраслью сельского хозяйства поставлена задача увеличения объемов выпуска продукции с одновременным повышением качества и сохранением конкурентоспособности с импортными товарами.

В зависимости от конкретного вида производства в аграрном секторе доля, занимаемая в структуре себестоимости энергоресурсами, может сильно варьироваться (от 3–5 % при производстве молока и до 30–40 % в теплично-парниковом хозяйстве). Немалую роль в развитии сельского хозяйства играет и обеспечение высококвалифицированными специалистами, что в настоящее время является серьезной проблемой. На привлекательность профессий в отрасли оказывают влияние как уровень оплаты труда, так и уровень комфорта условий жизнедеятельности, значительно зависящий от качества и доступности коммунальных услуг.

Основными проблемами ЖКХ в малых населенных пунктах является ветхость систем тепло- и водоснабжения, отсутствие должного обслуживания и существенный рост тарифов. Так, например, в Омской области стоимость 1 м<sup>3</sup> воды у крупнейшего поставщика АО «Омскобводопровод» в 4,3 раза превышает тариф ОАО «Омскводоканал», снабжающего водой г. Омск [3, 4].

Тарифы на тепловую энергию в населенных пунктах Омской области также в 1,5 и более раз превышают тарифы МП г. Омска «Тепловая компания» [3, 5]. В этих условиях модернизация систем коммунальной инфраструктуры, в том числе и теплоэнергетики, приобретает особую значимость.

Рассмотрим основные подходы к выбору методов повышения энергетической эффективности

систем теплоснабжения малых населенных пунктов. Традиционно малые населенные пункты подразделяют на несельскохозяйственные (транспортные, промышленные, рекреационные и пр.) и сельскохозяйственные [6], среди которых выделяют:

- со значительным развитием административных, обслуживающих и распределительных функций (районные центры);
- с местными административными и хозяйственными функциями (центры сельских поселений);
- с наличием крупного сельскохозяйственного производства;
- без производственных предприятий, с преобладанием личных подсобных хозяйств.

В свою очередь, формирование действующих систем теплоснабжения в малых населенных пунктах неразрывно связано с плотностью тепловой нагрузки, на которую в том числе влияет и распределение сфер занятости населения. При рассмотрении структуры систем централизованного теплоснабжения (СЦТ) малых населенных пунктов можно выделить следующие группы:

1. Сочетание СЦТ на базе производственно-отопительной котельной и индивидуальных источников теплоснабжения (к примеру, Красноярское городское поселение Любинского муниципального района Омской области) [7].
2. Сочетание СЦТ на базе центральной отопительной котельной и индивидуальных источников теплоснабжения (к примеру, Большереченское городское поселение Омской области) [8].
3. Сочетание СЦТ на базе квартальных отопительных котельных и индивидуальных источников теплоснабжения (к примеру, Седелниковское сельское поселение Омской области) [9].
4. Сочетание локальных котельных для теплоснабжения социальной сферы и индивидуальных источников теплоснабжения (к примеру, Замелете-

новское сельское поселение Любинского муниципального района Омской области) [10].

5. Теплоснабжение потребителей от индивидуальных котельных (к примеру, Южно-Любинское СП Омской области) [11].

На основе опыта авторов, полученного при разработке перспективных схем теплоснабжения населенных пунктов, были выделены следующие типовые сценарии эксплуатации систем теплоснабжения по каждой группе.

**СЦТ на базе производственно-отопительной котельной (ПОК) и индивидуальных источников теплоснабжения.** Такие системы теплоснабжения сложились в так называемых моногородах, поселках, которые строились для населения, обслуживающего промышленные предприятия. Их характеризует относительно высокая плотность тепловой нагрузки, наличие благоустроенного жилого фонда. При этом основные условия эксплуатации данных СЦТ могут быть следующими:

1. Промышленное предприятие успешно развивается и наращивает технологические мощности, потребляющие пар или горячую воду; при этом предприятие не заинтересовано в развитии системы теплоснабжения населенного пункта, вследствие низкой рентабельности этого процесса и, зачастую, из-за необходимости в значительной модернизации основного оборудования котельной и ее тепловых сетей.

2. Промышленное предприятие значительно снизило использование пара и горячей воды на выпуск продукции, и оборотные средства от продажи тепловой энергии и теплоносителя внешним потребителям составляют существенную величину, что делает предприятие заинтересованным в развитии системы теплоснабжения населенного пункта.

3. Промышленное предприятие сохраняет темпы производства, а также уровень потребления пара и горячей воды на технологические нужды, и тогда заинтересованность предприятия в улучшении теплотранспортирующей системы зависит от доли реализации тепла населению и социальной сфере в общем объеме доходов.

**СЦТ на базе центральной отопительной котельной (ЦК) и индивидуальных источников теплоснабжения.** Данная разновидность систем теплоснабжения встречается в большинстве районных центров как Омской области, так и прочих регионов РФ со следующими условиями эксплуатации:

1. Газификация поселка и существующей центральной котельной с постепенным снижением тепловой нагрузки, вызванной уходом потребителей на индивидуальные источники теплоснабжения.

2. Постепенное снижение тепловой нагрузки котельной, вызванное снижением численности населения поселка и закрытием промышленных производств.

3. Увеличение тепловой нагрузки центральной котельной из-за строительства объектов социальной инфраструктуры и жилых домов, а также возможным закрытием неэффективных индивидуальных котельных бюджетного сектора (как правило, на твердом топливе) и передачей их нагрузки основному источнику теплоснабжения населенного пункта.

**СЦТ на базе квартальных отопительных котельных (КК) и индивидуальных источников теплоснабжения.** Формирование этих систем теплоснабжения происходило при массовой застройке поселков. Квартальные котельные могут иметь

разный период ввода с различными показателями энергетической эффективности и износа основного и вспомогательного оборудования. Радиусы действия тепловых сетей часто могут быть как смежными, так и пересекающимися. Условия эксплуатации данного типа СЦТ характеризуются следующими особенностями:

1. Снижение подключенной тепловой нагрузки котельных, вызванное переходом потребителей на индивидуальные источники теплоснабжения и закрытием производственных предприятий.

2. Изменение структуры тепловых нагрузок, связанное с уходом промышленных потребителей, увеличением присоединенной нагрузки социальных объектов и бытовых потребителей или закрытием неэкономичных источников теплоснабжения с перераспределением нагрузки между более эффективными котельными.

3. Постепенный рост тепловых нагрузок за счет присоединения объектов жилищного строительства и коммунально-бытовых потребителей, а также роста фермерских хозяйств.

**Сочетание локальных котельных для теплоснабжения социальной сферы и индивидуальных источников теплоснабжения.** СЦТ такого вида формировались в сельских населенных пунктах с преобладающей одноэтажной застройкой, локальные котельные устанавливались, как правило, на группу социальных объектов (школы, детские сады, административные здания) и объекты бытового обслуживания населения (банно-прачечные комплексы, теплицы). Условия эксплуатации системы теплоснабжения могут характеризоваться следующими аспектами:

— снижение подключенной нагрузки при переходе ряда частных потребителей на собственные источники теплоснабжения, например, при газификации поселения;

— эксплуатация котельных со стабильным тепловым потреблением и постепенным ростом удельных эксплуатационных затрат из-за повышения износа основных фондов;

— рост теплопотребления в связи со строительством новых социально значимых объектов, например, в рамках государственной программы или при поддержке частного инвестора.

**Теплоснабжение потребителей от индивидуальных котельных.** Системы теплоснабжения на базе индивидуальных источников формировались в поселках численностью населения до 1000 человек, незначительно удаленных от населенных пунктов с развитой инфраструктурой. Из-за малой плотности тепловых нагрузок они часто остаются негазифицированными с отоплением от бытовых котлов на твердом топливе, а уровень теплопотребления условно постоянен. Изменение нагрузок может возникнуть вследствие резкого роста индивидуального жилищного строительства, связанного с ростом престижности, исполнением программы переселения или вследствие массового отъезда населения в поисках лучших условий жизни.

Для каждой из групп систем теплоснабжения в зависимости от сценария эксплуатации могут быть предложены типовые мероприятия, направленные на снижение энерго- и ресурсоемкости производства и передачи тепловой энергии, для включения их в перспективную схему теплоснабжения, а также программу повышения энергетической эффективности предприятия или инвестиционную программу, согласно требованиям нормативных



**Рис. 1. Типовые мероприятия, предлагаемые к внедрению в СЦТ на базе промышленно-отопительной котельной и индивидуальных источников теплоснабжения**

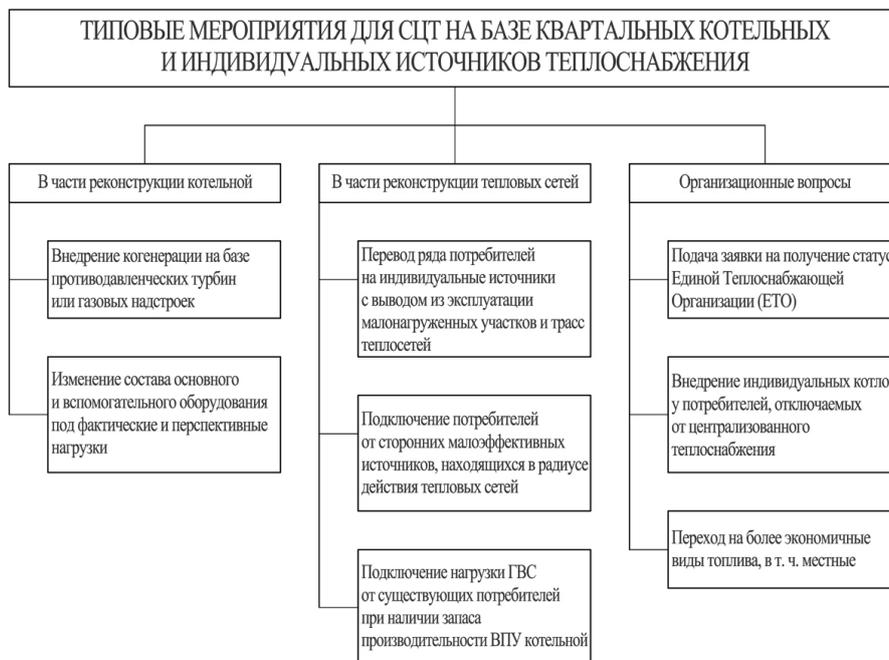


**Рис. 2. Типовые мероприятия, предлагаемые к внедрению в СЦТ на базе центральной котельной и индивидуальных источников теплоснабжения**

документов [12–16]. Предлагаемый перечень типовых мероприятий, приведенный на рис. 1–4, а также алгоритм их принятия на основе анализа технико-экономических показателей [17] по каждой группе населенных пунктов позволит упростить процесс разработки схем теплоснабжения, инвестиционных программ и программ энергосбережения. Данный подход был опробован авторами при разработке перспективных схем теплоснабжения поселений Любинского и Марьяновского муниципальных районов Омской области, что позволило

существенно сократить временные и трудовые затраты разработчиков, а также повысить качество оценки перспективного состояния систем централизованного теплоснабжения.

Для оптимизации расхода средств муниципальных бюджетов предлагается создать при региональных органах исполнительной власти (например, в Омской области при Министерстве строительства и жилищно-коммунального хозяйства) обособленное подразделение, основными задачами которого являлись бы разработка схем теплоснабжения,



**Рис. 3. Типовые мероприятия, предлагаемые к внедрению в СЦТ на базе квартальных котельных и индивидуальных источников теплоснабжения**



**Рис. 4. Типовые мероприятия, предлагаемые к внедрению в СЦТ на базе промышленно-отопительной котельной и индивидуальных источников теплоснабжения**

технических заданий на составление инвестиционных программ, программ повышения энергетической эффективности. Контроль исполнения мероприятий, прописанных в указанных выше документах, предлагается также возложить на данный отдел с привлечением для этой цели представителей соответствующих ведомств, регулирующих служб, Ростехнадзора, научных работников из профильных учебных заведений.

Организация процесса разработки и контроля программ перспективного развития СЦТ малых населенных пунктов позволит:

— принимать оптимальные технические решения с учетом формирования перспективного то-

пливного баланса региона с возможностью организации централизованных закупок, а также создания объединенных складов твердого и жидкого топлива, в том числе и местного возобновляемого;

— создать единую базу реконструируемого основного и вспомогательного оборудования с оптимизацией процесса его закупки или передачи в рамках энергетического сервиса;

— привести расчеты экономического эффекта и затрат в реконструкцию и/или новое строительство котельных и тепловых сетей к единому формату, исключив неточности и расхождения при определении значений данных параметров за счет принятия регламентирующих документов;

— подготовить перечень неэффективных систем теплоснабжения с рациональным набором энергосберегающих мероприятий для разработки конкурсной документации на заключение концессионного соглашения с возможностью привлечения управляющих организаций межрегионального уровня;

— стимулировать производство топливных пеллет из отходов сельхозпереработки и лесозаготовки, а также использование иных местных возобновляемых видов топлива путем формирования региональной программы замены неэффективных котлов в негазифицированной местности на период разработки схем теплоснабжения.

Таким образом, организация нового отдела окажет влияние не только на управление централизованным теплоснабжением на региональном уровне, но и на процесс эксплуатации отдельных котельных и теплосетей. Администрации районов и теплоснабжающие организации смогут планировать мероприятия по реконструкции объектов на средне- и долгосрочную перспективу, для органов тарифного регулирования облегчится задача проверки обоснованности инвестиционных мероприятий, а потенциальный инвестор получит доступ к достаточной информации о текущем состоянии и предлагаемым направлениям модернизации интересной ему СЦТ.

#### Библиографический список

1. О федеральной целевой программе «Устойчивое развитие сельских территорий на 2014–2017 годы и на период до 2020 года»: постановление Правительства РФ от 15 июля 2013 года № 598. URL: <http://government.ru/media/files/41d47baf642258e68c1b.pdf> (дата обращения: 03.04.2017).
2. Об утверждении долгосрочной целевой программы Омской области «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия Омской области (2013–2020 годы): постановление Правительства Омской области от 28 ноября 2012 г. № 243-п. URL: <http://docs.cntd.ru/document/467307533> (дата обращения: 03.04.2017).
3. Тарифы на коммунальные услуги по городу Омску на 2016 год. URL: [www.admomsk.ru/web/guest/progress/rates/people/info-2016](http://www.admomsk.ru/web/guest/progress/rates/people/info-2016) (дата обращения: 04.04.2017).
4. Региональная энергетическая комиссия Омской области (РСТ) // Портал публикации сведений, подлежащих свободному доступу. URL: <http://tarif.omskportal.ru/RI2/DisclosureInfo.aspx?reg=RU.6.55&razdel=Plan&sphere=TS&year=2017> (дата обращения: 04.04.2017).
5. Региональная энергетическая комиссия Омской области (РСТ) // Портал публикации сведений, подлежащих свободному доступу. URL: <http://tarif.omskportal.ru/RI2/DisclosureInfo.aspx?reg=RU.6.55&razdel=Plan&sphere=HVS&year=2016> (дата обращения: 04.04.2017).
6. Михалев Ю. А. Основы градостроительства и планировки населенных пунктов. Красноярск, 2012. 237 с.
7. Об утверждении схемы теплоснабжения Красноярского городского поселения Любинского муниципального района Омской области: постановление № 134-п от 13.11.2013. URL: [http://lubin.omskportal.ru/ru/municipal/localAuthList/3-52-229-1/poseleniya/krasnoyarskoe\\_gorodskoe/normotvorch/prav\\_akt/NPA-2013/post-2013/2013-12-13-16-00.html](http://lubin.omskportal.ru/ru/municipal/localAuthList/3-52-229-1/poseleniya/krasnoyarskoe_gorodskoe/normotvorch/prav_akt/NPA-2013/post-2013/2013-12-13-16-00.html) (дата обращения: 06.04.2017).

8. Об утверждении схемы теплоснабжения Большерецкого городского поселения на период до 2029 года: постановление № 25 от 26.05.2014. URL: [http://bolr.omskportal.ru/ru/municipal/localAuthList/3-52-203-1/poseleniya/bolsherechenskoe\\_gorodskoe/normotvorch/pravovye\\_akt/postanovlenie\\_2014.html](http://bolr.omskportal.ru/ru/municipal/localAuthList/3-52-203-1/poseleniya/bolsherechenskoe_gorodskoe/normotvorch/pravovye_akt/postanovlenie_2014.html) (дата обращения: 06.04.2017).

9. Об утверждении схем водоснабжения и теплоснабжения Седельниковского сельского поселения: постановление № 27 от 20.11.2012. URL: [http://sedel.omskportal.ru/ru/municipal/localAuthList/3-52-252-1/poseleniya/sedelnikovskoe/normotvorch/prav\\_akt/2012/post/PageContent/0/body\\_files/file25/27.pdf](http://sedel.omskportal.ru/ru/municipal/localAuthList/3-52-252-1/poseleniya/sedelnikovskoe/normotvorch/prav_akt/2012/post/PageContent/0/body_files/file25/27.pdf) (дата обращения: 06.04.2017).

10. О внесении изменений в схемы теплоснабжения Замелетеновского сельского поселения Любинского муниципального района Омской области: постановление № 36-п от 15.04.2015. URL: [http://lubin.omskportal.ru/ru/municipal/localAuthList/3-52-229-1/poseleniya/zameletenovskoe/normotvorch/prav\\_akt/NPA-2015/post-2015/post-2015-04-15-36.html](http://lubin.omskportal.ru/ru/municipal/localAuthList/3-52-229-1/poseleniya/zameletenovskoe/normotvorch/prav_akt/NPA-2015/post-2015/post-2015-04-15-36.html) (дата обращения: 06.04.2017).

11. Об утверждении схемы теплоснабжения Южно-Любинского сельского поселения Любинского муниципального района Омской области на период с 2013 до 2028 гг.: постановление № 79-п от 12.11.2013. URL: <http://lubin.omskportal.ru/ru/municipal/localAuthList/3-52-229-1/poseleniya/yujno-lyubinskoe/normotvorch/zkh.html> (дата обращения: 06.04.2017).

12. О порядке согласования и утверждения инвестиционных программ организаций, осуществляющих регулируемые виды деятельности в сфере теплоснабжения, а также требований к составу и содержанию таких программ (за исключением таких программ, утверждаемых в соответствии с законодательством Российской Федерации об электроэнергетике): постановление Правительства РФ от 5 мая 2014 года № 410. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

13. О порядке установления требований к программам в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности организаций, осуществляющих регулируемые виды деятельности: постановление Правительства РФ от 15 мая 2010 года № 340. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

14. О теплоснабжении: Федер. закон от 27.07.2010 № 190-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

15. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федер. закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

16. О требованиях к схемам теплоснабжения, порядку их разработки и утверждения: постановление Правительства РФ от 22 февраля 2012 г. № 154 (с изм. и доп.) Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

17. Глухов С. В., Коваленко А. В., Чуриков Д. А. Комплексный подход к повышению энергетической эффективности теплоснабжающих предприятий Омской области // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технология. 2015. № 1 (137). С. 134–141.

**ГЛУХОВ Сергей Витальевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика».

**ЧУРИКОВ Дмитрий Андреевич**, аспирант кафедры «Теплоэнергетика».

Адрес для переписки: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Статья поступила в редакцию 18.05.2017 г.

© С. В. Глухов, Д. А. Чуриков

## РЕШЕНИЕ РЯДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В статье рассмотрены проблемы поиска энергоэффективного режима функционирования и прогнозирования энергопотребления для одного из энергоёмких непрерывных производств, которое характеризуется нелинейностью, инерционностью и замкнутостью. Для их решения предложено детерминированное моделирование технологического процесса производства с применением нечеткой логики. Для решения оптимизационной задачи поиска энергоэффективного режима применен генетический алгоритм, в результате которого получены значения управляющих технологических параметров, обеспечивающих снижение энергозатрат производства. Для прогнозирования энергопотребления предложена модель динамического характера, позволяющая при любых технологических режимах определять электропотребление производства без ретроспективных данных.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, прогнозирование, энергопотребление, моделирование, энергоёмкое производство, генетический алгоритм.

**Актуальность.** Современный этап экономического развития выдвигает ряд задач энергетического характера перед промышленными предприятиями. Одна из этих задач — повышение энергоэффективности [1] функционирования, которая является основой стабильного существования любого производства и сохранения природной среды [2]. Другая актуальная задача энергетического характера — проблема более точного прогнозирования электропотребления для:

1) составления договоров на покупку электроэнергии с ежемесячной разбивкой и почасовой детализацией;

2) уменьшения неравномерности графиков электрической нагрузки за счет привлечения потребителей к ее выравниванию [3].

Пути решения этих сложных в общем случае задач являются определяющей тенденцией развития промышленности и требуют привлечения научного потенциала.

Перечисленные выше задачи в настоящее время особо остро стоят перед энергоёмким производством алюминия ввиду резкого падения мировых цен на него. Сырьем для электролитического получения металла алюминия является глинозем (технический оксид алюминия), который вырабатывают на крупнотоннажных непрерывных производствах наиболее широко распространенным способом Байера. По этому способу работает большинство заводов в мире (производительность среднего глиноземного завода — 1 млн тонн продукта в год, мощность такого завода составляет около 200 МВт).

Производство глинозема относится к непрерывным замкнутым инерционным производствам, зависимости технологических параметров которых носят нелинейный характер [4]. Эта особенность не позволяет использовать ретроспективные

данные для построения прогнозных моделей, основанных на статистике (существует отрицательный опыт такой попытки [5, 6]). Поэтому для решения двух выше означенных задач были разработаны две модели с использованием уравнений материального баланса и методов искусственного интеллекта.

Первая модель статического характера была использована для поиска технического решения повышения энергоэффективности технологического процесса Байера [5]. Вторая модель динамического характера [6, 7] — для построения более точных прогнозов потребления мощности с ежемесячной разбивкой и почасовой детализацией, а также решения задачи выравнивания графика нагрузки.

**Решение задачи повышения энергоэффективности.** Статическая модель состоит из семи блоков, описывающих технологический цикл Байера (рис. 1). Блок I — выщелачивание боксита; блок II — разбавление бокситовой пульпы щелочной водой с промывки шлама; блок III — смешение пульпы с затравочным глиноземом; блок IV — блок промывки

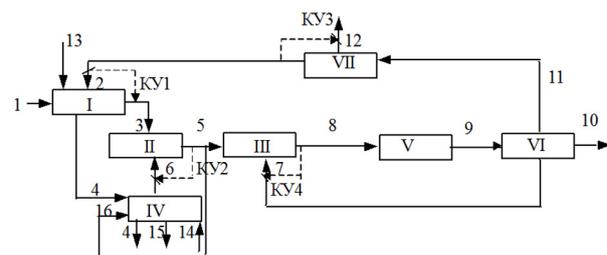


Рис. 1. Принципиальная структура статической модели энергопотребления производством глинозема по способу Байера

шлама с целью извлечения щелочи; блок V — разложение пульпы с получением глинозема; блок VI — разделение на щелочной раствор, производственный и затравочный гидрат; VII — выпаривание оборотного щелочного раствора до требуемой концентрации.

Электропотребление в данном производстве направлено на работу по преобразованию и перемещению материальных потоков. Оно связано с объемами этих потоков посредством пропорциональных зависимостей, определяемых априорно, и рассчитывается по формуле:

$$W = K_s \cdot \sum_{i=1}^{16} K_{is} \cdot F_i, \quad (1)$$

здесь  $K_{is}$  — удельные затраты электроэнергии  $i$ -го материального потока в производстве (кВт.ч/ед.изм.Ф), где  $K_s$  — поправочный коэффициент, отражающий долю неучтенных затрат электроэнергии.

Потребление пара, который расходуется для выпаривания оборотного раствора с реагентом в блоке VII, определяется величиной материального потока  $F_{12}$  ( $\text{м}^3 \cdot \text{час}$ ).

В основе моделирования  $j$ -х блоков-переделов ( $j=I, II, \dots, VII$ ) — нелинейные алгебраические уравнения материального баланса, записываемые для всех  $i$ -х потоков ( $i=1, 2, \dots, 16$ ), проходящих через моделируемый блок:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n L_{ij} \cdot A_i \cdot G_i \cdot F_i &= 0 & \sum_{i=1}^n H_{ij} \cdot F_i \cdot G_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^n K_{ij} \cdot B_i \cdot G_i \cdot F_i &= 0 & \sum_{i=1}^n I_{ij} \cdot F_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^n I_{ij} \cdot F_i \cdot D_i &= 0 & M_i &= 1,645 \cdot \frac{B_i}{A_i} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $F_i$  — потоки растворов,  $D_i$  — плотности растворов,  $A_i$  и  $B_i$  — концентрации жидкой фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Na}_2\text{O}_k$  соответственно,  $G_i$  — концентрации твердой фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $I_i, K_i, L_i, H_i$  — нелинейные функции  $i$ -го потока, имеющие положительное значение, если поток входящий, и отрицательное, если выходящий, и равные 0, если данный поток не проходит через моделируемый блок.

В основу моделирования блока V (перехода оксида алюминия из раствора в твердую фазу) по-

ложено кинетическое уравнение 2-го порядка:  $\frac{dA}{dt} = -R_d \cdot K_d \cdot (A - A_p)^2$ , где  $A$  — концентрация оксида алюминия в растворе,  $A_p$  — его равновесная концентрация,  $l$  — длительность процесса разложения,  $K_d$  — его скорость. Эта величина описывается очень сложной зависимостью от температуры, концентрации реагента и других параметров, поэтому ее значение в данной работе определялось с помощью теории нечетких множеств.

Представленная модель обладает существенной нелинейностью. При этом, в силу взаимосвязанности параметров рассматриваемого производства, все уравнения модели, включая дифференциальное, должны решаться в едином итерационном цикле.

**Построение целевой функции.** Для решения данной оптимизационной задачи были определены следующие критерии: минимизация электропотребления и расхода пара, без увеличения себестоимости готовой продукции. Для разработки целевой многокритериальной функции было проведено исследование.

С помощью статической модели были построены функции расхода электроэнергии ( $Q_e$ ), пара ( $Q_s$ ) и сырья ( $Q_B, Q_R$ ) на одну тонну готовой продукции от управляемых параметров  $X = \{B2, B5, XZ, M3\}$ . Графическое представление зависимостей от двух этих параметров представлено на рис. 2.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы: все зависимости носят нелинейный характер, по параметрам  $B5$  и  $XZ$  в диапазоне их изменения наблюдается глобальный минимум, но присутствуют и локальные минимумы (рис. 2а, 2б), снижение затрат по одному показателю может приводить к увеличению расхода других показателей.

Поэтому в критерий решено было включить стоимости всех видов расходов, чтобы обеспечить возможность стратегии выбора между противоречивыми тенденциями. В результате была разработана целевая функция:

$$S = C \cdot Q(X) / F_{10} \rightarrow \min. \quad (3)$$

где  $Q(X) = (K_1 \cdot W(X), K_2 \cdot Q_s(X), K_3 \cdot F_1(X), K_4 \cdot F_{13}(X))$ ,  $W$  — электропотребление, вычисляемое по формуле (1),  $Q_s$  — расход пара,  $Q_s = K_s F_{12}$  ( $K_s$  — коэффициент расхода пара на  $1\text{м}^3$  упаренной воды (Гкал/ $\text{м}^3$ ),  $F_1$  и  $F_{13}$  — расходы сырья при значениях режимных параметров, определяемых вектором  $X$ ,  $F_{10}$  — выход готовой продукции,  $C$  — цены на электроэнергию,

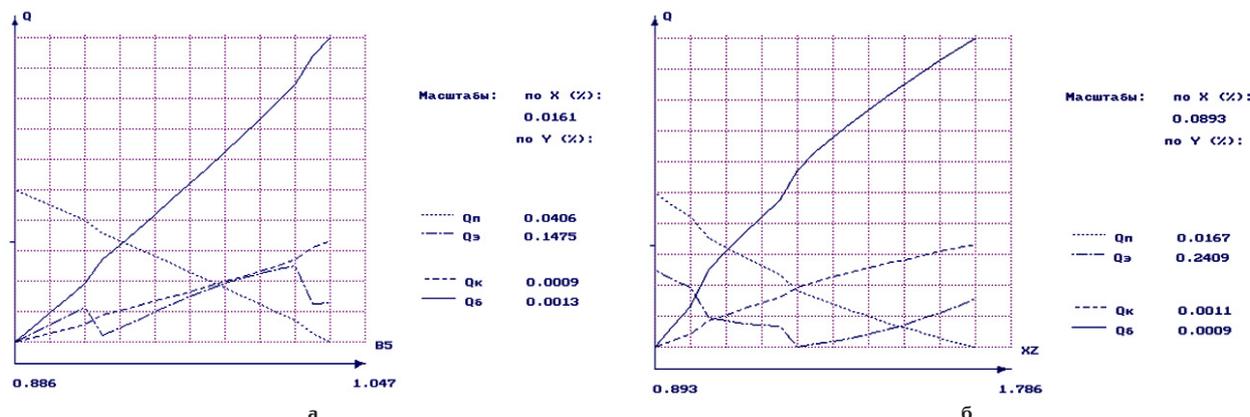


Рис. 2. Изменение удельного расхода электроэнергии ( $Q_e$ ), пара ( $Q_s$ ) и сырья ( $Q_B, Q_R$ ) от управляемых параметров: а)  $B5$  в диапазоне 0,11...0,13 и б)  $XZ$  в диапазоне 1...2

пар и сырье соответственно,  $K_1 - K_4$  — коэффициенты, определяющие долю неучтенных затрат.

Таким образом, получен критерий, описываемый одним аналитическим выражением и учитывающий требуемые расходы, цены на энергию и сырье. Следовательно, он может быть использован в качестве единого критерия в данной многокритериальной задаче.

**Решение оптимизационной задачи.** Очевидно, что для рассматриваемой 4-параметрической оптимизационной задачи невозможно привести аналитического описания целевой функции и определить ее свойства, так как  $Q(X)$  определяется с помощью модели всего производства при значении режимных параметров  $X$ . Ранее эта задача решалась с применением классических методов оптимизации [4], однако они не всегда давали решение, так как целевая функция содержит множество локальных экстремумов.

В последние годы для решения подобных задач стали применяться методы искусственного интеллекта, основанные на закономерностях эволюционного развития природы, так называемые эволюционные методы поиска. Эволюционный поиск, с точки зрения преобразования информации, — это последовательное преобразование одного конечного нечеткого множества промежуточных решений в другое. Для данной постановки дифференцируемость, непрерывность и другие условия, накладываемые на целевую функцию в классических математических методах, не являются необходимым свойством рассматриваемого класса задач.

Для решения рассматриваемой оптимизационной задачи был выбран один из методов искусственного интеллекта — классический генетический алгоритм [8], который выглядит следующим образом: 1) создается начальная популяция, 2) оценивается приспособленность каждой особи в популяции, 3) выбор особей с высокой приспособленностью для скрещивания, 4) скрещивание выбранных особей и получение потомков, 5) мутация, 6) формирование нового поколения, 7) проверка, если популяция не сошла, то переход к пункту 2, иначе — конец поиска.

Так как генетический алгоритм работает не с параметрами задачи, а с закодированным множеством параметров, то первоначально при его применении должна быть решена задача кодирования всех параметров задачи, то есть отображения области решений на генетический код.

Кодирование элементов исходной популяции для данной задачи выполнялось в двоичном коде для всей области допустимых значений по 4-м управляемым параметрам. Каждый параметр кодировался 5 двоичными символами в пределах значений от «00000» до «11111». На этот код отражались значения технологических параметров, составляющие область их допустимых значений.

Создание 4-х начальных популяций «родительских» хромосом выполнялось с помощью случайного выбора («дробовик») из всей области решений рассматриваемой задачи.

Функция приспособленности должна зависеть от решаемой задачи, поэтому она разрабатывалась на основе критерия (3). Кроме того, для соседних хромосом ( $ch$  — обозначение хромосомы) она должна принимать значения, значительно отличающиеся друг от друга, чтобы обеспечить селекционный отбор. В результате функция приспособленности приняла вид:

$$G(ch) = MAX(S) - C \cdot Q(X) / F_{10} \rightarrow max, \quad (4)$$

где  $MAX(S)$  — максимально возможное для данной задачи значение выражения (3)

Для формирования родительских хромосом каждой особи популяции вычислялась вероятность  $P_s(ch_i)$ , равная отношению ее функции приспособленности к суммарной приспособленности всей популяции:

$$P_s(ch_i) = \frac{G(ch_i)}{\sum_{i=1}^N G(ch_i)}. \quad (5)$$

Отбор  $N$  хромосом для дальнейшей генетической обработки выполнялся согласно величине  $P_s(ch_i)$  на основе простейшего отбора — «рулетка».

При решении данной оптимизационной задачи для каждой пары особей-родителей был реализован одноточечный кроссовер, причем точки скрещивания определялись случайно. Операция скрещивания выполнялась для всей популяции каждого поколения, а операция мутации выполнялась с вероятностью 0,01. В хромосоме, которая подвергалась мутации, один из случайно выбранных битов изменялся на противоположный.

Для реализации данного алгоритма была разработана и отлажена программа. В ходе ее работы были получены значения технологических параметров, при которых уменьшены затраты по электроэнергии на 10 % и пара на 14 % по сравнению с режимом, когда управляемые параметры поддерживались на уровне их среднего допустимого значения.

**Решение задачи прогнозирования энергопотребления.** В современных условиях предприятия имеют возможность выбора на рынке среди большого количества поставщиков сырья различного качественного состава и цены. При поступлении в производство нового вида сырья неизбежно возникают ситуации изменения технологических параметров [6, 7], что влечет за собой для подобных производств мало предсказуемый процесс изменения энергопотребления.

Поставленная в этих условиях задача прогнозирования энергопотребления потребовала разработки динамической модели. Структура модели, изображенная на рис. 1, была изменена следующим образом: блок V был заменен последовательностью блоков, имитирующих работу аппаратов-декомпозиров, и введена обобщенная буферная емкость:

$$\frac{dV_s(t)}{dt} = F_{11}(t) - F_2(t).$$

Последовательность из  $N_d$  блоков имитировала динамику разложения раствора в аппаратах-декомпозирах:

$$F_{n-1} = F_n + 0,53V_d V_n G_n^* \quad G_n^* = 1 - \frac{U_n}{2,43}$$

$$V_d \frac{d}{dt} G_n = F_{n-1} G_{n-1} - F_n G_n + 1,53V_d V_n G_n^*$$

$$V_d \frac{d}{dt} G_n^* A_n = F_{n-1} G_{n-1}^* A_{n-1} - F_n G_n^* A_n - V_d V_n G_n^* \quad (6)$$

$$V_d \frac{d}{dt} G_n^* B_n = F_{n-1} G_{n-1}^* B_{n-1} - F_n G_n^* B_n$$

$$V_n = -U_D K_1(B_n, T_n) K_2(X_{,30}, S_{30}) \frac{(A_n - A_E(B_n, T_n))^2}{A_E(B_n, T_n)^2},$$

где  $F_n$  — расход гидратной пульпы на выходе  $n$ -го аппарата,  $G_n$  — содержание в ней твердой фазы

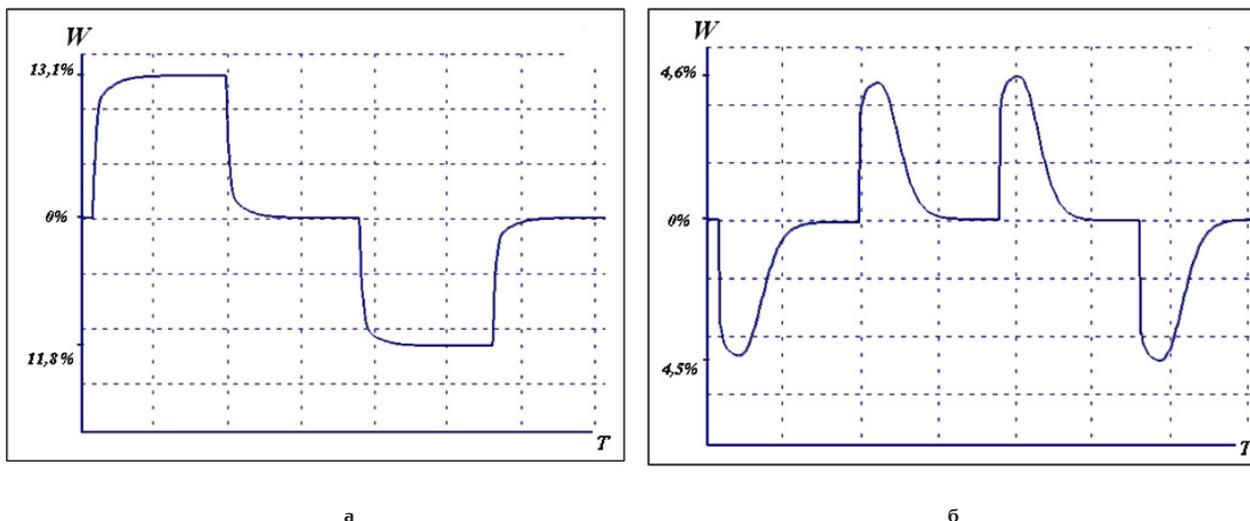


Рис. 3. Реакция изменения энергопотребления  $W$  глиноземного производства (относительно номинального режима) при скачкообразном изменении на 4 %, затем на -4 % параметров относительно номинальных значений:  $M_3$  (а) и концентрации щелочи в потоке  $F_5$  (б). Цена деления оси абсцисс — 120 часов

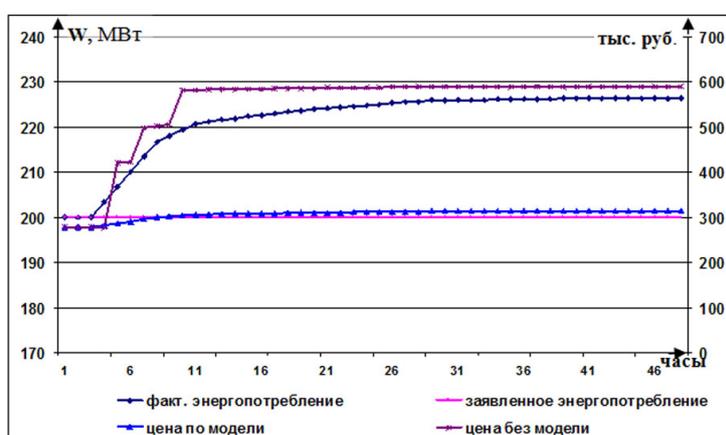


Рис. 4. Энергопотребление и его стоимость при отклонении от договорного объема при изменении параметра производства  $M_3$  на +4 % без применения модели почасового прогнозирования (—\*) и с применением этой модели (—●—)

$Al_2O_3$ ,  $A_n$  — содержание жидкой фазы,  $B_n$  — содержание в жидкой фазе  $Na_2O_k$ ,  $V_n$  — скорость разложения раствора в аппарате,  $A_E$  — равновесная концентрация  $Al_2O_3$ , которая представляет собой нелинейную функцию от  $B_n$  и  $T_n$ .  $K_1$ ,  $K_2$  — величины, учитывающие зависимость от целого ряда параметров. Их значения определялись с помощью одного из методов искусственного интеллекта: нечеткой логики. Переходные характеристики получались при скачкообразном изменении основных параметров производства. На рис. 3 проиллюстрировано динамическое воздействие на энергопотребление производства скачкообразного изменения на +4 %, затем на -4 % относительно номинальных значений технологических параметров:  $M_3$ (а) и концентрации щелочи в потоке  $F_5$ (б). При изменении  $M_3$  (рис. 3а) изменение энергопотребления может достигать пределов от +13 % до -11 %, а концентрации  $B_5$  — от -4,5 % до +4,6 % (рис. 3б) относительно текущего концентрационного режима.

Анализ полученных переходных характеристик позволил сделать следующие выводы: а) средняя длительность переходного процесса в кольце — 5 суток;

б) величина энергопотребления практически устанавливается через 2-е суток. Очевидно, что участвовать в выравнивании графика нагрузки энергосистемы [3, 7] подобным предприятиям возможно лишь при переходе на иные технологические режимы.

Потребители розничного рынка с присоединенной мощностью более 750 кВа (к которым относится и рассматриваемое производство) с интервальным или интегральным учетом в случае возникновения отклонений фактически поставленного объема электрической энергии от договорного для каждого часа месяца поставки оплачивают помимо стоимости планового потребления и стоимость указанных отклонений, рассчитываемых по формуле [9]:

$$S_{откл} = \sum_i^m S_i^{откл}, \quad (7)$$

где  $S_i^{откл}$  — стоимость отклонений фактического объема потребления электроэнергии от указанного в договоре за час  $i$ ,  $m$  — количество часов расчетного периода, рассчитываемое по формулам, приводимым в документе [9].

Считая, что тариф на электроэнергию для диапазона присоединения СН-I 1,38 руб./кВт·час, и при условии договора представлять изменение энергопотребления не позднее чем за 2-е суток, можно рассчитать эффект от применения предлагаемого инструментария при изменении  $M3$  (см. рис. 3), одного из технологических параметров. На рис. 4 представлены кривые планового и фактического энергопотребления, при смене параметра  $M3$ , а также кривые, отражающие цену энергопотребления при заранее представленном почасовом графике и без него. Если плановое энергопотребление 200 МВт·час, то за 2-е суток предприятие должно уплатить энергоснабжающей организации дополнительно помимо предварительно рассчитанных обязательств по договору поставки электроэнергии стоимость отклонений фактического потребления, равную 13 081545 руб., рассчитываемую по формуле (7). В итоге предприятие должно уплатить 26 361225 руб., так, по договору оно должно было за 2-е суток 13 279680 руб. Если заранее был бы предоставлен график изменения энергопотребления, то стоимость электроэнергии составила бы 14 705770 руб. В результате экономический эффект от использования предложенного инструментария составляет:  $26\ 361225 - 14\ 705770 = 11\ 655455$  рублей.

#### Выводы.

1. Техническое решение задачи поиска энергоэффективного режима функционирования непрерывных производств, обладающих свойствами, аналогичными глиноземному, может быть выполнено на основе моделирования технологического процесса данного производства с решением оптимизационной задачи поиска режимных параметров, обеспечивающих снижение затрат энергии на основе методов искусственного интеллекта.

2. Разработанная динамическая модель позволяет: а) заранее рассчитать как величину энергопотребления при различных параметрах производства, так и динамику его изменения при переходе на иные режимы, что, в свою очередь, позволяет во время представить графики почасового потребления электроэнергии и тем самым уменьшить оплату за ее использование; б) решать задачи выравнивания нагрузки при привлечении потребителей к выравниванию графика нагрузки энергосистемы.

#### Библиографический список

1. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные зако-

нодательные акты Российской Федерации: Федер. закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

2. Worrell E., Bernstei L., Roy J., Price L., Harnisch J. Industrial energy efficiency and climate change mitigation // Energy Efficiency. 2009. Vol. 2. P 109–123.

3. Гуртовцев А., Забелло Е. Электрическая нагрузка энергосистемы. Выравнивание графика // Новости электротехники. 2008. № 5. С. 108–114.

4. Зайцева Н. М., Потапова Т. Б. Оптимизация концентративного режима глиноземного производства // Цветные металлы. 1996. № 2. С. 74–77.

5. Mikhaylovna Z. N. Modeling of power consumption by nonlinear inertial production // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS): International Conference on 16–18 Oct. 2014. P 149–153.

6. Зайцева Н. М., Потапова Т. Б. Моделирование переходных режимов в кольце гидрохимических переделов глиноземного производства // Цветные металлы. 1996. № 12. С. 77–79.

7. Зайцева Н. М. Выравнивание графика электрической нагрузки для глиноземного производства // Промышленная энергетика. 2012. № 8. С. 19–22.

8. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с пол. И. Д. Рудинского. М.: Горячая линия – Телеком. 2007. 452 с.

9. Об утверждении Правил применения цен (тарифов), определения стоимости электрической энергии (мощности), реализуемой на розничных рынках по регулируемым ценам (тарифам), оплаты отклонений фактических объемов потребления электрической энергии (мощности) от договорных, а также возмещения расходов в связи с изменением договорного объема потребления электрической энергии (мощности) на территориях, не объединенных в ценовые зоны оптового рынка: приказ Федер. службы по тарифам от 30 ноября 2010 г. № 364-э/4 (зарегистрировано в Минюсте России от 27.01.2011 г. № 19594). URL: <http://www.fstrf.ru/docs/electro/186> (дата обращения: 21.12.2016).

**ЗАЙЦЕВА Наталья Михайловна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент департамента «Энергетика, металлургия и информационные технологии».

Адрес для переписки: [zaitzevns@mail.ru](mailto:zaitzevns@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 16.01.2017 г.

© Н. М. Зайцева

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЯХ ПРИ НАЛИЧИИ ИНТЕРГАРМОНИК

Предложен алгоритм, рассчитывающий потери мощности в токоведущих частях систем электроснабжения (СЭС), работающих в несинусоидальных нестационарных режимах и содержащих интергармоники. Интергармоники представляют собой колебания напряжения (тока), которые не кратны основной частоте питающей сети. Предлагаемый алгоритм основан на применении пакетного вейвлет-преобразования (ПВП), которое позволяет анализировать сигналы не только в частотной области, но и во временной. Применение ПВП позволило избавиться от главного недостатка преобразования Фурье (ПФ) — эффекта «растекания спектра». При проведении эксперимента роль нелинейной нагрузки в СЭС выполнял 6-пульсный преобразователь. Произведен расчет потерь мощности при наличии интергармоник в сети с помощью представленного алгоритма.

**Ключевые слова:** вейвлет-преобразование в электроэнергетике, высшие гармоники в системах электроснабжения, качество электрической энергии, потери мощности при наличии интергармоник.

Действующим нормативным документом, определяющим основные требования к показателям качества электрической энергии в Российской Федерации, является ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [1]. Согласно п. 3.1.19 ГОСТа, под интергармониками напряжения понимаются действующие значения составляющих напряжения, частота которых не кратна основной частоте напряжения питающей сети. Однако не представлено никаких четких ограничений по допустимым пороговым значениям интергармонических составляющих напряжения в СЭС. Единственное, на что указывает стандарт, — их увеличение при применении частотных преобразователей и на то, что «допустимые уровни интергармонических составляющих напряжения электропитания находятся на рассмотрении» [1, п. 4.2.4.2]. Если анализировать действующие в мире стандарты по качеству электрической энергии, то становится очевидным отсутствие общих подходов и значительные отличия по нормированию допустимых значений интергармоник напряжения. В Европейском Союзе процесс стандартизации в области интергармоник в настоящий момент находится в стадии накопления знаний и обсуждения. Так, согласно рекомендациям IEC 61000–4–7:2002 [2], интергармоники напряжения ограничиваются значе-

нием 0,2 %. Стандарт IEEE Std 519 [3], действующий в США, определяет пороговые значения интергармоник в сетях низшего (до 1 кВ), среднего (69–161 кВ) и высшего (более 161 кВ) напряжения.

Одной из причин появления в сетях интергармоник являются асинхронные включения частотно-регулируемых электроприводов, выполненных на основе полупроводниковых преобразователей. Быстрые изменения тока в оборудовании также могут привести к колебаниям напряжения. Источниками интергармоник в СЭС являются дуговые печи, частотно регулируемые электроприводы, преобразователи частоты и др. [4, с. 93].

ВГ и интергармоники оказывают негативное влияние на работу СЭС. В зависимости от амплитуды токов ВГ и интергармоник возникают искажения напряжения в узлах нагрузок на данной частоте. В зависимости от ширины спектра частот интергармоник повышается вероятность возникновения резонанса, что может привести к еще более значительному искажению напряжения, перегрузке токоведущих частей и полному нарушению работы потребителя электрической энергии [5]. Одним из существенных влияний интергармоник на СЭС является изменение действующего значения напряжения. Интергармоники вызывают низкочастотные колебания в электромеханических системах, создают помехи в системах релейной защиты и автоматики, приводят «к нерегулярным колебаниям тока

нагрузки и перенапряжениям, опасным для изоляции» [4, с. 101].

Задача настоящей работы заключается в разработке алгоритма расчета дополнительных потерь в токоведущих частях при наличии интергармоник, генерируемых частотно-регулируемым приводом на основе пакетного вейвлет-преобразования (ПВП).

При анализе интергармоник может использоваться преобразование Фурье (ПФ). Однако при исследовании нестационарных процессов в СЭС ПФ является одной из причин возникновения эффекта растекания спектра. Для устранения данного эффекта широко применяется оконное преобразование Фурье (ОПФ) с различными типами оконных функций [6].

Исследуя спектральный состав токов промышленных частотных преобразователей, авторы в работе [7] показывают преимущества методов с высокой разрешающей способностью — метода Прони и метода минимальной нормировки гармоник. Авторы приходят к выводу, что оба метода являются методами с высокой разрешающей способностью. Однако они не способны преодолеть недостатков традиционных подходов и не позволяют точно определить частоты интергармоник.

В статье [8] освещается методика спектрального анализа гармоник и интергармоник на основе преобразования Гильберта. Авторами предложен подход определения огибающей и гармонических составляющих методом сдвига окна и интерполяции, что в конечном счете имеет ряд преимуществ, таких как нивелирование эффекта растекания спектра, вызванного высшими гармониками (ВГ) сети.

Спектральный анализ гармоник и интергармоник представлен не только в зарубежных, но и в отечественных работах, например [9, 10].

В [9] был предложен метод спектрального анализа канонических гармоник и интергармоник. Этот метод был реализован с помощью ОПФ с применением оконных функций низкого разрешения и интерполяции.

Авторами работы [10] на предварительном этапе анализа (перед проведением дискретного ПФ) был предложен, так называемый, догармонический анализ сигнала. Он представляет собой предварительное определение частот, входящих в исходный сигнал путем расчета среднеквадратичного отклонения, определение периода сигнала путем нахождения наименьшего общего делителя.

Детальный анализ спектрального состава токов и напряжений в СЭС, имеющей в своем составе преобразовательную технику, также приводится и в работе [11].

Так, гармонический состав напряжения (тока) может быть определен по техническим характеристикам преобразователей:

$$f_i = (p_1 m \pm 1) f \pm p_2 n f_0, \quad (1)$$

где  $p_1$  — число пульсаций секции выпрямителя;  $p_2$  — число пульсаций выходного сигнала;  $m, n$  — целые числа.

В зависимости от выходной частоты циклоконвертера  $f_0$  спектральный состав тока (напряжения) может быть различным. В общем случае спектр частот может быть представлен в виде основной гармоники и двух боковых частот:

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t) + I_m \cdot m \cdot \sin((\omega \mp \Omega)t), \quad (2)$$

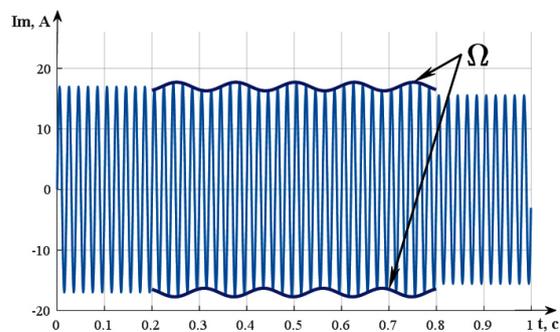


Рис. 1. Гармонические и интергармонические группы

где  $I_m$  — амплитуда основной частоты;  $I_m \cdot m$  — амплитуда боковых частот;  $\omega$  — угловая частота питающей сети, рад/с;  $\Omega$  — угловая частота огибающей, рад/с.

Наличие боковых частот вызывает эффект колебания напряжения. В статье [12] представлен анализ взаимосвязи интергармоник, генерируемых частотно-регулируемым приводом, на колебание напряжения в СЭС.

Определенная трудность при анализе интергармоник возникает при малых значениях частоты огибающей  $\Omega \ll \omega$  в этом случае возможно попадание интергармоники в так называемую гармоническую группу [2]. Интервал исследуемых спектральных линий составляет 5 Гц. Гармонические группы представляют собой основную частоту гармоники и две соседние с ней частоты. Интергармоническая группа составляет интервал между двумя гармоническими группами (рис. 1).

Выделение гармонических и интергармонических групп призвано минимизировать эффект растекания спектра, но в данном случае, причисление интергармоники, генерируемой преобразовательной техникой к гармонической группе влечет за собой погрешность в расчете режима и при анализе потерь в токоведущих частях. Применение традиционного подхода с использованием низкочастотных и высокочастотных фильтров не позволит решить проблему выделения интергармонической составляющей.

Для решения данной задачи предлагается использовать частотную декомпозицию сигнала напряжения (тока) на ПВП. Обзор применения ВП для расчета установившихся и переходных процессов в электроэнергетических системах представлен в [13–15]. Для реализации ПВП определяющую роль играют масштабирующая функция и соответствующая вейвлет-функция. Вейвлеты — это семейство функций, которые получаются из одной функции посредством ее сдвигов и растяжений по оси времени. Эти функции являются базами, которые применяются для разложения и восстановления сигнала. Быстрое ВП на основе алгоритма Малла позволит вычислять вейвлет-коэффициенты без интегрирования на основе операции свертки:

$$\varphi(t) = \sum_k h_0(k) \sqrt{2} \varphi(2t - k), \quad (3)$$

$$\psi(t) = \sum_k h_1(k) \sqrt{2} \varphi(2t - k), \quad (4)$$

где  $h_0, h_1$  — коэффициенты фильтра, определяемые для каждого типа вейвлета.

В соответствии с (3) и (4) матрица мгновенных значений тока может быть представлена в виде массивов аппроксимирующих  $i_j^A$  и детализирующих  $i_j^D$  коэффициентов:

$$\begin{cases} i_j^A = \sum_k h_0(2t-k)i_{j-1}^A \\ i_j^D = \sum_k h_1(2t-k)i_{j-1}^A \end{cases} \quad (5)$$

Результатом пакетного вейвлет-разложения становится частотная декомпозиция сигнала, позволяющая выделить характерные частотные полосы (рис. 2).

Конкретные частотные диапазоны для каждого случая определяются частотой дискретизации

сигнала  $f_{d'}$ , которая должна быть выбрана в соответствии с теоремой Найквиста, а также глубиной вейвлет-разложения сигнала.

**Предлагаемый алгоритм.** Для расчета потерь в токоведущих частях при несинусоидальных режимах (в том числе при наличии интергармоник) необходимо владеть информацией о спектральном составе тока и времени (длительности) присутствия высокочастотных компонент. Для решения поставленной задачи предлагается следующий алгоритм (рис. 3).

**Шаг 1.** Цифровой сигнал тока, поступающий с измерительного прибора, формирует матрицу мгновенных значений. Производится частотная декомпозиция матрицы тока при помощи ПВП таким образом, чтобы каждому набору вейвлет-коэф-

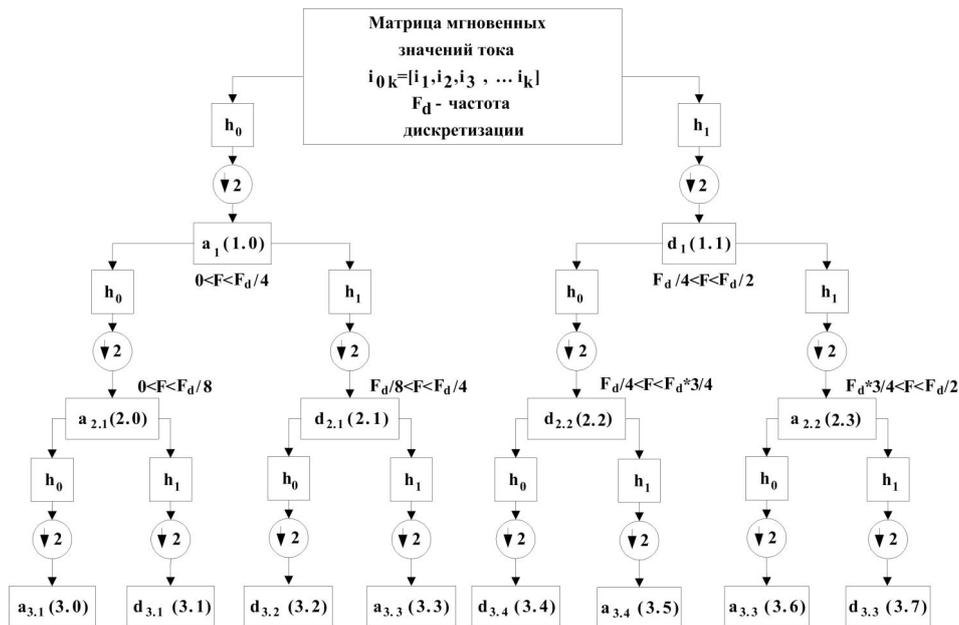


Рис. 2. Дерево пакетного вейвлет-преобразования

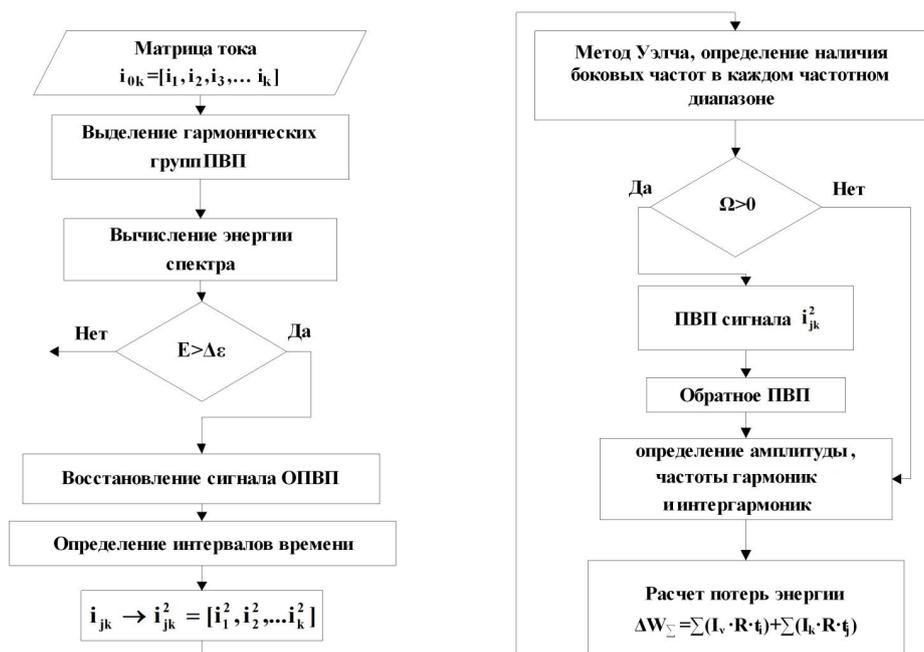


Рис. 3. Блок-схема предлагаемого алгоритма

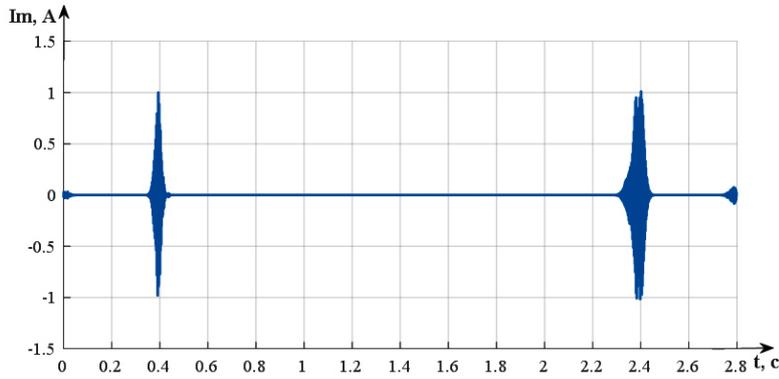
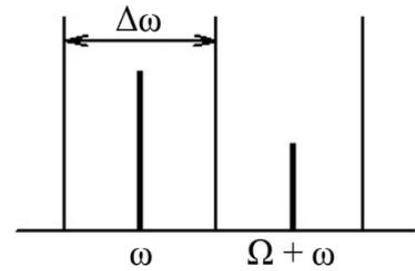
Рис. 4. График детализирующего коэффициента  $d1$ 

Рис. 5. Полоса пропускания фильтра

фициентов соответствовал интервал пропускания частот, центрированный около определенной гармонической группы [2]. В соответствии с деревом вейвлет-разложения (рис. 2) исходный сигнал разлагается на частотные полосы, где помимо высшей гармоники с частотой  $k\omega$  присутствуют боковые частоты, созданные интергармоникам  $k\omega \pm \Omega$ . Размер матрицы вейвлет-коэффициентов по отношению к исходной матрице сигнала тока уменьшается в  $2^j$  раз, что определяется глубиной вейвлет-разложения  $j$ .

**Шаг 2.** Определяется энергия спектра вейвлет-коэффициентов по каждому частотному диапазону. Если энергия спектра окажется меньше заданного порогового уровня погрешности  $\Delta\epsilon$ , то данные коэффициенты могут быть отброшены, т.к. это означает отсутствие частотных составляющих в данном диапазоне.

**Шаг 3.** По вейвлет-коэффициентам, имеющим энергию спектра выше заданного уровня  $\Delta\epsilon$ , производится обратное ВП. Таким образом, восстанавливается сигнал тока, отвечающий за определенный частотный диапазон (см. схему на рис. 2). При этом размер матрицы значений токов выделенного частотного диапазона становится равным размеру матрицы исходного сигнала.

**Шаг 4.** По детализирующим вейвлет-коэффициентам  $d1$  определяется время изменения режима — интервалы времени  $\Delta t$ , когда в сигнале присутствуют интергармоники. Необходимость определения интервалов времени обусловлена задачей определения потерь энергии в токоведущих частях. В то же время характер изменения потребляемой мощности узлами электрических нагрузок может носить случайный характер. Изменение режима работы узла может быть достаточно точно определено по характерным всплескам (кратковременному увеличению амплитуды) детализирующих коэффициентов (рис. 4).

**Шаг 5.** Матрица восстановленного сигнала элементарно возводится в квадрат.

$$i_{jk}^2 = [i_1^2, i_2^2, \dots, i_k^2], \quad (6)$$

Так, если выделенный сигнал задан формулой (1), то в результате возведения в квадрат получим:

$$\begin{aligned} i^2(t) &= I_m^2 \cdot \sin^2(\omega t) + I_m^2 \cdot m^2 \cdot \sin^2((\omega \pm \Omega)t) = \\ &= I_m^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + m^2\right) + 2I_m^2 \cdot m \cdot \cos \Omega t + 2I_m^2 \cdot m^2 \cdot \cos 2\Omega t + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ I_m^2 \cdot \left(m^2 - \frac{1}{2}\right) \cdot \cos 2\omega t - I_m^2 \cdot m \cdot \cos(\omega - \Omega) - \\ &- I_m^2 \cdot m^2 \cdot \cos(\omega + \Omega) - \frac{I_m^2 \cdot m}{2} \cos 2(\omega - \Omega) - \\ &- \frac{I_m^2 \cdot m}{2} \cos 2(\omega + \Omega). \quad (7) \end{aligned}$$

Из выражения (7) видно, что при возведении функции исследуемой в квадрат в сигнале появляется постоянная составляющая тока и частоты  $\Omega$ ,  $2\Omega$ ,  $2\omega$ ,  $(\omega \mp \Omega)$ ,  $2 \cdot (\omega \mp \Omega)$ . Практический интерес представляет частота огибающей —  $\Omega$ , что позволит определить частоту интергармоники.

**Шаг 6.** С применением метода Уэлча, фиксируем наличие боковых частот  $\Omega$  в каждом частотном диапазоне, определенном из предыдущего шага. Отсутствие боковой частоты, дает возможность, не изменяя частотную полосу пропускания вейвлет-фильтра, перейти к расчету действующего значения тока (шаг 7).

Если боковая частота фиксируется, то возникает необходимость произвести коррекцию частотной полосы пропускания фильтра. Тогда находим оптимальную частотную полосу пропускания фильтра из условия  $\Delta\omega < \Omega$  (рис. 5).

**Шаг 7.** С учетом выбранной в предыдущем шаге оптимальной полосы пропускания вейвлет-фильтра  $\Delta\omega$  производим частотную декомпозицию сигнала. Затем определяются частоты гармоник и интергармоник, а также их действующие значения. Эффекта растекания спектра в данном случае не происходит, так как восстановление сигнала осуществляется только в границах времени, определенного в шаге 4. Это позволяет рассматривать сигнал как стационарный.

**Шаг 8.** На завершающем этапе работы производится расчет потерь энергии в токоведущих частях на основе данных, полученных с помощью предлагаемого алгоритма.

$$\Delta W_{\Sigma} = \sum (I_y \cdot R \cdot t_i) + \sum (I_k \cdot R \cdot t_j), \quad (8)$$

где  $I_y$ ,  $I_k$  — значение тока гармонической и интергармонической составляющей соответственно;  $R$  — активное сопротивление токоведущей жилы;  $t_i$  — интервал времени при котором присутствовала  $y$ -я гармоническая составляющая;  $t_j$  — интервал времени, при котором присутствовала  $k$ -я интергармоническая составляющая.

Предлагаемый алгоритм позволит повысить точность расчета параметров СЭС при несинусоидальных нестационарных режимах. Такой подход позволит уточнить расчет дополнительных потерь, обусловленных интергармониками в токоведущих частях.

**Результаты эксперимента.** При проведении эксперимента использовался сигнал тока, в котором присутствуют гармоники и интергармоники, генерируемые 6-пульсным преобразователем:

$$i(t) = \begin{cases} i(t) = I_m \cdot \sin(2\pi \cdot t \cdot f), & 0 < t < 2,8; \\ i(t) = 3I_m \cdot \sin(2\pi \cdot t \cdot f), & 0,4 < t < 2,4; \\ i(t) = \frac{3I_m}{6} \cdot \sin(2\pi \cdot t \cdot (3f + \Omega)), & 0,4 < t < 2,4; \\ i(t) = \frac{3I_m}{5} \cdot \sin(2\pi \cdot t \cdot (5f)), & 0,4 < t < 2,4; \\ i(t) = \frac{3I_m}{10} \cdot \sin(2\pi \cdot t \cdot (5f + \Omega)), & 0,4 < t < 2,4; \\ i(t) = \frac{3I_m}{14} \cdot \sin(2\pi \cdot t \cdot (7f - \Omega)), & 0,4 < t < 2,4; \\ i(t) = \frac{3I_m}{7} \cdot \sin(2\pi \cdot t \cdot (7f)), & 0,4 < t < 2,4, \end{cases} \quad (9)$$

где  $I_m = 20\sqrt{2}$ ,  $f = 50$  Гц,  $\Omega = 4$  Гц.

Исследуемый сигнал тока представлен на рис. 6. Применяем ПВП к исходному сигналу, чтобы раз-

бить его на гармонические группы. Используем для анализа вейвлет Добеши 42 порядка (db42). Разложение производим до 3-го уровня, в результате чего получаем 8 гармонических групп, или частотных диапазонов. Вычисляем энергию спектра каждого частотного диапазона  $\Delta\omega$ . Результаты представлены в табл. 1.

Производим обратное ПВП (ОПВП) участков с  $E_j \epsilon$ , участки с  $E_j \epsilon$  отбрасываем. Возводим в квадрат все оставшиеся частотные диапазоны.

Применяем метод Уэлча к каждому частотному диапазону.

На рис. 7 представлен результат применения метода Уэлча для третьего участка. Видно, что на участке присутствует боковая частота  $\Omega$ . Отсюда следует, что необходимо произвести коррекцию частотной полосы пропускания фильтра. Находим оптимальную частотную полосу пропускания фильтра из условия  $\Delta\omega \langle \Omega$ .

С учетом выбранной оптимальной полосы пропускания вейвлет-фильтра  $\Delta\omega$  производим частотную декомпозицию сигнала. Находим значения частот и действующие значения гармонических и интергармонических составляющих, присутствующих в данном диапазоне.

Затем рассчитываем потери энергии, обусловленные данными частотными составляющими.

В табл. 2 представлены значения частот, действующие значения, погрешность расчета действующих

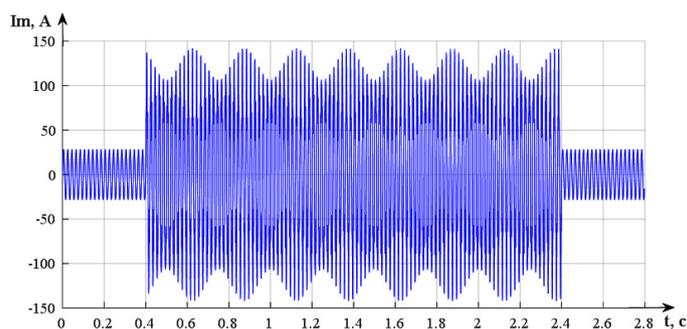


Рис. 6. Исследуемый сигнал тока

Энергия спектра частотных диапазонов

Таблица 1

$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$	$E_7$	$E_8$
94,62	1,46	1,31	2,07	0,0009	0,0008	0,53	0,0018

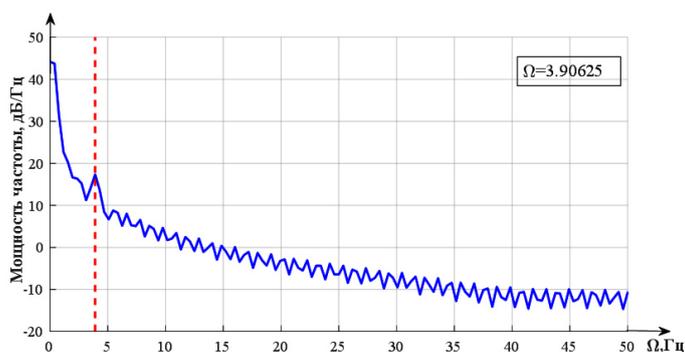


Рис. 7. Результат применения метода Уэлча для третьего частотного диапазона

Результаты эксперимента

$f$ , Гц	50	154	250	254	346	350
$I_{m'}$ , А	68,49	10,029	12,037	5,98	4,231	8,527
$\varepsilon$ , %	0,031	0,295	0,31	0,33	1,145	0,52
$\Delta W$	5,945	0,622	0,746	0,371	0,262	0,529

значений и потери энергии каждой частотной составляющей.

Таким образом, в настоящей работе был предложен алгоритм расчета потерь от воздействия интергармоник в токоведущих частях. Метод основан на частотной декомпозиции сигнала тока с применением ПВП. Преимуществом математического аппарата ВП является возможность анализа сигналов не только в области частот, но и в области времени, что является определяющим для расчета потерь в элементах СЭС.

#### Библиографический список

- ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
- IEC 61000–4–7. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4–7. Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. Second edition. 2002–08. IEC, 2002. 48 p.
- IEEE Std. 519–2014. IEEE Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. Approved 2014–03–27. IEEE, 2014. 29 p.
- Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
- Горюнов В. Н., Осипов Д. С., Лютаевич А. Г. Расчет потерь мощности от влияния высших гармоник // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 2. С. 268–273.
- Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2003. 608 с. ISBN 5-318-00666-3.
- Leonowicz Z., Lobos T., Rezmer J. Advanced Spectrum Estimation Methods for Signal Analysis in Power Electronics // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2003. Vol. 50, no. 3. P. 514–519. DOI: 10.1109/TIE.2003.812361.
- Xiong J., Wang B. Measuring power system harmonics and interharmonics by envelope spectrum analysis // Przegląd Elektrotechniczny. 2010. Vol. 86, no. 12. P. 319–324.
- Чижма С. Н. Метод спектрального анализа интергармоник в электроэнергетических системах // Промышленная энергетика. 2014. № 4. С. 43–47.
- Гольдштейн Е. И., Радаев Е. В. Гармонический анализ токов (напряжений) при наличии в них интергармоник и неизвестном периоде результирующего сигнала // Электричество. 2009. № 12. С. 87–88.
- Жежеленко И. В., Шидловский А. К., Пивняк Г. Г. [и др.]. Электромагнитная совместимость потребителей: моногр. М.: Машиностроение, 2012. 351 с. ISBN 978-5-94275-637-6.
- Tayjasaanant T., Wang W., Li C., Xu W. Interharmonic-flicker curves. // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. Vol. 20, issue 2. P. 1017–1024. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.838639.
- Файфер Л. А., Осипов Д. С., Еремин Е. Н. [и др.]. Применение пакетного вейвлет-преобразования для определения составляющих мощности при несинусоидальных режимах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 8 (115). С. 136–145. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-8-136-145.
- Ляшков А. А., Осипов Д. С., Сатпаев Д. С. [и др.]. Применение вейвлет-преобразования для частотной декомпозиции токов нулевой последовательности при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2016. № 4 (148). С. 56–61.
- Осипов Д. С., Коваленко Д. В., Киселёв Б. Ю. Расчет потерь энергии в кабельной линии электропередачи при наличии нелинейной нагрузки методом пакетного вейвлет-преобразования // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2016. № 4 (148). С. 84–89.

**ОСИПОВ Дмитрий Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

**КОВАЛЕНКО Дмитрий Валерьевич**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

**ФАЙФЕР Лилия Андреевна**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

**КИСЕЛЁВ Богдан Юрьевич**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

**ДОЛГИХ Надежда Николаевна**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий». Адрес для переписки: Dmitrii\_Kovalenko92@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14.06.2017 г.

© Д. С. Осипов, Д. В. Коваленко, Л. А. Файфер, Б. Ю. Киселёв, Н. Н. Долгих

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СШИТОЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ

Актуальной задачей в области повышения надежности электроснабжения является сокращение количества коротких замыканий. В связи с этим контроль состояния изоляции кабельных линий электропередачи необходим на протяжении всего срока эксплуатации. Однако многие методы контроля состояния изоляции не позволяют прогнозировать пробой изоляции и время до ее полного износа. В связи с этим все более актуальным является направление исследований по разработке способов расчета остаточного ресурса изоляции. В статье рассматривается математическое моделирование процессов старения изоляции с использованием элементов математической статистики. Предложена методика расчета остаточного ресурса изоляции кабелей. Полученные результаты говорят о необходимости доработки статистических элементов математической модели. Использование методов экспоненциальной экстраполяции позволит прогнозировать время до полного износа изоляции.

**Ключевые слова:** кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена, математическое моделирование старения изоляции, остаточный ресурс изоляции кабеля, мониторинг состояния изоляции.

**1. Введение.** Актуальной задачей в области повышения надежности электроснабжения является сокращение количества коротких замыканий, каждое из которых влечет за собой экономические потери.

Одним из направлений исследований в этой области является контроль состояния изоляции кабельных линий, который обеспечивается рядом мероприятий, среди которых могут быть:

— испытания изоляции до ввода в эксплуатацию и в ее процессе методами, предусмотренными существующими стандартами; испытания, подразумевающие использование повышенного напряжения, являются разрушающими для изоляции (испытание повышенным напряжением, измерение частичных разрядов, согласно [1]);

— диагностика изоляции методами, не предусмотренными существующими стандартами, некоторые из которых подразумевают использование постоянного напряжения, что также является разрушающим для изоляции из сшитого полиэтилена (например, анализ возвратного напряжения, рефлектометрия, измерение тангенса угла диэлектрических потерь и др. [2]);

— неразрушающие методики мониторинга состояния изоляции, позволяющие контролировать ее состояние в режиме онлайн в течение всего срока эксплуатации.

Использование средств мониторинга состояния изоляции является наиболее перспективным ввиду возможности прогнозирования пробоев изоляции. Возможность спрогнозировать пробой изоляции в краткосрочной перспективе позволяют, например, методы измерения и анализа характеристик частичных разрядов [3, 4]. Однако прогнозирование

времени эксплуатации кабеля до полного износа требует дополнительного внимания.

Решение задачи прогнозирования времени эксплуатации до износа изоляции заключается в математическом моделировании процесса ее старения. На решение этой задачи в разное время были направлены работы Г. С. Кучинского [5] (предложенная им модель также упоминается в [6]), С. Н. Журкова [7], Ж. П. Крайна [8, 9], а также модель, сочетающая в себе модели старения С. А. Аррениуса и обратную степенную модель [10, 11].

Также в [11] был проведен сравнительный анализ последних трех перечисленных моделей, который показал, что, несмотря на их различные аналитические выражения и численные значения параметров, в равных условиях дают общее представление о степени износа изоляции.

Однако математическая модель старения изоляции, предложенная Г. С. Кучинским, также требует исследования.

Кроме того, необходимо произвести доработку математической модели для расчета остаточного ресурса изоляции кабеля в зависимости от параметров оказываемых воздействий.

**2. Постановка задачи.** Целью работы является анализ математической модели старения изоляции, предложенной Г. С. Кучинским, а также ее уточнение и преобразование для расчета остаточного ресурса изоляции в режиме онлайн-мониторинга разрушающих факторов. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

— уточнить предложенную ранее математическую модель старения изоляции на основе статистического расчета [12] с целью определения критической степени разрушения материала;

— произвести преобразования модели Г. С. Курчинского и определить неизвестные коэффициенты.

**3. Теория.** Статистический расчет критической степени разрушения изоляции. В [12] была предложена математическая модель старения изоляции, в которой был произведен расчет вероятности пробоя изоляции в зависимости от степени разрушения материала. Для расчета брался срез изоляции размером 100x100 клеток. При этом с использованием случайной функции определялись координаты разрушенных клеток, и при разрушении на одной прямой 10 клеток из 100 считалось, что произошел пробой.

Очевидно, что эта модель нуждается в доработке. В первую очередь, необходимо определить критерий возникновения пробоя изоляции, то есть степень разрушения материала по радиусу изоляции для возникновения пробоя.

Для этой цели проводилось моделирование электрического поля в кабеле с дефектом изоляции различного размера и формы в пакете программ Elcut 5.6 (профессиональная версия). В качестве объекта исследований был выбран одножильный коаксиальный кабель АПвПут 1x70/35-10 на напряжение 10 кВ.

В ходе исследования было установлено, что наиболее вероятная форма дефекта — эллиптическая с наибольшим измерением по радиусу кабеля, так как дефекты изоляции, способные привести к ее пробоя, обычно представляют собой дендриты [13] — древовидные каналы в изоляции, заполненные газом, жидкостью или твердыми примесями. Моделирование различных размеров дефекта показало значительный запас электрической прочности изоляционного материала. Для возникновения напряженности электрического поля выше пробивной, принятой 6 кВ/мм для состаренного кабеля [14], необходимо разрушить около 78 % изоляции по радиусу, согласно картине электрического поля (рис. 1) и распределению напряженности электрического поля в области дефекта (рис. 2).

Еще одним недостатком модели [12], является то, что не учитывалось третье измерение изоляции. Для выполнения расчета в трех измерениях предлагается использовать параллелепипед со сторонами, пропорциональными размерам изоляции кабеля

по длине, толщине и внутренней длине окружности изоляции. Использование такой формы позволит учесть возможность роста дендрита не только вдоль радиуса.

Для определения пропорциональности сторон необходимо рассчитать размеры каждой из них. Площадь сечения токопроводящей жилы равна 70 мм<sup>2</sup>, отсюда, если считать жилу идеально круглой, длина окружности будет около 30 мм. Толщина изоляции составляет 3,4 мм. Для определения третьего размера необходимо знать возможное количество включений в объеме изоляции кабеля, которое, согласно [15], составляет от 0 до 5 на 200 грамм полиэтилена. Однако, учитывая высокий уровень развития техники и технологий изготовления изоляции с момента выхода стандарта, примем для расчета одно включение на 200 граммов полиэтилена.

Тогда при плотности сшитого полиэтилена 940 кг/м<sup>3</sup>, объем изоляции для расчета равен 212766 мм<sup>3</sup>. Исходя из объема и при известных двух других измерениях третье измерение будет равно 2086 мм. Таким образом, для расчета получаем параллелепипед размерами 3,4x30x2086 мм.

Однако для расчета необходимо преобразовать полученный параллелепипед в трехмерный массив элементов для проведения расчета. Проводились расчеты с помощью разработанной программы Delphi. Размеры массивов менялись от минимально возможных (5x44x3067) до максимально возможных и ограниченных только максимальными значениями переменных, зависящими от типов данных (160x1408x98165). Результаты моделирования показали, что плотность вероятности пробоя изменяется по закону распределения Вейбулла, которое выражается формулой:

$$f = \left( \frac{k}{\lambda} \right) \left( \frac{x}{\lambda} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{x}{\lambda} \right)^k} \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент формы,  $\lambda$  — коэффициент масштаба.

Однако при увеличении размеров массива параметр распределения стремился к максимально возможному значению, соответствующему 78 % разрушенных молекул. Этот факт объясняется

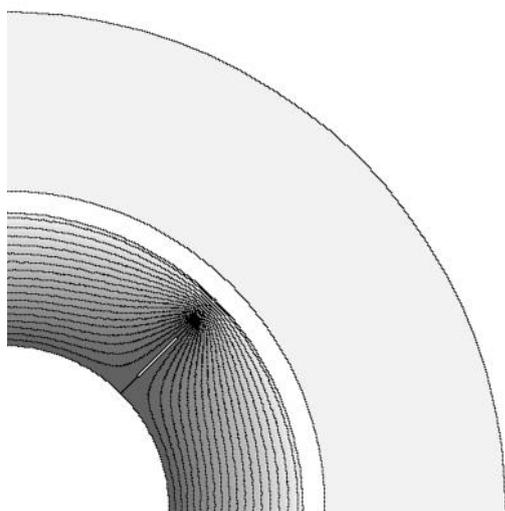


Рис. 1. Картина электрического поля кабеля с дефектом

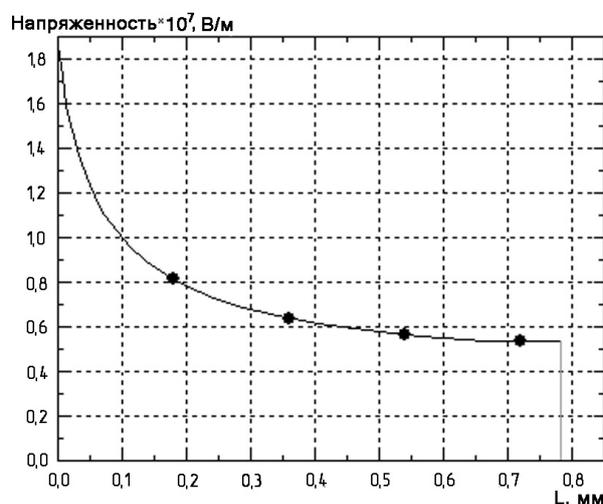


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в области между острием дефекта и экраном

отсутствием учета более высокой вероятности разрушения клетки в области, где уже началось разрушение. Однако учет этого факта требует создания сложного алгоритма математического моделирования, что требует отдельного исследования.

Тем не менее для математического расчета остаточного ресурса изоляции кабелей требуется знать функцию вероятности пробоя в зависимости от степени разрушения материала. Для распределения Вейбулла она имеет вид:

$$F = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad (2)$$

Таким образом, предлагается принять коэффициент масштаба  $\lambda = 0,63$  (63 %) как параметра, используемого в расчете надежности электроэнергетических систем [16], а коэффициент формы  $k = 8$ , так как при этом значении при разрушении 78 % материала вероятность пробоя стремится к единице (рис. 3).

Полученный график зависимости вероятности пробоя изоляции от доли разрушенных молекул показал, что при разрушении материала до 35,5 % вероятность пробоя составляет менее 1 %, после чего начинает существенно увеличиваться. Таким образом, при разрушении материала до 35,5 % велика вероятность безотказной работы изоляции. В области от 35,5 % до 78 % вероятность пробоя существенно возрастает, что говорит о возможности частого появления дефектов изоляции. Соответственно, не рекомендуется доводить степень разрушения материала до этой области и производить замену при разрушении порядка 35,5 % молекул материала.

1. Математическая модель расчета остаточного ресурса.

Предлагается за основу расчета остаточного ресурса взять модель старения изоляции Г. С. Кучинского, согласно которой срок службы изоляции можно рассчитать по формуле:

$$\tau_{ср} = AE^{-n} \exp\left(\frac{W_a}{kT}\right). \quad (3)$$

Согласно [5], срок службы изоляции определяется мощностью частичных разрядов и скоростью химических реакций при термической и термоокислительной деструкции изоляционного материала, определяемой законом С. А. Аррениуса.

Исходя из полученных результатов статистических расчетов, изоляционный материал рекомендуется признать непригодным к эксплуатации при



Рис. 3. Зависимость вероятности пробоя от доли разрушенных молекул

разрушении 35,5% его структуры, так как при превышении этого значения вероятность пробоя изоляции начинает существенно возрастать, что может повлечь за собой образование большого количества дефектов изоляции. Исходя из всего вышеперечисленного, формулу (3) можно представить в виде:

$$\tau_{ср} = \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right)} \quad (4)$$

или:

$$\tau_{ср} = \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{c \cdot P_{чр} \cdot K_t(t)}, \quad (5)$$

где  $N_t$  — количество молекул вещества в единице объема в данный момент времени,  $N_0$  — количество молекул вещества в единице объема до начала разрушения, принято  $N_t/N_0 = 0,645$ ,  $P_{чр} = B \cdot E^n$  — мощность частичных разрядов,  $B$  — константа,  $E$  — напряженность электрического поля,  $n$  — показатель степени, зависящий от типа и структуры материала,  $K_t(T) = K_0 \cdot e^{(-W_a/kT)}$  — коэффициент скорости химических реакций при температуре в данный момент времени,  $K_0$  — константа скорости реакции закона Аррениуса,  $W_a$  — энергия активации,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура в Кельвинах,  $c$  — умножающий коэффициент, определенный синергизмом воздействия температуры и электрического поля.

Расчет остаточного ресурса целесообразно производить по формуле (4), так как возможно увеличение мощности частичных разрядов в изоляции при образовании дефекта, что не всегда является условием необходимости замены кабеля по всей длине. Не учет этого фактора при расчете остаточного ресурса по формуле (5) может внести существенную погрешность в расчет.

При этом для расчета остаточного ресурса необходимо производить расчет количества неразрушенных молекул материала в заданном объеме вещества с целью определения степени его деградации. Исходя из формулы (4), количество неразрушенных молекул в данный момент времени при неизменных напряженности и температуре будет рассчитываться следующим образом:

$$N_t = N_0 e^{-c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right) t}. \quad (6)$$

Однако, учитывая условие, что с течением времени напряженность электрического поля и температура, как правило, хаотично меняются в условиях эксплуатации, необходимо производить расчет с разбивкой по времени (например, один раз в секунду).

Учитывая, что функции изменения напряженности и температуры хаотичны, предлагается производить расчет по формуле:

$$N_t(t) = \int_0^t v(t) dt, \quad (7)$$

где  $v(t)$  — скорость разрушения материала под совокупным воздействием факторов, разрушающих изоляцию воздействием, в момент времени  $t$ , которую можно определить по формуле:

$$v(t) = -\frac{dN_t}{dt} = c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right) \times N_0 \cdot e^{-c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right) \cdot t} \quad (8)$$

Далее, для решения задачи прогнозирования износа изоляции, требуется произвести экстраполяцию функции  $N_t(t)$  по данным, накопленным в течение определенного времени. Учитывая цикличность процессов, происходящих в электроэнергетической системе, предполагается, что функция сохранит экспоненциальный характер. Кроме того, для учета сезонного фактора нагрузок предполагается, что время накопления статистических данных для получения прогноза относительно высокой точности составляет не менее года.

**4. Результаты исследований.** Произведена доработка предложенной ранее модели старения изоляции на основе статистического расчета. Предложена математическая модель расчета остаточного ресурса изоляции на основе модели старения изоляции Г. С. Кучинского.

Полученные новые результаты статистического моделирования старения изоляции позволили сделать некоторые промежуточные выводы о степени разрушения материала, которая наиболее вероятно приведет к пробое изоляции. Однако был выявлен недостаток разработанной модели, состоящий в том, что необходимо производить учет более высокой вероятности разрушения материала в области, где разрушение уже началось.

Предложенная методика расчета остаточного ресурса реализуема в программном обеспечении электронных устройств и компьютеров с небольшими преобразованиями, учитывающими специфику работы электронных устройств. Использование методов экспоненциальной экстраполяции позволит спрогнозировать время, спустя которое рекомендуется производить замену кабельной линии.

#### 5. Выводы и заключение.

1. Предложено уточнение статистической модели старения изоляции, предложенной ранее, однако для полного приближения к реальным условиям эксплуатации требуется доработка алгоритма математического моделирования.

2. Методика расчета остаточного ресурса изоляции кабелей может быть реализована в программном обеспечении устройства прогнозирующей защиты [17, 18], предназначенного для прогнозирования пробоя изоляции и расчета ее остаточного ресурса.

#### Библиографический список

1. ГОСТ Р МЭК 62067-2011. Кабели силовые с экструированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 150 кВ ( $U(m) = 170$  кВ) до 500 кВ ( $U(m) = 550$  кВ). Методы испытаний и требования к ним. Введ. 01-07-2012. М.: Стандартинформ, 2012. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-mek-62067-2011> (дата обращения: 01.06.2017).

2. Пономарев Н. В. Анализ методов диагностики состояния силовых высоковольтных кабельных линий // Вестник КузГТУ. 2012. № 5 (93). С. 68–71.

3. Исмагилов Ф. Р., Максудов Д. В. Математическое моделирование развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика // Вестник Уфимского государственного авиа-

ционного технического университета. 2011. Т. 15, № 3 (43). С. 98–100.

4. Ahmed Z., Hussain G. A., Lehtonen M. [et al.]. Analysis of partial discharge signals in medium voltage XLPE cables // 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Prague, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/EPE.2016.7521817. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7521817&isnumber=7520888> (дата обращения: 01.06.2017).

5. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние. 1979. 224 с.

6. Вдовико В. П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования: моногр. Новосибирск: Наука, 2007. 155 с.

7. Zhurkov S. N. Kinetic Concept of Strength of Solids // Intern. J. Fract. Mech. 1965. Vol. 1. P. 311–323.

8. Crine J. P. On the interpretation of some electrical aging and relaxation phenomena in solid dielectrics // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2005. Vol. 12, no. 6. P. 1089–1107. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1561789.

9. Parpal J. L., Crine J. P., Chinh Dang. Electrical aging of extruded dielectric cables. A physical model // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1997. Vol. 4, no. 2. P. 197–209. DOI: 10.1109/94.595247.

10. Mazzanti G. Analysis of the Combined Effects of Load Cycling, Thermal Transients, and Electrothermal Stress on Life Expectancy of High-Voltage AC Cables // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007. Vol. 22, no. 4. P. 2000–2009. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.905547.

11. Mazzanti G. The combination of electro-thermal stress, load cycling and thermal transients and its effects on the life of high voltage ac cables // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2009. Vol. 16, no. 4. P. 1168–1179. DOI: 10.1109/TDEI.2009.5211872.

12. Никитин К. И., Поляков Д. А. Определение срока службы изоляции // Фундаментальные исследования. 2015. № 3. С. 129–132.

13. Резинкина М. М., Резинкин О. Л., Носенко М. И. Зависимость фазы появления частичных разрядов в полиэтиленовой изоляции от стадии роста дендрита // Журнал технической физики. 2001. Т. 71, № 3. С. 69–71.

14. Борисов П. А. Водные триинги и принцип определения участков кабельной линии, содержащих водные триинги, при трассировке кабельных линий // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. № 12-2. С. 176–182.

15. ГОСТ 16336-77. Композиции полиэтилена для кабельной промышленности. Технические условия. Введ. 01-01-1979. М.: Изд-во стандартов. 1977. URL: <http://vsegost.com/Catalog/33/33140.shtml> (дата обращения: 01.06.2017).

16. Mosch W., Hauschild W. Statistical Techniques for HV Engineering. London, 1992. 318 p. ISBN 978-0-86341-205-9.

17. Горюнов В. Н., Никитин К. И., Сарычев М. М. Опережающий автоматический ввод резерва собственных нужд электрических станций и подстанций // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2011. № 3 (103). С. 211–213.

18. Никитин К. И., Сарычев М. М., Степанов В. Д. [и др.]. Опережающее автоматическое включение резерва // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2012. № 1 (107). С. 237–238.

**ПОЛЯКОВ Дмитрий Андреевич**, аспирант, старший преподаватель кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

Адрес для переписки: polyakowdmitry@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 13.06.2017 г.

© Д. А. Поляков

## СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Мониторинг состояния изоляции кабельных линий является актуальной проблемой электроэнергетики в связи с большим количеством коротких замыканий, вызванных пробоем изоляции. При решении задачи мониторинга состояния изоляции ключевыми факторами являются определение предпробойного состояния изоляции и расчет ее остаточного ресурса. Определять предпробойное состояние предлагается путем мониторинга характеристик частичных разрядов, которые, как известно, имеют определенную динамику изменения перед пробоем. Для определения остаточного ресурса требуется дополнительно контролировать напряжение питающей сети и температуру изоляции кабеля. В статье предложена реализация системы сбора данных, включающая в себя функции мониторинга всех учитываемых в процессе определения предпробойного состояния и остаточного ресурса изоляции воздействий. На основе получаемых данных предполагается в режиме онлайн рассчитывать остаточный ресурс изоляции и анализировать характеристики частичных разрядов по заданным в программном обеспечении математическим моделям.

**Ключевые слова:** кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена, предпробойное состояние изоляции кабеля, остаточный ресурс изоляции кабеля, мониторинг состояния изоляции.

**1. Введение.** Короткие замыкания на кабельных линиях с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ-изоляция), вызванные пробоем изоляции по причине ее естественного разрушения, является одной из основных причин и составляет более 70 % от общего числа технологических нарушений, возникающих в кабельных линиях в процессе эксплуатации. Из практики эксплуатации электрооборудования известны случаи, когда такие короткие замыкания приводили к крупным системным авариям с существенными экономическими потерями. В связи с этим контроль состояния изоляции на протяжении всего срока ее эксплуатации необходим для сведения количества коротких замыканий к минимуму.

Существующие в настоящее время стандарты испытаний изоляции кабельных линий подразумевают испытания повышенным напряжением, измерение частичных разрядов, измерение сопротивления и емкости изоляции и др. [1 – 3]. Использование повышенного напряжения при испытании изоляции и измерении частичных разрядов, предусмотренных существующими стандартами, является разрушающим для изоляционного материала и сокращает срок его службы.

В то же время известны неразрушающие методы диагностики и контроля состояния изоляции, не предусмотренные по существующим стандартам.

Среди них измерение тангенса угла диэлектрических потерь, коэффициента абсорбции, анализ возвратного напряжения и тока релаксации, метод рефлектометрии и метод контроля характеристик частичных разрядов без использования повышенного напряжения [4 – 7].

Основным недостатком традиционных испытаний является тот факт, что они проводятся периодически, следовательно, не позволяют прогнозировать короткие замыкания в долгосрочной перспективе, а только оценивать пригодность изоляции для дальнейшей эксплуатации или говорят о необходимости ее замены.

Также известны системы мониторинга состояния изоляции, работающие в режиме онлайн и производящие контроль характеристик, которые зависят от состояния изоляции под нагрузкой. Среди них системы мониторинга частичных разрядов (ЧР), измерения тангенса угла диэлектрических потерь, рефлектометрии. Перечисленные системы измеряют контролируемые параметры в режиме онлайн, что существенно более эффективно периодического контроля параметров. Однако для анализа данных, регистрируемых системой, требуется участие человека.

Следовательно, актуальным в настоящее время является исследование по разработке системы мониторинга состояния изоляции, производящей

регистрацию необходимой информации для определения ее предпробойного состояния и расчета ее остаточного ресурса. Кроме того, указанная система должна работать по заданным математическим алгоритмам и автоматически принимать решение о необходимости ремонта локального дефекта или о замене участка кабеля в целом. Такую систему можно назвать прогнозирующей защитой, предложенной в [8, 9].

Метод контроля характеристик частичных разрядов показывает хорошие результаты при его использовании для определения предпробойного состояния изоляции, так как характеристики частичных разрядов показывают существенные изменения непосредственно перед пробоем. Известно, что при наличии в изоляции достаточно большого дефекта частичные разряды возникают в нем регулярно, что влечет за собой существенное увеличение их мощности. Использование этого метода в совокупности с мониторингом других разрушающих факторов позволит определять остаточный ресурс изоляции при использовании математической модели ее старения.

Следовательно, система регистрации данных для мониторинга состояния изоляции кабелей должна быть спроектирована таким образом, чтобы имелась возможность измерять характеристики всех воздействий, которые необходимо контролировать для расчета остаточного ресурса изоляции с целью последующей обработки информации.

**2. Постановка задачи.** Целью работы является разработка системы сбора данных, необходимых для определения предпробойного состояния СПЭ-изоляции кабелей и расчета ее остаточного ресурса на основе математического моделирования процессов ее старения. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

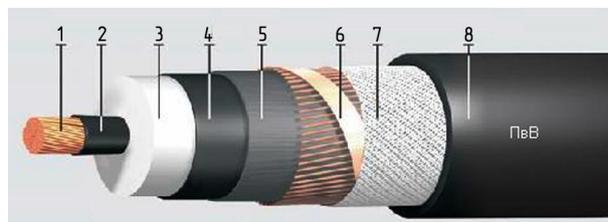
- проанализировать возможные воздействия, оказываемые на изоляцию кабельных линий электропередачи в процессе ее эксплуатации, и определить воздействия, которыми можно пренебречь;
- предложить решение по проектированию системы сбора данных, способной производить мониторинг факторов, оказывающих существенное воздействие на состояние изоляции в процессе ее эксплуатации.

**3. Теория.** Анализ воздействий, оказываемых на изоляцию кабелей в процессе эксплуатации.

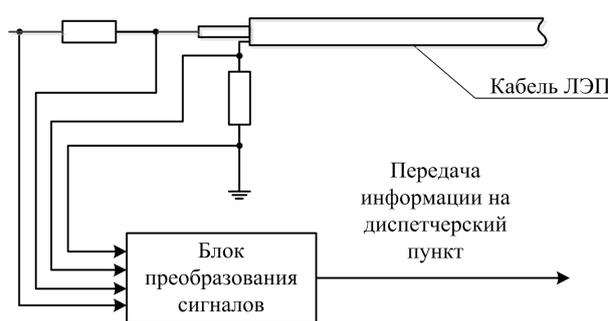
В процессе эксплуатации кабельных линий разрушение их изоляции может быть вызвано достаточно обширным спектром внешних и внутренних воздействий, среди которых могут быть [10–13]:

- электрическое поле высокой напряженности;
- температура;
- механические воздействия;
- увлажнение изоляции;
- радиация;
- УФ-излучение;
- химические воздействия.

Кабельная линия электропередачи может подвергаться воздействию всех вышеперечисленных разрушающих факторов в той или иной степени. Однако в некоторых случаях воздействием разрушающих факторов можно пренебречь. Конструкция кабельных линий такова (рис. 1), что существенное воздействие на изоляцию большинства эксплуатируемых кабелей могут оказывать только напряженность электрического поля и температура изоляции, определяющая скорость химических реакций при деструкции изоляционного материала.



**Рис. 1.** Конструкция одножильного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена:  
1 — алюминиевая или медная токопроводящая жила, 2 — полупроводящий слой из сшитой полимерной композиции, 3 — изоляция из сшитого полиэтилена, 4 — полупроводящий слой из сшитой полимерной композиции, 5 — слой из электропроводящей водоблокирующей ленты, 6 — экран из медных проволок, скрепленных медной лентой, 7 — слой из электропроводящих водоблокирующих лент, 8 — полиэтиленовая оболочка



**Рис. 2.** Структурная схема датчика тока и напряжения для подключения к кабельной линии

Остальными воздействиями можно пренебречь, так как они оказывают существенное воздействие только на поверхность оболочки кабеля или встречаются только при особых условиях. Следовательно, расчет остаточного ресурса необходимо производить, исходя из мониторинга воздействий температуры и напряжения на кабеле. Однако в некоторых случаях может возникнуть дефект в изоляции, не израсходовавшей свой ресурс. Для прогнозирования пробоя изоляции в этом случае необходимо производить мониторинг характеристик частичных разрядов.

**1. Мониторинг воздействия электрического поля.**

Следствием воздействия электрического поля является возникновение в изоляции частичных разрядов. Известно, что они могут присутствовать в кабеле и при рабочем режиме, однако при возникновении дефекта в изоляции начинают появляться регулярно, наблюдается рост характеристик (мощности, среднего кажущегося заряда), затем их кратковременное снижение, после чего происходит быстрый рост до пробоя [4, 14].

Для измерения характеристик частичных разрядов требуется возможность регистрации высокочастотных составляющих спектра сигналов тока и напряжения линий электропередачи. В связи с этим использование традиционных измерительных трансформаторов тока и напряжения для указанных целей невозможно.

В связи с этим предлагается использовать новую конструкцию датчика [15], позволяющего регистрировать одновременно ток и напряжение питающей сети (рис. 2). Достаточной точности регистрации

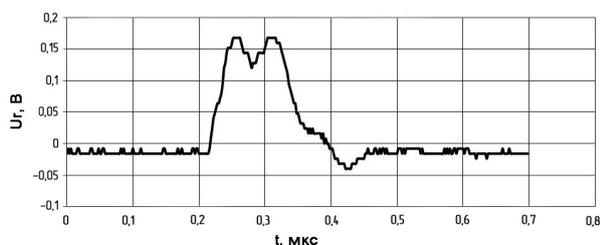


Рис. 3. Импульс частичного разряда

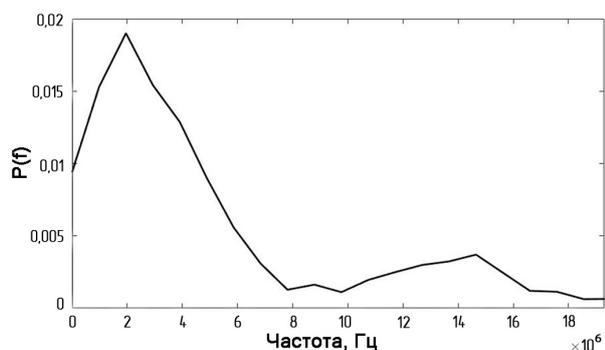


Рис. 4. Частотный спектр частичного разряда

высокочастотных составляющих предлагается достичь за счет использования безынерционных резистивных шунтов и делителей, не вносящих искажения в формы сигналов.

Сигналы тока и напряжения, снимаемые с линии электропередачи, передаются на блок преобразования сигналов, используемый для следующих задач:

- преобразование сигналов с помощью аппаратных средств (например, полосового фильтра или устройства, предложенного в [16]) для анализа сигналов и выявления электрических сигналов частичных разрядов;

- оцифровка сигналов тока и напряжения для передачи на диспетчерский пункт с высокой частотой дискретизации и разрядностью АЦП;

- программные средства, используемые для обработки сигнала до его передачи на устройство прогнозирующей защиты (обработка данных 32-разрядным микроконтроллером с использованием вейвлет-преобразований или другого способа обработки данных для анализа сигнала).

Спектр частот частичных разрядов достаточно обширен и может содержать гармоники в диапазоне до десятков мегагерц. С целью определения необходимого частотного диапазона работы устройства было проведено осциллографирование характеристик частичных разрядов и проанализирован частотный спектр ряда импульсов. Пример импульса ЧР представлен на рис. 3, результат анализа его частотного спектра представлен на рис. 4. Указанный импульс имеет самую высокую плотность спектра на частоте 2 МГц, при этом сам спектр достаточно широк и содержит гармоники до 18 МГц. Однако спектр различных импульсов имеет некоторые различия, по результатам анализа ряда зарегистрированных импульсов максимумы спектральной плотности были зарегистрированы при частоте 1–2 МГц, а общий спектр менялся в пределах от 16 до 25 МГц. В некоторых случаях спектр не ограничивался этими частотами и имелись гармоники

до 150 МГц, но большая часть спектральной плотности находилась в частотном диапазоне до 25 МГц.

Однако, несмотря на существенное содержание гармоник низших частот в сигнале, требуется производить фильтрацию основной гармоники (50 Гц). Кроме того, различное электрооборудование может быть источником высших гармоник в сети. Так, согласно [17], для анализа показателей качества электрической энергии учитываются гармоники частотой до 2 кГц. В связи с этим целесообразно использовать фильтр верхних частот с ослаблением гармоник основного сигнала до 2 кГц не менее 20 дБ.

Обработку сигналов предлагается производить в блоке преобразования сигналов с помощью средств быстродействующей микропроцессорной техники. В частности предлагается рассчитывать кажущийся заряд каждого частичного разряда путем численного трапецеидального интегрирования, а также рассчитывать энергию каждого разряда и мощность частичных разрядов по методике, предложенной в [18].

## 2. Мониторинг температуры изоляции.

Мониторинг температуры изоляции кабелей является достаточно сложной задачей ввиду неравномерности распределения теплового поля в изоляции. В связи с этим данная задача тесно связана с математическими алгоритмами расчета распределения температуры в изоляции кабелей, основой расчета которых служит известное термическое действие тока, протекающего в токопроводящей жиле и экране, и температура в нескольких точках оболочки кабеля.

Возможными способами мониторинга температуры поверхности кабеля являются:

1. Измерение температуры с помощью контактных датчиков, механически смонтированных в оболочку кабеля или кабельную муфту.

2. Измерение температуры с помощью бесконтактных пирометрических датчиков.

3. Измерение температуры с помощью оптоволоконной жилы, установленной в кабельной системе или непосредственно смонтированной в кабель.

Термическое действие тока может быть вычислено при известном действующем значении тока, протекающего в жиле и экране, которое может быть измерено с помощью датчика тока и напряжения (рис. 2).

Важным фактом при выборе мест установки датчиков температуры является анализ мест возможного локального перегрева кабельных линий. Мониторинг температуры в таких местах является наиболее приоритетным ввиду ускорения процессов старения в области перегрева, что приведет к более быстрому выходу кабеля из строя. Однако следует контролировать температуру изоляции кабеля и в нормальных условиях для расчета остаточного ресурса всей кабельной линии.

## 3. Прогнозирующая защита.

Исходя из описанных выше решений мониторинга температуры и частичных разрядов, предлагается структурная схема прогнозирующей защиты (рис. 5). Для оптимизации работы прогнозирующей защиты часть вычислений целесообразно отдать непосредственно микропроцессорным блокам датчиков. Основной расчет остаточного ресурса изоляции наиболее рационально производить в блоке прогнозирующей защиты, в котором записана математическая модель расчета остаточного ресурса изоляции кабеля.

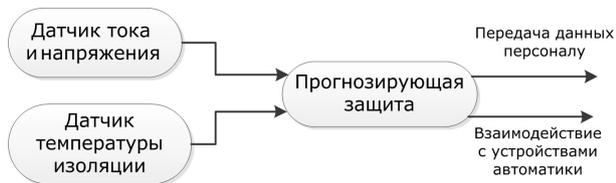


Рис. 5. Структурная схема прогнозирующей защиты

**4. Выводы и заключение.** Датчик тока и напряжения позволяет измерять и анализировать характеристики частичных разрядов, тока в жиле кабеля.

1. Выбор датчиков температуры для мониторинга температуры изоляции зависит от условий эксплуатации кабеля. Также на выбор способа измерения температуры влияет тот факт, устанавливается ли система на кабельную линию, находящуюся в эксплуатации, или на линию в процессе ее строительства.

2. Задачи мониторинга температуры изоляции и определения остаточного ресурса требуют дополнительных исследований по разработке математических алгоритмов расчета для реализации предложенной прогнозирующей защиты на практике.

#### Библиографический список

1. Пономарев Н. В. Анализ методов диагностики состояния силовых высоковольтных кабельных линий // Вестник КузГТУ. 2012. № 5 (93). С. 68–71.
2. ГОСТ Р МЭК 62067-2011. Кабели силовые с экструдируемой изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 150 кВ ( $U(m) = 170$  кВ) до 500 кВ ( $U(m) = 550$  кВ). Методы испытаний и требования к ним. Введ. 01.07.2012. М.: Стандартинформ, 2012. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-mek-62067-2011> (дата обращения: 01.06.2017).
3. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: ЭНАС, 2000. 552 с.
4. Исмагилов Ф. Р., Максудов Д. В. Математическое моделирование развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2011. Т. 15, № 3 (43). С. 98–100.
5. Пат. 2373546 Российская Федерация, МПК G01R31/00 (2006.01). Способ определения состояния и ресурса изоляции / Зенова Е. М., Чернышев В. А., Чернов В. А. № 2008103231/28; заявл. 01.02.2008; опубл. 20.11.2009. Бюл. № 32. 9 с.
6. Пат. 2523075 Российская Федерация, МПК G01R27/18 (2006.01). Устройство для контроля качества электрической изоляции / Серебряков А. С., Семенов Д. А. № 2012122288/28; заявл. 01.02.2008; опубл. 20.07.2014. Бюл. № 20. 12 с.
7. Сотников В. В. Математическое моделирование системы локализации и типизации повреждений работающей силовой сети // Вестник СГТУ. 2011. № 4 (62). URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/matematiceskoe-modelirovanie-sistemy-lokalizatsii-i-tipizatsii-povrezhdeniy-rabotayushey-silovoy-seti> (дата обращения: 01.06.2017).
8. Горюнов В. Н., Никитин К. И., Сарычев М. М. Опережающий автоматический ввод резерва собственных нужд

электрических станций и подстанций // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2011. № 3 (103). С. 211–213.

9. Никитин К. И., Сарычев М. М., Степанов В. Д. [и др.] Опережающее автоматическое включение резерва // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2012. № 1 (107). С. 237–238.

10. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние. 1979. 224 с.

11. Вдовико В. П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования: моногр. Новосибирск: Наука, 2007. 155 с.

12. Сажин Б. И. [и др.]. Электрические свойства полимеров / под ред. Б. И. Сажина. 3-е изд., перераб. Л.: Химия. 1986. 224 с.

13. Брацыхин Е. А., Шульгина Э. С. Технология пластиковых масс. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия. 1982. 328 с.

14. Ahmed Z., Hussain G. A., Lehtonen M., Varacka L., Kudelcik J. Analysis of partial discharge signals in medium voltage XLPE cables // 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Prague. 2016. P. 1–6. DOI 10.1109/EPE.2016.7521817. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7521817&isnumber=7520888> (дата обращения: 01.06.2017).

15. Пат. 2608335 Российская Федерация, МПК G01R 19/00 (2006.01). Оптико-электронный датчик тока и напряжения / Никитин К. И., Поляков Д. А., Довбня Б. Я., Клець М. Я., Максимов В. М. № 2015116387; заявл. 29.04.2015; опубл. 17.01.2017. Бюл. № 2.

16. Пат. 2564536 Российская Федерация, МПК G01R 23/167 (2006.01). Способ выделения слагаемой электрической величины / Антонов В. И., Наумов В. А., Солдатов А. В., Иванов Н. Г. № 2014125935/07; заявл. 26.06.2014; опубл. 10.10.2015. Бюл. № 28.

17. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01–07–2014. М.: Стандартинформ. 2014. 16 с.

18. Поляков Д. А., Комаров И. В., Никитин К. И., Пугач В. Н. Измеритель мощности частичных разрядов // Актуальные вопросы энергетики: материалы междунар. науч.-практ. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ. 2017. С. 290–293.

**ПОЛЯКОВ Дмитрий Андреевич**, аспирант, старший преподаватель кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

**ПУГАЧ Вадим Николаевич**, аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

**НИКИТИН Константин Иванович**, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника».

**ЮРЧУК Дмитрий Анатольевич**, студент гр. Э-136 энергетического института.

Адрес для переписки: polyakowdmitry@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 13.06.2017 г.

© Д. А. Поляков, В. Н. Пугач, К. И. Никитин, Д. А. Юрчук

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННОГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ЗАМЫКАНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–35 КВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА**

Проведен обзор и анализ существующих методов и алгоритмов определения поврежденного присоединения в распределительных сетях 6–35 кВ с использованием параметров аварийного режима. Приведено описание алгоритмов, применяемых в современных микропроцессорных устройствах защиты и автоматики. На основе рассмотренных методов построена имитационная модель определения поврежденной линии и вида замыкания. Описан принцип действия модели определения поврежденного присоединения. Приведено описание вспомогательных блоков.

**Ключевые слова:** распределительная сеть, замыкания в сети, определение поврежденного присоединения, микропроцессорные устройства защиты.

Короткие замыкания (далее — КЗ) сопровождаются значительным увеличением токов в фазах, что вызывает нагрев элементов электроустановок, приводит к старению и разрушению изоляции, а также потери механической прочности шин и проводов. Рассмотрим распределительные сети 6–35 кВ, так как в них, помимо КЗ, наиболее часто встречаются, не менее опасные, однофазные замыкания на землю (далее — ОЗЗ). Например, длительное ОЗЗ представляет опасность для людей, животных и может перерасти в двух- и трехфазное короткое замыкание. Поэтому оперативное устранение опасной ситуации и определение поврежденного присоединения при замыканиях является актуальной задачей [1–6].

В настоящее время известно много отечественных и зарубежных устройств, способных определить поврежденное присоединение [3–5]. Одним из простейших устройств является индикатор поврежденной линии, определяющий путь прохождения тока при аварийном режиме сети [7].

Быстро определить присоединение с замыканием можно с помощью анализа полярностей первых полуволн переходных токов нулевой последовательности [8]. Выполняется данный анализ с помощью одновременного распознавания замыкания

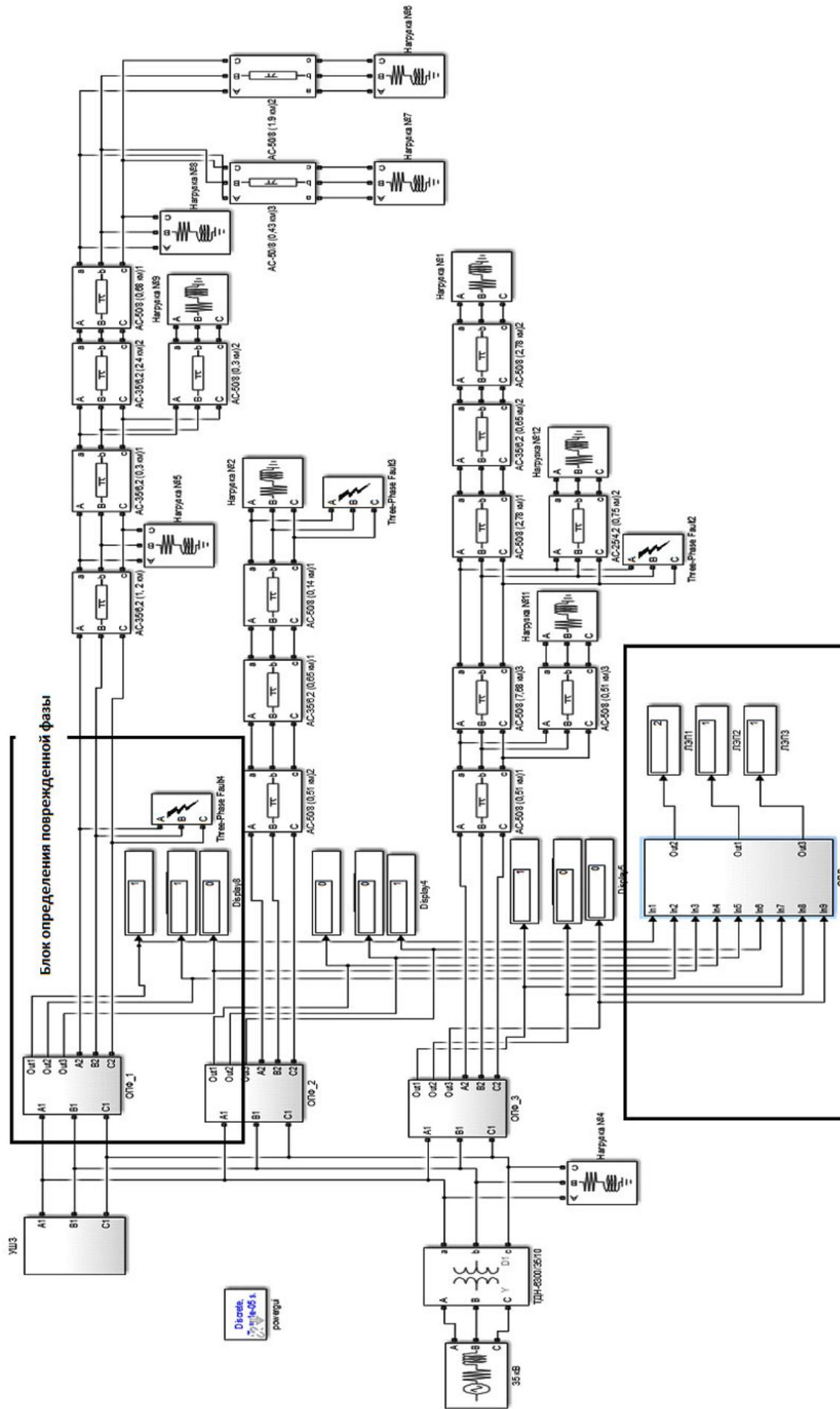
по параметрам переходного процесса (далее — ПАР) [2–4].

В данной статье представлены результаты анализа алгоритма определения поврежденного присоединения при различных видах замыканий в распределительных сетях 6–35 кВ, рассмотрены особенности его применения.

В методе распознавания поврежденного присоединения используется свойство малой скорости изменения напряжения нулевой последовательности на нейтрали ( $u_0$ ) после затухания дуги, аналогично при металлическом замыкании. Во время самогашения дуги снижается напряжение нейтрали посредством насыщения трансформаторов напряжения [8–9].

Скорость изменения напряжения нулевой последовательности ( $du_0/dt$ ) определяется с помощью аппроксимации квадратичным полиномом, ограниченным временным интервалом  $t_u$ . Это ограничение позволяет определить длительность измерительного интервала. Уставки устанавливаются по мгновенному значению и производной напряжения нулевой последовательности. Уставка устанавливается в начале участка аппроксимации [8–9].

Другим способом определения поврежденного присоединения является метод, основанный



Блок определения поврежденного присоединения и вида замыкания

Рис. 1. Имитационная модель определения поврежденной линии

на принципе противоположности полярностей первой полуволны переходного тока нулевой последовательности ( $i_0$ ) исследуемого во всех фазах. Для достоверности данных при определении поврежденного присоединения необходимо наличие факта распознавания замыкания, одним из описанных методов [8–9].

Определить поврежденное присоединение можно с помощью замера и сравнения в каждой линии емкостного тока. При ОЗЗ сравнивается ток нулевой последовательности от линии к шинам [4]. Определяют данные токи для линий по формулам (1):

$$I_{3n} = j3\omega C_{yn} E_\phi = I_{Cn} I_{Cn} = 3\omega C_{yn} I_{yn} U_\phi = I_{yn} I_{yn},$$

$$\dots\dots\dots,$$

$$I_{32} = j3\omega C_{y2} E_\phi = I_{C2} I_{C2} = 3\omega C_{y2} I_{y2} U_\phi = I_{y2} I_{y2}$$
(1)

где  $U_\phi$  — фазное напряжение [кВ];  $E_\phi$  — фазная напряженность поля;  $\omega$  — угловая частота синусоидального тока;  $C_{yn}, \dots, C_{y2}$  — удельные емкости  $n$ -ой, ... второй линии [мФ/км];  $I_{Cn}, \dots, I_{C2}$  — емкостные токи  $n$ -ой, второй линии [А/км];  $I_{yn}, \dots, I_{y2}$  — удельные токи  $n$ -ой, второй линии [А/км];  $l_{yn}, \dots, l_{y2}$  — длины  $n$ -ой, ... второй линий [км].

Ток нулевой последовательности в поврежденной линии  $w_1$  при ОЗЗ (2):

$$I_{31} = I_{Cn} + \dots + I_{C2} + I_{C1} - I_{C1.2} =$$

$$= I_{Cn} + \dots + I_{C2} + I_{C1.1}.$$
(2)

Зная емкостной ток, протекающий через линию  $w_1$  (при аналогичном ОЗЗ на другой линии), (3):

$$I_{C1} = 3\omega C_{y1} l_{y1} U_\phi = I_{y1} l_{y1},$$
(3)

где  $C_{y1}$  — удельная емкость первой линии [мФ/км];  $I_{y1}$  — удельный ток первой линии [А/км];  $l_{y1}$  — длина первой линии [км].

Суммарный емкостной ток сети будет определяться (4):

$$I_{C\Sigma} = I_{Cn} + \dots + I_{C2} + I_{C1}. \quad (4)$$

Определив суммарный емкостной ток в сети (4) и поврежденной линии (2), определяют их разницу (5):

$$I_{C\Sigma} - I_{31} = (I_{Cn} + \dots + I_{C2} + I_{C1}) -$$

$$- (I_{Cn} + \dots + I_{C2} + I_{C1.1}) = I_{C1} - I_{C1.1}. \quad (5)$$

Таким образом, предложенным алгоритмом можно определить поврежденное присоединение [4].

На основе метода, основанного на принципе противоположности полярностей первой полуволны переходного тока нулевой последовательности, построим имитационную модель определения поврежденного присоединения (рис. 1).

Главной задачей является: проверка предлагаемых алгоритмов и создание имитационной модели определения поврежденного присоединения в программе Matlab–Simulink. Поэтому параметры линий (тип, марка кабеля) и силового трансформатора, мощности нагрузок заданы произвольно. При помощи блоков «Three-Phase Fault», установленных в разных частях линий 6(10) кВ, моделируются замыкания. Для анализа данного метода в разветвленных сетях присоединим несколько ответвлений к первой и третьей линиям.

В программе Matlab (библиотека SimPower-Systems) отсутствует блок, который позволял бы определять поврежденную фазу ЛЭП, поэтому такой блок можно создать самостоятельно [10]. Приведем описание и принцип действия такого блока.

Блок «ОПЛ» состоит из блока способного определить поврежденную фазу «ОПФ» и логических элементов.

На входы A1, B1, C1 блока «ОПФ» поступает переменное амплитудное значение тока, которое снимается измерительным блоком «Current Measurement» (рис. 2). Полученные значения делятся на  $\sqrt{2}$ . Полученное амплитудное значение тока поступает на блок «Ort», где происходит преобразование в ортогональную систему координат (рис. 3). В блоке «Ort» происходит оценка квадранта по значениям

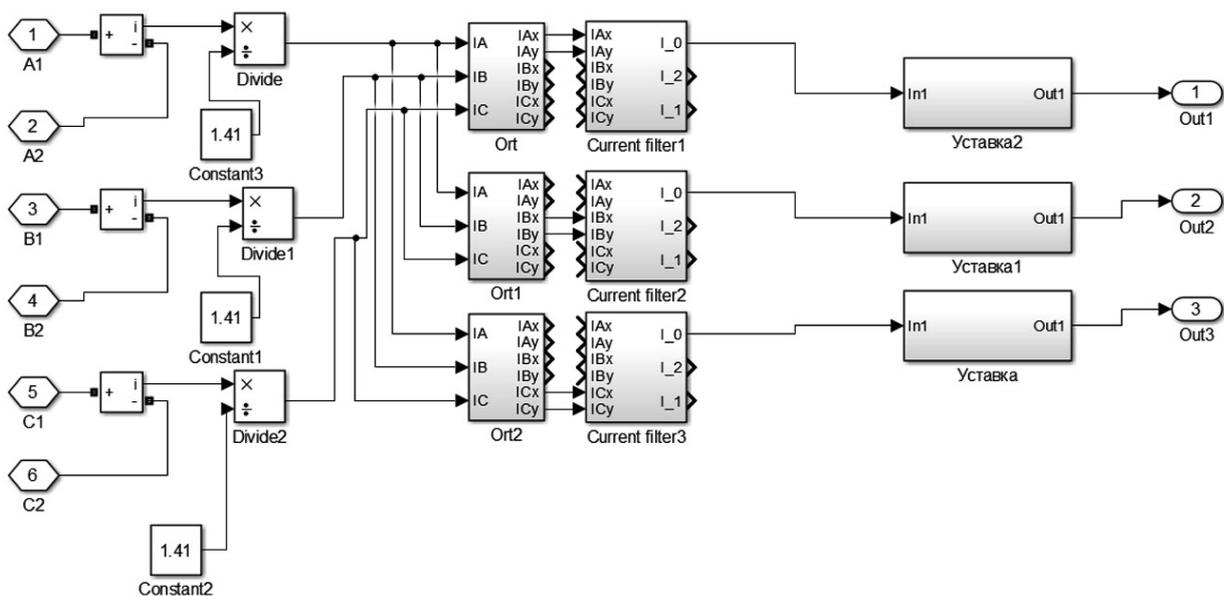


Рис. 2. Структура блока определения поврежденной фазы

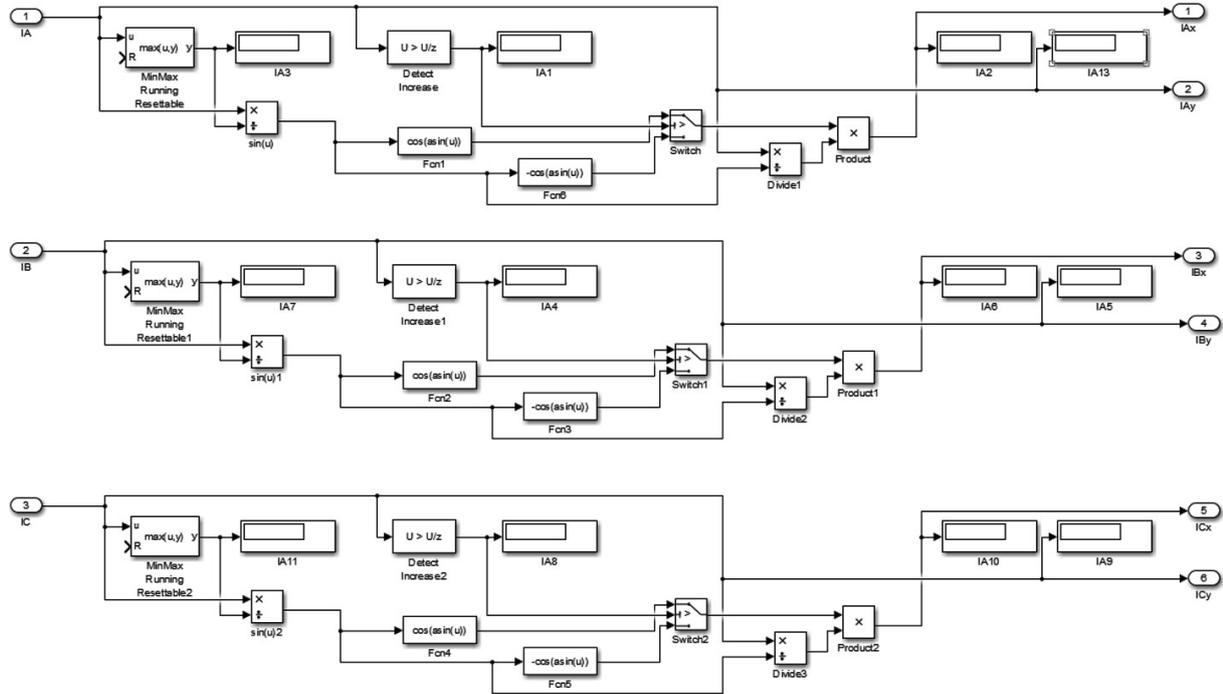


Рис. 3. Структура блока «Out»

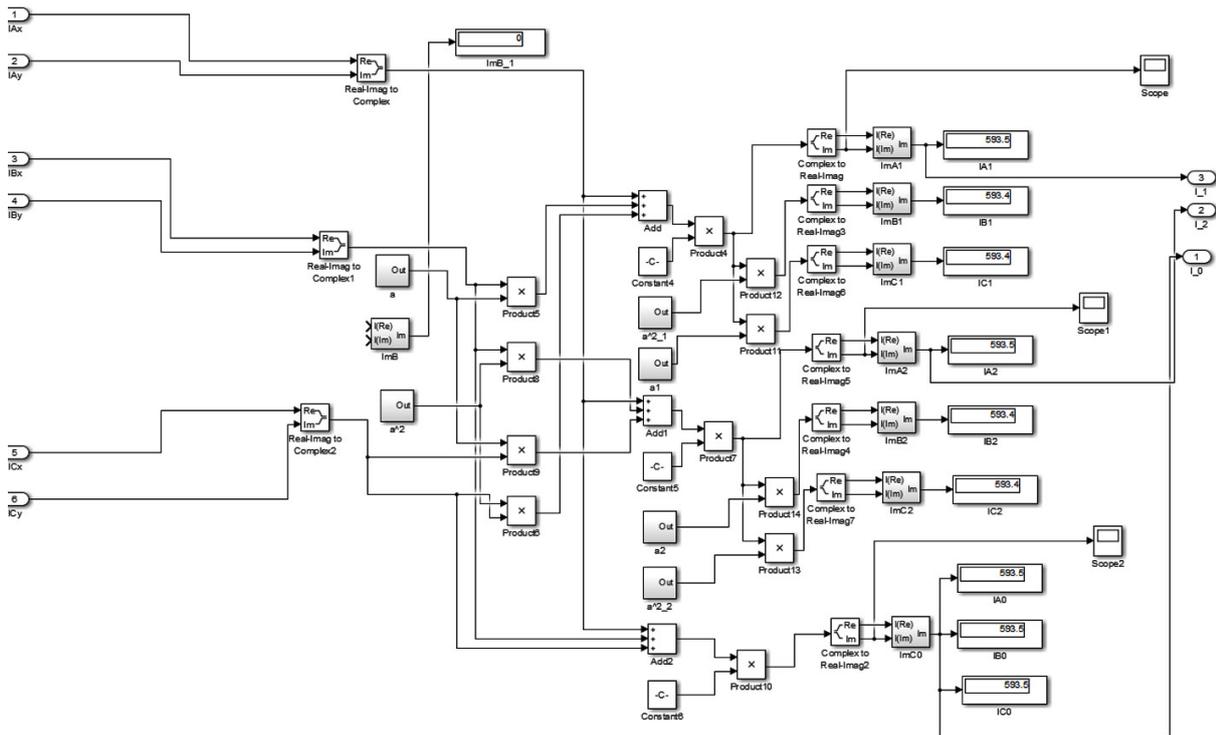


Рис. 4. Структура блока «Current filter»

синусоиды и косинусоиды. Далее полученные значения передаются на фильтр тока «Current filter», где выделяется мнимая и действительная части (рис. 4). В свою очередь, выделенные части разбиваются на симметричные составляющие. Далее значение тока нулевой последовательности поступает на блок «Уставка», в котором регистрируется максимальное значение блоком «MinMax Running Resettable» и сравнивается с установленными уставками на блоках «Замыкание» и «НР» (рис. 5). Для

адаптации к любой из сетей в блоке «Замыкание» необходимо предусмотреть уставку срабатывания при увеличении тока более чем на рабочее значение в данной сети. В блоке «НР» уставку срабатывания составляет меньше значения рабочего тока. Срабатывание уставок в блоках происходит через выдержку времени (0,5 секунды), обеспеченную блоком «Transport delay». Для того чтобы срабатывала уставка по току, устанавливаем блок УШЗ, который представляет собой дополнительный источник

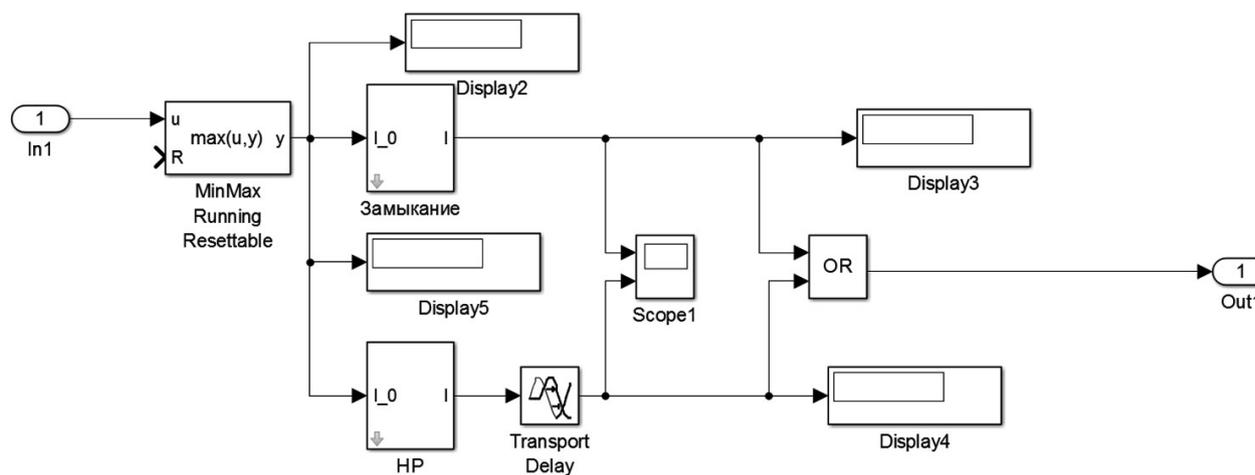


Рис. 5. Структура блока «Уставка»

и увеличивает ток в поврежденных фазах в несколько раз. Работу блока по определению поврежденной фазы можно отслеживать по осциллограммам, установленным после блоков «Замыкания» и «НР». После того как работает одна из уставок, сигнал поступает на логический блок «ИЛИ». Дисплей показывает, повреждена фаза (1) или нет (0), для каждой из фаз (см. рис. 1). Выходы «Out1», «Out2» и «Out3» соответствуют фазам А, В и С.

Для определения поврежденной линии создан отдельный блок «ОПЛ», в который со всех блоков «ОПФ» собирается информация о полученном выходном сигнале. Затем с помощью математического блока суммы «Add» определяются присоединение и вид замыкания на ней. Если выходной сигнал равен нулю (0), то линия не повреждена, иначе (1–3) в линии произошло замыкание, значение выходного сигнала соответствует виду замыкания (рис. 1).

По результатам проведенной работы была с помощью построенной имитационной модели подтверждена работоспособность рассмотренного алгоритма определения поврежденной линии. Построенная имитационная модель способна определять не только поврежденную фазу, линию, но и вид замыкания.

#### Библиографический список

1. Мирошник В. Ю., Батулько Д. В., Ляшков А. А. Методы и алгоритмы для определения места однофазного замыкания на землю в сетях 6–35 кВ с использованием параметров аварийного режима // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2017. № 1 (151). С. 62–65.
2. Мирошник В. Ю., Гармс Е. В., Батулько Д. В. Анализ дистанционных методов определения места однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всерос. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов. Омск, 12 мая 2016 г. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. С. 114–119.
3. Батулько Д. В. Определение поврежденной воздушной линии с однофазным замыканием на землю в сети с изолированной нейтралью: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2007. 18 с.
4. Никитин К. И., Владимиров Л. В., Ерёмин Е. Н., Хачевский К. В. Токовый принцип определения поврежденности присоединения и места однофазного замыкания в сети с изолированной нейтралью // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2012. № 1 (107). С. 234–236.

5. Владимиров Л. В. Дистанционное определение места однофазного замыкания на землю воздушных линий, питающих объектов нефтедобычи: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2007. 162 с.

6. Kletsel M. Y., Borodenko V. A., Goryunov V. N., Nikitin K. I., Batulko D. V., Petrova E. V. The device for determining the distance to single phase fault on the power line // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings. 2015. P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147098.

7. Электронный каталог [www.ic-bresler.ru](http://www.ic-bresler.ru): Индикатор повреждения воздушной линии (ИПВА) FI-3A1F. URL: [http://relematika.ru/produkty/6-35\\_kv/indikator-fi-3a1f](http://relematika.ru/produkty/6-35_kv/indikator-fi-3a1f) (дата обращения: 25.05.2017).

8. Качесов В. Е., Ларионов В. Н., Овсянников А. Г. О результатах мониторинга перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю в распределительных кабельных сетях // Электрические станции. 2002. № 8. С. 38–45.

9. Качесов В. Е. Метод определения зоны однофазного замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением // Электричество. 2005. № 6. С. 9–19.

10. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ИД Питер, 2007. 288 с. ISBN 978-5-388-00020-0.

**МИРОШНИК Вадим Юрьевич**, магистрант гр. ЭЭМ-153 факультета «Элитное образование и магистратура» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

**ЛЮБЕЗНЫХ Дмитрий Александрович**, магистрант гр. ФЭ 12-03М факультета энергетики политехнического института Сибирского федерального университета.

**ПОМОГАЛОВА Екатерина Васильевна**, магистрант гр. ЭЭМ-153 факультета «Элитное образование и магистратура» ОмГТУ.

**БАТУЛЬКО Дмитрий Васильевич**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

**АНДРЕЕВА Елена Григорьевна**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ.

Адрес для переписки: [miroshnikovad@gmail.com](mailto:miroshnikovad@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 25.05.2017 г.

© В. Ю. Мирошник, Д. А. Любезных, Е. В. Помогалова, Д. В. Батулько, Е. Г. Андреева