

УДК 62-83

**А. В. БУБНОВ**  
**А. Н. ЧЕТВЕРИК**  
**А. Н. ЧУДИНОВ**

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## **МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ЛОГИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО СРАВНЕНИЯ С КОСВЕННЫМ ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ОШИБКИ ПО УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ДЛЯ СИНХРОННО-СИНФАЗНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

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 разработка классификации методов косвенного определения ошибки по угловой скорости в электроприводе с фазовой синхронизацией и разработка схемных решений по построению блока определения частотного рассогласования, являющегося одним из основных элементов многофункционального логического устройства сравнения. Предложена классификация методов косвенного определения ошибки по угловой скорости (вариантов построения блока определения частотного рассогласования сравниваемых импульсных последовательностей) и разработаны функциональные схемы блока определения частотного рассогласования, реализующие косвенные методы определения ошибки по угловой скорости в синхронно-синфазном электроприводе.

**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, видео-записывающей аппаратуры, в копировальных установках, что обусловлено их высокими точностными и динамическими показателями в широком диапазоне регулирования угловой скорости [1 – 7].

Одно из перспективных направлений развития теории электропривода связано с сокращением используемых в электроприводе датчиков, разработкой косвенных методов измерения требуемых параметров и, в конечном итоге, переходом на проектирование бездатчиковых электроприводов. В ЭПФС благодаря использованию цифрового логического устройства сравнения частот и фаз входных импульсных последовательностей появляется возможность косвенного определения ошибки по углу, ошибки по угловой скорости и углового уско-

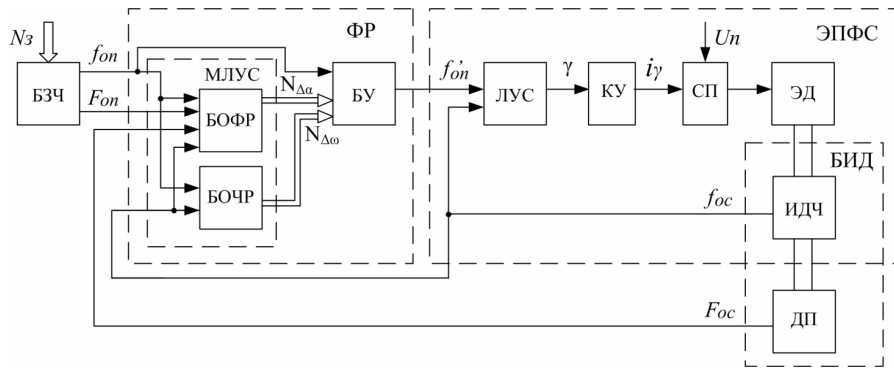


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема синхронно-синфазного электропривода

рения путем логической обработки импульсных сигналов задания и обратной связи [8].

Обобщенная функциональная схема ССЭ (рис. 1) выполнена в виде двухконтурной системы автоматического управления (САУ), включающей в себя внутренний контур — ЭПФС, реализованный на основе принципа фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), и внешний контур управления доворотом вала электродвигателя в заданное начальное угловое положение (фазирования), соответствующее началу строки сканирования, управление которыми осуществляется от блока задания частоты БЗЧ, формирующего импульсы опорной частоты  $f_{оп}$  (задания частоты вращения электропривода) и импульсы угловой привязки (задания начального углового положения вала электродвигателя)  $F_{оп}$ .

Электропривод с фазовой синхронизацией состоит из логического устройства сравнения ЛУС частот и фаз двух импульсных последовательностей: задания  $f_{оп}$  и обратной связи  $f_{ос}$ ; формируемой на выходе импульсного датчика частоты вращения ИДЧ, расположенного на валу электродвигателя ЭД, корректирующего устройства КУ и силового преобразователя СП.

Внешний контур фазирования включает в себя датчик положения вала электродвигателя ДП, формирующий импульсы индикации текущего положения вала электродвигателя  $F_{ос}$ , и фазированный регулятор ФР, содержащий блок определения фазового рассогласования БОФР импульсов частот  $F_{оп}$  и  $F_{ос}$  (пропорционального угловой ошибке  $\Delta\alpha$  электропривода), блок определения частотного рассогласования БОЧР входных импульсных последовательностей  $f_{оп}$  и  $f_{ос}$  (пропорционального ошибке по частоте вращения  $\Delta\omega$  электропривода) и блок управления БУ угловым положением вала электродвигателя. Фазированный регулятор преобразует по определенному закону импульсы задающей частоты  $f_{оп}$  в импульсы входной задающей частоты ЭПФС  $f'_{оп}$ .

Блок определения фазового рассогласования и блок определения частотного рассогласования образуют многофункциональное логическое устройство сравнения (МЛУС). Датчик положения и импульсный датчик частоты вращения ИДЧ образуют блок импульсных датчиков БИД, расположенный на валу электродвигателя.

В качестве ЛУС в системах фазовой автоподстройки частоты ФАПЧ используется импульсный частотно-фазовый дискриминатор (ИЧФД) [8]. Алгоритм работы ИЧФД основан на логической обработке порядка следования импульсов частот  $f_{оп}$  и  $f_{ос}$ , и по результатам анализа дискриминатор устанавливается в один из трех следующих режимов работы:

— режим насыщения при разгоне (Р) электропривода ( $f_{оп} > f_{ос}$ ,  $\gamma = 1$ );

— режим фазового сравнения (П — пропорциональный) дискриминатора ( $f_{оп} \approx f_{ос}$ ,  $\gamma = \Delta\phi$ , где  $\Delta\phi$  — фазовое рассогласование импульсов частот  $f_{оп}$  и  $f_{ос}$ );

— режим насыщения при торможении (Т) электропривода ( $f_{оп} < f_{ос}$ ,  $\gamma = 0$ ).

Переход из одного режима в другой осуществляется в моменты прихода двух импульсов одной из сравниваемых частот между двумя импульсами другой частоты.

Целью статьи является разработка классификации методов косвенного определения ошибки по угловой скорости в электроприводе с фазовой синхронизацией и разработка схемных решений по построению БОЧР, являющегося одним из основных элементов многофункционального логического устройства сравнения (МЛУС).

В современных системах управления ЭПФС и ССЭ применяются методы косвенного определения ошибки по угловой скорости, реализованные в БОЧР, входящем в состав МЛУС. Основу многофункционального логического устройства сравнения составляет импульсный частотно-фазовый дискриминатор (ИЧФД) с расширенными функциональными возможностями [9]:

— индикация режимов работы ИЧФД (Р, П, Т);

— индикация моментов времени изменения режима работы ИЧФД (0/2 — ситуации отсутствия импульсов обратной связи между двумя соседними импульсами опорной частоты, 2/2 — ситуации прохождения двух импульсов обратной связи между двумя соседними импульсами опорной частоты).

На основе ИЧФД с расширенными функциональными возможностями могут быть реализованы методы косвенного определения ошибки по угловой скорости, классификация методов приведена на рис. 2.

Известные методы косвенного определения ошибки по угловой скорости реализуются в трех основных вариантах построения блока определения частотного рассогласования (БОЧР).

В первом варианте построения БОЧР (рис. 3) осуществляется подсчет повторяющихся совпадений во времени импульсов частот  $f_{оп}$  и  $f_{ос}$ . При использовании двухразрядного счетчика импульсов определяется область текущих значений ошибки по угловой скорости  $\Delta\omega$  [8]:

$$|\Delta\omega| \leq 2 \cdot \tau \cdot \varphi_0 \cdot f_{оп}^2, \quad (1)$$

где  $\tau$  — длительность импульсов  $f_{оп}$  и  $f_{ос}$ ;

$\varphi_0$  — угловое расстояние между соседними метками ИДЧ.

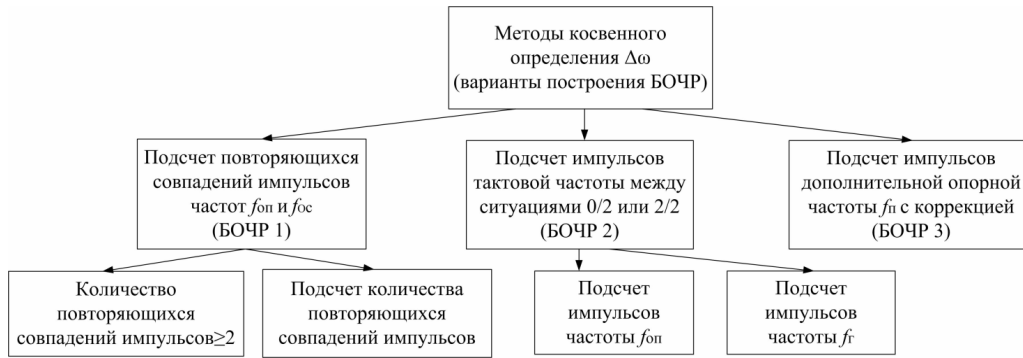


Рис. 2. Классификация методов косвенного определения ошибки по угловой скорости и вариантов построения БОЧР

Совпадение во времени импульсов  $f_{оп}$  и  $f_{ос}$  определяется с помощью логического элемента И, совпадение во времени пауз импульсных сигналов  $f_{оп}$  и  $f_{ос}$  определяется с помощью логического элемента ИЛИ – НЕ. Первый двухразрядный счетчик импульсов подсчитывает количество повторных совпадений входных импульсов. Сброс счетчика импульсов в нулевое состояние осуществляется при появлении между совпадающими импульсами двух совпадений пауз импульсных сигналов, что позволяет не подсчитывать единичные совпадения входных импульсов. Сброс второго счетчика импульсов в нулевое состояние осуществляется при появлении совпадающих входных импульсов, что позволяет вернуть схему в исходное состояние. При появлении двух повторных совпадений входных импульсов первый счетчик импульсов устанавливается в состояние «10», срабатывает одновибратор ОБ, сигнализируя о нахождении электропривода в заданной области ошибки по частоте вращения.

Из выражения (1) следует, что определяемая область ошибки по частоте вращения зависит от опорной частоты. В то же время синхронизация ЭПФС на любой заданной частоте вращения происходит в области начальных условий  $\Delta\omega \leq \Delta\omega_r$ , где  $\Delta\omega_r = \sqrt{2 \cdot \varphi_0 \cdot \varepsilon_m}$ , где  $\varepsilon_m$  — максимальное ускорение электродвигателя в режимах насыщения ИЧФД. Для расширения диапазона рабочих угловых скоростей электропривода может быть использовано регулирование длительности  $\tau$  импульсов частоты  $f_{оп}$  в зависимости от заданной угловой скорости  $\tau = K / f_{оп}^2$ , где  $K = const$  (рис. 4, где ПЧК — преобразователь частоты – код, ФДИ — формирователь длительности импульсов).

При использовании  $n$ -разрядного счетчика совпадающих импульсов (рис. 5) подсчитывается количество повторяющихся совпадений импульсов  $N$ , полученное значение переписывается в регистр и по нему вычисляется текущее значение ошибки по угловой скорости (при разгоне электропривода) [8]:

$$\Delta\omega = \frac{\varphi_0}{N \cdot T_{оп}} \cdot \sigma - \frac{\varepsilon_m \cdot N \cdot T_{оп}}{2}, \quad (2)$$

где  $\sigma = \frac{\tau_{оп} + \tau_{ос}}{T_{оп}}$ ;  $T_{оп} = 1/f_{оп}$ .

Для защиты от ложных срабатываний БОЧР при большой ошибке по частоте вращения, когда за время прохождения одного импульса частоты  $f_{ос}$  проходят несколько импульсов частоты  $f_{оп}$ , в схему БОЧР дополнительно вводят RS-триггер и второй логический элемент И (рис. 6).

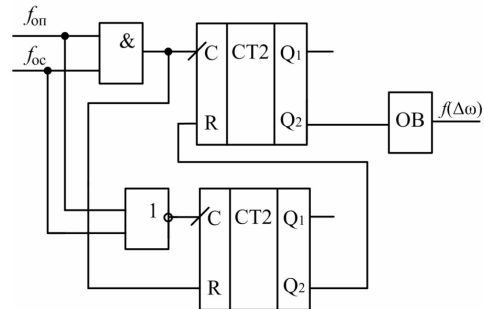


Рис. 3. Функциональная схема БОЧР 1 с определением ситуации повторного совпадения во времени входных импульсов

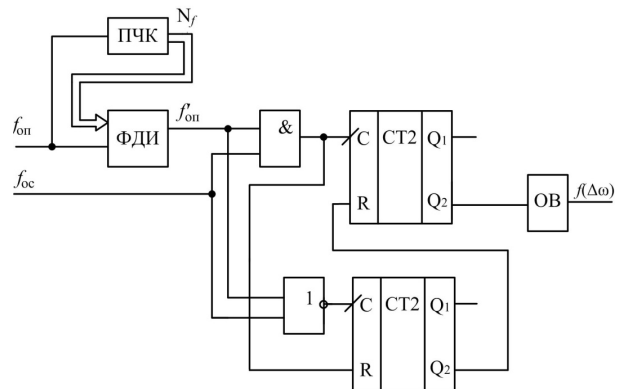


Рис. 4. Функциональная схема БОЧР 1 с коррекцией длительности импульсов  $f_{оп}$

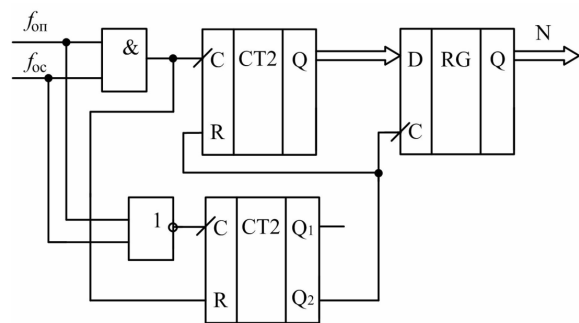


Рис. 5. Функциональная схема БОЧР 1 с подсчетом количества повторяющихся совпадений входных импульсов

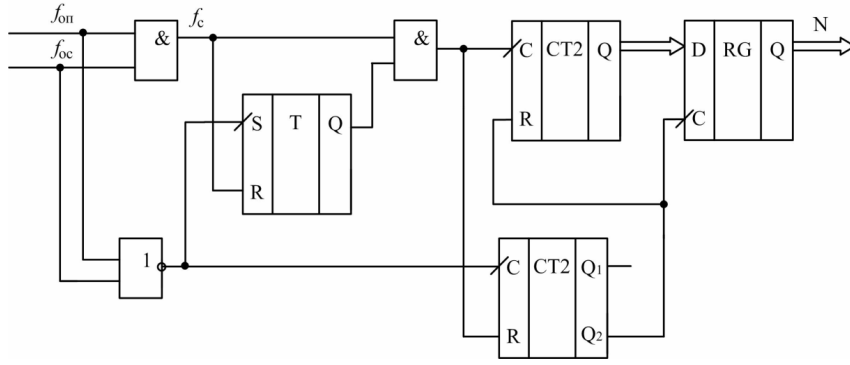


Рис. 6. Функциональная схема БОЧР 1 с защитой от ложных срабатываний при больших значениях ошибки по угловой скорости

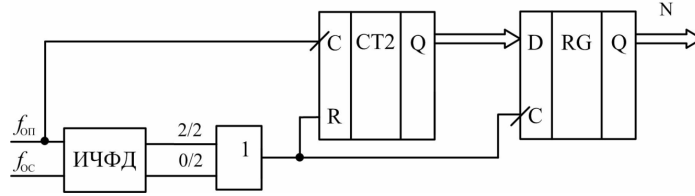


Рис. 7. Функциональная схема БОЧР 2 с подсчетом импульсов задающей частоты между ситуациями 0/2 или 2/2

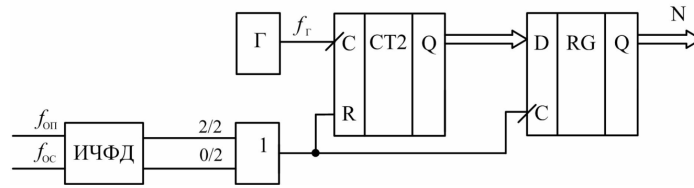


Рис. 8. Функциональная схема БОЧР 2 с подсчетом импульсов высокой частоты между ситуациями 0/2 или 2/2

Во втором варианте построения БОЧР осуществляется подсчет импульсов тактовой частоты  $f_{оп}$  между двумя ситуациями 0/2 или 2/2 (рис. 7). Ошибка по угловой скорости рассчитывается по формуле:

$$\Delta\omega = \frac{\varphi_0}{N \cdot T_{оп}} - \frac{\varepsilon_m \cdot N \cdot T_{оп}}{2}. \quad (3)$$

При использовании данного метода косвенного измерения ошибки по частоте вращения исчезает зависимость от длительности входных импульсов и повышается точность измерения за счет увеличения значения  $N$ , подсчитываемого на интервале между ситуациями 0/2 или 2/2 (в данном методе подсчитываются все импульсы частоты  $f_{оп}$ , а в предыдущем — только совпадающие с импульсами частоты  $f_{ос}$ ).

В качестве источника тактовой частоты может быть использован независимый генератор импульсов  $f_r$  (рис. 8) или высокочастотный генератор импульсов в БЗЧ [8]. Определение ошибки по угловой скорости рассчитывается по формуле:

$$\Delta\omega = \frac{\varphi_0}{N \cdot T_r} - \frac{\varepsilon_m \cdot N \cdot T_r}{2}, \quad (4)$$

где  $T_r = 1/f_r$ .

В этом случае в формуле отсутствует переменная величина  $T_{оп}$  (заменяется постоянной величиной  $T_r$ ),

что упрощает процедуру вычисления, и, кроме того, точность измерения  $\Delta\omega$  может быть повышена за счет выбора частоты  $f_r > f_{оп}$ , при этом значение  $N$ , подсчитываемое на интервале между ситуациями 0/2 или 2/2, увеличивается.

В третьем варианте построения БОЧР формируется дополнительная опорная последовательность импульсов с частотой  $f_n$  (рис. 9, где ГВЧ — генератор высокой частоты, ДЧ — управляемый делитель частоты, ВУ — вычислительное устройство), близкой к текущему значению частоты следования импульсов в канале обратной связи  $f_{ос}$  [10]. На основе данной частоты определяется значение ошибки по угловой скорости  $\Delta\omega'$ , которое в дальнейшем пересчитывается на реальное значение ошибки по угловой скорости путем добавления разности  $\Delta\omega_n$  между заданной угловой скоростью  $\omega_3$  и угловой скоростью, соответствующей дополнительной подстраиваемой частоте  $f_n$ :

$$\Delta\omega = \Delta\omega' + \Delta\omega_n,$$

$$\Delta\omega' = \frac{\varphi_0}{N \cdot T_n} - \frac{\varepsilon_m \cdot N \cdot T_n}{2},$$

$$\Delta\omega_n = \omega_3 - \omega_n = \varphi_0 \cdot f_r \left( \frac{1}{N_{оп}} - \frac{1}{N_{оп}} \right),$$

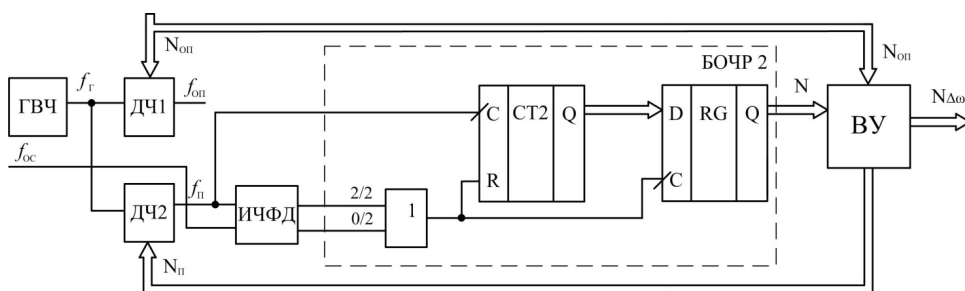


Рис. 9. Функциональная схема БОЧР 3 с подсчетом импульсов подстраиваемой частоты между ситуациями 0/2 или 2/2 и последующей коррекцией

$$\Delta\omega = \left( \frac{\varphi_0}{N \cdot T_n} - \frac{\varepsilon_m \cdot N \cdot T_n}{2} \right) + \varphi_0 \cdot f_r \left( \frac{1}{N_{оп}} - \frac{1}{N_{оп}} \right). \quad (5)$$

Данный метод определения ошибки по угловой скорости позволяет получать более точные значения при больших отклонениях текущей угловой скорости от заданной. Первое слагаемое в выражении (5), соответствующее  $\Delta\omega'$ , дает большую точность измерения по сравнению с выражением (3), т.к. при выборе  $f_n \approx f_{oc}$  происходит значительное увеличение  $N_n$  и снижение погрешности ( $1/N_n$ ) его измерения. Второе слагаемое в выражении (5), соответствующее  $\Delta\omega_n$ , может быть рассчитано с высокой точностью, т.к. входящие в его состав аргументы характеризуются высокой точностью.

Анализ выражений (1–5) показывает, что основными аргументами, влияющими на точность вычисления ошибки по угловой скорости, являются  $\varepsilon_m$  и  $N$ . Реальное угловое ускорение в режимах насыщения ЛУС может изменяться в зависимости от режима работы ЛУС и текущей угловой скорости электропривода. Для получения его более точного значения можно использовать косвенный метод измерения  $\varepsilon_m$  [8]. Погрешность, вносимая измеренным значением  $N$ , определяется как  $1/N$  (погрешность целочисленного значения  $N$ ). Поэтому более перспективными являются схемные решения БОЧР 2 и БОЧР 3, реализующие косвенные методы измерений ошибки по угловой скорости, путем подсчета количества импульсов между ситуациями 0/2 или 2/2. При больших ошибках по угловой скорости достаточную точность измерений может обеспечить только БОЧР 3.

Рассмотренные варианты построения БОЧР могут эффективно применяться при построении ЭПФС и ССЭ с улучшенными динамическими показателями, в режимах 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. 169 с.
2. Hsieh G. C., Hung J. C. Phase-Locked Loop Techniques. A Survey // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1996. Vol. 43, Issue 6. P. 609–615. DOI: 10.1109/41.544547.

3. Best R. E. Phase-Locked Loops: Design, Simulation, and Applications. NY: McGraw-Hill, 2003. 421 p.

4. Wu Y., Zhao H., 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., Fang E. A Phase-Locked-Loop-Assisted Internal Model Adjustable-Speed Controller for BLDC Motors // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55, Issue 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 // Journal of the Franklin Institute. 2015. Vol. 352 (10). P. 4188–4204. DOI: 10.1016/j.jfranklin.2015.06.001.

8. 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.

9. 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. 2016. Vol. 59, Issue 9. P. 985–989.

10. Пат. 2608177 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 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.

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

Адрес для переписки: bubnov-av@bk.ru.

**ЧЕТВЕРИК Алина Наилевна**, старший преподаватель кафедры «Электрическая техника».

Адрес для переписки: alina.an@mail.ru.

**ЧУДИНОВ Александр Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая техника».

Адрес для переписки: chudinov\_al@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.08.2017 г.

© А. В. Бубнов, А. Н. Четверик, А. Н. Чудинов

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТИХОХОДНЫХ ДЛИННОХОДОВЫХ БЕССМАЗОЧНЫХ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТУПЕНЕЙ ДЛЯ СЖАТИЯ ХОЛОДИЛЬНЫХ АГЕНТОВ И КРИОГЕННЫХ ГАЗОВ

Авторами данной статьи разработана методика расчёта рабочих процессов тихоходных длинноходовых поршневых ступеней, верифицированная при использовании в качестве рабочего тела — воздух. Полученные результаты позволили показать, что в тихоходных поршневых компрессорных агрегатах возможно сжатие газа до средних давлений в одной ступени при удовлетворении условия по допустимой температуре сжимаемого газа. В связи с этим необходимо решить вопрос о возможности применения тихоходных ступеней при сжатии различных газов, в том числе и в холодильной и криогенной технике.

**Ключевые слова:** тихоходная ступень, криогенная техника, холодильные агенты, температура нагнетания.

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

В настоящее время подавляющее число компрессорных агрегатов в качестве привода применяют электродвигатели либо двигатели внутреннего сгорания. Наиболее часто используемые компрессорные станции имеют частоту вращения коленчатого вала более 12,5 об./с, т.е. время цикла составляет 0,08 с и менее [1, 2]. В предлагаемых же конструкциях тихоходных ступеней применяется линейный привод, позволяющий обеспечить параметр  $\psi = Sd$ , где  $d$  — диаметр цилиндра;  $S$  — ход поршня более 10 [3, 4]. В существующих компрессорах общего назначения данный параметр принимается в диапазоне 0,4–0,8 [4, 5]. Время цикла для рассматриваемых тихоходных ступеней  $\tau$  может составлять от нескольких десятых секунды до 2...6 с.

В данной работе на примере тихоходного длинноходового поршневого компрессора [6–8] рассмотрена возможность сжатия различных газов до давления до 3 МПа в одной ступени.

Проблема сжатия газа в одной ступени до больших давлений связана с недопустимым нагревом деталей ступени и вопросами пожаро- и взрывоопасности. Данная проблема известна давно и описана в различных источниках [1, 9–11].

Преимущества, которые можно получить, сжимая газ в одной ступени, очевидны при сравнении тихо-

ходных длинноходовых ступеней с многоступенчатыми мембранными и поршневыми агрегатами и анализа недостатков последних [1, 10, 12–14]. Исследуемые компрессорные ступени имеют менее напряжённый температурный режим, меньшие массогабаритные параметры, сниженные виброшумовые характеристики, более высокий ресурс работы.

Также наборы из тихоходных ступеней могут иметь различные компоновки, позволяющие рационально разместить их в зависимости от конфигурации места размещения, что не так просто выполнить для рассмотренных выше мембранных и многоступенчатых поршневых компрессоров.

В данной работе поставлена задача определить возможность применения тихоходных длинноходовых ступеней ПК для сжатия различных по своим физическим свойствам газов. Параметрический анализ выполнен по уточнённой методике расчёта рабочего процесса [6].

Параметрический анализ режимов охлаждения проводился для следующих газов: аммиак, пропанобутановая смесь, гелий, водород. Были рассмотрены следующие режимы работы: диаметр цилиндра — 0,02 м; ход поршня — от 0,2 до 0,5 м; время цикла — от 0,25 до 2 с. Тип цилиндрико-поршневого уплотнения — манжетное. Давление всасывания — 0,1 МПа;

Сжимаемый газ	k	Ср, кДж/(кг·К)	Сv, кДж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> при 20 °С	$\lambda$ , Вт/м·К при 20 °С	$\lambda \cdot 10^6$ , Па·с при 20 °С
Воздух	1,4	1,006	0,717	1,204	0,025	18,1
Аммиак	1,31	2,24	1,709	0,769	0,026	10,0
Пропан	1,130	1,86	1,64	1,882	0,024	8,0
Водород	1,407	14,26	10,1	0,0899	0,18	8,8
Гелий	1,33	5,29	3,98	0,1785	0,136	19,46
Пропан-бутановая смесь	1,13	1,554	1,365	2,703	0,018	7,44

температура всасывания — 293 К; давление нагнетания до 3 МПа. Внешнее охлаждение цилиндра — интенсивное, с температурой окружающей среды — 293 К.

Поршневые манжеты могут быть выполнены из таких материалов, как «криолон 3», фторпласт 4. Данные материалы хорошо работают до температуры 160 °С, что соответствует 433 К [5]. Для определённости, в качестве определяющего параметра для оценки возможности применения того или иного газа в качестве рабочего тела в тихоходных длинноходных поршневых ступенях принята средняя температура нагнетания. В табл. 1 представлены характеристики исследуемых газов.

Расчётная схема объекта исследования подробно описана в работе [3].

Основные допущения, принятые при выполнении расчётного анализа [1, 4, 9]:

1. Газовая среда непрерывна и гомогенна.
2. Моделируемые процессы обратимы, равновесны и квазистатичны.
3. Параметры состояния рабочего газа изменяются одновременно по всему объёму рабочей камеры.
4. Изменение потенциальной и кинетической энергии газа пренебрежимо мало.
5. Теплота трения поршневых уплотнений не подводится к газу.
6. Параметры состояния в полостях всасывания и нагнетания постоянны
7. Течение рабочего газа через газораспределительные органы и конструктивные зазоры принимается адиабатным и квазистационарным.
8. Теплообмен между газом и стенками рабочих полостей конвективный и может быть описан формулой Ньютона – Рихмана.
9. Теплообмен на внешних поверхностях стенок деталей, формирующих рабочую камеру, определяется при постоянном по времени коэффициенте теплоотдачи, выбранном для рассматриваемого участка теплообменной поверхности.
10. В стенках рабочей камеры отсутствуют внутренние источники тепла.

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

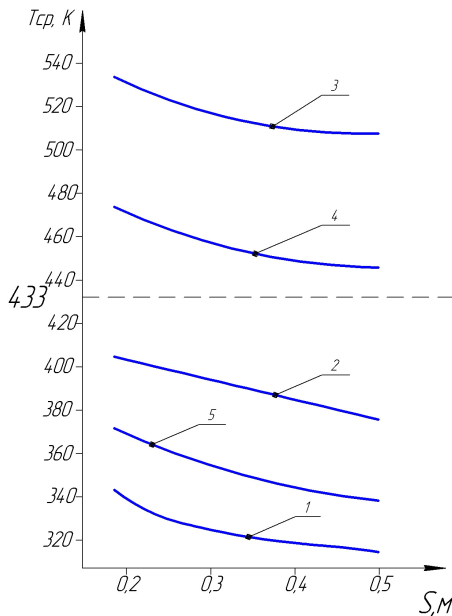
сового баланса, уравнение состояния, следствие закона Джоуля для внутренней энергии газа, уравнения расхода газа через клапан и конвективного теплообмена между газом и стенками рабочей камеры. Математические модели компрессорной ступени такого типа классифицируются как модели второго уровня и широко применяются в практике исследования и проектирования компрессоров объёмного принципа действия [1].

Уравнение конвективного теплообмена между рабочим газом и стенками рабочей камеры, используемое применительно к внутренним поверхностям расчётных 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.

Граничные условия на внешней поверхности стенок рабочей камеры носят слабопеременный характер, обусловленный малой амплитудой изменения температуры стенок за время рабочего цикла [4, 5] и практически постоянными параметрами охлаждающей среды. Комплексным параметром, характеризующим условия внешнего теплоотвода, является приведенный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{пр}$ , а также температура охлаждающей среды.

В общем случае анализ формирования нестационарных температурных полей в стенках рабочей камеры может быть проведён путём решения заданной задачи теплопроводности для системы конструктивных элементов, формирующих рабочую камеру ступени, со взаимозависимыми быстроизменяющимися граничными условиями 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 [11]. Разработанная методика расчёта реализована в программном пакете PASCAL.

Входными данными являются следующие величины: температура всасывания; давление нагнетания и давление всасывания; газовая постоянная; теплоёмкость газа; коэффициент теплопроводности; диаметр цилиндра; ход поршня; величина мёртвого объёма (мм); обороты коленчатого вала; характеристики материала из которого сделаны детали, образующие рабочую камеру (плотность; теплоёмкость; коэффициент теплопроводности); толщина стенок; площадь



**Рис. 1. Зависимость средней температуры газа от хода поршня при давлении нагнетания  $P_n = 3$  МПа и времени цикла  $\tau = 1$  с:**  
1 — воздух; 2 — аммиак; 3 — гелий; 4 — водород; 5 — пропан-бутановая смесь

клапана; коэффициент расхода; коэффициенты теплоотдачи на внешних поверхностях по участкам.

Выходными данными являются следующие изменяющиеся по времени параметры: температура газа; давление газа; объём газа; температура элементов стенок рабочей камеры; масса газа в рабочей камере; тепловые потоки. А также интегральные характеристики: количество тепла, отданное или принятое по рабочим процессам; средняя температура нагнетания.

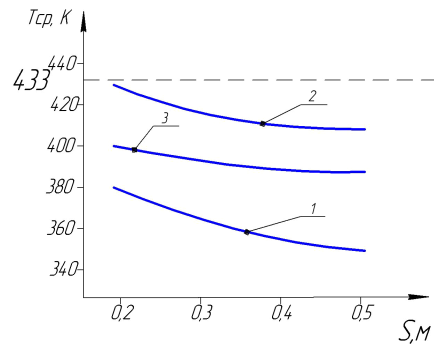
На рис. 1–3 представлены результаты расчётов рабочих процессов бесшмазочных тихоходных ступеней при сжатии различных газов.

Из полученных графиков видно, что для различных газов температуры нагнетания различны для одинаковых режимов работы. Одни газы имеют большой запас по температуре нагнетания по сравнению с допустимой, другие же даже при длительных временах цикла имеют температуру, близкую к максимально допустимой, либо вообще температуру выше допустимой.

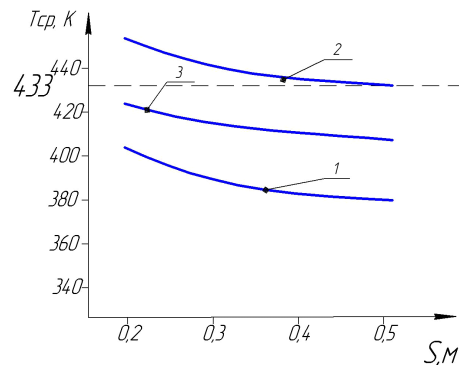
Очевидно, что применение бесшмазочных тихоходных длинноходовых ступеней для сжатия того или иного газа возможно в определённых диапазонах режимных и конструктивных параметров. Наиболее широкие диапазоны при допустимой средней температуре нагнетания из рассматриваемых газов имеют воздух, аммиак и пропан-бутановая смесь. Перспективным направлением исследования является определение диапазонов режимных и конструктивных параметров тихоходных ступеней, для которых возможно применение того или иного газа в допустимом диапазоне температур.

#### Библиографический список

1. Plastinin P., Fedorenko S. Simulation of Transient Gas-Temperatures in Cylinders of Reciprocating Compressors Using Identification Techniques with a Mathematical Model // International Compressor Engineering Conference. 1978. 295 p. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/295> (дата обращения: 20.03.2017).



**Рис. 2. Зависимость средней температуры газа от хода поршня при давлении нагнетания  $P_n = 3$  МПа и времени цикла  $\tau = 0,5$  с:**  
1 — воздух; 2 — аммиак; 3 — пропан-бутановая смесь



**Рис. 3. Зависимость средней температуры газа от хода поршня при давлении нагнетания  $P_n = 3$  МПа и времени цикла  $\tau = 0,25$  с:**  
1 — воздух; 2 — аммиак; 3 — пропан-бутановая смесь

2. Пластинин П. И. Расчёт и исследование поршневых компрессоров с использованием ЭВМ. М.: ВИНТИ, 1981. 168 с.

3. Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Громов А. Ю., Титов Д. С., Бусаров И. С. Математическое моделирование процессов теплообмена в рабочей камере тихоходной ступени поршневого компрессора // Компрессорная техника и пневматика. 2016. № 6. С. 6–10.

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

5. Фотин Б. С., Пирумов И. Б., Прилуцкий И. К. [и др.]. Поршневые компрессоры. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1987. 372 с.

6. Yusha V. L., Busarov S. S., Goshlya 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. Omsk, 2016. P. 297–302. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.706.

7. Yusha V. L., Dengin V. G., Karagusov 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. Slovakia, Papiernicka. 2013. Book of abstracts. P. 22.

8. 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 / Eds.: A. V. Myshlyaytsev, V. A. Likhonobov, V. L. Yusha // Procedia Engineering. International Conference on Oil and Gas Engineering (OGE-2015), 25–30 April 2015. Vol. 113. P. 264–269. ISBN 978-1-5108-0988-8.



9. Chrustalev B. S., Zdalinsky V. B., Bulanov V. P. Mathematical Model of Reciprocating Compressor With One or Several Stages for the Real Gases // International Compressor Engineering Conference. 1996. P. 1108. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/1108> (дата обращения: 30.03.2017).

10. Михайлов А. К., Ворошилов В. П. Компрессорные машины. М.: Энергоатомиздат, 1989. 290 с.

11. Прилуцкий И. К., Прилуцкий А. И. Расчёт и проектирование поршневых компрессоров и детандеров на нормализованных базах. СПб.: СПбГАХПТ, 1995. 193 с. ISBN 5-230-10678-6.

12. Perevozchikov M. M., Pirumov I. B., Chrustalyov B. S., Ignatiev K. S., Taha A. Low flow displacement compressor: thermodynamical process analysis // International Compressor Engineering Conference. 1992. P. 937. <http://docs.lib.purdue.edu/icec/937>.

13. Алтухов С. М. О долговечности работы мембран компрессоров // Химическое и нефтяное машиностроение. 1965. № 5. С. 8–11.

15. Грезин А. К., Зиновьев В. С. Микрокриогенная техника. М.: Машиностроение, 1977. 232с.

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

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

**НЕДОВЕНЧАНЫЙ Алексей Васильевич**, аспирант кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

**ЧИЖИКОВ Максим Александрович**, магистрант гр. ТМОм-162 факультета «Элитное образование и магистратура».

**САЖИН Богдан Сергеевич**, магистрант гр. Хм-151 факультета «Элитное образование и магистратура». Адрес для переписки: [bsi1980@mail.ru](mailto:bsi1980@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 03.04.2017 г.

© В. К. Васильев, С. С. Бусаров, А. В. Недовенчаный,

М. А. Чижиков, Б. С. Сажин

УДК 621.314

**В. С. КЛИМАШ  
Б. Д. ТАБАРОВ**

Комсомольский-на-Амуре  
государственный технический университет,  
г. Комсомольск-на-Амуре

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПУСКРЕГУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Предлагается магнитно-тиристорное пускорегулирующее устройство на высокой стороне трансформаторной подстанции взамен механического переключающего устройства. Оно обеспечивает управляемое включение и выключение силового трансформатора под нагрузкой и стабилизацию напряжения у потребителей на заданном уровне. Исследования в среде *Matlab* штатной и новой схемы показали, что предлагаемое устройство ограничивает пусковые токи, просадку напряжения и ударные электродинамические усилия, действующие на обмотки трансформатора, а выключение производится без тока и дуги через контакты выключателя.

**Ключевые слова:** трансформаторные подстанции, регулирование напряжения под нагрузкой, пропускная способность электропередачи, коэффициенты мощности и полезного действия.

**Введение.** В настоящее время трансформаторные подстанции не оснащаются устройствами силовой электроники. В их комплект входит различная коммутационная аппаратура. Это высоковольтные и низковольтные выключатели, предназначенные для подключения силовых трансформаторов к сети и нагрузке, и механические переключающие устройства типа ПБВ и РПН [1–6] для дискретного регулирования напряжения при отключенном силовом трансформаторе от сети и при работе под нагрузкой.

К недостаткам существующих выключателей с механическими контактами следует отнести включение при одновременном замыкании контактов во всех трех фазах, которые сопровождаются переход-

ными процессами с большими бросками токов и просадками напряжения в сети. Кроме этого, выключение разрывом электрической цепи механическими контактами сопровождается дугой. Все это приводит к дополнительным потерям в силовых трансформаторах и в сети, увеличению материалоемкости, удорожанию и сокращению срока службы электрооборудования. Кроме этих недостатков, РПН создает еще более тяжелые режимы для силовых трансформаторов, поскольку при переключении отпаек возникают межвитковые короткие замыкания с ударными токами и электродинамическими усилиями в высоковольтных обмотках трансформаторов. Мало того что РПН сам по себе сложное

и дорогое устройство, его применение в комплектных трансформаторных подстанциях (КТП) приводит еще и к усложнению и удорожанию эксплуатации.

Силовые трансформаторы со встроенным РПН имеют большое количество ответвлений в первичной обмотке. Это усложняет технологию производства трансформаторов и увеличивает их стоимость.

**Разработка пускорегулирующего устройства для подстанций.** Для устранения вышеуказанных недостатков предлагается вместо РПН применять магнитно-тиристорное пускорегулирующее устройство (МТПУ).

Схема трансформаторной подстанции с высоковольтным МТПУ приведена на рис. 1. Она содержит трёхфазную сеть G, высоковольтный выключатель Q, силовой трансформатор СТ, тиристорные ключи VS, дроссель L, контактор AC и нагрузку Z.

Пускорегулирующее устройство включает между сетевым высоковольтным выключателем Q и первичной обмоткой силового трансформатора СТ и может быть конструктивно согласовано как с сухими, так и масляными трансформаторами [7]. Производство тиристорных ключей VS на 35 кВ и 2 кА освоено Опытным заводом ВЭИ им. В. И. Ленина (Москва) для статических компенсаторов реактивной мощности электросталеплавильных цехов. Эти тиристорные регуляторы применены на металлургическом комбинате «Амурметалл» (г. Комсомольск-на-Амуре) и находятся в эксплуатации более 15 лет.

Принцип работы схемы (рис. 1) заключается в том, что после включения высоковольтного выключателя Q, при отключенном контакторе AC, к силовому трансформатору СТ прикладывается напряжение через тиристорный блок VS.

Включение и выключение силового трансформатора СТ производится специальным способом [8]. Сначала тиристорными ключами VS подключают две фазы первичной обмотки СТ к соответствующим фазам сети в момент перехода фазного напряжения

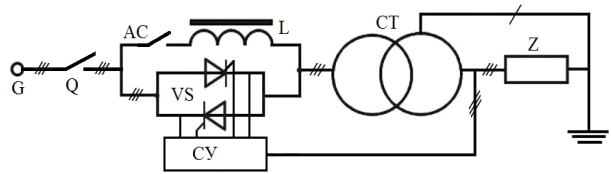


Рис. 1. Схема трансформаторной подстанции с магнитно-тиристорным устройством

третьей фазы сети через ноль, а затем подключают к сети G, третью фазу первичной обмотки силового трансформатора СТ в момент перехода линейного напряжения двух других фаз сети через ноль. В завершение процесса включения силового трансформатора СТ параллельно полностью открытым тиристорным ключом подключают трехфазный дроссель L посредством трехфазного контактора AC.

Для исследования штатной и новой схемы трансформаторной подстанции разработан программный комплекс в среде Matlab [9]. Модель подстанции представлена на рис. 2 и содержит следующие блоки и модули. Три однофазных источника, образующих трехфазную сеть, блок трехфазной активно-индуктивной нагрузки, силовой трансформатор, блок магнитно-тиристорного пускорегулирующего устройства, конденсаторную батарею, измерительные блоки и другие вспомогательные элементы.

**Математическое моделирование.** В программу математического моделирования и исследования физических процессов подстанции по схеме МТПУ – СТ входило следующее:

1. Исследование штатной схемы при включении, отключении и дискретном регулировании напряжения силового трансформатора. Изучение переходных процессов и выявление недостатков.
2. Разработка новых модулей математической модели в среде Matlab и проверка их адекватности физическим моделям. Построение модели ТП по схеме МТПУ – СТ.

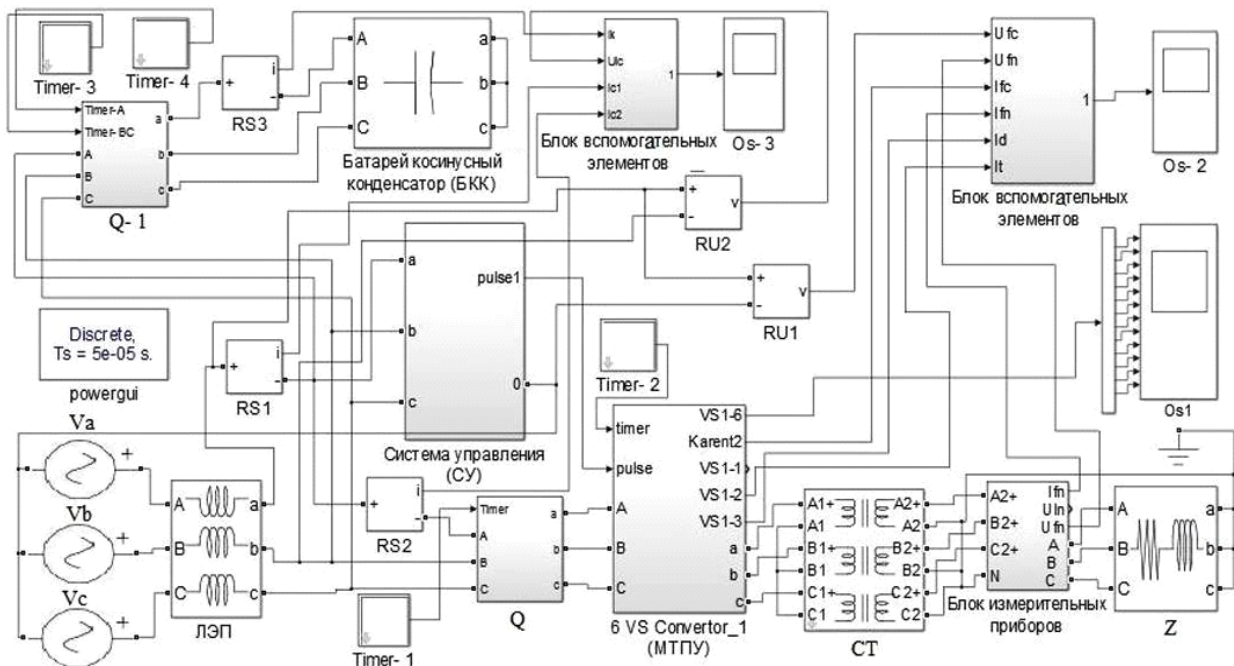


Рис. 2. Блочная-модульная модель трансформаторной подстанции с магнитно-тиристорным пускорегулирующим устройством

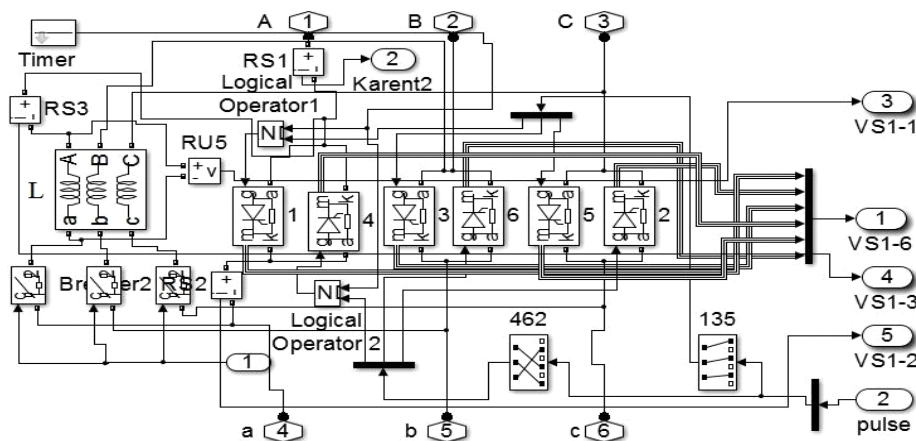


Рис. 3. Силовой модуль магнитно-тиристорного пускорегулирующего устройства

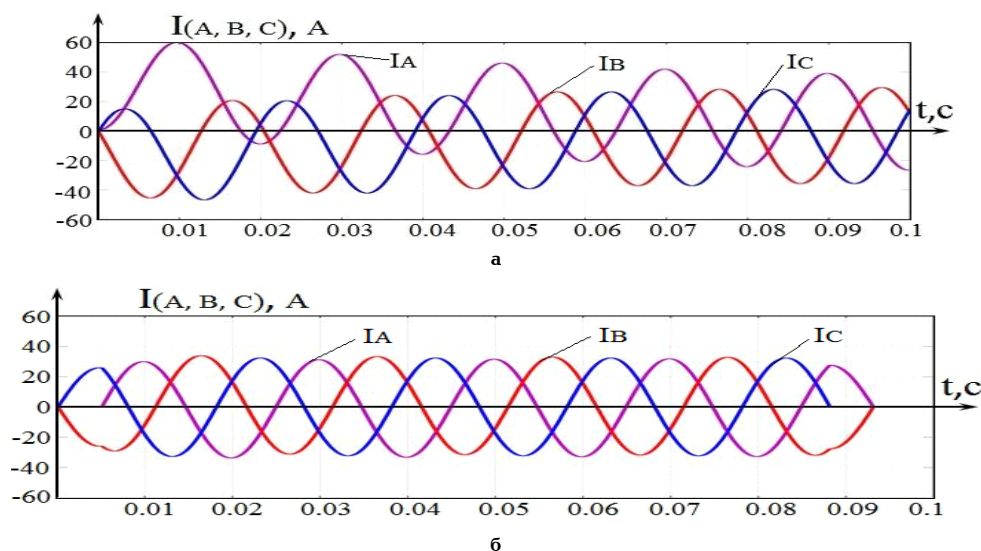


Рис. 4. Осциллограммы токов сети при включении подстанции электрическим аппаратом (а), и при включении и выключении — электронным аппаратом (б)

3. Исследование динамических процессов и разработка способов включения и выключения подстанции, а также способов перехода между включением и выключением на стационарный режим регулирования напряжения.

4. Исследования физических процессов при работе трансформаторной подстанции от магнитно-тиристорного пускорегулирующего устройства.

Каждый модуль и блок модели представляет собой частную систему дифференциальных уравнений. Стыковка модулей и блоков (объединение частных уравнений в общую систему дифференциальных уравнений) произведена по электротехническим принципам.

В состав модели МТПУ входит силовой модуль 6VS-Most-P из шести тиристоров, шунтированных дросселями, и система управления CONTROL system1. На рис. 3 показана развернутая схема силового модуля магнитно-тиристорного пускорегулирующего устройства.

**Результаты исследований.** На рис. 4 представлены осциллограммы токов при включение СТ электрическим аппаратом по штатной схеме (а) и электронным аппаратом по новой схеме (б).

Из численного эксперимента (рис. 4б) видно, что включение и выключение трансформаторной под-

станции производится без негативного влияния на сеть.

После включения контактора АС, схема подстанции подготовлена к регулированию напряжения. Контакттор АС включает дроссель L в цепь первичной обмотки силового трансформатора СТ и при плавном изменении проводящего состояния тиристорных ключей VS, производится непрерывное регулирование напряжения на входе трансформатора СТ и на нагрузке Z.

Верхний предел регулирования напряжения задается и устанавливается уменьшением коэффициента трансформации СТ (уменьшением числа витков первичной обмотки), а нижний предел — увеличением индуктивного сопротивления дросселя L.

Регулирование напряжения производится плавно с заданной интенсивностью, не вызывая возмущений переходных процессов в квазистационарных режимах. При необходимости диапазон регулирования напряжения на нагрузке может быть изменен применением дросселя с другим индуктивным сопротивлением. С уменьшением его сопротивления и, соответственно, диапазона регулирования искажения выходного напряжения также снижаются. Целесообразной областью применения являются трансформаторные подстанции промышленных предприятий

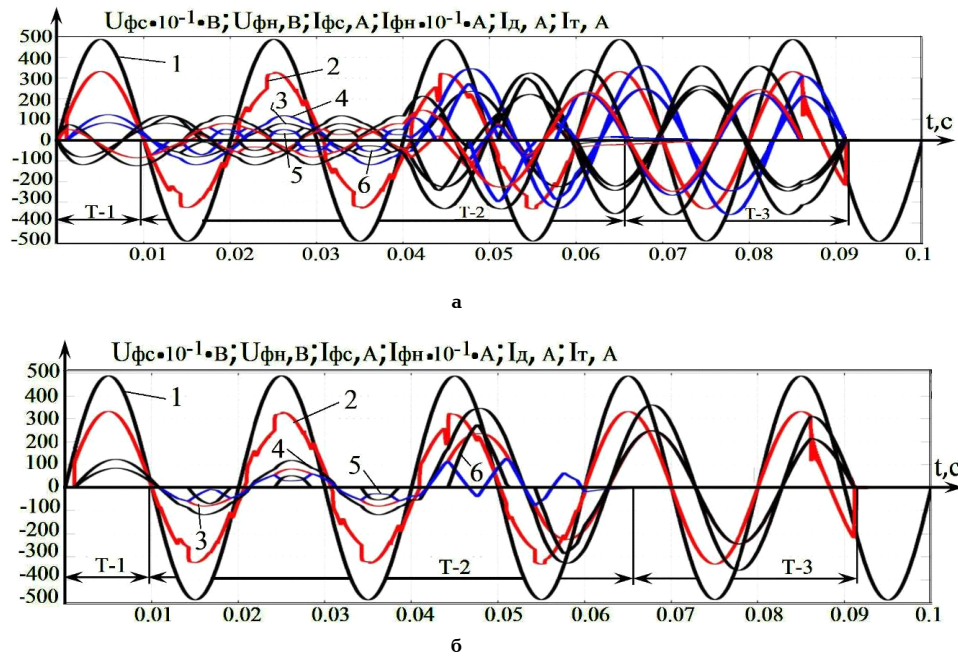


Рис. 5. Осциллограммы операций способа по включению и выключению подстанции

с напряжениями  $35/(10-6)$  кВ и  $(10-6)/0,4$  кВ, требующие устранения отклонений напряжения в узком диапазоне  $\pm 10\%$ .

Выключение силового трансформатора СТ подстанции без возникновения электрической дуги, коммутационных потерь и перенапряжений производится в три операции.

Сначала перед выключением контактора АС тиристорные ключи VS переводят в полностью открытое состояние (первая операция, угол управления  $\alpha$  уменьшается до угла  $\phi$ ), обнуляя ток через контакты контактора АС и дроссель L.

Затем производят выключение контактора АС (вторая операция) и на завершающей стадии отключения силового трансформатора (третья операция), снимают управляющие импульсы с тиристорных ключей VS, и они в результате естественных процессов в первичной цепи СТ выключаются без коммутационных потерь. Процессы включения и выключения СТ подстанции показаны на рис. 5. Выполнение всех операций, связанных с включением и отключением подстанции, иллюстрируют осциллограммы, приведенные для трех фаз (рис. 5а) и для одной фазы А (рис. 5б). На рис. 5 введены следующие обозначения: 1 и 2 — фазное напряжение сети и нагрузки; 3 и 4 — ток сети и нагрузки; 5 и 6 — ток дросселя и тиристоров.

На этих осциллограммах показаны временные интервалы коммутационных процессов. На интервале T-1 тиристорными ключами включаются две фазы В и С с последующим включением через четверть периода фазы А и одновременной подачей напряжения на катушку контактора. На интервале T-2 при включенном контакторе и дросселе производится увеличение угла  $\alpha$  с  $15$  до  $75$  град. На интервале T-3 в результате перегрузки подстанции происходит срабатывание максимальной токовой защиты с предварительным шунтированием дросселя тиристорными ключами и последующим снятием управляющих импульсов с тиристоров.

Естественное отключение СТ однооперационными тиристорами протекает следующим образом. Первой отключается та из фаз, ток в которой рань-

ше, чем в остальных фазах перейдет через ноль, а затем отключаются две оставшиеся фазы при переходе через ноль общего для них тока.

Результаты моделирования стационарных процессов этого устройства в составе ТП представлены на рис. 6 при разных углах управления тиристорами. Здесь введены обозначения: 1 — ток сети, 2 — ток тиристоров, 3 — ток дросселя.

Новое пускорегулирующее устройство позволит устранить недостатки, которые возникают при применении электрических аппаратов с механическими контактами.

Математическое моделирование ТП с МТПУ в цепи высоковольтной обмотки СТ в среде MatLab показало, что повышение или понижение напряжения сети не оказывает отрицательного действия на работу СТ, так как регулирование напряжения на входе подстанции обеспечивает стабильное напряжение у потребителей электрической энергии.

Будем различать три уровня в диапазоне регулирования напряжения:

- максимальный уровень, которым задается коэффициент трансформации силового трансформатора при полностью включенных тиристорах;
- номинальный уровень, который достигается изменением  $\alpha$  тиристоров;
- минимальный уровень обеспечивает сопротивление дросселя при полностью выключенных тиристорах;

Произведем расчеты на ЭВМ для каждого из этих уровней. Результаты этих исследований приведены на рис. 7 и 8. Здесь показаны фазное напряжение сети 1 и нагрузки 2, ток нагрузки 4, ток сети (ток на входе СТ) 3, ток дросселя 5 и ток тиристоров 6.

На промышленных предприятиях из-за большого количества потребляемой реактивной мощности возникает необходимость её компенсации. Наиболее распространенным способом является подключение конденсаторов. Однако из-за повышения напряжения на входе подстанции приходится отказываться от этого простого способа [10, 11]. Применение устройства стабилизации напряжения устраняет этот недостаток.

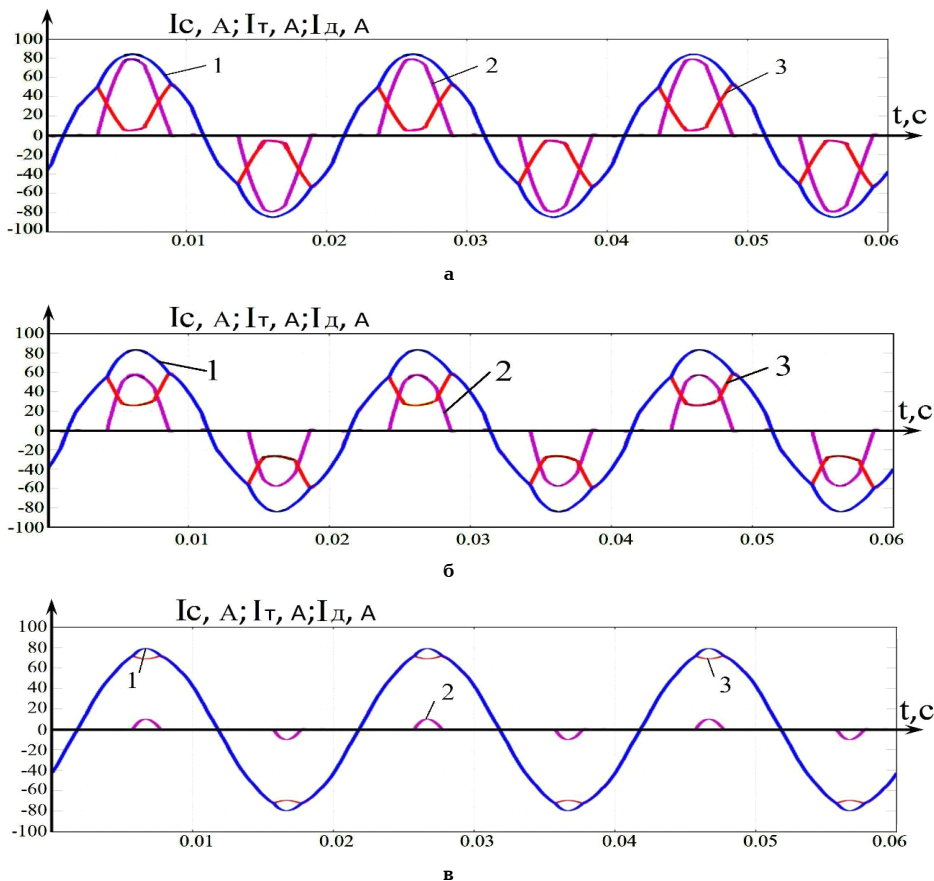


Рис. 6. Осциллограммы токов при разных углах управления тиристорами:  
а)  $\alpha = 65^\circ$ ; б)  $\alpha = 75^\circ$ ; в)  $\alpha = 102^\circ$

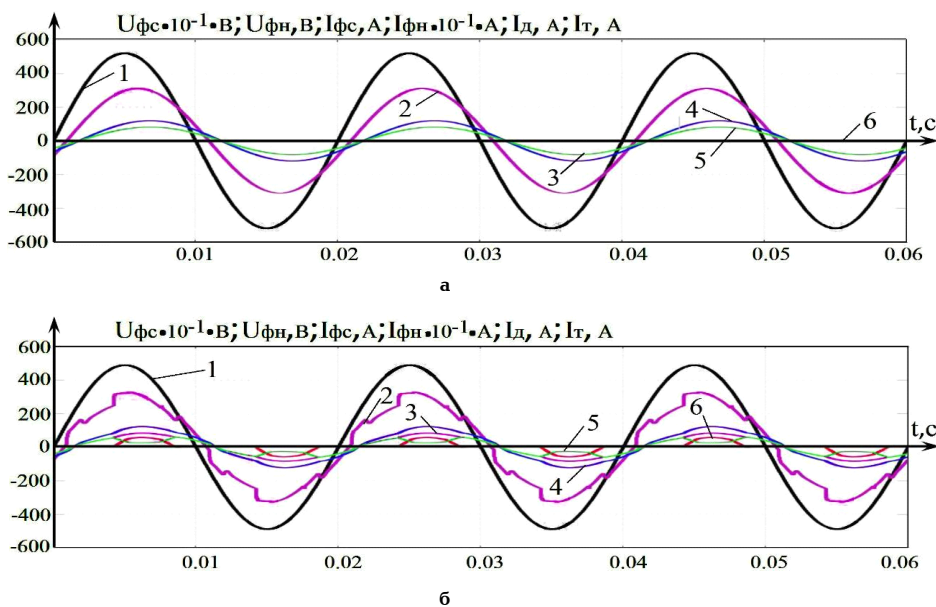


Рис. 7. Осциллограмма тока и напряжения при:  
а — максимальном режиме; б — номинальном режиме

**Заключение.** Численными экспериментами для новой схемы на имитационной модели установлено, что при включении подстанции токи нагрузки и сети практически сразу входят в установившийся режим. Магнитные потоки и токи намагничивания силового трансформатора в процессе пуска не имеют постоянных подмагничивающих составляющих и ударных динамических воздействий на обмотки СТ.

Отключение силового трансформатора производится при значениях токов, равных нулю, и, следовательно, без возникновения дуги между механическими контактами контактора.

Регулирование напряжения на входе силового трансформатора на заданном уровне позволяет сохранить паспортные значения его коэффициентов мощности и полезного действия.

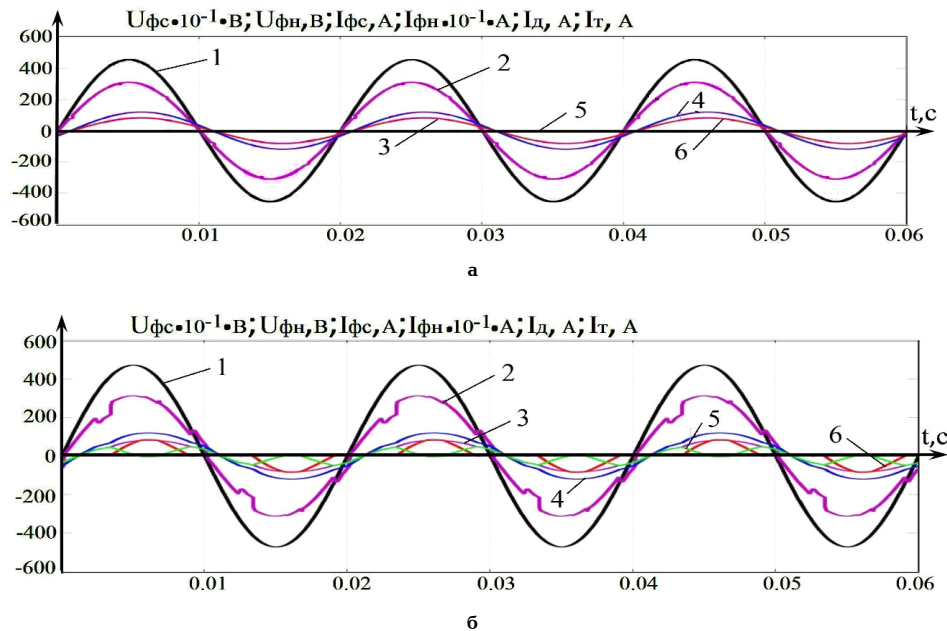


Рис. 8. Осциллограмма тока и напряжения при:  
а — минимальном режиме; б — минимально-промежуточном режиме

#### Библиографический список

- Сергеенков Б. Н., Киселев В. М., Акимова Н. А. Электрические машины: Трансформаторы / под ред. И. П. Копылова. М.: Высшая шк., 1989. 352 с. ISBN 5-06-000450-3.
- Климаш В. С. Вольтодобавочные устройства для компенсации отклонений напряжения и реактивной энергии с амплитудным, импульсным и фазовым регулированием. Владивосток: Дальнаука, 2002. 140 с. ISBN 5-8044-0231-5.
- Веников В. А., Идельчик В. И., Лисеев М. С. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 214 с.
- Вольдек А. И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1987. 832 с.
- Рожкова Л. Д., Козулин В. С. Электрооборудование станций и подстанций. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1987. 648 с.
- Князевский Б. А., Липкин Б. Ю. Электроснабжение промышленных предприятий. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1986. 400 с.
- Пат. 166559 Российская Федерация, МПК Н 02 М 5/00, Н 02 Р 13/00. Пускорегулирующее устройство на стороне высокого напряжения трансформаторной подстанции / Климаш В. С., Табаров Б. Д., Гетопанов А. Ю. № 2016121772/07; заявл. 01.06.16; опубл. 10.12.16, Бюл. № 34.
- Пат. 2622890 Российская Федерация, МПК Н 02 М 5/257 (2006.01). Способ включения, выключения и регулирования

напряжения трансформаторной подстанции / Климаш В. С., Табаров Б. Д., Гетопанов А. Ю. № 2016131037/07; заявл. 27.07.16; опубл. 21.06.17, Бюл. № 18.

9. Климаш В. С., Табаров Б. Д. Программный комплекс математических моделей магнитно-тиристорного пускорегулирующего устройства для силового трансформатора в среде MatLab: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. М.: ФИПС, 2017. № 2017613852 от 03.04.2017.

10. Мукосеев Ю. Л. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Энергия, 1973. 584 с.

11. Федоров А. А., Старкова Л. Е. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования по электроснабжению промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1987. 368 с.

**КЛИМАШ Владимир Степанович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Промышленная электроника».

Адрес для переписки: klimash@yandex.ru

**ТАБАРОВ Бехруз Довудходжаевич**, аспирант кафедры «Промышленная электроника».

Адрес для переписки: behruz.tabarov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.06.2017 г.

© В. С. Климаш, Б. Д. Табаров

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ВАГОНОВ

**Целью настоящей работы является комплексное изучение процесса подготовки вагонов для определения возможного искрообразования в результате как механических, так и электростатических явлений с разработкой технических мероприятий и рекомендаций по снижению рисков искрообразования.**

**Ключевые слова:** промывочно-пропарочные станции, статическое электричество, контур заземления, паровая укосина, искрообразование.

Основной задачей промывочно-пропарочной станции (ППС) является своевременная и качественная организация работ по подготовке вагонов-цистерн под налив и в ремонт.

На протяжении всего срока эксплуатации промывочно-пропарочного комплекса специалистами ОАО «РЖД» ведется работа по внедрению новых технологий, механизации процесса подготовки вагонов в целях улучшения условий труда и обеспечения безопасности работников ППС.

При подготовке вагонов возможно механическое и статическое искрообразование. Потенциальная угроза фрикционного искрообразования возникает при нарушении требований технологии подготовки цистерн под налив со стороны персонала. По совокупности факторов наибольшую угрозу фрикционного искрообразования представляют операции удаления остатков нефтепродуктов и пропарка котлов цистерн (механический удар паровой укосины о стенки заливной горловины цистерны).

Разряд статического электричества возникает при электризации. Разряд появляется в тех случаях, когда напряженность электростатического поля над диэлектриком или проводником доходит до пробивного напряжения. Пробивное напряжение воздуха составляет от 1 до 3 кВ/мм (в зависимости от формы электродов и влажности воздуха). Найти значение электрического заряда при истечении пара в цистерну невозможно из-за трудностей измерения.

Возникновение и при выполнении ряда условий накопление зарядов малой мощности характерно для процесса пропаривания цистерн и резервуаров [1 – 3]. Насыщенный перегретый водяной пар, проходя через паровой рукав, соприкасается со стенками рукава, что приводит к возникновению явления контактной электризации благодаря наличию трения.

При этом слой на поверхности водяной паровоздушной смеси зарядов уносится ее потоком, а заряды противоположного знака остаются на поверхности паропровода, и если оно заземлено, стекают в землю. Согласно требованиям нормативных документов способы защиты от статического электричества

можно разделить на две группы. Первая группа — это способы, применение которых предотвращает накопление зарядов на взаимодействующих телах (заземление элементов оборудования; подбор контактных пар и другие). Ко второй группе относят способы, которые не исключают возможности накопления зарядов, предотвращают их опасное проявление. На основании анализа физической природы образования статических зарядов при контактном взаимодействии газообразных сред с твердыми телами, к которым относятся трубопроводы, можно выделить два основных фактора, определяющих образование и накопление зарядов [4]:

1) свойства материалов, из которых изготовлен паропровод;

2) наличие условий для нейтрализации и удаления накопленного электростатического заряда паровоздушной смеси и с поверхности металлического трубопровода (качество его заземления).

Для пропарки на ППС используют металлические паровые укосины, представляющие собой сочлененную конструкцию, выполненную из стальных труб.

Условия для удаления накопленных зарядов статического электричества определяются качеством заземления металлоконструкций паровых укосин, рельсового пути и эстакад ППС.

На ППС проведено исследование контура заземления эстакады (рис. 1).

Вспомогательные контакты (штыри) заземления Р и С вбивались в землю. Расстояние между штырями и тестируемой эстакадой или рельсовой цепью составляло 10 м. Соединительные провода подключались к прибору согласно схеме измерения прибора KEW 4105A.

Измерение сопротивления цепи между заземлителем (контур эстакады) и паровой укосиной проводилось в двух точках, указанных на схеме (рис. 2).

Стабильность металосвязи оценивалась по результатам нескольких измерений прибором типа Ф4103-М1 при различных положениях элементов паровой укосины относительно друг друга. Изменения показаний переходного сопротивления можно

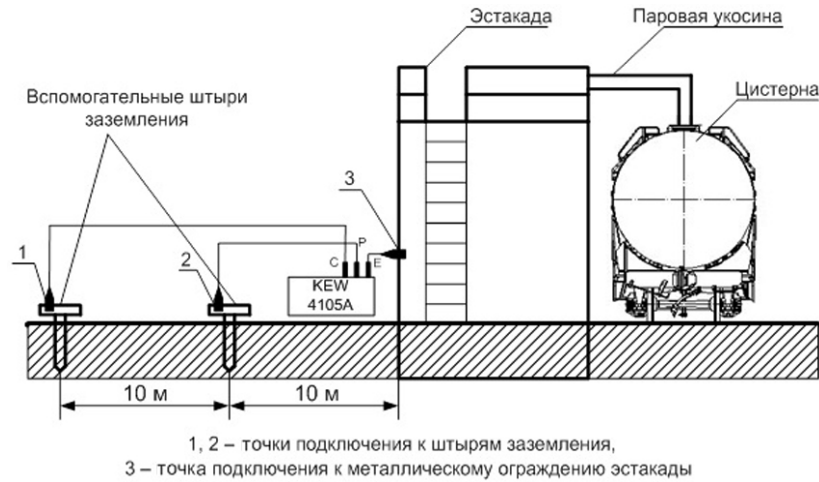


Рис. 1. Схема измерения контура заземления эстакады

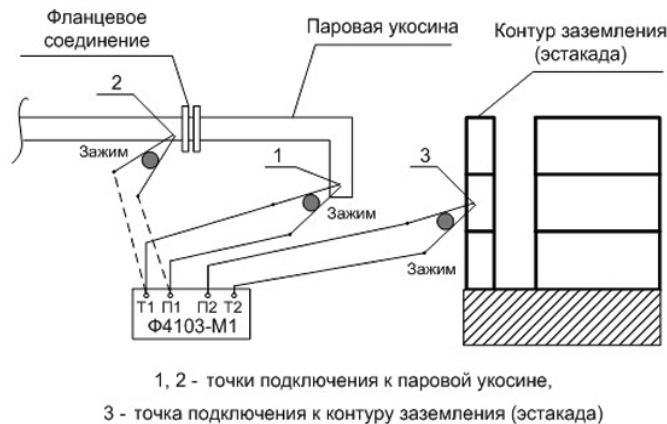


Рис. 2. Схема измерения металlosвязи между паровой укосиной и контуром заземления

оценить как несущественные, в пределах погрешности измерений и во всех случаях были менее нормативного значения 0,05 Ом.

При измерениях было установлено наличие электрической цепи (металlosвязи) при отсутствии металлического токопроводящего соединения, обусловленное существенным обводнением поверхностного грунта путевой призмы промывочно-пропарочных эстакад. Данное обстоятельство не позволяет гарантировать стабильность металlosвязи при изменении внешних факторов, например: погодных условий, длительном простое эстакады, изменении технологии удаления остатков нефтепродуктов и т.д.

Измерения статического электричества выполнялись цифровым прибором типа СТ-01 на расстоянии 20 мм от объекта исследования. Измеренные значения получены на различных точках объекта исследования (на эстакаде № 1, операция дегазации), (табл. 1).

В штатном режиме работы измеренные значения электрического поля на различных объектах не превышали критических значений, при которых возможен разряд (150 кВ/м [5–7]).

Заряды статического электричества стекают на устройства заземления, тем самым обеспечивают низкий уровень статического электричества, а следовательно, и отсутствие электрического потенциала в выбранных точках измерения. Образование статического электричества также может быть обусловлено наличием высоких температур (их разности)

для соединений различных металлов при выполнении операций пропарки, промывки и дегазации вагонов.

Термоэлектродвижущая сила (ТЭДС) возникает в результате разности потенциалов на концах неоднородного, однородного (сварного или спаянного) материала, создается разность температур на его концах:

$$\frac{d\varphi_i}{dT} = \alpha, \quad (1)$$

где  $d\varphi_i$  — изменение разности потенциалов при изменении на концах материала разности температур;  $\alpha$  — термо-эдс [В/К].

Электроны переходят из металла с меньшей работой выхода  $\chi_B$  в металл с большей работой выхода  $\chi_A$ , следовательно, на границе между двумя металлами из-за разности зарядов в металлах «А» и «В» возникает разность потенциалов. На границе между металлами возникает электрическое поле, локализованное в слое  $d = 10^{-8}$  см. В момент выравнивания уровней Ферми направленный поток электронов прекратится.

Число электронов, перешедших из «В» в «А», определяет контактную разность потенциалов. А концентрация электронов в металле зависит от положения уровня Ферми, м:

$$\mu_0 = \frac{h^2}{2m} \left( \frac{3n}{8\pi} \right)^{2/3}, \quad (2)$$



Значения измерения статического электричества на эстакаде № 1 (операция дегазации)

Объект	Напряженность поля $E$ , кВ/м
Выход паровой укосины	0,17
Заливная горловина	0,19
Верхняя поверхность цистерны	0,16
Боковая поверхность цистерны	0,16
Нижняя поверхность цистерны	0,12
Одежда работника на расстоянии 20 м от объекта	0,8...1,5

где  $n$  — концентрация электронов;  
 $m$  — эффективная масса электронов;  
 $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж/с — постоянная Планка.

Величину разности потенциалов при изменении температуры контакта на концах цепи можно определить как разность между энергией Ферми электронов металлов «А» и «В», она характеризуется значением энергий уровней Ферми в этих металлах:

$$\varphi = \mu_B - \mu_A = \frac{h^2}{2} \left( \frac{3n}{8\pi} \right)^{2/3} \left( \frac{n_B^{2/3}}{m_B} - \frac{n_A^{2/3}}{m_A} \right). \quad (3)$$

Внутреннюю контактную разность потенциалов на контакте двух металлов можно определить концентрацией электронов в изолированных металлах и их эффективными массами. Для металлов  $\Delta\varphi \sim 10^{-3} - 10^{-2}$  мВ. Значение  $\alpha$  определяется в зависимости от природы соприкасающихся проводников, для различных пар металлов и полупроводника или металлов различно.

Большинство пар металлов имеют постоянное значение ТЭДС в широком диапазоне температур, что делает контакт металлов (термопару) удобным способом для измерения температуры.

$$\frac{\Delta T}{\Delta \varphi} = \alpha. \quad (4)$$

Такой контакт показывает изменение разности потенциалов от изменения температуры от определенной начальной величины, то для нахождения температуры необходимо к  $\Delta T$  добавлять значение начальной температуры.

$$T = T_K + \frac{\Delta \varphi_i}{\alpha}. \quad (5)$$

Наиболее распространенная термопара медь-константан (Cu-(Cu-Ni)) имеет термо-эдс  $\alpha = 40$  мкВ/К.

Конструкция наконечника паровой укосины состоит из стальной трубы 1 и наконечника 2 из медного или алюминиевого сплава (рис. 3). В условиях повышенных температур (водяной пар под давлением при температуре свыше 200 °С), соединение работает в режиме образования термо-ЭДС.

При заземлении стальной трубы паровой укосины на алюминиевом наконечнике образуется более отрицательный потенциал. При длительной эксплуатации в зоне резьбового соединения образуется изолирующий оксидный слой, приводящий к потере электрической связи алюминиевого наконечника с контуром заземления.

Таким образом, алюминиевый наконечник, сохраняя свойства ударной защиты от образования фрикционной искры, уменьшает их при электризации при прохождении через него перегретого пара.

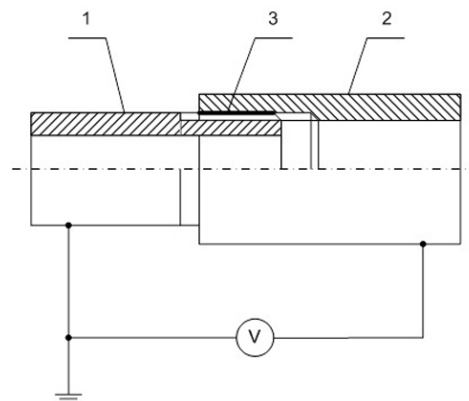


Рис. 3. Наконечник паровой укосины

Таблица 2  
Результаты измерений термо-ЭДС материалов наконечника, мВ

Материал	Температура, °С	
	20	200
Сталь — алюминий	52	108
Сталь — латунь	45	76

Были проведены измерения термо-ЭДС двух наконечников — из алюминиевого сплава и латуни (табл. 2). Установлено, что в соединении сталь-латунь уровень термо-ЭДС меньше, чем у соединения сталь-алюминий, что способствует меньшей электризации перегретого пара при движении по трубопроводу. При длительной эксплуатации оксидной пленки, ухудшающей электропроводность составной трубы сталь — латунь, в случае паяного соединения не образуется.

В результате эксперимента установили, что наконечник паровой укосины из алюминиевого сплава обеспечивает искробезопасность при фрикционном взаимодействии; при длительной эксплуатации в соединении сталь — алюминий образуется изолирующая оксидная пленка, которая ухудшает электрическую связь с контуром заземления; при сравнении алюминия и латуни лучшими свойствами обладает соединение сталь — латунь, обеспечивающая меньший уровень электризации водяного пара.

К мероприятиям по исключению искрообразования относятся создание единого контура заземления «паропровод (паровая укосина) — эстакада — рельсовая цепь» с использованием промывочно-паропроходной эстакады в качестве естественного за-

землителя; изменение конструкции паровой укосины.

Разработка конструкции паровой укосины [8]. В качестве материала паропровода укосины предложено использовать сталь 12X18H10T, относящуюся к хромоникелевым сталям аустенитного класса.

Предлагаемая конструкция шарнира, учитывающая термоэлектрические свойства соединений металлов и обеспечения надежного заземления при длительной эксплуатации (рис. 4).

Хорошая подвижность, устойчивая фиксация и плотное прилегание сочленяемых поверхностей обеспечиваются за счет шариковых подшипников, для уменьшения трения в которые закладывается жаростойкая электропроводящая смазка.

Преимущества предлагаемого приспособления для пропарки котлов цистерн (рис. 5): жесткая фиксация паровой укосины; экономия на паровых рукавах; снижение нагрузки на промывальщика-пропарщика; конструкция шарнира исключает возможность утечек пара и обеспечивает электрическую связь предусмотрена вставка из искробезопасного металла, обеспечивающая электрическую связь цистерны с укосиной для отвода статического электричества; применены жаропрочные, коррозионностойкие материалы.

Необходимо отметить, что до настоящего времени четкой позиции по наиболее эффективному материалу и технологии производства искробезопасных деталей, работающих в условиях фрикционного контакта, нет. Фрикционная искробезопасность в конструкциях приспособлений для пропаривания цистерн может достигаться различными способами. Самый надежный и безопасный вариант — изготовление деталей паровой укосины, контактирующих с поверхностью котла цистерны, целиком из искробезопасного металла или сплава.

Важным фактором, ограничивающим возможность применения алюминия и его сплавов (в том числе алюминиевых бронз) при изготовлении искро-

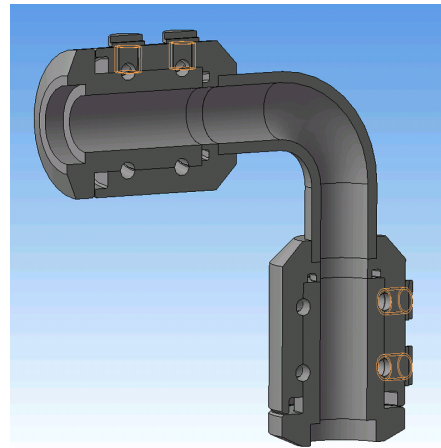


Рис. 4. Конструкция узла подвижного сочленения паровой укосины

безопасных элементов конструкции паровой укосины, является сложность обеспечения надежной металловязи алюминиевого наконечника со стальным паропроводом и основной конструкцией эстакады. Причина — образование окислов на поверхности алюминиевой детали в кислородсодержащей среде, имеющих крайне низкую электрическую проводимость. В этом случае алюминиевый наконечник играет роль накопителя зарядов статического электричества, величина которых может быть опасной для возникновения поджигающих электростатических искр.

Альтернативным вариантом является использование латунных сплавов, обладающих хорошими электропроводящими свойствами и коррозионной стойкостью, большей по сравнению с чистой медью прочностью, технологичностью обработки и при этом безопасностью при фрикционном взаимодействии со стальными деталями котла цистерны.

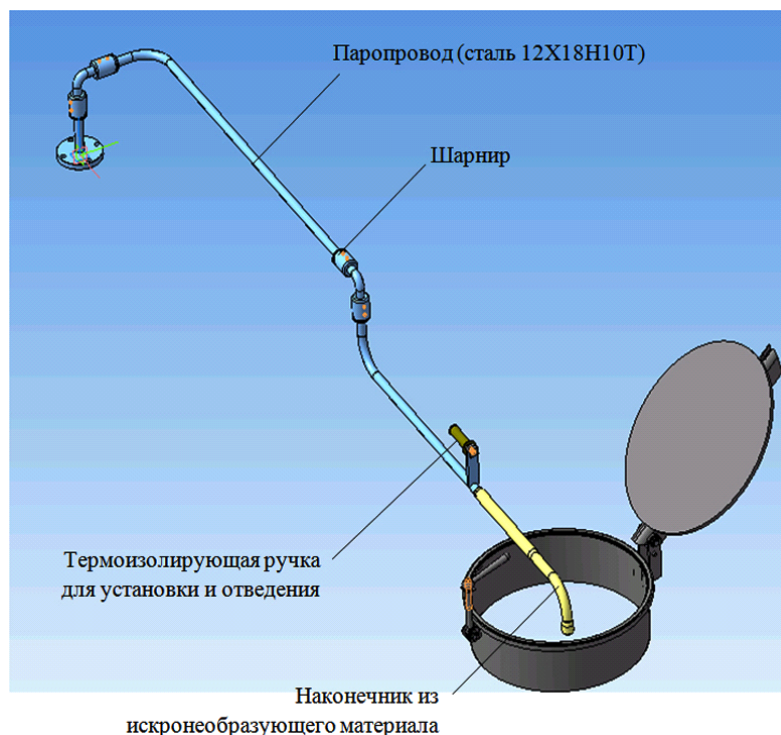


Рис. 5. Конструкция устройства для пропаривания котлов цистерн (чертеж общего вида)

Принимая во внимание, что дальнейшая работа будет осуществляться в условиях повышенной температуры, наличие агрессивной паровоздушной среды, при токарной обработке, а также учитывая стоимость и доступность на рынке цветных металлов, предложено в качестве материала искробезопасного наконечника паровой укосины применять двойную латунь марки Л63.

В итоге проведенных теоретических исследований и экспериментальных испытаний была предложена новая конструкция одного из элементов, который с большей вероятностью влияет на образование искры и приводит к созданию аварийных ситуаций — паровой укосины. Разработанная конструкция предполагает использование нового материала, исключающего образование искровых разрядов при производстве промывки, пропаривания и подготовки вагонов — цистерн.

#### Библиографический список

1. Максимов Б. К., Обух А. А. Статическое электричество в промышленности и защита от него. М.: Энергоатомиздат. 2000. 96 с.
2. Черкасов В. Н. Защита взрывоопасных сооружений от молнии и статического электричества. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1984. 80 с.
3. Тютяев А. В., Должников А. С., Зверева И. С. Исследование причин воспламенения газозадушенной смеси нефтепродуктов при заполнении резервуаров дизельным топливом // Фундаментальные исследования. 2013. № 6. С. 873–876.
4. Овчаренко А. Г., Раско С. А. Контроль электризации в технологических процессах // Ползуновский вестник № 1–2. 2008. С. 4–10.
5. Вережкин В. Н., Смелков Г. И., Черкасов В. Н. Электростатическая искробезопасность и молниезащита. М.: Изд-во МИЭЭ, 2006. 170 с. ISBN 5-98540-007-7.

6. Glover B., Whites K. W., Hong H. [et al.]. Effective electrical conductivity of functional single-wall carbon nanotubes in aqueous fluids // Synthetic Metals. 2008. Vol. 158, Issue 12. P. 506–508. DOI: 10.1016/j.synthmet.2008.03.022.

7. Сорокин А. Ю. Статическое электричество на объектах транспортировки легковоспламеняющихся жидкостей // Предупреждение. Спасение. Помощь: сб. материалов XXVII Междунар. науч.-практ. конф. Химки. 2017. С. 133–134.

8. Смирнов В. А., Кузнецов А. А., Копытов Е. Ю., Михалева С. С. Совершенствование технологии очистки железнодорожных цистерн путем уменьшения возможного искрообразования // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 4. С. 69–71.

**КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника».

Адрес для переписки: te@omgups.ru

**КОПЫТОВ Евгений Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность».

Адрес для переписки: isib@omgups.ru

**МИХАЛЕВА Светлана Сергеевна**, аспирантка кафедры «Теоретическая электротехника».

Адрес для переписки: 3-s.s.s@mail.ru

**ЗВЕРЕВ Андрей Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая электротехника».

Адрес для переписки: zverevag@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 17.07.2017 г.

© А. А. Кузнецов, Е. Ю. Копытов, С. С. Михалева, А. Г. Зверев

## Книжная полка

**Парамонов, А. М. Технологические энергоносители предприятий : учеб. текстовое электрон. изд. локального распространения: учеб. пособие / А. М. Парамонов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. – 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).**

В пособии рассматриваются основные положения и теоретические вопросы по системам воздухоснабжения, газоснабжения, мазутоснабжения, производственного водоснабжения промышленных предприятий. Даны принципы выбора основного и вспомогательного оборудования. Приведены пути и способы экономии энергетических ресурсов при производстве и распределении сжатого воздуха. Изложены вопросы по обеспечению промышленных предприятий продуктами разделения воздуха. Предназначено для студентов дневной, заочной и дистанционной форм обучения направлений подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», 13.03.03 «Энергетическое машиностроение».

**Малафеев, С. И. Надежность электроснабжения : учеб. пособие / С. В. Малафеев. – СПб. : Лань, 2017. – 368 с. – ISBN 978-5-8114-1876-3.**

Рассмотрены основные понятия теории надежности электроснабжения технических систем. Приведены сведения о физических процессах нарушения работоспособности систем электроснабжения, математических методах расчетов надежности, мероприятиях, направленных на повышение надежности и живучести объектов. Даны примеры решения типовых задач надежности электроснабжения. Приведены задания для самостоятельной работы. Для студентов высших учебных заведений. Допущено УМО по образованию в области электро- и теплоэнергетики в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника».

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА В УСЛОВИЯХ ПРИЕМОСДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ НЕИДЕНТИЧНОСТИ КОММУТАЦИОННЫХ ЦИКЛОВ

В статье показана необходимость учета параметров закона распределения интенсивности искрения в процессе диагностирования состояния коллекторно-щеточного узла. Обоснованы векторные параметры диагностирования, отражающие неидентичность коммутационных циклов. Предложена форма отображения новых параметров в виде трехмерных векторов. Уточнены двудольные графы соответствия дефектов и диагностических параметров с учетом условий приемосдаточных испытаний. Разработан алгоритм применения предложенных диагностических параметров в процессе приемосдаточных испытаний.

**Ключевые слова:** коллекторная машина постоянного тока, диагностические параметры, неидентичность коммутационных циклов, приемосдаточные испытания, алгоритм диагностирования, закон распределения, интенсивность искрения.

Причины искрения щеток коллекторных двигателей разнообразны по своей природе [1]. Осциллограммы импульсов искрения показывают, что каждый коммутационный цикл не повторяет предыдущий, что объясняется случайным характером неидентичности физических процессов, обуславливающих искрение. Следовательно, обобщить экспериментальные данные и более детально проанализировать состояние коммутации электрических машин можно, применяя аппарат математической статистики и теорию случайных процессов [2].

Для получения основных характеристик законов распределения интенсивности искрения коллекторных электрических машин постоянного тока (МПТ) проведены экспериментальные исследования на машине ПЗ1 без явных дефектов на коллекторе. Интенсивность искрения задавалась изменением магнитодвижущей силы добавочных полюсов. По осциллограммам диагностического сигнала, полученного с разнополярных щеток испытуемой машины, выявлено, что искрение в процессе эксперимента происходило только в секциях, лежащих последними в пазу. Для определения интенсивности искрения у каждого импульса подсчитывался его интеграл по времени (сумма оцифрованных значений напряжения), отражающий энергию импульса искрения. Последние секции в пазу, коммутация которых закончилась без искрообразования, учитывались при подсчете, а остальные секции паза при подсчете не учитывались. Полученные гистограммы распределения

интенсивности искрения приведены на рис. 1 для трех режимов работы с различной степенью искрения. Степень искрения оценена визуальным методом по ГОСТ 183-74.

Проанализируем, как изменяются такие параметры закона распределения, как среднеквадратическое отклонение (СКО) ( $\sigma$ ), косость ( $\alpha$ ) и крутость ( $\nu$ ) [3].

Расчет данных параметров можно выполнить по выражениям:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k (N_j - \bar{A})^2 A_j}{n}}; \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{1}{\sigma^3} \cdot \frac{\sum_{j=1}^k (N_j - \bar{A})^3 A_j}{n}; \quad (2)$$

$$\nu = \frac{1}{\sigma^4} \cdot \frac{\sum_{j=1}^k (N_j - \bar{A})^4 A_j}{n} - 3, \quad (3)$$

где  $\bar{A}$  — значение интенсивности искрения, найденное как площадь импульса;  
 $j$  — номер интервала значений интенсивности искрения;  
 $k$  — количество интервалов;

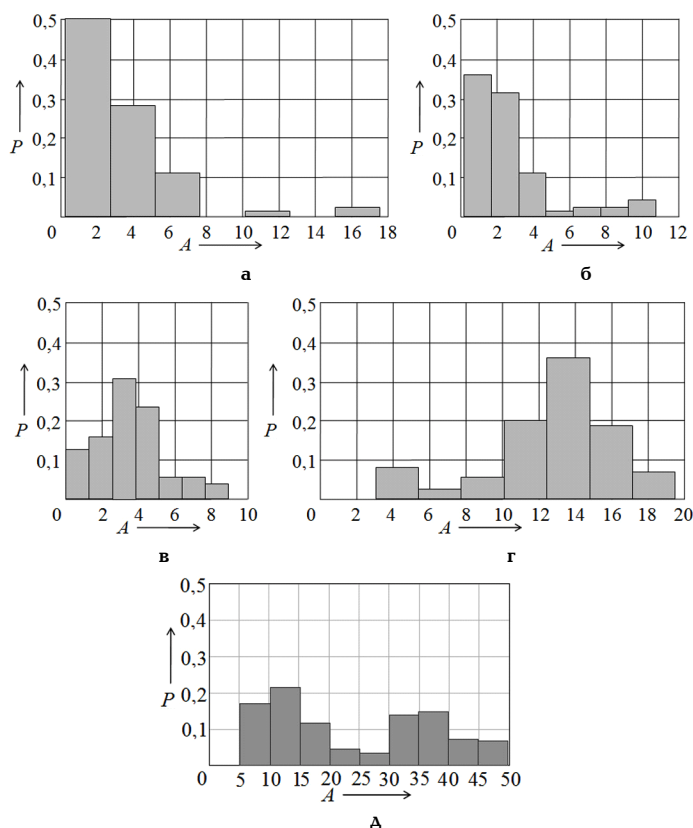


Рис. 1. Гистограммы распределения интенсивности искрения коллекторных пластин при различной степени искрения:

- а — 1 балл (импульсы недокоммутации),  $\sigma = 3,5$ ,  $\alpha = 2,41$ ,  $\tau = 5,92$ ;  
 б — 1 балл (импульсы перекоммутации),  $\sigma = 2,9$ ,  $\alpha = 1,29$ ,  $\tau = 0,39$ ;  
 в —  $1^{1/4}$  балла (импульсы недокоммутации),  $\sigma = 2,1$ ,  $\alpha = 0,55$ ,  $\tau = 0,06$ ;  
 г —  $1^{1/2}$  балла (импульсы недокоммутации),  $\sigma = 5,3$ ,  $\alpha = -0,87$ ,  $\tau = 0,36$ ;  
 д — 2 балла (импульсы недокоммутации),  $\sigma = 13,2$ ,  $\alpha = 0,25$ ,  $\tau = -1,40$ .

$N_j$  — количество импульсов искрения, попавших в интервал с индексом  $j$ ;

$n$  — количество зафиксированных импульсов искрения;

$\bar{A}$  — математическое ожидание интенсивности искрения.

При настройке коммутации, соответствующей степени искрения 1 балл (рис. 1а, б), присутствуют импульсы искрения обеих полярностей, которым соответствует закон распределения, близкий к экспоненциальному. Такой форме закона распределения соответствует относительно небольшое значение СКО и относительно большие положительные значения как косости, так и крутости.

При увеличении степени искрения до  $1^{1/4}$  балла и далее до  $1^{1/2}$  балла (рис. 1в, г) математическое ожидание на гистограмме смещается вправо. При этом СКО увеличивается, косость и крутость снижаются и даже могут принимать отрицательные значения.

При дальнейшем увеличении степени искрения до 2 баллов (рис. 1д) СКО резко возрастает, косость принимает относительно небольшое значение, а крутость становится отрицательной. При этом закон распределения становится двухмодальным — явно присутствуют две вершины. Правая вершина, соответствующая более интенсивному искрению, обусловлена искрением секций, лежащих последними в пазах сердечника якоря. Левая вершина обусловлена искрением остальных секций, подключившихся к процессу искрения, при ухудшении электромагнитной настройки машины.

Для подтверждения полученных результатов и выявления влияния на закон распределения интенсивности искрения факторов механической природы проведены исследования на экспериментальной установке с испытуемым двигателем, имеющим дефекты на коллекторе. Для измерения интенсивности искрения использовались щетка-датчик и прибор контроля коммутации ПКК-5, разработанный на кафедре «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС. Интенсивность искрения оценивалась по амплитуде сигнала на выходе аналогового интегратора. Одновременно регистрировались значения частоты вращения  $n$ , тока подпитки (отпитки)  $I_n$  ( $I_o$ ) добавочных полюсов (ДП) и тока якоря  $I_a$ . В процессе измерений ток якоря поддерживался неизменным, а ток подпитки/отпитки ДП варьировался от 1А до 2,5А для перекоммутации и от  $-1А$  до  $-3А$  для недокоммутации. Результаты испытаний приведены на рис. 2.

При подпитке и отпитке с небольшой интенсивностью искрения  $1^{1/4}$  балла (рис. 2а, в) СКО имеет относительно небольшие значения, косость — относительно большое положительное. При усилении интенсивности искрения до  $1^{1/2}$  балла (рис. 2б, г) значение СКО резко возрастает, а косость снижается. При этом крутость во всех случаях имеет либо относительно небольшое, либо отрицательное значение. Это связано с тем, что закон распределения имеет две вершины. Физически такой вид гистограмм объясняется следующим образом. Случайная природа изменения электромагнитных условий, в которых находятся различные секции якорной обмотки

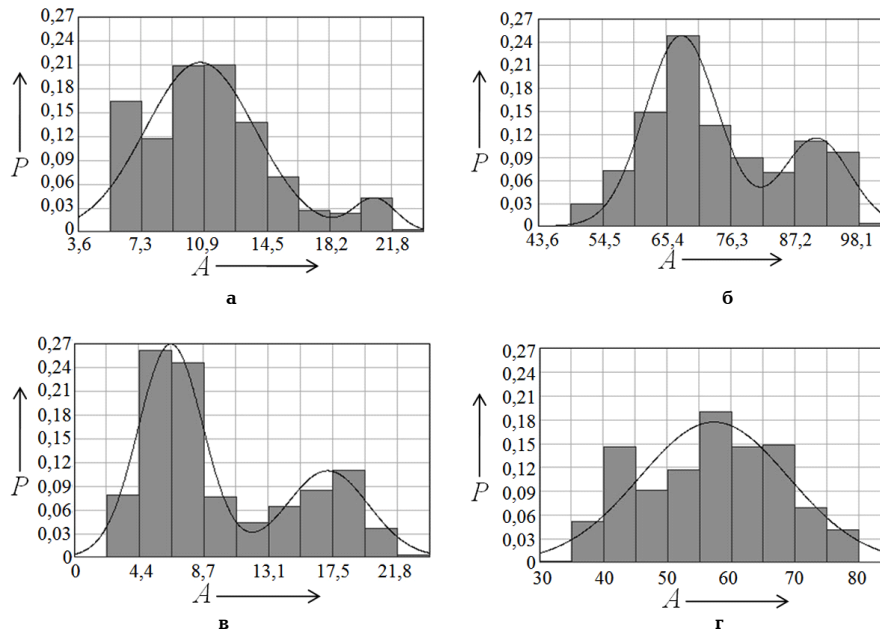


Рис. 2. Гистограммы распределения интенсивности искрения коллекторных пластин при различной степени искрения:

- а —  $1\frac{1}{4}$  балла (импульсы недокоммутации),  $\sigma = 3,8$ ,  $\alpha = 0,74$ ,  $\tau = 0,29$ ;  
 б —  $1\frac{1}{2}$  балла (импульсы недокоммутации),  $\sigma = 12,1$ ,  $\alpha = 0,38$ ,  $\tau = -0,88$ ;  
 в —  $1\frac{1}{4}$  балла (импульсы перекоммутации),  $\sigma = 5,3$ ,  $\alpha = 0,67$ ,  $\tau = -0,90$ ;  
 г —  $1\frac{1}{2}$  балла (импульсы перекоммутации),  $\sigma = 10,9$ ,  $\alpha = -0,05$ ,  $\tau = -0,91$ .

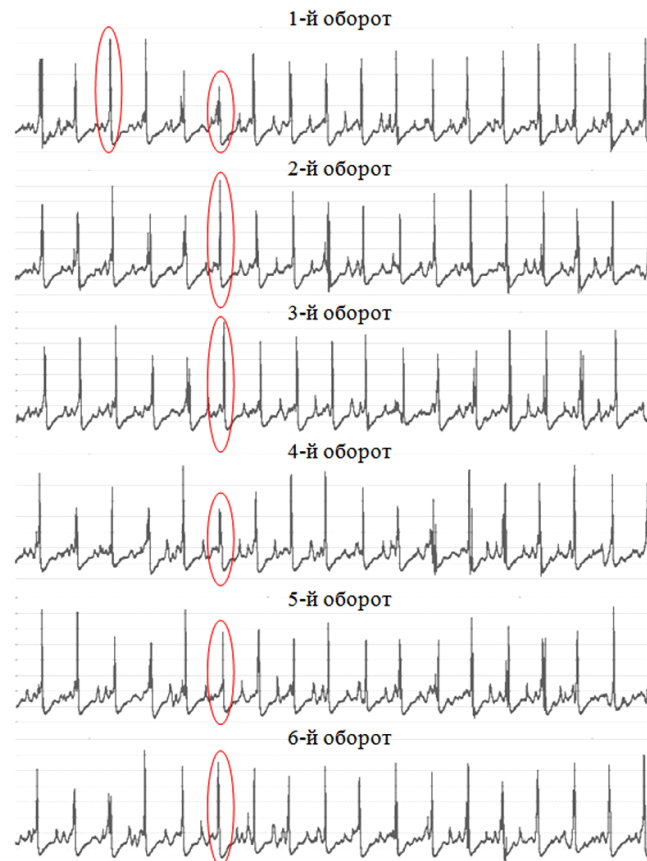
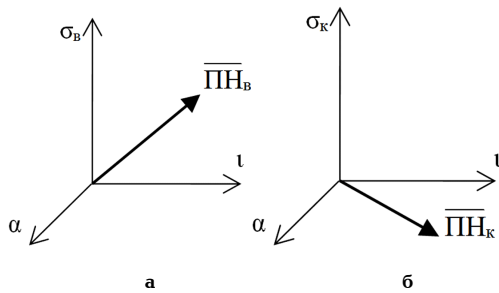


Рис. 3. Сигнал искрения с разнополярных щеток за несколько оборотов ротора

в процессе коммутации, обуславливает закон распределения интенсивности их искрения, близкий к нормальному. Однако при взаимодействии щетки с пластинами, имеющими механические дефекты, появляется искрение повышенной интенсивности, что и приводит к двухмодальной форме закона рас-

пределения интенсивности искрения. Механические факторы, воздействующие на процесс коммутации приводят к уменьшению ее периода и усилению искрения от недокоммутации. Электромагнитные факторы могут приводить к усилению как недокоммутации, так и перекоммутации. Следовательно,



**Рис. 4. Трехмерные векторные параметры неидентичности коммутационных циклов различных секций обмотки якоря:**  
**а** — параметр неидентичности во времени,  
**б** — параметр неидентичности по коллектору

интенсивность искрения, обусловленного неидентичностью разной физической природы, приводит к искрению различных групп коллекторных пластин с различной средней интенсивностью.

Полученные в результате исследований осциллограммы (рис. 3) показывают, что вследствие неидентичности коммутационных циклов изменяется не только интенсивность искрения различных коллекторных пластин за один оборот, но и интенсивность искрения одной и той же пластины за время нескольких оборотов. В первом случае это связано в большей степени со сложным профилем коллектора, имеющим перепады высот коллекторных пластин, а во втором — с изменением напряжения питания, момента на валу и вибрацией машины.

В работе [4] с использованием графоаналитического метода получены двудольные графы соответствия дефектов и диагностических параметров коллекторно-щеточного узла (КЩУ), определяющие средний уровень искрения, а также неидентичность коммутационных циклов во времени и по коллектору. Однако, как показывают результаты испытаний, приведенные на рис. 1 и 2, параметры закона распределения в отдельности (СКО  $\sigma$ , косость  $\alpha$  и крутость  $l$ ) не в полной мере характеризуют состояние коммутации в машине. Более полно охарактеризовать форму закона распределения и численно увязать результаты испытаний с неисправностями, обусловившими искрение той или иной степени, возможно только за счет совместного применения всех трех параметров.

Таким образом, неидентичность коммутационных циклов вдоль окружности коллектора можно численно охарактеризовать следующими параметрами закона распределения интенсивности искрения: СКО по коллектору ( $\sigma_k$ ), косость ( $\alpha$ ), крутость ( $l$ ), а неидентичность во времени: СКО во времени ( $\sigma_b$ ), косость ( $\alpha$ ), крутость ( $l$ ).

Для упрощения обозначений введем параметры неидентичности во времени и по коллектору:  $\overline{PN}_b = \{\alpha_b, \alpha, l\}$  и  $\overline{PN}_k = \{\alpha_k, \alpha, l\}$ , представляющие собой трехмерные векторы, характеризующие форму закона распределения интенсивности искрения. Графическое изображение предложенных параметров неидентичности коммутационных циклов приведено на рис. 4.

В процессе диагностирования для выявления неисправностей необходимо сопоставить данные параметры с областями их допустимых значений. Если обозначить множества допустимых значений параметров следующим образом:

$$\Sigma_{\text{в доп}} \in \{\sigma_{\text{в доп } 1}, \sigma_{\text{в доп } 2}, \dots, \sigma_{\text{в доп } N}\}, \quad (4)$$

$$\Sigma_{\text{к доп}} \in \{\sigma_{\text{к доп } 1}, \sigma_{\text{к доп } 2}, \dots, \sigma_{\text{к доп } N}\}, \quad (5)$$

$$A_{\text{доп}} \in \{\alpha_{\text{доп } 1}, \alpha_{\text{доп } 2}, \dots, \alpha_{\text{доп } N}\}, \quad (6)$$

$$I_{\text{доп}} \in \{l_{\text{доп } 1}, l_{\text{доп } 2}, \dots, l_{\text{доп } N}\}, \quad (7)$$

тогда можно записать:

$$\overline{PN}_b \in \{\Sigma_{\text{в доп}}, A_{\text{доп}}, I_{\text{доп}}\}; \quad (8)$$

$$\overline{PN}_k \in \{\Sigma_{\text{к доп}}, A_{\text{доп}}, I_{\text{доп}}\}. \quad (9)$$

При лучшей настройке машины векторы  $\overline{PN}_b$  и  $\overline{PN}_k$  стремятся занять определенное положение в пространстве: СКО ( $\sigma_k$  и  $\sigma_b$ ) уменьшаются, косость и крутость ( $\alpha$  и  $l$ ) увеличиваются в положительном направлении. При ухудшении условий коммутации значения СКО ( $\sigma_k$  и  $\sigma_b$ ) увеличиваются, однако значения косости и крутости ( $\alpha$  и  $l$ ) убывают не монотонно: в процессе убывания могут присутствовать локальные максимумы, что нужно учитывать в процессе диагностирования.

Сформированные в работе [4] двудольные графы отражают дефекты, которые могут иметь место как при эксплуатации МПТ, так и при приемосдаточных испытаниях в соответствии с известными источниками [5, 6]. При этом в условиях, созданных при испытаниях, отсутствует воздействие, которое МПТ испытывает во время эксплуатации. Следовательно, ряд неисправностей в случае испытаний, связанных с условиями эксплуатации, будет отсутствовать.

Вибрация при эксплуатации МПТ обусловлена воздействием рабочих условий. Но, несмотря на то, что при испытаниях МПТ не испытывает тех воздействий, которые присущи в эксплуатации, усиление вибрации также может быть обусловлено некачественной стыковкой испытуемой и нагрузочной машины, когда их оси вращения не совпадают. То есть неисправность, связанная с вибрацией, и соответствующий ей диагностический параметр сохраняется для условий приемосдаточных испытаний, но при этом он в себе содержит уже другую информацию.

Помимо сказанного, неисправности, которые могут быть заложены заводом-изготовителем при производстве МПТ [7], практически не изменяются в процессе эксплуатации и не требуют диагностирования при проведении приемосдаточных испытаний [8]. Контроль над ними осуществляется на самом заводе-изготовителе.

Кроме того, такое явление в МПТ, как круговой огонь, также можно исключить из диагностической модели для условий приемосдаточных испытаний, так как возникает оно, как правило, при переходных процессах.

Таким образом, в условиях приемосдаточных испытаний полученные в [4] двудольные графы являются информативно избыточными: содержат лишние неисправности и присущие только им диагностические параметры. После исключения данных неисправностей и диагностических параметров можно получить упрощенные двудольные графы.

Однако проведенные исследования [9, 10] показывают, что для повышения достоверности диагностирования КЩУ МПТ всё-таки следует учитывать некоторые наиболее важные условия эксплуатации путем их моделирования. При этом достаточно простым для моделирования в условиях приемосдаточных испытаний и, одновременно, имеющим большую значимость для выявления коммутационной устойчивости МПТ является параметр  $\Delta M$  (рис. 5). Его диаг-

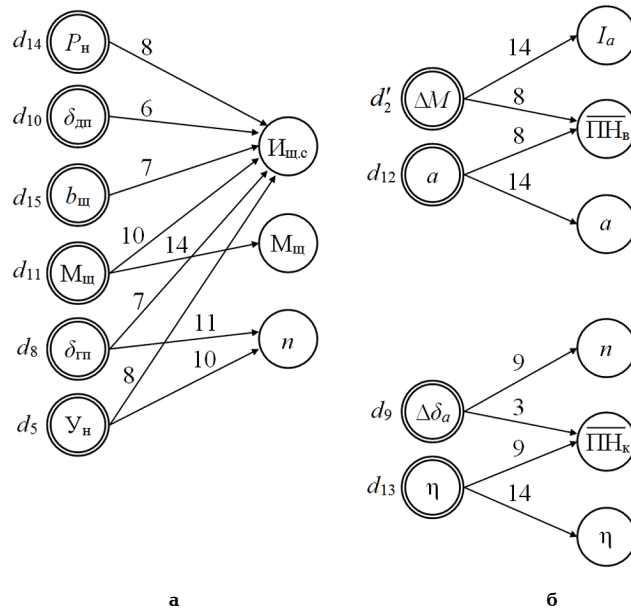


Рис. 5. Двудольные графы соответствия дефектов и диагностических параметров коллекторно-щеточного узла МПТ с учетом условий приемосдаточных испытаний, определяющие:  
 а — средний уровень искрения;  
 б — неидентичность коммутационных циклов во времени и неидентичность коммутационных циклов по коллектору

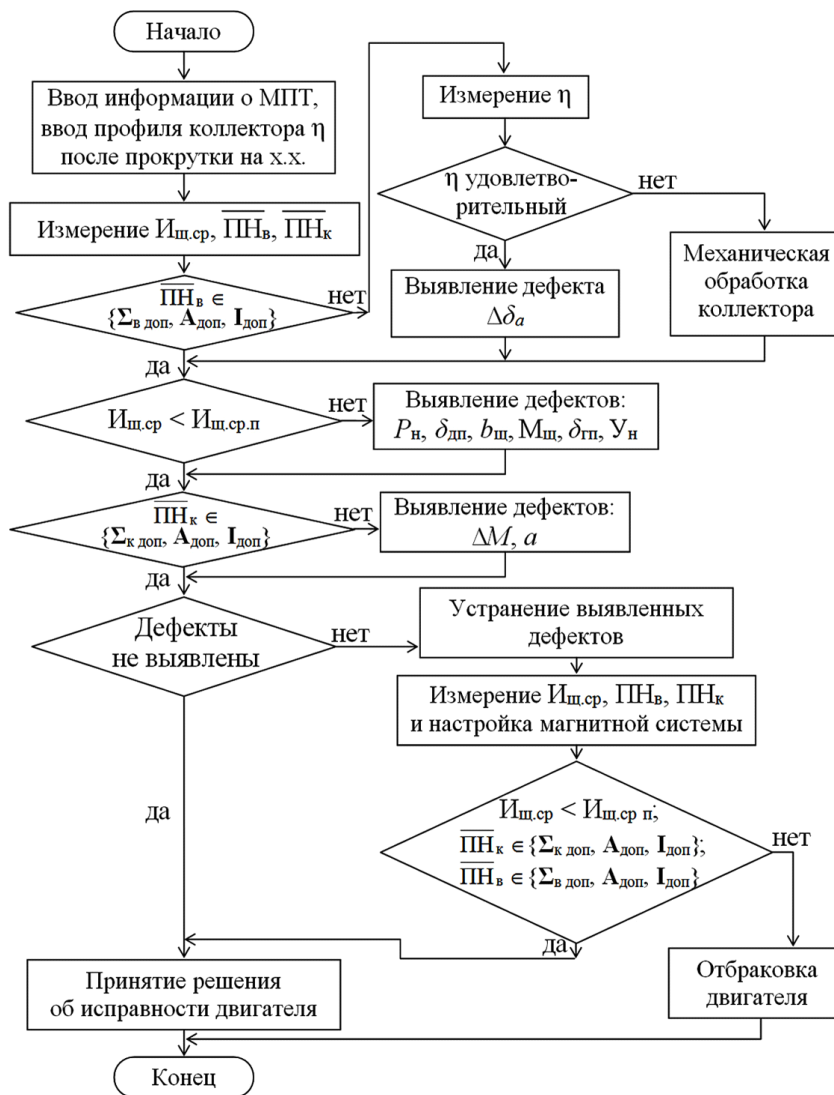


Рис. 6. Алгоритм применения диагностических параметров  $\overline{ПН}_в$  и  $\overline{ПН}_к$  в процессе приемосдаточных испытаний



ностическим параметром является легко измеряемый ток якоря  $I_a$ . При этом задание необходимого момента нагрузки на валу в процессе испытаний достаточно просто автоматизировать.

Исходя из изложенного выше, предлагается двудольные графы соответствия дефектов и диагностических параметров КЩУ МПТ с учетом условий приемосдаточных испытаний привести к следующему упрощенному виду, приведенному на рис. 5.

Таким образом, полученные двудольные графы позволяют составить алгоритм диагностирования в условиях приемосдаточных испытаний с учетом предложенных векторных параметров неидентичности коммутационных циклов  $\overline{ПН}_в$  и  $\overline{ПН}_к$  (рис. 6).

В алгоритме на первом этапе после ввода технических данных испытуемой машины и измерения и расчета диагностических параметров происходит сравнение параметра  $\overline{ПН}_к$  с областью его допустимых значений по выражению (8). Если условие не выполняется, то необходимо снять профиль коллектора после работы под нагрузкой и по анализу профиля определить необходимость его механической обработки. Если профиль коллектора удовлетворительный, то неудовлетворительное значение  $\overline{ПН}_к$  может быть выявлено дефектом  $\Delta\delta_a$  (биение якоря). На втором этапе производится сравнение параметра  $I_{щ,ср}$  с его пороговым значением  $I_{щ,ср,п}$ , а на третьем этапе сравнение параметра  $\overline{ПН}_в$  с областью его допустимых значений по выражению (9), и в случае необходимости выявление связанных с данными параметрами дефектов.

Далее необходимо устранить выявленные дефекты и снова провести измерение и расчет диагностических параметров  $I_{щ,ср}$ ,  $\overline{ПН}_в$ ,  $\overline{ПН}_к$  с параллельной настройкой магнитной системы МПТ.

Применение разработанного алгоритма в процессе диагностирования с использованием параметров  $I_{щ,ср}$ ,  $\overline{ПН}_в$ ,  $\overline{ПН}_к$  позволяет в ряде случаев отказаться от такой диагностической операции, как снятие профиля коллектора, в том случае, когда значение параметра  $\overline{ПН}_к$  лежит в области допустимых значений.

Разработанная методика позволяет повысить достоверность диагностирования состояния коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока в условиях приемосдаточных испытаний с учетом параметров неидентичности коммутационных циклов.

#### Библиографический список

1. Копылов И. П. Электрические машины. В 2-х т. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2015. 674 с. ISBN 9785991647403.

2. Авилов В. Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока: моногр. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2013. 356 с.

3. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1971. 576 с.

4. Харламов В. В., Попов Д. И., Афонин А. П., Огневский О. С. Повышение достоверности диагностирования коллекторно-щеточного узла электрических машин с учетом неидентичности коммутационных циклов // Омский научный вестник. 2016. № 4 (148). С. 65–69.

5. ГОСТ 2582–2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. Введ. 2015–01–01. М.: Стандартинформ, 2015. 81 с.

6. ГОСТ 11828–86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. Введ. 1987–07–01. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1986. 42 с.

7. Курбасов А. С., Семенов В. И., Сорин Л. Н. Проектирование тяговых электродвигателей. М.: Транспорт, 1987. 535 с.

8. Коварский Е. М., Янко Ю. И. Испытание электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.

9. Харламов В. В., Шкодун П. К., Афонин А. П., Проненко А. В. Оценка состояния коммутации тяговых электродвигателей с учетом условий эксплуатации // Инновационные проекты и новые технологии на железнодорожном транспорте: материалы науч.-практ. конф., посвященной 200-летию образования Управления водными и сухопутными сообщениями и учреждения Института корпуса инженеров путей сообщения: сб. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2009. С. 122–131.

10. Харламов В. В., Шкодун П. К., Бакланов А. А., Попов Д. И., Афонин А. П. Испытания тяговых электрических двигателей электровозов с учетом режимов их эксплуатации // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2012. С. 173–178.

**ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника».

**ПОПОВ Денис Игоревич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

**АФОНИН Александр Петрович**, соискатель по кафедре «Электрические машины и общая электротехника».

Адрес для переписки: emoe@omgups.ru

Статья поступила в редакцию 29.09.2017 г.

© В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. П. Афонин

## СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АСПЕКТ ТЕПЛООВОГО АНАЛИЗА РЕЗЕРВУАРОВ ХРАНИЛИЩА СЖИЖЕННОГО ГАЗА

Эффективное проектирование и эксплуатация хранилищ сжиженных продуктов во многом определяется качеством теплового анализа резервуаров хранилища сжиженного газа, исследованием их в общем случае как сложных динамических теплотехнических систем. В статье проведен структурно-функциональный анализ объектов хранилища, введено понятие теплового к.п.д. резервуара, получены выражения и результаты исследования для температуры продукта после  $\tau$  часов хранения для различных типов резервуаров.

**Ключевые слова:** резервуарный парк, теплотехническая система, теплообменная система, сжиженный газ, ресурсосбережение.

Повышение эффективности эксплуатации хранилищ сжиженного углеводородного газа (СУГ), например, сжиженного пропан-бутана (СПБ) предполагает сокращение потерь хранимых продуктов, снижение энергопотребления при эксплуатации (прием, хранение, откачка СУГ), что реализуется на практике при помощи системы газовых обвязок (СГО), газоуравнительных систем (ГУС), изотермического хранения [1–4].

Исследование данных объектов, представляющих собой резервуарные парки (РП), предполагает проведение соответствующего структурно-функционального и теплового анализа, в рамках которых необходимо:

- определить особенности структуры теплотехнической системы, образованной парком резервуаров с учетом способа снижения потерь хранимых продуктов;

- выделить расчеты (в том числе тепловые) отдельного резервуара и резервуарного парка, представляющего собой в общем случае теплотехническую систему сложной структуры.

Предметом структурно-функционального исследования в этом случае является теплотехническая система (ТТС), включающая хранилище СПБ на базе ряда групп резервуаров с системой газовых обвязок и конденсатосборником (КС), возможно с газоуравнительной системой (ГУС) и специальным газосборником (ГС), а также по необходимости с дополни-

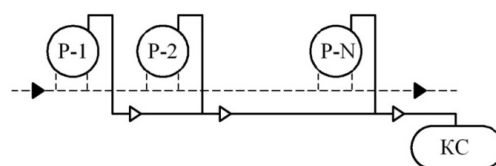


Рис. 1. Хранилище СПБ с системой газовых обвязок:  
Р — резервуар, КС — конденсатосборник

тельной системой компримирования легких фракций, содержащей компрессор и насос.

Применение системы газовых обвязок (системы трубопроводов, объединяющих газовые пространства резервуаров с одинаковым продуктом хранения, рис. 1) позволяет в рамках операции заполнения одних резервуаров (при совпадении по времени с опорожнением других), части паровоздушной смеси из заполняемых резервуаров переходить не в атмосферу, а в эти опорожняемые (свободные) резервуары [2, 5].

Более широкими возможностями обладают газоуравнительные системы (ГУС), включающие специальный газосборник (ГС) постоянного или переменного объема (рис. 2а).

Газосборник может быть использован для аккумуляции части паровоздушной смеси при несовпадении операций закачки-выкачки [2, 5], в том

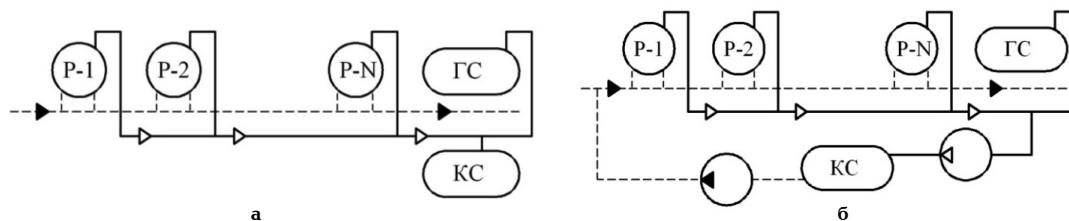


Рис. 2. Хранилище СПБ с газоуравнительной системой (а) и, дополнительно, с системой компримирования легких фракций (б):  
Р — резервуар, КС — конденсатосборник, ГС — газосборник

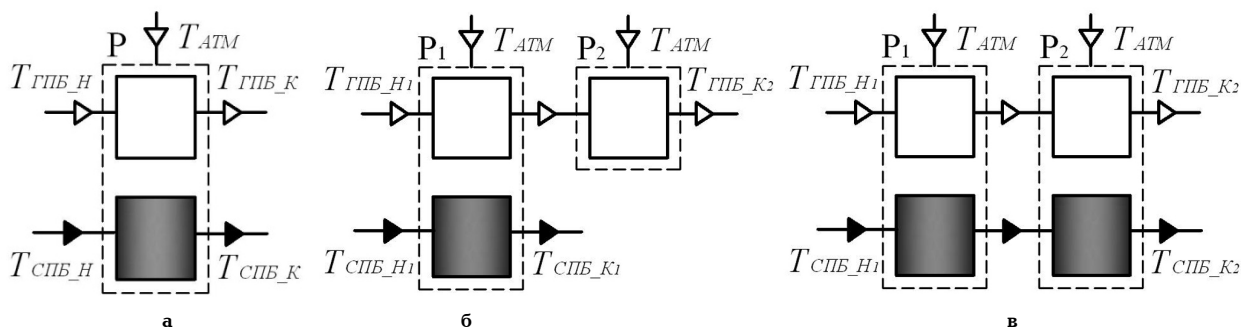


Рис. 3. Структурные особенности хранилища в виде одного (а) и пары резервуаров (б, в)

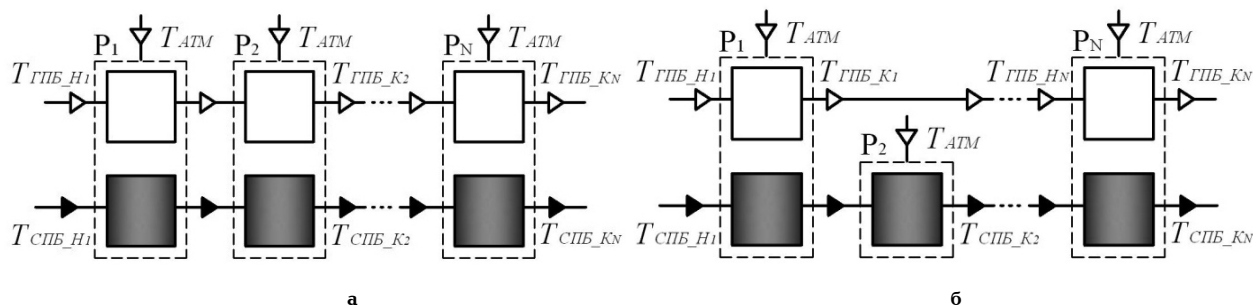


Рис. 4. Структурные схемы хранилищ с СГО и ГУС с образованием перекрестной схемы (а) и общего лупинга (б)

числе с использованием системы компримирования легких фракций (рис. 2б).

При частичном заполнении резервуара СПБ (режим приема или откачки) процессы испарения и конденсации хранимого продукта (в рамках «большого и малого дыхания», «обратного выдоха» и т.д.) становятся более существенны. Это связано с изменениями объема газового пространства (ГП), средней концентрации, температуры и давления газообразных углеводородов, что приводит к перетеканию последних в рамках систем СГО или ГУС в ГП других резервуаров или в мягкие резервуары-газгольдеры и требует соответствующего учета при тепловом расчете.

На рис. 3 отражены структурные особенности элементов хранилища в виде отдельного частично заполненного резервуара (рис. 3а), пары резервуаров  $P_1$  и  $P_2$ , связанных между собой ГУС (рис. 3б), один из которых частично заполнен, а другой порожний (заполнен азотом), пары резервуаров, связанных ГУС при реализации совместной операции заполнения одного и освобождения другого (рис. 3в).

Таким образом, для частично заполненного резервуара, или для группы резервуаров (ГР), связанных СГО или ГУС, тепловой анализ может быть проведен с учетом структурных особенностей образующих в рамках рассмотренных технологических операций теплообменных систем (ТС), с использованием соответствующей функций тепловой эффективности.

Рассмотрим далее с учетом [6] структурные особенности элементарных ТС для группы резервуаров.

Так для хранилищ СПБ с системой газовых обвязок (рис. 1), для частично заполненных резервуаров, например, при реализации совместной операции заполнения одних резервуаров и опорожнением других (часть паровоздушной смеси из заполняемых резервуаров переходит не в атмосферу, а в эти опо-

рожняемые, свободные резервуары) объект теплового анализа может быть представлен в виде простой последовательности соседних резервуаров, или для структурной схемы в виде однородной двухниточной перекрестной теплообменной системы (рис. 4а). При этом каждый отдельный частично заполненный резервуар (рис. 3а) выступает в качестве теплообменника, реализующего теплообмен хранимого продукта в сжиженном (СПБ) и газовом (ГПБ) виде с окружающей средой (атмосферным воздухом) через корпус резервуара и его изоляцию.

Для хранилищ СПБ с системой газовых обвязок (рис. 1) и с газоуравнительной системой (рис. 2), в случае реализации совместных операций заполнения-налива (не обязательно соседних) при движении по ГУС продукта в газовом состоянии в том же направлении, что и в сжиженном, объект теплового анализа может быть представлен в виде однородной двухниточной теплообменной системы с общим лупингом, причем резервуары со второго по  $N-1$  полностью заполнены СПБ (рис. 4) или полностью свободны.

Для хранилищ с системой газовых обвязок и газоуравнительной системой при движении по ГУС продукта в газовом состоянии в обратном направлении по отношению к движению СПБ, объект теплового анализа может быть представлен в виде однородной двухниточной теплообменной системы с общим рециклом, причем резервуары со второго по  $N-1$  могут быть полностью заполнены СПБ (рис. 5) или полностью свободны (рис. 5).

Для хранилищ СПБ с ГУС, дополненной системой компримирования легких фракций (рис. 2), соответственно, объект теплового анализа может быть представлен в виде неоднородной трехниточной теплообменной системы с общим обращением основного потока (рис. 6). Неоднородность ТС определяется наличием в структурной схеме компрессора и насоса, в которых подводится энергия  $E_k$  и  $E_n$ .

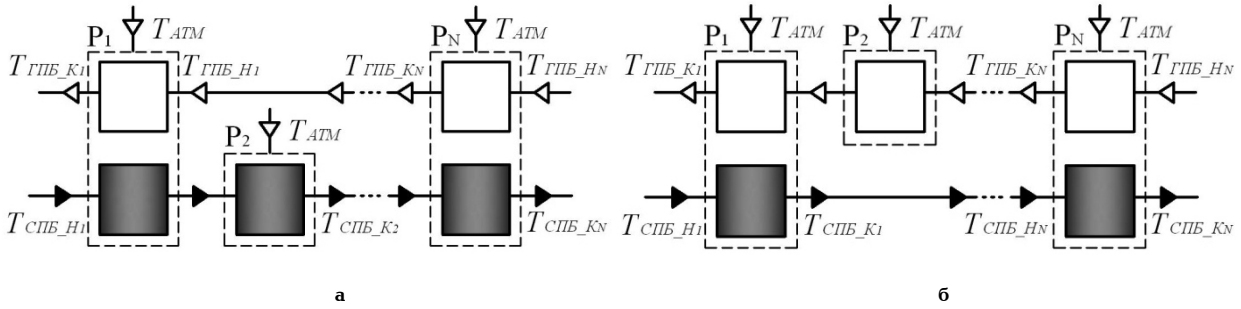


Рис. 5. Структурные схемы хранилищ с заполненными (а) и свободными (б) резервуарами с образованием рецикла

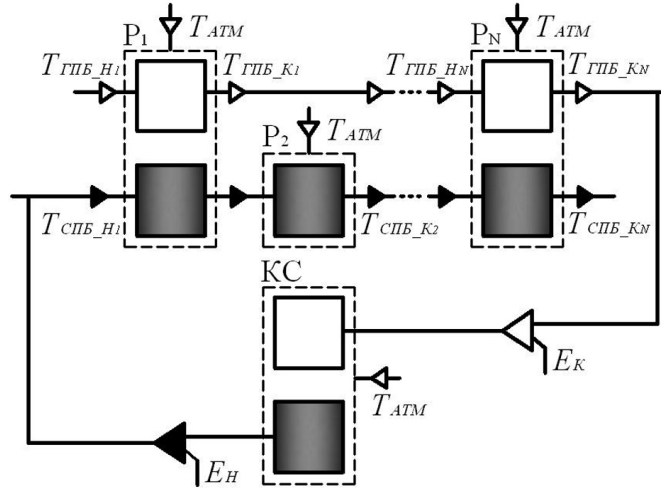


Рис. 6. Структурная схема хранилища с системой компрессирования легких фракций с образованием обращения

Применение структурно-функционального анализа позволит классифицировать теплообменные объекты в рамках теплового анализа, сформировать соответствующее математическое описание и определить значения важных эксплуатационных параметров:

- температуру продукта в определенный момент времени в отдельном резервуаре или их группе для режимов приема, хранения и откачки-налива;

- температуру продукта в определенный момент времени в отдельной железнодорожной цистерне или их группе для режима налива;

- время, за которое температура продукта достигнет заданного уровня, а также получить ответы на ряд существенных вопросов, возникающих при проектировании:

- обеспечивается ли для заданного способа снижения потерь хранимых продуктов (теплотехнической системы заданной структуры) требуемый температурный режим

- удовлетворяют ли принятые проектные решения по теплообогреву и теплоизоляции резервуаров требуемому температурному диапазону для режимов приема, хранения и откачки-налива продукта.

В рамках теплового анализа тепловой (температурный) к.п.д.  $\eta^p(\tau)$  отдельного полностью заполненного СПБ шарового резервуара (опечатанного и находящегося в режиме хранения) за время  $\tau$  является функцией времени и выражает соотношение между фактическим переданным количеством теплоты  $Q^p$  и тем максимально возможным количеством теплоты  $Q_{MAX}^p$ , которое может быть передано от окружающей среды (атмосферного воздуха) продукту  $T_{Pi}(\tau) \leq T_{ATM}$ , или от продукта окружающей среде

$T_{Pi}(\tau) \geq T_{ATM}$  в резервуаре с бесконечно большим значением коэффициента теплопередачи  $k$ , или бесконечно большой поверхностью теплообмена  $F$  (или за бесконечное время).

$$\eta^p(\tau) = \frac{Q^p}{Q_{MAX}^p} = \frac{F_p k_p \Delta T_{СПБ}(\tau) \cdot \tau}{F_p k_p \cdot \Delta T_{MAX}(\tau) \cdot \tau} = \frac{M_{СПБ} C_{СПБ} (T_{СПБ\_Н} - T_{СПБ\_К}(\tau))}{M_{СПБ} C_{СПБ} (T_{СПБ\_Н} - T_{ATM}(\tau))} \quad (1)$$

где  $T_{СПБ\_Н}$ ,  $T_{СПБ\_К}$ ,  $T_{ATM}$  — начальная и конечная температура СПБ;  $T_{ATM}$  — температура атмосферного воздуха;  $M$ ,  $c$  — масса и теплоемкость СПБ.

Время  $\tau_T$ , необходимое для достижения температуры СПБ заданного значения  $T = T_{СПБ\_К}$  (при заданных  $M$ ,  $k$ ,  $F$ ) можно определить по выражению (2)

$$\tau_T = \frac{M_{СПБ} C_{СПБ} \cdot (T_{СПБ\_Н} - T_{СПБ\_К})}{F_p k_p \cdot (T_{СПБ\_СР} - T_{ATM})} \quad (2)$$

Соответственно, для температуры продукта после  $\tau$  часов хранения

$$T_{СПБ\_К} = T_{СПБ\_Н} - \frac{F_p k_p \cdot \tau \cdot (T_{СПБ\_СР} - T_{ATM})}{M_{СПБ} C_{СПБ}} \quad (3)$$

Или с учетом  $T_{СПБ\_СР} = (T_{СПБ\_Н} + T_{СПБ\_К})/2$  после преобразований

$$T_{СПБ\_К} = \frac{T_{СПБ\_Н} + \left( \frac{F_p k_p \cdot \tau}{M_{СПБ} C_{СПБ}} \right) \cdot \left( T_{ATM} - \frac{T_{СПБ\_Н}}{2} \right)}{\left( 1 + \frac{F_p k_p \cdot \tau}{2 M_{СПБ} C_{СПБ}} \right)} \quad (4)$$

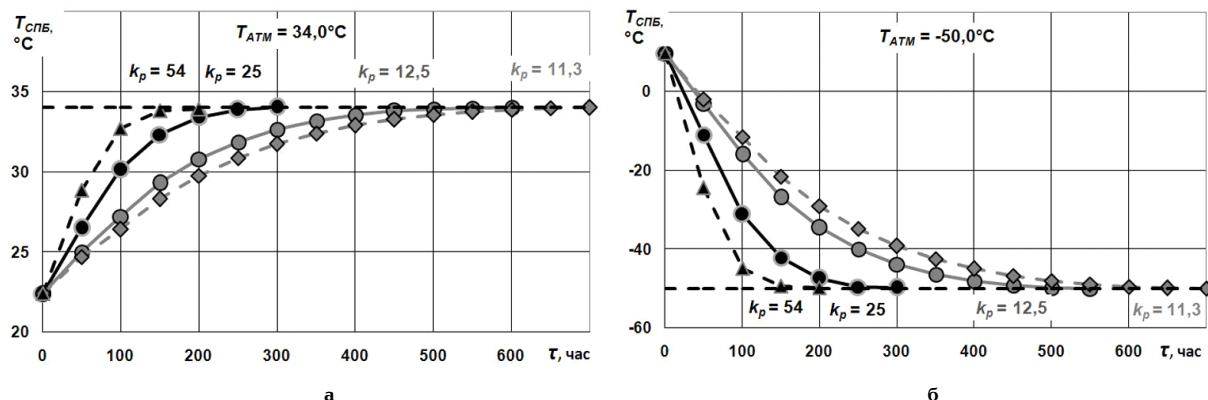


Рис. 7. Температура продукта  $T_{СПБ-К}$  за время хранения СПБ  $\tau$  для различных типов резервуаров при максимальной (а) и минимальной (б) температуре атмосферного воздуха

На рис. 7 отражены результаты расчетов температуры продукта  $T_{СПБ-К}$  за время хранения СПБ  $\tau$  для различных типов резервуаров объема  $2000 \text{ м}^3$  (шаровой металлический неизолированный наземный резервуар, шаровой металлический изолированный наземный резервуар, цилиндрический подземный резервуар) при максимальной температуре атмосферного воздуха  $T_{АТМ} = 34 \text{ °C}$  (рис. 7а), а также при его минимальной температуре  $T_{АТМ} = -50 \text{ °C}$  (рис. 7б). Для металлического неизолированного наземного резервуара коэффициент теплопередачи  $k_p = 25 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C})$ , для металлического изолированного наземного резервуара —  $k_p = 12,5 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C})$ , для подземного резервуара  $k_p = 11,3 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C})$  [4]. Значение коэффициента теплопередачи  $k_p = 54 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C})$  приведено как значение принимаемое по умолчанию при моделировании резервуаров в программе Aspen HYSYS и использовано для сравнения.

Как следует из полученных результатов в летний период для различных типов резервуаров время достижения температуры хранимого продукта его максимального значения (температуры атмосферного воздуха  $T_{АТМ} = 34 \text{ °C}$ ) существенно отличается и находится в общем диапазоне 200 – 450 часов. При этом минимальным это время является для металлического неизолированного наземного резервуара, а максимальным — для подземного резервуара.

Примерно аналогичная картина наблюдается и в зимний период при достижении температуры хранимого продукта его минимального значения (температуры атмосферного воздуха  $T_{АТМ} = -50 \text{ °C}$ ).

Для резервуаров с большим значением коэффициента теплопередачи (металлический неизолированный наземный резервуар) и в летний и в зимний период характерно более быстрое сближение температуры хранимого продукта с температурой атмосферного воздуха (в течение 150 часов), с дальнейшим небольшим плавным приближением температуры СПБ к  $T_{АТМ}$  в течение последующих 250 – 300 часов.

На рис. 8 представлены соответствующие графики теплового к.п.д. и коэффициента эффективности термостатирования  $E_t^P = 1 - \eta^P$  для металлического изолированного наземного резервуара в зимний период.

Таким образом, из приведенных материалов, результатов структурно-функционального анализа и соответствующего теплового расчета можно сделать следующие выводы:

1. Тепловой анализ хранилищ СУГ, представляющих собой резервуарные парки, в том числе с це-

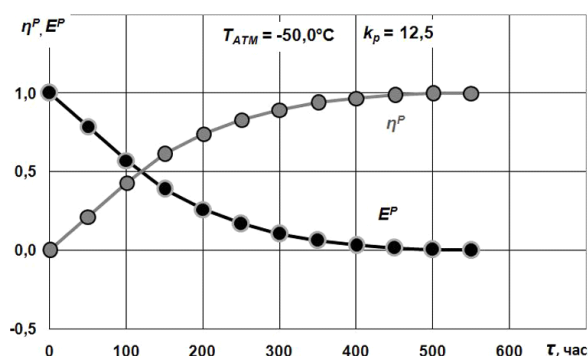


Рис. 8. Тепловой к.п.д. и коэффициент эффективности термостатирования для металлического изолированного наземного резервуара в зимний период

лю повышения эффективности их эксплуатации предполагает проведение соответствующего структурно-функционального анализа в общем случае как сложных динамических теплотехнических систем.

2. В рамках классификации хранилищ СУГ можно выделить хранилища с системой газовых обвязок, хранилища с газоуравнительной системой, а также с системой компримирования легких фракций.

3. Тепловой к.п.д. (коэффициент эффективности термостатирования) отдельного полностью заполненного резервуара (опечатанного и находящегося в режиме хранения) за время  $\tau$  является функцией времени, его использование в рамках теплового анализа позволяет определить значения важных эксплуатационных параметров: температуры продукта в определенный момент времени для режима хранения; времени, за которое температура продукта достигнет заданного уровня и т.д.

4. Для частично заполненного резервуара, или для группы резервуаров, связанных СГО или ГУС тепловой анализ может быть проведен с учетом структурных особенностей образуемых в рамках рассмотренных технологических операций теплообменных систем, с использованием соответствующей функцией тепловой эффективности.

5. Для хранилищ СПБ с системой газовых обвязок или с газоуравнительной системой в случае реализации совместных операций объект теплового анализа может быть представлен в виде однородной двухниточной теплообменной системы перекрестного типа, с общим лупингом или общим рециклом, причем внутренние резервуары  $j=2, N-1$  могут быть

полностью заполнены СПБ или полностью свободны.

6. Для хранилищ СПБ с ГУС, дополненной системой компримирования легких фракций объект теплового анализа может быть представлен в виде неоднородной трехниточной теплообменной системы с общим обращением газового потока.

7. В летний период для различных типов резервуаров время достижения температуры хранимого продукта его максимального значения (температуры атмосферного воздуха  $T_{АТМ} = 34\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) существенно отличается и находится в общем диапазоне 200–450 часов. При этом минимальным это время является для металлического неизолированного наземного резервуара, а максимальным — для подземного резервуара. Аналогичная картина наблюдается и в зимний период при достижении температуры хранимого продукта его минимального значения (температуры атмосферного воздуха  $T_{АТМ} = -50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

8. Для резервуаров с большим значением коэффициента теплопередачи (металлический неизолированный наземный резервуар) и в летний и в зимний период характерно более быстрое сближение температуры продукта с температурой атмосферного воздуха (в течение 150 часов), с дальнейшим небольшим плавным приближением температуры СПБ к  $T_{АТМ}$  в течение последующих 250–300 часов.

#### Библиографический список

1. Мартен П. И., Бултан П. Новая концепция производства СПГ // Газовая промышленность. 2005. № 1. С. 64–66.

2. Коршак А. А. Ресурсосберегающие методы и технологии при транспортировке и хранении нефти и нефтепродуктов. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2006. 191 с. ISBN 5-94423-088-6.

3. Rodriguez I., Castro J., Perez-Segarra C. D., Oliva A. Unsteady Numerical Simulation of the Cooling Process of Vertical Storage Tanks Under Laminar Natural Convection // International Journal of Thermal Sciences, 2009. Vol. 48, Issue 4. P. 708–721. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2008.06.002.

4. Январев И. А., Крупников А. В. Особенности теплового расчета резервуаров хранилища сжиженного газа как отдельных элементов и как теплообменной системы сложной структуры // Омский научный вестник. 2016. № 2 (146). С. 73–75.

5. Dolotovskii I. V., Dolotovskaya N. V., Larin E. A., Len'kova A. V. Improving energy efficiency in heating and cooling systems for tank farms of oil-gas enterprises // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Vol. 52, Issue 11–12. P. 803–809. DOI: 10.1007/s10556-017-0274-1.

6. Парфенов В. П., Январев И. А. Оценка тепловой эффективности теплообменного оборудования при комбинированном охлаждении сжатых газов в компрессорных установках // Известия вузов. Машиностроение. 1998. № 1–3. С. 62–67.

**ЯНВАРЕВ Игорь Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теплоэнергетика».

Адрес для переписки: iayanvarev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25.09.2017 г.

© И. А. Январев

## Книжная полка

**Полуянович, Н. К. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий / Н. К. Полуянович. – 3-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2017. – 396 с. – ISBN 978-5-8114-1201-3.**

Рассмотрены вопросы, связанные с правильным хранением, монтажом и техническим обслуживанием электрических машин и аппаратов, трансформаторов, распределительных электрических сетей, осветительных установок и электрической бытовой техники. Приведены порядок действия, способы выполнения пусконаладочных работ электротехнического оборудования, организационная структура, а также методы планирования электроремонтного производства, типовые технологические процессы ремонта оборудования и краткая характеристика ремонтных испытаний. Особое внимание уделено устройству, конструкции и расчету различных заземляющих устройств. Даны образцы нормативных документов, регламентирующих завершение монтажных, электромонтажных, пусконаладочных и ремонтных работ. Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника». Допущено УМО по образованию в области энергетики и электротехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 140610 – «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» направления подготовки 140600 – «Электротехника, электромеханика и электротехнологии».

**Атабеков, Г. И. Основы теории цепей / Г. И. Атабеков. – 4-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2017. – 424 с. – ISBN 978-5-8114-0699-9.**

Курс «Основы теории цепей» является первой специальной дисциплиной в системе радиотехнического образования. Этот курс включает в себя анализ и синтез линейных электрических цепей и основные сведения о цепях с ферромагнитными сердечниками. В отличие от теоретических основ электротехники данный курс предусматривает подробное изложение ряда разделов, относящихся к линейной радиотехнике (колебательные системы, спектральный анализ, общая теория двухполюсников, четырехполюсники). Каждая глава книги снабжена типовыми примерами, задачами (с ответами) и вопросами для самопроверки. Учебник предназначен для бакалавров направления «Радиотехника», «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», «Конструирование и технология электронных средств», «Электроника и нанoeлектроника», специалистов направления «Радиоэлектронные системы и комплексы», «Специальные радиотехнические системы» всех форм обучения.

## К ВОПРОСУ ИЗМЕНЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ МЕЖФАЗНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

В данной статье описаны процессы, связанные с появлением несимметрии трехфазной системы напряжения, пояснены причины, почему это явление нежелательное и с данным явлением необходимо бороться. Рассмотрены вопросы способов снижения коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности. Исследованы зависимости значений коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности от значений межфазных сопротивлений и даны основные рекомендации по управлению этих значений, что позволяет улучшить качество электрической энергии для полного соответствия требованиям ГОСТ.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, коэффициент несимметрии напряжения, электромагнитная помеха, межфазные сопротивления, линейные напряжения.

Несимметрия трехфазной системы напряжений, согласно ГОСТ 32144-2013, является одним из видов искажения электрической сети. Основной причиной несимметричных режимов являются различные условия работы фаз [1]. Такие режимы возникают из-за несимметрии источников тока; из-за неполнофазных режимов работы элементов электрической сети, например, при пофазном отключении линий и трансформаторов для ремонта (продольная несимметрия); из-за значительных несимметричных нагрузок по фазам (поперечная несимметрия) [2].

Объектом исследования является литейное производство, в котором литейные установки конструктивно подключены на две фазы, вызывая при этом поперечную несимметрию.

Несимметрия напряжения характеризуется коэффициентом несимметрии напряжения по обратной последовательности  $K_{2U}$ , который является одним из показателей качества электрической энергии (КЭ) и рассчитывается по формуле [3]:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \cdot 100,$$

где  $\beta = \frac{U_{12fund}^4 + U_{23fund}^4 + U_{31fund}^4}{(U_{12fund}^2 + U_{23fund}^2 + U_{31fund}^2)^2}$ , в свою очередь,

$U_{ijfund}$  — основная составляющая напряжения между фазами  $i$  и  $j$ .

При этом установлены следующие уровни электромагнитной совместимости (ЭМС) электрических сетей общего назначения для кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи (ЭМП) по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности: значения данного показателя КЭ в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале 10 мин не должны превышать 2 % в течение 95 % времени интервала и 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю [4].

Предлагается разработать математическую модель объекта исследования, на основании которой разработана структура объекта исследования (рис. 1) и её графическая интерпретация (рис. 2). Данный объект из источника питания напряжением 10 кВ, силового понижающего трансформатора ТМЗ 1000-10/0,4, четырех линейных трансформаторов ОЭСК 250/40, четырех установок электрошлакового литья с дуговым способом нагрева, работающие при напряжении 40 В, каждая мощностью 170 кВ·А. [5].

Данная модель характеризуется поперечной несимметрией [6].

Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности выходят за пределы нормально и предельно допустимых, а следовательно, наблюдается несоответствие ГОСТ 32144-

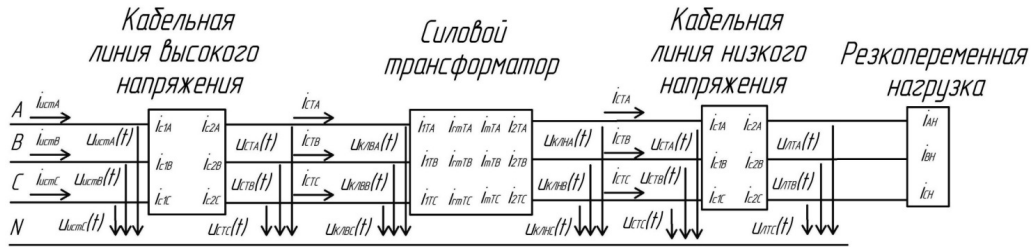


Рис. 1. Структурная схема объекта исследования

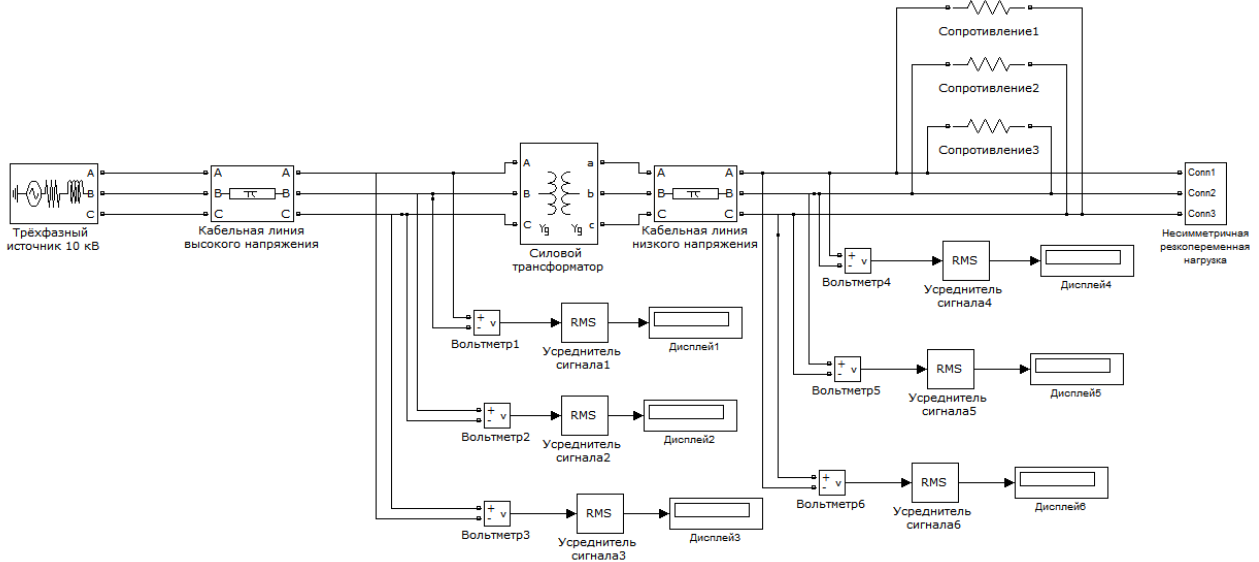


Рис. 2. Графическая интерпретация математической модели объекта исследования с межфазными сопротивлениями

2013 по данному показателю качества электроэнергии [7].

Одним из способов снижения несимметрии напряжения по обратной последовательности является выравнивание нагрузок по фазам [8]. Техническим решением данного способа является введение дополнительного межфазного переменного сопротивления [9]. В графической интерпретации математической модели уже введены данные сопротивления (рис. 2).

Для того, чтобы исследовать зависимость значений коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности от межфазных сопротивлений, принято решение изменять значения этих сопротивлений поочередно [10]. Модель позволяет при этом рассчитывать только линейные напряжения, но из формулы (1) видно, что, зная значения линейных напряжений, можно вычислить значения коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности [11].

За исходные данные брали значения каждого межфазного сопротивления 0,5 Ом. Поочередно изменяя значения каждого межфазного сопротивления, получали значения линейных напряжений для каждого случая, с помощью которых вычислялись значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности. Все полученные и вычисленные значения сведены в табл. 1–3. При этом выявлены следующие зависимости линейных напряжений от изменения межфазных сопротивлений:

1) При увеличении  $R_{ab}$  при постоянных значениях  $R_{bc}$  и  $R_{ac}$ :  $U_{ab}$  и  $U_{bc}$  — увеличиваются, а  $U_{ca}$  — уменьшается; при уменьшении  $R_{ab}$  —  $U_{ab}$  и  $U_{bc}$  — уменьшаются, а  $U_{ca}$  — увеличивается.

2) При увеличении  $R_{bc}$  при постоянных значениях  $R_{ab}$  и  $R_{ac}$ :  $U_{bc}$  и  $U_{ca}$  — увеличиваются,  $U_{ab}$  — уменьшается; при уменьшении  $R_{bc}$  —  $U_{bc}$  и  $U_{ca}$  уменьшаются, а  $U_{ab}$  — увеличивается.

3) При увеличении  $R_{ac}$  при постоянных значениях  $R_{ab}$  и  $R_{bc}$ :  $U_{ca}$  и  $U_{ab}$  — увеличиваются, а  $U_{bc}$  — уменьшается; при уменьшении  $R_{ac}$  —  $U_{ca}$  и  $U_{ab}$  уменьшаются, а  $U_{bc}$  — увеличивается.

Для более наглядного представления выявленных зависимостей разработана блок-схема, представленная на рис. 3. Данные выявленные зависимости позволяют определиться с направлением и порядком изменения значений сопротивлений, то есть управлять коэффициентом несимметрии напряжения по обратной последовательности. При этом становится известным, как изменятся значения линейных напряжений, что позволит найти верный путь для уменьшения коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности. Варьируя данными зависимостями, можно подобрать конечные значения данных межфазных сопротивлений, при которых значение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности станет в пределах, нормируемых ГОСТ 32144-3013.

Данные значения мы получили для случая, когда идет перегрузка по фазам А и В. Однако в электроэнергетических системах возможны перегрузки в двух других случаях: перегружены фазы В и С и перегружены фазы А и С. Так как все перечисленные варианты перегрузки фаз приводят к несимметрии напряжения, то необходимо исследовать два оставшихся варианта: перегрузка по фазам В и С и перегрузка по фазам А и С. Так как модель позволяет симулировать различные варианты перегрузки



Таблица 1  
Изменение значений  $K_{2U}$  в условиях перегрузки по фазам А и В  
в сети 0,4 кВ при изменении значений  $R_{ab}$

$R_{ab}$	$R_{bc}$	$R_{ca}$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$K_{2U}$
0,5	0,5	0,5	347,5	349,1	362,1	2,1
0,6	0,5	0,5	350,4	351,7	360,9	1,5
0,7	0,5	0,5	353,4	353,6	360	1
0,8	0,5	0,5	354	355,1	359,3	0,7
0,9	0,5	0,5	355,2	356,2	358,8	0,5
1	0,5	0,5	356,1	357,2	358,4	0,3
1,1	0,5	0,5	356,9	357,9	358	0,2
1,2	0,5	0,5	357,6	358,6	357,7	0,1
1,3	0,5	0,5	358,1	359,1	357,4	0,1
1,4	0,5	0,5	358,6	359,5	357,2	0,2
1,5	0,5	0,5	359	360	357	0,3

Таблица 2  
Изменение значений  $K_{2U}$  в условиях перегрузки по фазам А и В  
в сети 0,4 кВ при изменении значений  $R_{bc}$

$R_{ab}$	$R_{bc}$	$R_{ca}$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$K_{2U}$
0,5	0,5	0,5	347,5	349,1	362,1	2,1
0,5	0,6	0,5	346,2	351,9	364,8	2,5
0,5	0,7	0,5	345,2	353,9	366,9	2,8
0,5	0,8	0,5	344,4	355,4	368,4	3,1
0,5	0,9	0,5	343,8	356,6	369,6	3,3
0,5	1	0,5	343,3	357,5	370,5	3,5
0,5	1,1	0,5	342,9	358,2	371,3	3,7
0,5	1,2	0,5	342,6	358,9	372	3,8
0,5	1,3	0,5	342,3	359,4	372,6	3,9
0,5	1,4	0,5	342	359,9	373	4
0,5	1,5	0,5	341,8	360,3	373,4	4

Таблица 3  
Изменение значений  $K_{2U}$  в условиях перегрузки по фазам А и В  
в сети 0,4 кВ при изменении значений  $R_{ca}$

$R_{ab}$	$R_{bc}$	$R_{ca}$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$K_{2U}$
0,5	0,5	0,5	347,5	349,1	362,1	2,1
0,5	0,5	0,6	350,3	347,7	365	2,4
0,5	0,5	0,7	352,3	346,6	367,1	2,7
0,5	0,5	0,8	353,8	345,8	368,6	3
0,5	0,5	0,9	355	345,1	369,8	3,2
0,5	0,5	1	355,9	344,6	370,8	3,3
0,5	0,5	1,1	356,7	344,2	371,6	3,5
0,5	0,5	1,2	357,4	343,8	372,2	3,6
0,5	0,5	1,3	357,9	343,5	372,8	3,7
0,5	0,5	1,4	358,4	343,2	373,2	3,8
0,5	0,5	1,5	358,8	343	373,6	3,9

фаз, то не составляет труда получить значения линейных напряжений и коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности для оставшихся двух вариантов перегрузки.

За исходные данные принимались такие же значения межфазных сопротивлений, как и при перегрузке фаз А и В. Изменяя значения сопротивлений

получили все необходимые значения, представленные в табл. 4 и 5. При этом убедились, что блок-схема, представленная на рис. 3, справедлива для всех вариантов перегрузки фаз.

При этом имеется следующий факт: при разных вариантах перегрузки всегда значения одного из линейных напряжений чуть больше двух других.

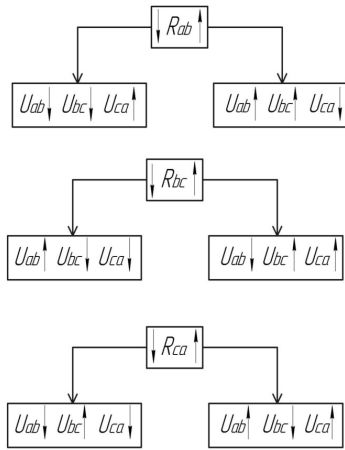


Рис. 3. Блок-схема зависимостей линейных напряжений от межфазных сопротивлений

Например, при перегрузке фаз А и В линейное напряжение  $U_{ca}$  всегда больше двух других линейных напряжений (при равных значениях межфазных сопротивлений) (табл. 1–3). При этом, используя блок-схему, можно рекомендовать, что для данного конкретного случая целесообразно увеличить меж-

фазное сопротивление  $R_{ab}$ , только в этом случае значение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности уменьшается за счет того, что, согласно блок-схеме (рис. 3), линейное напряжение  $U_{ca}$  уменьшается, а линейные напряжения  $U_{ab}$  и  $U_{bc}$  увеличиваются (табл. 1).

При перегрузке фаз В и С линейное напряжение  $U_{ab}$  больше остальных, поэтому целесообразно, согласно блок-схеме (рис. 3), увеличивать значения межфазного сопротивления  $R_{bc}$  для уменьшения значений коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности (табл. 4). При перегрузке фаз А и С линейное напряжение  $U_{bc}$  больше остальных, поэтому целесообразно, согласно блок-схеме (рис. 3), увеличивать значения межфазного сопротивления  $R_{ca}$ .

Таким образом, согласно проведенным исследованиям и данным рекомендациям можно сделать следующие выводы:

1) при перегрузке сети значение одного из линейных напряжений всегда больше значений двух других линейных напряжений, причем при различных вариантах перегрузки это линейное напряжение разное;

2) целесообразно увеличивать значение межфазного сопротивления, находящегося между теми фазами, которые перегружены.

Таблица 4  
Изменение значений  $K_{2U}$  в условиях перегрузки по фазам В и С в сети 0,4 кВ при изменении значений  $R_{bc}$

$R_{ab}$	$R_{bc}$	$R_{ca}$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$K_{2U}$
0,5	0,5	0,5	365,8	347,1	345,7	2,9
0,5	0,6	0,5	364,7	350	348,3	2,3
0,5	0,7	0,5	363,8	352,1	350,2	1,9
0,5	0,8	0,5	363,2	353,6	351,6	1,6
0,5	0,9	0,5	362,7	354,8	352,7	1,3
0,5	1	0,5	362,2	355,8	353,6	1,1
0,5	1,1	0,5	361,9	356,6	354,4	0,9
0,5	1,2	0,5	361,6	357,2	355	0,8
0,5	1,3	0,5	361,3	357,8	355,5	0,7
0,5	1,4	0,5	361,1	358,3	356	0,6
0,5	1,5	0,5	360,9	358,7	356,4	0,6

Таблица 5  
Изменение значений  $K_{2U}$  в условиях перегрузки по фазам А и С в сети 0,4 кВ при изменении значений  $R_{ca}$

$R_{ab}$	$R_{bc}$	$R_{ca}$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$K_{2U}$
0,5	0,5	0,5	349,6	365,4	343,6	2,9
0,5	0,5	0,6	352,2	364,3	346,5	2,3
0,5	0,5	0,7	354,1	363,4	348,6	1,9
0,5	0,5	0,8	355,5	362,8	350,1	1,6
0,5	0,5	0,9	356,7	362,3	351,3	1,4
0,5	0,5	1	357,6	361,9	352,2	1,2
0,5	0,5	1,1	358,3	361,5	353	1,1
0,5	0,5	1,2	358,9	361,2	353,7	1
0,5	0,5	1,3	359,5	361	354,2	0,9
0,5	0,5	1,4	359,9	360,8	354,7	0,8
0,5	0,5	1,5	360,3	360,6	355,1	0,8

## Библиографический список

1. Антонов А. И., Денчик Ю. М., Зубанов Д. А., Руппель А. А. Порядок обработки результатов экспериментальных исследований на соответствие отклонения напряжения требованиям ГОСТ 32144-2013 // Омский научный вестник. 2015. № 2 (140). С. 163–166.
2. Данилов Г. А., Денчик Ю. М., Иванов М. Н., Ситников Г. В. Повышение качества функционирования линий электропередачи: моногр. / под ред. В. П. Горелова, В. Г. Сальникова. Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2013. 559 с.
3. Антонов А. И., Вишнягов М. Г., Денчик Ю. М., Зубанов Д. А., В. И. Клеутин, Руппель А. А. Определение кондуктивной низкочастотной помехи по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности // Научные проблемы Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 4. С. 199–203.
4. Антонов А. И., Денчик Ю. М., Зубанов Д. А., Клеутин В. И., Руппель А. А., Никишкин А. С. Анализ проведения испытаний на соответствие установившегося отклонения напряжения требованиям ГОСТ 54149-2010 // Научные проблемы Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 4. С. 210–213.
5. Зубанов Д. А., Клеутин В. И., Сидоренко А. А. Обработка результатов экспериментальных исследований показателей качества электрической энергии средствами программы labView / сост. В. А. Глушеч // Сборник научных трудов ОИВТ. 2012. Вып. 10. С. 118–122. ISBN 978-5-8119-0512-6.
6. Машкин А. Г., Машкин В. А. Проблемы качества и учёта электроэнергии на границах системы тягового электроснабжения // Промышленная энергетика. 2007. № 11. С. 29–31.
7. Антонов А. И., Денчик Ю. М., Зубанов Д. А. [и др.]. Анализ разграничения ответственности за обеспечение качества электрической энергии после перехода на новый ГОСТ Р 54149-2010 // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 1-2. С. 329–331.

8. Иванова Е. В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах / под ред.: В. П. Горелова, Н. Н. Лизалека. Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2006. 432 с. ISBN 5-8119-0201-0.

9. Руппель А. А., Руппель А. А. Кондуктивные электромагнитные помехи в сетях 6–10 кВ: моногр. / под ред. В. П. Горелова. Омск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2004. 284 с.

10. Вишнягов М. Г., Иванова Ю. М., Сальников В. Г. Параметры электромагнитной обстановки в сети с искажающей нагрузкой // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2008. № 2. С. 242–247.

11. Иванова Е. В. Кондуктивные коммутационные помехи в местных электрических сетях промышленных предприятий и электростанций // Промышленная энергетика. 2003. № 7. С. 36–40.

**АНТОНОВ Александр Игоревич**, старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование».

**ВИШНЯГОВ Михаил Геннадиевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование».

**ЗУБАНОВ Дмитрий Александрович**, старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование».

**РУДИ Дмитрий Юрьевич**, ассистент кафедры «Электротехника и электрооборудование».

**РУППЕЛЬ Александр Александрович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование». Адрес для переписки: elektrotex@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.09.2017 г.

© А. И. Антонов, М. Г. Вишнягов, Д. А. Зубанов, Д. Ю. Руди, А. А. Руппель

## Книжная полка

**Сипайлова, Н. Электрические и электронные аппараты. Проектирование : учеб. пособие / Н. Сипайлова. – М. : Юрайт, 2017. – 167 с. – ISBN 978-5-534-00746-6.**

Учебное пособие содержит общие сведения о проектировании электрических аппаратов, методические рекомендации по проектированию основных узлов аппаратов, расчетные формулы и примеры расчета, а также справочный материал. Цель настоящего пособия — представить в краткой форме логику процесса проектирования электрического аппарата и помочь студентам организовать работу над курсовым проектом.

**Важов, В. Техника высоких напряжений : учеб. / В. Важов, В. Лавринович. – М. : Инфра-М, 2016. – 264 с. – ISBN 978-5-16-010565-9.**

Изложены основы техники высоких напряжений применительно к электроэнергетике. Освещены физические аспекты электроразрядных процессов в газообразных, жидких, твердых и комбинированных диэлектриках. Описаны конструкции внешней изоляции линий электропередачи и подстанций; рассмотрены основные принципы построения изоляции оборудования высокого напряжения (силовых трансформаторов, высоковольтных конденсаторов, кабелей, электрических машин, коммутационных аппаратов); кратко освещены вопросы назначения и построения высоковольтных испытательных установок, испытания и измерения, а также описаны внутренние и атмосферные перенапряжения в электрических системах, меры и средства защиты от них. Предназначен для студентов, обучающихся по направлению «Электроэнергетика», также может быть полезен инженерно-техническим работникам предприятий, энергосистем и проектных институтов.

## ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО РЫНКА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

**В статье проведен обзор современных средств измерений показателей качества электроэнергии, представленных в настоящее время на рынке России. Рассмотрены области их возможного применения и особенности конструктивного исполнения. Произведен сравнительный анализ их функциональных свойств и стоимости, результаты которого представлены в виде таблицы. Сформулирована сводная таблица технических характеристик анализаторов качества электрической энергии российских производителей.**

**Ключевые слова:** качество электрической энергии, средства измерений, методы измерений, показатели качества, электромагнитная совместимость.

В соответствии с пунктом № 27 части III постановления Правительства Российской Федерации от 04.05.2012 № 442 (ред. от 28.08.2017) «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии», электроэнергия на розничном рынке реализуется потребителю на основании договора энергоснабжения или договора купли-продажи электроэнергии [1].

Поставщик электрической энергии обязан самостоятельно либо привлекая третьих лиц оказывать поставку электроэнергии до потребителя и осуществлять её продажу. Потребитель, в свою очередь, обязан оплачивать поставляемую ему электроэнергию (мощность) [1].

По условиям договора энергоснабжения, поставщик электроэнергии несет ответственность за неисполнение либо ненадлежащее исполнение обязанностей определенных договором, в том числе за сетевую организацию, занимающуюся транспортировкой электрической энергии и за прочие организации, привлеченные для оказания услуг [1].

По договору купли-продажи электроэнергии поставщик также несет ответственность за неисполнение либо ненадлежащее исполнение обязанностей согласно договору, в том числе и за привлеченных лиц, оказывающих услуги, но за ненадлежащее оказание или неоказание услуг по передаче сетевая организация несет ответственность лично перед потребителем [1].

Статья 518 Гражданского кодекса Российской Федерации определяет, что, в случае поставки товара ненадлежащего качества, потребитель вправе требовать его замены на товар соответствующего качества либо отказаться от исполнения договора купли-продажи и потребовать возврата денежной суммы, которая была уплачена за товар [2].

Таким образом, сетевым организациям, занимающимся поставкой электрической энергии потребителям любой формы собственности, необходимо заботиться о качестве поставляемого ими товара.

Требования к показателям качества для электрической энергии как товара установлены в ГОСТ 32144-2013 [3].

Федеральный закон № 184-ФЗ от 27 декабря 2002 года «О техническом регулировании» определяет, что обязательной сертификации подлежат только электрическая энергия, которая отпускается гражданам для личного пользования (не для коммерческой деятельности), то есть простым бытовым потребителям [4]. В таком случае показателями качества электрической энергии, подлежащими обязательному подтверждению и сертификации, являются положительное и отрицательное отклонение напряжения и отклонение частоты [3].

Соответствие электрической энергии необходимому стандарту проверяет и подтверждает специализированная организация — орган по сертификации, после проведения испытательной лабораторией по качеству электрической энергии соответствующих сертификационных испытаний и оформления протоколов установленной формы.

Испытательные лаборатории в своей деятельности для измерений применяют специальные средства регистрации и анализа показателей качества электрической энергии — анализаторы (средства измерений) качества электрической энергии (далее — СИ ПКЭ).

Такие СИ ПКЭ предназначены для измерения, контроля и регистрации основных и дополнительных параметров электроэнергии, оценки и анализа показателей качества электроэнергии в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013, ГОСТ 33073-2014, ГОСТ 30804.4.30-2013, ГОСТ 30804.4.7-2013.

Помимо использования для решения основной задачи — контроля показателей качества электрической энергии, СИ ПКЭ находят применение во многих смежных областях деятельности, связанной с проведением научно-исследовательских работ и инструментального контроля (рис. 1).

Авторы статьи, приняв во внимание размещенную в открытом доступе информацию о СИ ПКЭ, а также



Рис. 1. Области применения СИ ПКЭ

опираясь на опыт испытательной лаборатории по качеству электрической энергии, функционирующей при кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета уже более 10 лет, а также на опыте других испытательных лабораторий, провели сравнительный анализ основных функциональных свойств и технических характеристик СИ ПКЭ, представленных на российском рынке (табл. 1, 2).

Дополнительным источником информации являются эксплуатационная документация и технические характеристики приборов, опубликованные в сети Internet на сайтах производителей и дистрибьюторов измерительного оборудования.

Принцип действия СИ ПКЭ основан на вычислении значений измеряемых параметров путем аналого-цифрового преобразования массива мгновенных значений входных сигналов напряжения и тока. На сегодняшний день на рынке представлен широкий спектр СИ ПКЭ как стационарного, так и переносного исполнения: класса «А» («advanced» — «повышенного типа»), класса «S» («survey» — «для наблюдений») или класса «B» («basic» — «начальный») в соответствии с ГОСТ 30804.4.30-2013, обеспечивающих проведение обследований и оценки качества электрической энергии [5].

Приборы класса «А» необходимо применять для проведения точных измерений — проверка соответствия стандартам, устанавливающим нормы качества электроэнергии, при выполнении условий договоров, предусматривающих возможность разрешения спорных вопросов путем измерений, и т.д. В то время как приборы класса «S» допускается применять при проведении мониторинга или оценке качества электроэнергии с использованием статисти-

ческих методов, в том числе при ограниченной номенклатуре показателей.

Основными производителями представленных в нашей стране приборов переносного типа для данного вида измерений являются следующие компании:

- Chauvin Arnoux (Франция), С.А 8336 Qualistar Plus [6];
- Circutor (Испания), Circutor AR 6 [7];
- Fluke Industrial (США), Fluke 435 II [8];
- Metrel (Словения), MI 2892 [9, 10];
- Sonel (Польша), PQM — 70X [11, 12];
- АО «ПриСТ» (Россия), АК ИП АКЭ-284 [13, 14];
- НПП «Энерготехника» (Россия), Ресурс-UF2MB [15, 16];
- ООО «НПП «Марс-Энерго» (Россия), Энерготестер ПКЭ-А-А [17, 18];
- ООО «НПП «Прорыв» (Россия), Прорыв-КЭ-А, Прорыв-Т-А [19, 20].

По данным сайтов фирм-производителей и поставщиков измерительного оборудования [6–20] по состоянию на сентябрь 2017 года, средняя стоимость СИ ПКЭ, оснащенного одним комплектом токовых клещей, находится на уровне 260 000 рублей, при этом средняя цена импортных СИ ПКЭ составляет порядка 340 000 рублей, в то время как отечественных аналогов — 181 000 рублей (рис. 2).

Как указывалось выше, требования к точности измерений по классу «S» ниже, чем по классу «А», в связи с этим измерительные приборы, соответствующие классу «S», имеют стоимость на 10–20% ниже по сравнению с приборами класса «А».

Результаты сравнения измеряемых СИ ПКЭ характеристик позволяют сделать вывод, что анализируемые в статье приборы, в том числе и отечественные, выполняют требования действующей норматив-

Функциональные свойства СИ ПКЭ

№ п/п	Производитель	Модель	Средняя стоимость, (руб.)	Преимущества	Недостатки
1	2	3	4	5	6
1	Fluke Industrial, США	FLUKE 435 II	510 000	— высокая точность измерений; — высокое качество комплектующих; — синхронизация времени; — соответствие класс «А»	— стоимость; — интервал между проверками — 1 год; — отсутствие первичной поверки (5 500 руб.); — диапазон рабочих температур.
2	Metrel, Словения	METREL MI 2892	295 000	— комплект поставки; — наличие первичной поверки; — межповерочный интервал 5 лет; — синхронизация времени UTC; — предустановленная конфигурация ГОСТ 32144-2013; — диапазон рабочих температур; — самостоятельное обновление ПО; — соответствие классу «А».	— стоимость; — GPS приемник (18 000 руб.)
3	Chauvin Arnoux, Франция	C.A 8336 QUALISTAR PLUS	330 000	— измерение энергии; — внутренняя память — 2 Гб.	— завышенная стоимость; — нет синхронизации времени UTC; — отсутствие первичной поверки (8 500 руб.); — соответствие классу «В»; — ПО для формирования протоколов (40 000 руб.) — токовые клещи приобретаются дополнительно (от 4 шт., от 14 000 руб./шт.)
4	Circutor, Испания	AR 6.4 AM 54	408 000	— комплект поставки; — дисплей 5,7"; — наличие пяти токовых каналов; — определение тока утечки; — внутренняя память 1 Гб; — карта памяти SD формата 2 Гб в комплекте.	— стоимость; — нет синхронизации времени UTC; — интервал между проверками 2 года; — диапазон рабочих температур; — свидетельство об утверждении типа СИ закончилось 30.06.2017 г.
5	Sonei, Польша	PQM-701	205 000	— защита корпуса IP65; — возможна установка непосредственно на ЛЭП; — диапазон рабочих температур; — трехуровневый подогрев прибора; — внутренняя Li-Ion батарея; — наличие первичной поверки; — синхронизация времени UTC (PQM-702); — соответствие классу «А».	— стоимость; — интервал между проверками 2 года; — отсутствие полноценного дисплея (PQM-701); — большой размер корпуса (PQM-701); — токовые клещи приобретаются дополнительно (от 12 600 руб./шт.)
6		PQM-702	309 000		
7	АО «ПриСТ», Россия / Италия	АКИП АКЭ-824	210 000	— стоимость; — комплект поставки.  *акционная стоимость на момент подготовки статьи	— отсутствие первичной поверки (5 500 руб.); — интервал между проверками — 1 год; — диапазон рабочих температур; — нет синхронизации времени UTC; — отсутствие русификации меню; — предустановленная конфигурация EN50160. — соответствие классу «В».
8	ООО «НПП «Прорыв», Россия	Прорыв Т-А-КТ250	107 000	— масса-габаритные показатели; — стоимость; — наличие первичной поверки; — межповерочный интервал 4 года; — диапазон рабочих температур; — синхронизация времени UTC; — соответствие классу «А».	— отсутствие дисплея; — металлический корпус; — необходимость наличия ноутбука для задания конфигурации измерения; — отсутствие возможности расширения памяти с помощью карт памяти SD формата; — упрощенный интерфейс программного обеспечения.
9		Прорыв Т-А-КТ800	165 000		

ной документации по метрологической точности и набору обязательных измеряемых ПКЭ (табл. 2).

Кроме определенных в ГОСТ 32144-2013 обязательных показателей, анализаторы ПКЭ позволяют определить достаточное количество смежных параметров, необходимых для оценки качества функционирования электрических сетей и определения оптимальности действующего распределения нагрузки (активная, реактивная и полная мощность,  $\cos \phi$ , минимальное, максимальное, среднее действующие значения напряжения и тока и т.д.).

Конструктивно все модели СИ ПКЭ представляют собой моноблочную, эргономичную, переносную конструкцию, с корпусами, выполненными из пластмассы. Приборы серии «Прорыв» имеют металлический корпус, что накладывает требования к обязательному подключению защитного заземления через соответствующую клемму, расположенную на задней панели.

Для удобства расположения анализатора на горизонтальной поверхности (для удобства чтения показаний и настройки) приборы Fluke 435 II, Metrel

1	2	3	4	5	6
10	ООО «НПП Марс-Энерго», Россия	Энерготестер ПКЭ-А-А "10А"	186 000	— масса-габаритные показатели; — комплект поставки; — встроенный аккумулятор; — наличие первичной проверки; — диапазон рабочих температур; — межповерочный интервал 4 года; синхронизация времени UTC; соответствие классу «А».	— возможность подключения только трех токовых клещей; — внутренняя память 512 Мб; — отсутствие возможности расширения памяти с помощью карт памяти SD формата; — упрощенный интерфейс дисплея и программного обеспечения.
11		Энерготестер ПКЭ-А-А "3000А"	240 000		
12	НПП «Энерготехника», Россия	Ресурс UF2MB-ЗП-15-5	180 000	— комплект поставки; — возможность работы с USB флеш-дискон; — диапазон рабочих температур; — синхронизация времени UTC; — соответствие классу «А»; — широкий выбор стандартного программного обеспечения.	— масса-габаритные показатели; — отсутствие полноценного дисплея; — сложность задания конфигурации измерения; — интервал между проверками — 2 года.

2892, Chauvin Arnoux C.A 8336 Qualistar Plus и АК ИП АКЭ-284 снабжены специальной удерживающей подставкой, которая удерживает наклон прибора от 30° (Metrel) до 53° (Chauvin Arnoux). Прибор Metrel MI 2892 дополнительно снабжен магнитом, позволяющим размещать его непосредственно на вертикальных металлических поверхностях, что облегчает выбор места для длительного размещения прибора во время испытаний качества электрической энергии.

Большинство СИ ПКЭ, за исключением компактных приборов серии «Прорыв», оснащены цветным жидкокристаллическим дисплеем, который позволяет без подключения внешнего управляющего устройства (ноутбук, планшет, смартфон и т.п.) производить проверку правильности присоединения измерительных каналов к точкам подключения (построение фазовых диаграмм и графиков фазных напряжений и токов), отслеживать в режиме реального времени действующие значения энергетических величин, необходимых при анализе показателей качества электрической энергии. Прибор АК ИП АКЭ-284 имеет дисплей с дополнительной возможностью сенсорного управления.

Также на лицевой панели СИ ПКЭ размещаются кнопки управления и функциональные клавиши для включения и выключения прибора, проведения измерений, выбора специальных функций при измерениях.

Гнезда интерфейсов USB и Ethernet могут быть расположены аналогично на лицевой (Metrel MI 2892, Sonel PQM-702), либо на боковой (Fluke 435 II, Chauvin Arnoux C.A 8336 Qualistar Plus, АК ИП АКЭ-284, Энерготестер ПКЭ-А-А) или же на задней панели анализатора (Circutor AR 6, Ресурс UF2MB).

На задней панели приборов (кроме Прорыв-КЭ-А, Прорыв-Т-А) расположены разъемы подключения каналов напряжения и токов к измеряемой цепи, разъем питания, разъем для подключения внешней активной антенны GPS/Глонасс. Разработчики приборов серии «Прорыв» расположили разъемы для подключения прибора к контролируемой электрической сети и индикаторы проверки правильности подключения на передней панели.

Необходимо отметить, что, в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30-2013, приборы класса «А» должны обеспечивать возможность подстройки (синхронизацию) текущего времени под время «Национальной шкалы координированного времени Российской Федерации UTC (SU)». При этом приборы серии «Прорыв», Энерготестер ПКЭ-А-А, Ресурс

UF2MB, Sonel PQM-702 имеют в штатной комплектации внешнюю активную антенну (GPS / Глонасс). Стоимость данной опции у остальных анализаторов класса «А» составляет 18 000 (Metrel 2892) и 85 000 рублей (Fluke 435 II) соответственно [10, 21].

Анализаторы Chauvin Arnoux C.A 8336 Qualistar Plus, Circutor AR 6, Sonel PQM-701, АК ИП АКЭ-824 не имеют возможности синхронизации времени, в связи с чем относятся к классу «S» [5].

Конструктивные исполнения регистраторов позволяют большинству СИ ПКЭ функционировать в диапазоне температур от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+55^{\circ}\text{C}$ . Исключением являются приборы Chauvin Arnoux C.A 8336 Qualistar Plus, Circutor AR 6, Fluke 435 II, АК ИП АКЭ-824, для которых нижняя температурная граница условий эксплуатации определена производителем на уровне  $0^{\circ}\text{C}$  [6–8, 13, 14]. Производитель приборов серии «Прорыв» заявляет отсутствие дополнительных погрешностей в диапазоне границы рабочих температур от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+55^{\circ}\text{C}$  [19, 20].

Анализаторы Sonel PQM-701 и Sonel PQM-702 обеспечивают стабильную работу при отрицательных температурах за счет встроенного подогрева [11, 12].

В случае отключения внешнего питания все СИ ПКЭ позволяют продолжить работу для сохранения произведенных измерений за счет внутренних Li-Ion (литий-ионных) или Ni-Mh (никель металл-гидридных) аккумуляторных батарей. Для прибора серии «Прорыв» такая возможность присутствует только в комплекте с дополнительно приобретаемым бесперебойным источником питания [22].

Для передачи данных измерений в стационарный компьютер или ноутбук производители СИ ПКЭ используют соединение либо посредством только канала USB (Энерготестер ПКЭ-А-А, Ресурс UF2MB), либо, для максимально быстрой передачи данных, дублируют эту возможность путем применения съемной карты памяти типа SD (англ. Secure Digital) большой емкости (Circutor AR 6, Fluke 435 II, Metrel MI 2892, Sonel PQM-70X, АК ИП АКЭ-824). После окончания измерений карту памяти можно вынуть из разъема анализатора и использовать внешнее устройство чтения карт SD совместно с прилагаемым программным обеспечением для максимально быстрой передачи данных в компьютер.

Для приборов серии «Fluke» необходимо отметить такую особенность, что карта памяти находится на задней стороне анализатора в аккумуляторном отсеке, причем доступ к ней возможен только после снятия крышки аккумуляторного отсека. Если карта

Сравнительный анализ характеристик СИ ПКЭ отечественного производства

Марка:	АКИП	Энерготестер	Прорыв	Прорыв	Ресурс
Модель:	АКЭ-824	ПКЭ-А-А	КЭ-А	Т-А	UF2M
Стоимость (руб.):	210 000	186 000 – 240 000	78 000	107 000 – 165 000	180 000
Габариты (мм):	235*165*75	250*120*80	183*109*35	183*109*35	310*260*150
Масса (кг):	1	1	0,4	0,4	4
Питание (основное) (В):	100 – 240	90 – 264	85 – 265	85 – 265	85 – 265
Питание (автономное):	Li-Ion (3,7 В)	Тип АА (4 шт.)	ИБП-1 (15000 руб.)	ИБП-1 (19000 руб.)	нет
Рабочие условия (°С):	-20 – 90	-20 – 55	-40 – 55	-40 – 55	-20 – 55
Госреестр	№ 36526-07 до 15.05.18 г.	№ 50861 до 29.05.2018 г.	№ 56518 до 20.08.2019 г	№ 56518 до 20.08.2019 г	№ 48623 до 31.10.2017 г.
Интервал поверки (месяцев):	12	48	48	48	24
Класс по ГОСТ 30804.4.30:	–	А	А	А	А
Входы напряжения:	5	4	4	4	5
Входы токов:	4	3	нет	4	4
Функции осциллографа:	да	да	нет	нет	нет
Гармонические составляющие:	да	да	да	да	да
Измерение частоты:	да	да	да	да	да
Измерение мощности:	да	да	нет	да	да
Измерение энергии:	нет	нет	нет	да	да
Измерение cos f:	да	да	нет	да	да
Измерение тока нейтрали:	да	нет	нет	да	да
Измерение несимметрии:	да	да	да	да	да
Фазовая диаграмма:	да	да	нет	нет	нет
Измерение дозы фликера:	да	да	да	да	да
Регистрация особых событий:	да	да	нет	да	да
Переходные процессы:	да	да	нет	да	нет
Регистрация пусковых токов:	да	да	нет	нет	нет
Регистрация формы сигналов:	да	да	нет	нет	да
Порт USB:	да (2 шт.)	да	опция (5100 руб.)	опция (5100 руб.)	да
Порт RS232:	нет	нет	нет	нет	да
Порт Ethernet:	нет	нет	опция (14000 руб.)	опция (14000 руб.)	нет
Объем памяти:	15 Мб	512 мб	не менее 30 дней	не менее 30 дней	не менее 60 дней
GPS приемник:	нет	да	да	да	нет
ЖК дисплей (Тип):	цветной TFT	цветной TFT	нет	нет	нет
Русификация:	нет	да	да	да	да
Комплект клещей:	4 шт. (до 3000А)	3 шт. (до 10А)	нет	4 шт. (на выбор)	4 шт. (на выбор)

памяти не установлена, то доступными будут только моментальные данные измерений.

Для приборов серии «Прорыв» (стандартная комплектация) передача текущей и архивной информации на внешний компьютер для дальнейшей обработки и отображения возможна только при помощи интерфейса RS-485. Передача данных посредством USB канала возможна только с помощью дополнительно приобретаемого преобразователя интерфейса RS 485-USB [23].

Анализаторы Chauvin Arnoux C.A 8336 Qualistar Plus, Circutor AR 6, Fluke 435 II, Metrel 2892, Sonel PQM-70X, АКИП АКЭ-284, Ресурс UF2MB оснащены пятью входами по напряжению типа «банан» (фаз-

ные напряжения, нейтраль и заземление), либо с проводами, заканчивающимися разъемами типа «банан» (Sonel PQM-70X). В свою очередь, приборы Прорыв-КЭ-А, Прорыв-Т-А и Энерготестер ПКЭ-А-А имеют четыре входа типа «банан» для подключения к напряжению (фазные напряжения, нейтраль).

Все анализаторы имеют возможность измерения токов при помощи четырех токоизмерительных клещей (фаза А, В, С и ток в нулевом проводнике), за исключением Энерготестер ПКЭ-А-А (токи в фазах А, В, С). Анализатор Circutor AR.6 имеет дополнительный пятый канал для определения тока утечки.

В связи с широкой гаммой токоизмерительных клещей (датчики тока различаются по конструктив-



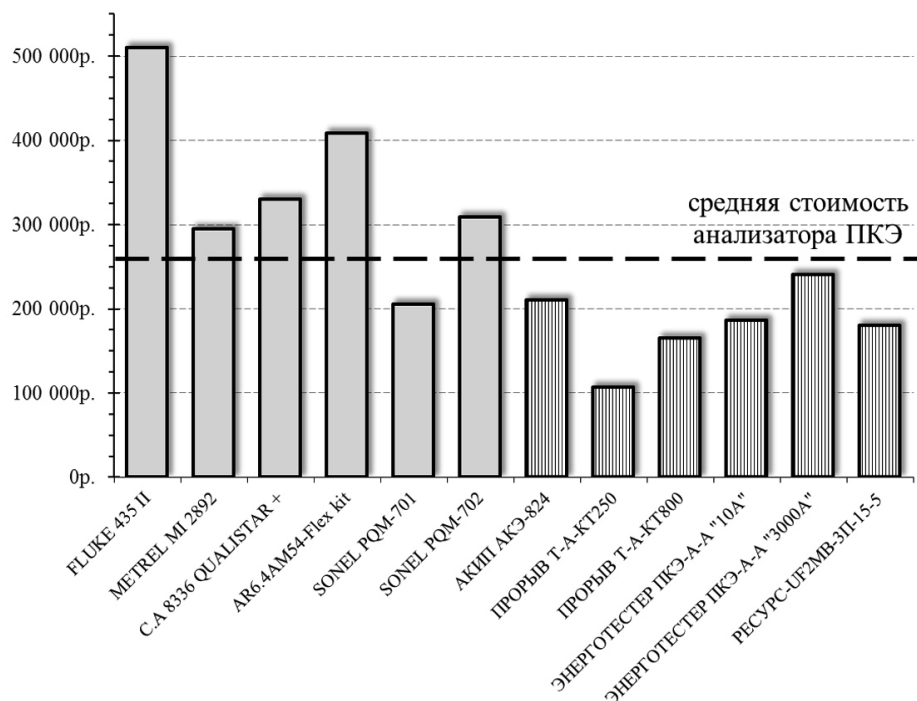


Рис. 2. Сравнение стоимости СИ ПКЭ

ному исполнению и номинальному измеряемому току), в зависимости от своих потребностей пользователь может либо первоначально, либо уже в процессе работы приобрести дополнительно комплект токоизмерительных клещей с необходимым диапазоном измерений, без внесения каких-либо изменений в конструкцию самого анализатора. В случае с приборами серии Прорыв максимальная величина измеряемого тока задается в конфигурации самим производителем исходя из конкретных ступеней регулирования и в связи с этим определяется пользователем на этапе формирования заявки на приобретение прибора.

Ключевым элементом, обеспечивающим результат работы анализатора при выполнении регистрации и анализа данных, является его программное обеспечение.

Каждый из рассмотренных анализаторов формирует массив измеренных данных в своем оригинальном формате, в связи с чем производители в комплекте с анализатором поставляют собственное программное обеспечение. Данные программы позволяют считывать данные с измерителя, конфигурировать отдельные измерительные функции и анализировать накопленные в процессе измерений данные, наблюдать за текущими параметрами сети, просматривать данные измерений в табличном виде и осциллограммы, а также создавать отчеты, с формированием различных графиков и протоколов измерений в соответствии с требованиями ГОСТ 33073-2014.

- Chauvin Arnoux (Франция) — ПО «Power Analyser Transfer DataView»;
- Circutor (Испания) — ПО «Power Vision Plus»;
- Fluke (США) — ПО «PowerLog430-II»;
- Metrel (Словения) — ПО «PowerView»;
- Sonel (Польша) — ПО «SONEL ANALYSIS 3»;
- АО «ПриСТ» (Россия), ПО «TopView»;
- НПП «Энерготехника» (Россия) — ПО «Монитор Ресурс-UF2»; ПО «РЕСУРС-UF2Plus» и др.;
- ООО «НПП «Марс-Энерго» (Россия) — ПО «Энергомониторинг ЭС»;

— ООО «НПП «Прорыв» (Россия) — ПО «Прорыв», «TERM».

При этом необходимо отметить, что программное обеспечение отечественных анализаторов, как правило, имеет гораздо более упрощенный вид интерфейса и минимально необходимый функционал для анализа измерений и вывода информации, нежели зарубежные аналоги.

Нельзя не учесть и такой немаловажный момент, как сроки обязательной поверки анализаторов. Межповерочный интервал для анализаторов Fluke 435 II и АКИП АКЭ-284 и составляет 1 год, для Chauvin Arnoux C.A 8336 Qualistar Plus, Circutor AR 6, Sonel PQM-70X, Ресурс UF2MB — 2 года, для Прорыв-Т-А, Прорыв-КЭ-А — 4 года и для Metrel 2892 — 5 лет! Кроме того, у анализаторов Chauvin Arnoux C.A 8336 Qualistar Plus, Fluke 435 II, АКИП АКЭ-284, первичная поверка, в отличие от других производителей, не входит в стоимость продажи приборов и потребует дополнительных затрат от 5500 до 8500 рублей соответственно [6, 8, 13].

Подводя итоги, нужно сказать, что за последние 5–10 лет развитие современной электронной базы позволило создать высокоэффективные СИ ПКЭ, которые обладают достаточно производительной элементной базой для выполнения вычислений и первичного анализа данных измерений прямо на месте контроля качества электрической энергии.

Тем не менее ожидания потребителей на появление недорогих, надёжных и удобных изделий, в первую очередь из-за влияния реалий экономической ситуации, не оправдались. Импортные приборы, отвечающие всем потребительским и техническим требованиям, стали лучше, но при этом в разы дороже. Для примера, стоимость СИ ПКЭ Circutor AR 6 в феврале 2013 года составляла 199 990 рублей, а по состоянию на сентябрь 2017 года — 408 200 рублей [7]. Аналогичная ситуация и с другими СИ ПКЭ зарубежных производителей.

Отечественные же анализаторы, несмотря на имеющиеся (заявленные) достоинства — способность рабочего применения в более суровых климатиче-

ских условиях и более низкую, но не значит доступную, стоимость, не лишены, в первую очередь, эргономических огрехов, на которые пользователь в большинстве случаев обращает основное внимание.

Поэтому, прежде чем осуществлять покупку анализатора качества электрической энергии, персоналу, которому предстоит работать с данными СИ ПКЭ, необходимо решить задачу по определению целей, степени, среды и характера (сертификация, периодические испытания или мониторинг) использования данных приборов, чтобы в итоге получить анализатор с наилучшим соотношением цена — потребительские свойства.

#### Библиографический список

1. О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии: постановление Правительства РФ от 4 мая 2012 г. № 442 г. URL: <https://rg.ru/2012/06/05/energorynki-site-dok.html> (дата обращения: 15.09.2017).
2. Гражданский кодекс Российской Федерации. Ч. 2: Федер. закон от 26 января 1996 г. № 14-ФЗ (ред. от 28.03.2017). URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_9027/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_9027/) (дата обращения: 15.09.2017).
3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014—07—01. М.: Стандартинформ, 2013. 10 с.
4. О техническом регулировании: Федер. закон № 184-ФЗ от 27 декабря 2002 г. URL: <https://rg.ru/2002/12/27/tehreglament-dok.html> (дата обращения: 15.09.2017).
5. ГОСТ 30804.4.30-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. Введ. 2014—01—01. М.: Стандартинформ, 2014. 51 с.
6. Прибор измерения показателей качества электрической энергии Chauvin Arnoux С.А 8336 QUALISTAR PLUS. URL: [http://www.electronpribor.ru/catalog/16/c\\_a\\_8336\\_qualistar\\_plus193.htm](http://www.electronpribor.ru/catalog/16/c_a_8336_qualistar_plus193.htm) (дата обращения: 15.09.2017).
7. Прибор измерения показателей качества электрической энергии Circutor AR6.4AM54. URL: <http://www.electronpribor.ru/catalog/16/komplekt-ar6.4am54-flex-kit.htm> (дата обращения: 15.09.2017).
8. Прибор измерения показателей качества электрической энергии Fluke 435 II. URL: <http://www.electronpribor.ru/catalog/16/fluke-435-ii.htm> (дата обращения: 15.09.2017).
9. Анализатор качества электроэнергии Metrel MI 2892. URL: <http://www.electronpribor.ru/catalog/16/mi-2892.htm> (дата обращения: 15.09.2017).
10. Анализатор качества электроэнергии класса А Metrel MI 2892 PowerMaster. URL: <http://www.metrel-russia.ru/products/Kachestvo/MI-2892-01> (дата обращения: 15.09.2017).
11. Анализатор параметров качества электрической энергии Sonel PQM-701. URL: <http://www.electronpribor.ru/catalog/16/pqm-701.htm> (дата обращения: 15.09.2017).
12. Анализатор параметров качества электрической энергии Sonel PQM-702. URL: <http://electroprogress.ru/catalog/izmerit/>

pribory-izmereniya-pokazatelei-kachestva-elektricheskoi-energii-pke/pqm-702-analizator-parametrov-kachestva-elektricheskoi-energii (дата обращения: 15.09.2017).

13. Анализатор качества электроэнергии АКИП АКЭ-824. URL: <http://www.electronpribor.ru/catalog/16/ake-824.htm> (дата обращения: 15.09.2017).

14. Микропроцессорный регистратор — анализатор качества электрической энергии в однофазных и трехфазных электрических сетях АКЭ-823, АКЭ-824. URL: <https://www.prist.ru/produces/pdf/ake-823,ake-824.pdf> (дата обращения: 15.09.2017).

15. Измеритель показателей качества электроэнергии Ресурс-UF2МВ. URL: <http://www.electronpribor.ru/catalog/16/resurs-uf2m.htm> (дата обращения: 15.09.2017).

16. Измеритель показателей качества электроэнергии Ресурс-UF2МВ-3П-15-5. URL: <http://www.entp.ru/catalog/pke/8> (дата обращения: 15.09.2017).

17. Энерготестер ПКЭ-А-А «10А» — прибор для измерений показателей качества электрической энергии. URL: [http://www.electronpribor.ru/catalog/16/energotester-pke-a-a-10a\\_.htm](http://www.electronpribor.ru/catalog/16/energotester-pke-a-a-10a_.htm) (дата обращения: 15.09.2017).

18. Приборы контроля качества и учёта электроэнергии. Энерготестер ПКЭ-А-А. URL: <http://www.mars-energo.ru/home/pribory-kontrolya-kachestva-i-ucheta-elektroenergii/energotester-pke-a.html> (дата обращения: 15.09.2017).

19. Анализатор качества электрической энергии «Прорыв-Т-А» с токовыми клещами Прорыв-КТ 250. URL: <http://www.electronpribor.ru/catalog/16/proryv-t-a-s-tokovymi-kleshami-proryv-kt250.htm> (дата обращения: 15.09.2017).

20. Анализатор качества электрической энергии «Прорыв-Т-А» с токоизмерительными клещами Прорыв-КТ800. URL: <http://proryvnpp.ru/product/proryv-t-a/> (дата обращения: 15.09.2017).

21. Модуль синхронизации времени по GPS (430 Series) Fluke GPS430. URL: <http://fluke-tools.ru/content/modul-sinhronizacii-vremeni-po-gps430-series-fluke-gps430> (дата обращения: 15.09.2017).

22. Источник бесперебойного питания ИБП-1. URL: <http://proryvnpp.ru/product/ibp-1/> (дата обращения: 15.09.2017).

23. Преобразователь интерфейса RS 485-USB — для Прорыв-КЭ-А, Прорыв-Т-А. URL: <http://www.electronpribor.ru/catalog/834/preobrazovatel-interfeysa-rs-485-usb.htm> (дата обращения: 15.09.2017).

**ДЕД Александр Викторович**, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

**СИКОРСКИЙ Сергей Петрович**, магистрант гр. ЭЭМ-172 факультета «Элитное образование и магистратура».

**РОГОЗИНА Дарья Анатольевна**, магистрант гр. ЭЭМ-172 факультета «Элитное образование и магистратура».

Адрес для переписки: [ded\\_av@mail.ru](mailto:ded_av@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 29.09.2017 г.

© А. В. Дед, С. П. Сикорский, Д. А. Рогозина

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СЕРТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА

В статье рассмотрены вопросы, относящиеся к проверке качества (сертификации) такого товара, как электрическая энергия. Указано, что сертификации подлежит электрическая энергия, передаваемая бытовым потребителям. Обобщена и представлена современная информация об организационных вопросах в сфере проведения сертификации электрической энергии. Обоснована необходимость проведения мероприятий по контролю показателей качества электрической энергии.

**Ключевые слова:** качество электрической энергии, сертификация, отклонение напряжения, отклонение частоты.

В настоящее время электроэнергия является неотъемлемой частью всех сфер нашей жизнедеятельности. Она имеет ряд специфических свойств и участвует при производстве других видов продукции, непосредственно оказывая влияние на их качество.

Само понятие качества электроэнергии не похоже на понятие качества иного вида продукции. Каждый приемник электрической энергии работает при её определенных параметрах: величина питающего напряжения, номинальная частота, ток и т.п.

Нарушение качества электроэнергии — это проблема, уже достаточно длительное время относящаяся не только к Российской Федерации и странам Евразийского союза [1–3]. По данным, приведенным в [4], нарушение качества электроэнергии обходится промышленности и в целом деловому сообществу Европейского союза около 10 млрд евро в год.

Омский государственный технический университет (ОмГТУ) с 1973 года занимается проблемами качества электроэнергии. При кафедре «Электро-

снабжение промышленных предприятий» создана и осуществляет деятельность «Испытательная лаборатория по качеству электрической энергии» (ИЛ КЭ). ИЛ КЭ аккредитована в соответствующем порядке Федеральной службой по аккредитации (Росаккредитации) и занимается проведением испытаний, которые определяют показатели качества электроэнергии в электросетях общего назначения и точках, где присоединяются приемники либо потребители электроэнергии [5].

Исходя из опыта работы ИЛ КЭ ОмГТУ, при выявлении виновников ухудшения показателей качества, целесообразно определять следующие параметры: установившееся отклонение (рис. 1) и несинусоидальность напряжения; отклонение частоты, а также несимметрию напряжений на шинах разных уровней всех предприятий электросетей, электростанций и центров питания (рис. 2).

Таким образом, для нормальной работы приемника его необходимо обеспечить электроэнергией

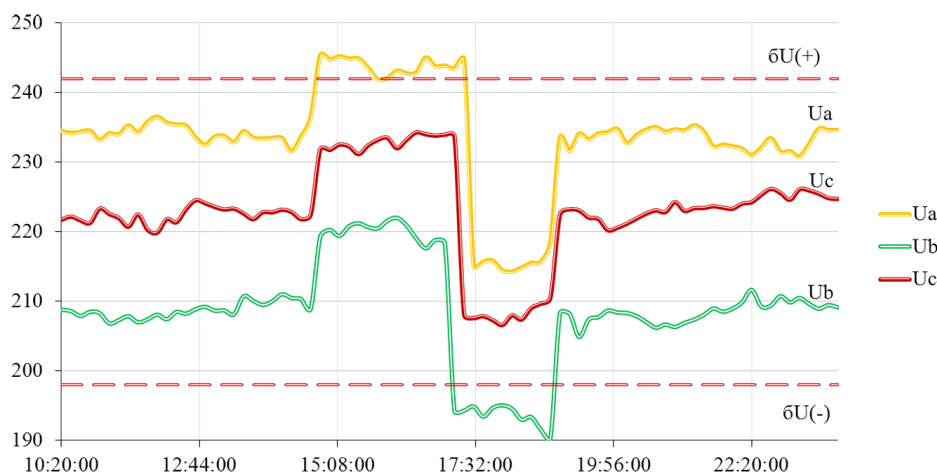


Рис. 1. Пример изменения уровней напряжений, выходящих за пределы нормативных значений

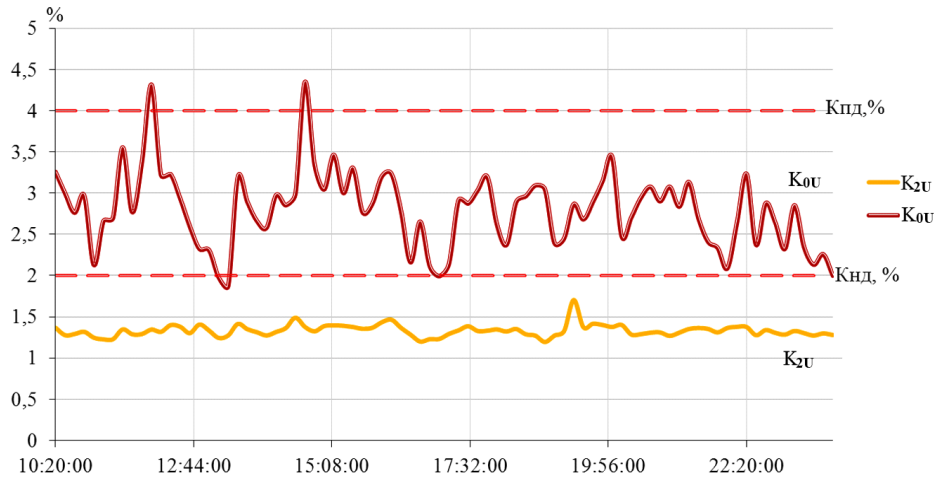


Рис. 2. Пример изменения уровней коэффициентов несимметрии напряжений по обратной ( $K_{2U}$ ) и нулевой ( $K_{0U}$ ) последовательности

требуемого качества. Качество электроэнергии определяется рядом характеристик, при которых будет обеспечена нормальная работа электроприемников и выполнение ими своих функций

ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» регламентирует нормы и показатели качества электроэнергии переменного тока частотой 50 Гц в точках ее передачи потребителям на низком, среднем и высоком классах напряжения в системах электроснабжения общего назначения.

ГОСТ 32144-2013 пришел на смену ГОСТ 54149-2010, он соответствует, но не эквивалентен, европейскому стандарту EN5016:2010 и действует в Российской Федерации с 1 июля 2014 г. [6, 7]. Требования европейского стандарта рассчитаны на применение в электросетях стран, которые имеют иные требования к проектированию этих сетей и иной уровень их состояния по сравнению с российским [8].

ГОСТ 32144-2013 устанавливает и регламентирует показатели качества электрической энергии, которые делятся на продолжительное изменение характеристик напряжения и случайные события [5].

К продолжительным изменениям относятся:

- отклонение частоты,  $\Delta f$ , Гц;
- медленное изменение напряжения,  $\delta U_{(+)}$ ,  $\delta U_{(-)}$ , %;

- колебания напряжения и фликер, отн. ед.;
- несинусоидальность напряжения,  $K_{U(n)}$ ,  $K_{UV}$ , %;
- несимметрия напряжений в трехфазных сетях,  $K_{2U}$ ,  $K_{0U}$ .

К случайным событиям относятся:

- прерывания напряжения;
- перенапряжения и провалы напряжения;
- импульсные напряжения.

Вся оценка показателей качества, относящаяся к напряжению, производится по его действующему значению, за период не менее семи суток [5].

Низкий уровень организационных мероприятий по управлению качеством электроэнергии зачастую является ключевой причиной несоответствия стандарту показателей качества энергии у потребителя. Большая часть энергосистем обладает недостаточно высоким уровнем оснащения устройств для автоматического регулирования напряжения. Это не позволяет поддерживать его в необходимых для нормальной работы потребителей пределах [9].

В то же время, согласно Закону «О защите прав потребителей (в редакции Федерального закона от 9 января 1996 года № 2-ФЗ)», потребитель имеет право на то, чтобы предоставляемый ему товар не причинял вред другому его имуществу. Требования, обеспечивающие предотвращение вреда имуществу потребителя, являются обязательными и устанавливаются на законодательном уровне. Соответственно, товар, на который установлены вышеуказанные требования, подлежит обязательной сертификации в установленном порядке [10].

Постановлением Правительства № 982 от 1 декабря 2009 года «Об утверждении единого перечня продукции, подлежащей обязательной сертификации...», электрическая энергия в электрических сетях общего назначения однофазного и трехфазного тока с частотой 50 Гц, как товар, под кодом 0110, внесена в единый перечень продукции, подлежащей обязательной сертификации по показателям качества [11].

В соответствии с Федеральным законом № 184-ФЗ от 27 декабря 2002 года «О техническом регулировании», обязательной сертификации подлежит только электрическая энергия, отпускаемая гражданам для личного пользования (не для коммерческой деятельности), то есть простым бытовым потребителям [12]. В таком случае показателями качества, которые подлежат сертификации, являются три показателя:

- положительное отклонение напряжения (ГОСТ 32144-2013, п. 4.2.1);
- отрицательное отклонение напряжения (ГОСТ 32144-2013, п.4.2.1);
- отклонение частоты (ГОСТ 32144-2013, п.4.2.1).

Таким образом, сетевая организация, обеспечивающая энергоснабжение, вместе с лицензией на выработку, передачу и распределение электрической энергии, обязана иметь сертификат, который удостоверяет, что качество электроэнергии, поставляемой потребителям, соответствует требованиям ГОСТ 32144-2013.

Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии Российской Федерации внесены, а Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол N 35-2009 от 11 июня 2009 г.) утверждены в виде ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 общие требования к компетентности испытательных лабораторий [13].

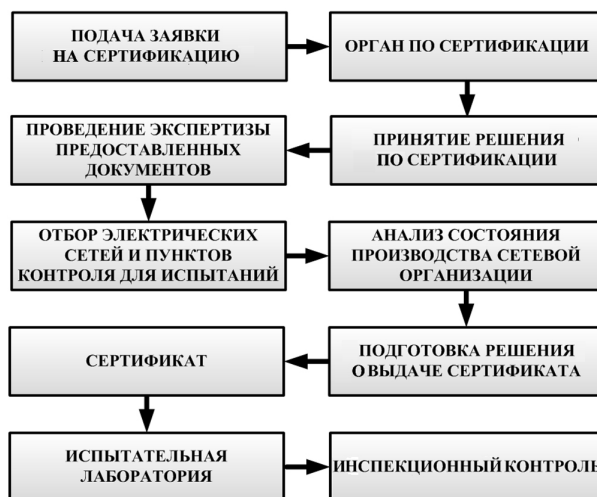


Рис. 3. Структурная схема последовательности проведения процедуры сертификации

Как указывалось ранее, проведение сертификации производится по заявкам организаций, снабжающих потребителей электрической энергией. Для того чтобы оценить возможность энергоснабжающей организации обеспечить у потребителей надлежащее качество электроэнергии, сертификационный орган проводит экспертизу её технической и методической документации, включая протоколы измерений показателей качества электрической энергии в заявляемых на сертификацию контрольных точках — центрах питания.

С одной стороны, сертификация — это ряд мероприятий, которые проводят соответствующие уполномоченные организации для выяснения того, удовлетворяют ли общепринятым требованиям потребителя параметры какого-либо товара, в нашем случае — электрической энергии.

С другой стороны, при проведении сертификации электроснабжающая организация должна обеспечить мероприятия, которые могут гарантировать стабильную поддержку требуемых показателей качества электроэнергии и их защиту от возможных возникающих искажений.

Согласно принятой (выбранной) схеме сертификации получают материалы, на их основании органом по сертификации осуществляется оценка электроэнергии, т.е. соответствует ли она установленным требованиям качества. Основные этапы процедуры сертификации представлены на рис. 3.

Полученные результаты данной оценки отражаются в решении о выдаче либо об отказе в выдаче сертификата или проведения необходимых мероприятий и недостающих испытаний. При успешном прохождении сертификационных испытаний, организации по энергоснабжению выдается сертификат соответствия электроэнергии для указанных в заявке электросетей.

Сертификат соответствия имеет срок действия, который определяет сертификационный орган по электроэнергии, приняв в учет срок действия нормативных документов, которые регламентируют требования к качеству электрической энергии, а также приняв срок, на который сертифицирована система качества либо производство организации по энергоснабжению, если это предусмотрено, но не более чем на три года.

После того как организация, занимающаяся поставкой электрической энергии, получит сертификат, она должна указать в заключенных договорах по энергоснабжению сведения о произведенной сертификации электроэнергии (срок действия, регистрационный номер и реквизиты организации, проводившей проверку качества) [14].

Для того чтобы обеспечить соответствующее качество электрической энергии, электросетевой организации нужно, в первую очередь, определить и устранить виновников, которые ухудшают её показатели качества. Это задача специализированных испытательных лабораторий.

Вопрос повышения качества электроэнергии в настоящее время актуален, и, учитывая нынешнее состояние энергосистем, острота данного вопроса будет нарастать. Нельзя не обратить внимание на то, что экономические характеристики при работе электрооборудования, а также, в некоторых случаях, качество и количество выпускаемой продукции зависит от показателей качества электрической энергии в системах электроснабжения предприятий и организаций.

Таким образом, нужно отметить, что контроль показателей качества электроэнергии является важным экономическим аспектом для достижения необходимых показателей энергоэффективности производства и потребления электрической энергии. Тем более что за последние десятилетия в России созданы и действуют законодательная, нормативная и методическая база для нужд сертификации электроэнергии, которую поставляют разным уровням потребителей энергоснабжающие организации [5, 10–13, 15].

Помимо того, активно ведется подготовка специалистов в области управления качеством энергии и её сертификации, разработаны и доступны технические средства как отечественного (ЭРИС-КЭ, Ресурс-UF, Энерготестер ПКЭ, АК ИП, Прорыв) так и иностранного (Metrel, Fluke, Circutor, Chauvin Arnoux, Sonel) производства по контролю качества электроэнергии, которые зарегистрированы в Государственном реестре средств измерений.

Очевидно, что энергоснабжающим организациям для реализации механизма сертификации электрической энергии потребуются дополнительные затраты, но в соответствии п. 2. ст. 16 Закона РФ от

10.06.1993 № 5151-1 «О сертификации продукции и услуг» — «сумма средств, израсходованных заявителем на проведение обязательной сертификации своей продукции, относится на ее себестоимость» [15].

Это означает, что при установлении тарифа на электрическую энергию энергоснабжающей организации необходимо представить в Региональную энергетическую комиссию перечень затрат, израсходованных ею на сертификацию [14].

Исходя из сказанного, мероприятия по сертификации должны заострить внимание организаций по энергоснабжению на вопросы о контроле и улучшении качества поставляемой электроэнергии, для предотвращения возможных убытков потребителей и повысить надежность электроснабжения.

#### Библиографический список

1. Булатенко М. А. Экономический ущерб у участников рынка электроэнергии от наличия в электрических сетях высших гармоник напряжения и тока // Вестник Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасского политехнического института). Сер. Социально-экономические науки. 2015. № 1. С. 84–92.
2. Горюнов И. Т., Мозгалев В. С., Богданов В. А. Проблемы обеспечения качества электрической энергии // Электрические станции. 2001. № 1. С. 32–37.
3. Хацевский К. В., Денчик Ю. М., Клеутин В. И., Зубанов Д. А., Бубнов А. В., Харламов В. В. Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения // Омский научный вестник. 2012. № 2 (110). С. 212–214.
4. Чэпмэн Д. Цена низкого качества электроэнергии / пер. с англ. Е. В. Мельниковой // Энергосбережение. 2004. № 1. С. 66–69.
5. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. М.: Стандартинформ, 2013. 10 с.
6. Дед А. В., Бирюков С. В., Паршукова А. В. К вопросу о стандартах на качество электрической энергии // Омский научный вестник. 2015. № 1 (137). С. 145–147.
7. Дед А. В., Паршукова А. В. О показателях качества электрической энергии. Нормы ГОСТ 32144-2013 // Омский научный вестник. 2015. № 1 (137). С. 148–150.

8. Никифоров В. В. Новый стандарт по качеству электрической энергии. Основные положения и отличия от ГОСТ 13109-97 // Новости электротехники. 2011. № 3. С. 15–17.

9. Добрусин Л. А. Повышение энергоэффективности электросетевого комплекса России // Энергосбережение. 2013. № 7. С. 54–60.

10. Российская Федерация. Законы. О защите прав потребителей: Федер. закон № 2300-1 от 07 февраля 1992 года (в ред. ФЗ № 193 от 26 ноября 2006 г.) (с изм. на 3 июля 2016 года). URL: <http://docs.cntd.ru/document/9005388> (дата обращения 15.09.2017).

11. Об утверждении единого перечня продукции, подлежащей обязательной сертификации, и единого перечня продукции, подтверждение соответствия которой осуществляется в форме принятия декларации о соответствии: постановление Правительства Российской Федерации от 01 декабря 2009 г. № 982 г. URL: <https://rg.ru/2010/02/19/serifikacia-dok.html> (дата обращения 15.09.2017).

12. Российская Федерация. Законы. О техническом регулировании: Федер. закон № 184-ФЗ от 27 декабря 2002 г. URL: <https://rg.ru/2002/12/27/tehreglament-dok.html> (дата обращения 15.09.2017).

13. ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. Введ. 2012–01–01. М.: Стандартинформ, 2014. 29 с.

14. Белоусов В. Н., Никифорова В. Н., Кармашев В. С., Суднова В. В. Основные положения порядка сертификации электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения // Вестник Госэнергонадзора. 2001. № 1. С. 19–22.

15. Российская Федерация. Законы. О сертификации продукции и услуг: Федер. закон № 5151-1 от 10 июня 1993 г. URL: <http://base.garant.ru/100795> (дата обращения 15.09.2017).

**ДЕД Александр Викторович**, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

**СИКОРСКИЙ Сергей Петрович**, магистрант гр. ЭЭМ-172 факультета «Элитное образование и магистратура».

**СМИРНОВ Павел Сергеевич**, магистрант гр. ЭЭМ-172 факультета «Элитное образование и магистратура».

Адрес для переписки: [ded\\_av@mail.ru](mailto:ded_av@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 15.09.2017 г.

© А. В. Дед, С. П. Сикорский, П. С. Смирнов

## Книжная полка

**Круглов, Г. Теплотехника. Практический курс : учеб. пособие / Г. Круглов, Р. Булгакова, Е. Круглова. – СПб. : Лань, 2017. – 192 с. – ISBN 978-5-8114-2575-4.**

Изучение общетехнического или специального технического курса включает: прослушивание лекционного курса, выполнение лабораторных работ, а также при необходимости выполнение расчетно-графической работы (курсового проекта). В настоящем учебном пособии приведены примеры решения задач по теплотехнике и ход проектирования отопительно-вентиляционной системы животноводческого помещения. Целью пособия является закрепление знаний, полученных студентами при изучении курса «Теплотехника», и привитие навыков самостоятельного решения задач, расчета и выбора оборудования при проектировании систем воздушного отопления, совмещенного с приточной вентиляцией животноводческого помещения. Основные теоретические зависимости следует черпать из вышеупомянутого пособия, а также соответствующих разделов рекомендуемой литературы. Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Агроинженерия», также может быть полезно для преподавателей дисциплины «Теплотехника».