

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ЭНЕРГЕТИКА

УДК 62-83

А. В. БУБНОВ
А. Н. ЧЕТВЕРИКОмский государственный
технический университет

РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ С УЛУЧШЕННЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ

Электропривод с фазовой синхронизацией широко используются в тепловизионных и лазерных сканирующих системах благодаря высоким точностным характеристикам в широком диапазоне регулирования угловой скорости. Целью работы является разработка способов регулирования электропривода с улучшенными динамическими показателями. Рассмотрены вопросы построения электропривода с опережающей разблокировкой логического устройства сравнения в режим фазового сравнения, обеспечивающей перевод электропривода в режим замкнутого управления при уменьшении ошибки по угловой скорости до заданной величины. Предложен способ квазиоптимального по быстродействию регулирования электропривода, позволяющий улучшить динамические показатели электропривода в переходных режимах синхронизации.

Ключевые слова: электропривод с фазовой синхронизацией, фазовая автоподстройка частоты, логическое устройство сравнения, импульсный частотно-фазовый дискриминатор, фазовая плоскость, способ регулирования.

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».

Перспективной основой для разработки электропривода с высокими точностными характеристиками являются системы управления, построенные с использованием принципа фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [1], которые позволяют обеспе-

чить более высокие точностные показатели системы управления по сравнению с цифровыми и аналоговыми регуляторами. В электроприводе, построенном на основе данного принципа, — электроприводе с фазовой синхронизацией (ЭПФС), в качестве

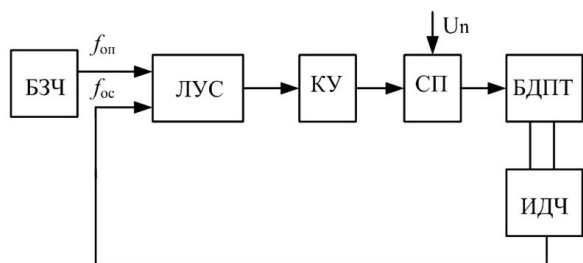


Рис. 1. Функциональная схема электропривода с фазовой синхронизацией

задающего сигнала используется частотный сигнал f_{on} , формируемый с помощью кварцевого генератора; в качестве сигнала обратной связи — частотный сигнал f_{oc} , формируемый на выходе импульсного датчика частоты (ИДЧ) вращения; а в качестве сравнивающего элемента — логическое устройство сравнения (ЛУС) частот и фаз двух импульсных последовательностей (рис. 1, где БЗЧ — блок задания частоты, КУ — корректирующее устройство, СП — силовой преобразователь, БДПТ — бесконтактный двигатель постоянного тока).

В соответствии с принципом ФАПЧ алгоритм функционирования ЛУС обеспечивает три режима работы электропривода: режим разгона с максимальным ускорением (при $f_{on} > f_{oc}$), режим синхронизации (при $f_{on} \approx f_{oc}$), режим управления с обратной связью) и режим торможения с максимальным ускорением (при $f_{on} < f_{oc}$). Реализация такого алгоритма работы электропривода обеспечивается благодаря наличию трех режимов работы ЛУС: режима насыщения при $f_{on} > f_{oc}$, режима фазового сравнения при $f_{on} \approx f_{oc}$ и режима насыщения при $f_{on} < f_{oc}$.

В качестве ЛУС в ЭПФС широко используются схемы импульсного частотно-фазового дискриминатора (ИЧФД), работа которого основана на логической обработке порядка следования во времени импульсов двух входных частотных сигналов: опорного с частотой f_{on} и контролируемого с частотой f_{oc} . Выходной сигнал ИЧФД γ в режиме фазового сравнения ($f_{on} \approx f_{oc}$) представляет собой последовательность импульсов с периодом следования $T_{on} = 1/f_{on}$ и длительностью τ , равной временному интервалу между соседними импульсами частот f_{on} и f_{oc} . В этом случае среднее значение сигнала γ пропорционально фазовому рассогласованию $\Delta\varphi$ сравниваемых частот (ШИМ-сигнал фазовой ошибки).

Наиболее широко в ЭПФС применяются ИЧФД, алгоритм функционирования которых основан на изменении режима их работы в моменты прихода двух импульсов одной из частот f_{on} или f_{oc} между двумя соседними импульсами другой частоты. При приходе двух подряд импульсов частоты f_{oc} между двумя соседними импульсами частоты f_{on} происходят следующие изменения режима работы ИЧФД:

- из режима насыщения при $f_{on} > f_{oc}$ осуществляется переход в режим фазового сравнения при $f_{on} \approx f_{oc}$;
- из режима фазового сравнения осуществляется переход в режим насыщения при $f_{on} < f_{oc}$;
- режим насыщения при $f_{on} < f_{oc}$ сохраняется.

При приходе двух подряд импульсов частоты f_{on} между двумя соседними импульсами частоты f_{oc} изменения режима работы происходят в обратном порядке.

Анализ динамических процессов в линеаризованных системах (в системах с линеаризованным

релейным элементом ШИМ-модулятора выходного сигнала ЛУС [2]) управления ЭПФС в области высоких частот вращения электропривода удобно проводить методом фазовой плоскости [3], при этом электропривод рассматривается как система с переменной структурой (в соответствии с тремя режимами работы электропривода) и для каждой рабочей области строятся семейства фазовых траекторий.

Фазовые траектории [3] для режимов разгона и торможения представляют собой семейства парабол, смещенных по оси $\Delta\alpha$. Переключение из режима разгона электропривода в режим синхронизации обеспечивается переключением ИЧФД в режим фазового сравнения при приходе двух импульсов частоты f_{oc} между двумя соседними импульсами частоты f_{on} , что соответствует изменению знака ошибки по угловой скорости $\Delta\omega$ и угловому рассогласованию

$$\Delta\alpha = \varphi_0/2 \pm \varphi_0 n, \quad (1)$$

где $\varphi_0 = 2\pi/z$ — угловое расстояние между метками ИДЧ;

z — количество меток ИДЧ;

$n = 0, 1, 2 \dots$

Данное выражение является уравнением линии переключения, разделяющих области работы электропривода в зависимости от режима работы ИЧФД. Пересечение изображающей точки фазового портрета линии переключения соответствует моменту времени прихода двух импульсов одной из сравниваемых частот между двумя соседними импульсами другой частоты.

Данный алгоритм переключения ИЧФД из одного режима в другой можно представить в более удобной для анализа динамических процессов в электроприводе форме, связанной с расположением импульсов частоты обратной связи f_{oc} относительно импульсов опорной частоты f_{on} : ситуации прохождения двух импульсов частоты обратной связи между двумя импульсами опорной частоты ($2/2$) и ситуации прохождения нуля импульсов частоты обратной связи между двумя импульсами опорной частоты ($0/2$).

В режиме фазового сравнения ИЧФД система автоматического управления (САУ) ЭПФС замыкается по фазовой ошибке $\Delta\varphi$, и движение изображающей точки на фазовом портрете осуществляется по траекториям, соответствующим передаточной функции замкнутой САУ.

На рис. 2 изображен фазовый портрет работы электропривода для режима входящего в синхронизм с задающим частотным сигналом f_{on} при различных начальных условиях. Направление движения на траекториях отмечено стрелками. Фазовые траектории 1 и 2 соответствуют режиму разгона электропривода с последующей синхронизацией, а траектория 3 — режиму торможения электропривода. Начальные условия для режима разгона выбраны таким образом, чтобы вершины парабол фазовых траекторий пересекали ось абсцисс в точках, близких к $\varphi_0/2$ и $3\varphi_0/2$, которые задают область перехода ИЧФД в режим фазового сравнения на линии переключения $\Delta\alpha = \varphi_0/2$ с последующей синхронизацией электропривода в точке $\Delta\alpha = 0$.

На фазовом портрете область режима фазового сравнения ИЧФД ограничена линиями переключения $\Delta\alpha = \varphi_0/2$ и $\Delta\alpha = -\varphi_0/2$, и ей соответствуют участки фазовых траекторий ao , bo , co , построен-

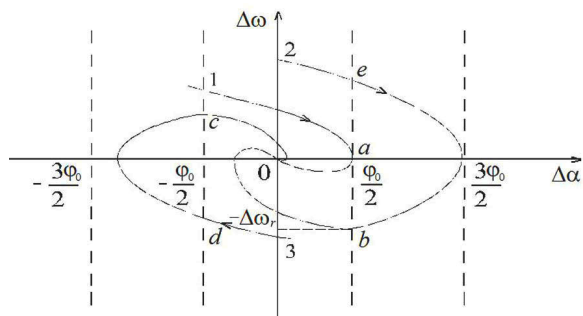


Рис. 2. Фазовый портрет работы электропривода

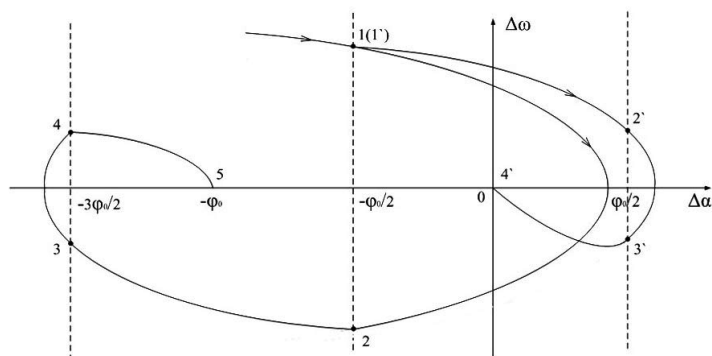


Рис. 4. Фазовый портрет работы электропривода с опережающей разблокировкой ИЧФД

ные для различных начальных условий режима синхронизации.

Фазовые траектории в момент синхронизации электропривода после режима разгона могут подходить к линиям переключения при различных значениях ошибки по угловой скорости $\Delta\omega$ в области значений

$$|\Delta\omega| \leq \sqrt{2\varphi_0 \varepsilon_m} = \Delta\omega_r, \quad (2)$$

где ε_m — максимальное ускорение электропривода в режимах насыщения.

Участки линий переключения, лежащие выше оси абсцисс на фазовой плоскости, соответствуют ситуациям прохождения нуля импульсов частоты обратной связи между двумя импульсами опорной частоты (0/2), а участки линий переключения, лежащие ниже оси абсцисс, соответствуют ситуациям прохождения двух импульсов частоты обратной связи между двумя импульсами опорной частоты (2/2).

Выражения для начальных условий по $\Delta\alpha$ и $\Delta\omega$ (1, 2) в режиме фазового сравнения ИЧФД не зависят от заданной частоты вращения, а определяются только параметрами контура ФАПЧ, поэтому представленный на рис. 2 фазовый портрет верно отражает динамику электропривода с фазовой синхронизацией при любой заданной частоте вращения электропривода.

Недостатком рассмотренного алгоритма работы ИЧФД является переход электропривода в режим синхронизации после изменения знака угловой ошибки электропривода, что снижает быстродействие ЭПФС и является причиной наличия перерегулирования в переходных процессах синхронизации. Для повышения быстродействия и снижения перерегулирования используются различные способы организации управления ЭПФС:

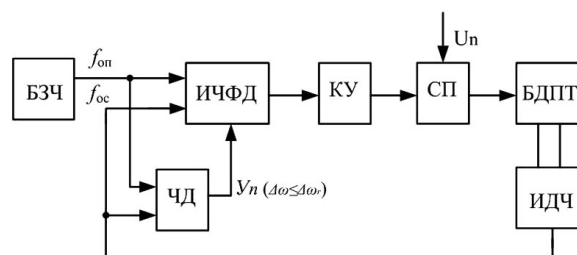


Рис. 3. Структурная схема ЭПФС с опережающей разблокировкой ИЧФД

- с изменением логики работы ИЧФД [4];
- с введением корректирующих сигналов в каналы формирования импульсов f_{on} и f_{oc} [5];
- с введением корректирующих сигналов в основной канал регулирования в режимах насыщения ИЧФД [6, 7].

Наиболее широкое применение получил способ управления ЭПФС с опережающей разблокировкой ИЧФД (изменение логики работы ИЧФД). Структурная схема ЭПФС, в которой реализуется данный способ управления, представлена на рис. 3, где ЧД — частотный дискриминатор.

Практическая реализация частотного дискриминатора может осуществляться на основе схемы сравнения сигналов, пропорциональных частотам [4] или их периодам [8]. Для получения более высокой точности определения ошибки по угловой скорости $\Delta\omega$ были разработаны способы косвенного определения $\Delta\omega$, реализованные на основе:

- подсчета повторяющихся наложений импульсов f_{on} и f_{oc} на интервале между ситуациями взаимного расположения импульсов 0/2 или 2/2 [9–11];
- подсчета количества импульсов f_{on} или импульсов дополнительной высокой частоты $f_{вч}$ на интервале между ситуациями взаимного расположения импульсов 0/2 или 2/2 [12, 13].

С помощью данных способов осуществляется измерение $\Delta\omega$ в моменты прохождений изображающей точкой на фазовом портрете линий переключений (ситуации взаимного расположения импульсов 0/2 или 2/2), и при уменьшении значения $\Delta\omega$ до величины меньшей $\Delta\omega_r$, на выходе ЧД формируется импульс $U_{п'}$, принудительно переводящий ИЧФД в режим фазового сравнения. Для реализации данного способа управления разработана схема ИЧФД с возможностью принудительного перевода ИЧФД в любой требуемый режим работы [14].

Работа рассмотренного способа регулирования ЭПФС с опережающей разблокировкой ЛУС поясняется фазовым портретом работы электропривода, представленным на рис. 4. Для большей наглядности и удобства сравнения способов на рисунке приведены две фазовые траектории: траектория, обозначенная цифрами 1–2–3–4–5 соответствует работе ЭПФС с обычным алгоритмом работы ИЧФД (рис. 1) и траектория, обозначенная цифрами 1'–2'–3'–4', соответствует работе ЭПФС с опережающей разблокировкой ИЧФД (рис. 3).

Движение изображающей точки на фазовом портрете до точки 1 на линии переключения происходит в режиме разгона ЭПФС. Далее при обычном алгоритме работы ИЧФД режим разгона продолжается до изменения знака ошибки по угловой скорости и пересечения линии переключения в точке 2. Участок траектории 2–3 соответствует переходу ИЧФД в режим фазового сравнения (режим замкнутого управления). Точка 3 на линии переключения соответствует ситуации взаимного расположения импульсов $2/2$, в результате ЭПФС переходит в режим торможения (участок фазовой траектории 3–4). Точка 4 на линии переключения соответствует ситуации взаимного расположения импульсов $0/2$, в результате ИЧФД переходит в режим фазового сравнения, а ЭПФС — в режим синхронизации (участок фазовой траектории 4–5).

В случае использования способа управления ЭПФС с опережающей разблокировкой ЛУС в точке 1' ИЧФД по сигналу U_n с ЧФ принудительно переводится в режим фазового сравнения, а электропривод переходит в режим замкнутого управления (участок фазовой траектории 1'–2'). Точка 2' на линии переключения соответствует ситуации взаимного расположения импульсов $0/2$, в результате ЭПФС переходит в режим разгона (участок фазовой траектории 2'–3'). Точка 3' на линии переключения соответствует ситуации взаимного расположения импульсов $2/2$, в результате ИЧФД переходит в режим фазового сравнения, а ЭПФС — в режим синхронизации (участок фазовой траектории 3'–4').

Сравнение фазовых траекторий, приведенных на рис. 4, позволяет оценить сокращение времени переходного процесса синхронизации ЭПФС при использовании способа управления ЭПФС с опережающей разблокировкой ЛУС. Выигрыш по времени определяется участком фазовой траектории 1–2 работы ЭПФС при обычном алгоритме работы ЛУС и составляет [3]

$$0 < t_s \leq 4\varphi_0 / \Delta\omega_r.$$

Повысить быстродействие электропривода можно путем организации квазиоптимального по быстродействию управления перед началом режима синхронизации. Оптимальное по быстродействию управление не может быть реализовано в ЭПФС из-за дискретного характера выходного сигнала ИЧФД γ . Для реализации квазиоптимального по быстродействию управления предлагается структурная схема ЭПФС [15] (рис. 5).

В данной схеме управляющий сигнал, поступающий на вход силового преобразователя, формируется с помощью сумматора СМ. На первый вход СМ через управляемый ключ УК2 с выхода дифференцирующего устройства ДУ поступает сигнал, пропорциональный ошибке по угловой скорости $\Delta\omega$. Управление УК2 осуществляется выходным сиг-

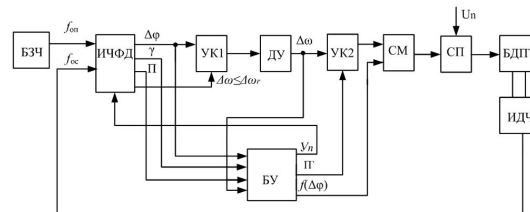


Рис. 5. Структурная схема ЭПФС с квазиоптимальным по быстродействию регулированием

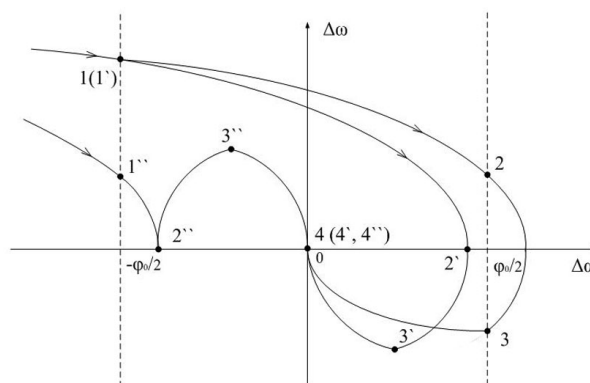


Рис. 6. Фазовый портрет работы ЭПФС с улучшенными динамическими показателями

налом П' блока управления БУ, соответствующим переключению электропривода в режим замкнутого управления.

На вход дифференцирующего устройства через УК1 поступает сигнал $\Delta\varphi$, пропорциональный фазовому рассогласованию сравниваемых частот f_{on} и f_{oc} . Подключение сигнала $\Delta\varphi$ к ДУ происходит при уменьшении ошибки по угловой скорости до величины $\Delta\omega_r$. В качестве ИЧФД, формирующего необходимые для организации управления ЭПФС выходные сигналы, может быть использована многофункциональная схема дискриминатора [16]. Блок управления БУ в зависимости от входных сигналов ($\Delta\varphi$, γ , Π , $\Delta\omega$) формирует следующие выходные сигналы:

- U_n , осуществляющий перевод ИЧФД в режим фазового сравнения;
- П', осуществляющий перевод электропривода в режим замкнутого управления;
- $f(\Delta\varphi)$ — сигнал, формируемый для организации квазиоптимального по быстродействию регулирования.

Работа ЭПФС поясняется фазовым портретом, приведенным на рис. 6. На рисунке приведены три фазовые траектории:

- траектория, обозначенная цифрами 1–2–3–4, соответствует работе ЭПФС с опережающей разблокировкой ИЧФД (рис. 3);
- траектории, обозначенные цифрами 1'–2'–3'–4' и 1''–2''–3''–4'' соответствуют работе ЭПФС с организацией квазиоптимального по быстродействию регулирования перед началом режима синхронизации (рис. 6).

В точках фазовых траекторий 1' и 1'' на линии переключения значения ошибки по угловой скорости становятся меньше величины $\Delta\omega_r$, что приводит к открытию первого УК. Работа ЭПФС продолжается

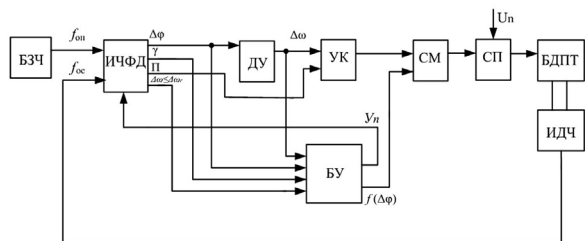


Рис. 7. Структурная схема ЭПФС с квазиоптимальным по быстродействию регулированием (вариант 2)

в режиме разгона. В точках фазовых траекторий 2' и 2'' значения ошибки по угловой скорости становятся приблизительно равными 0. В этот момент определяется начальное значение фазовой ошибки $\Delta\varphi_n$ и половина ее значения запоминается в запоминающем устройстве блока управления БУ. Далее в зависимости от знака $\Delta\varphi_n$ на выходе БУ формируется сигнал $f(\Delta\varphi)$, равный логической «1» для продолжения режима разгона или равный логическому «0» для переключения в режим торможения ЭПФС. В точках фазовых траекторий 3' и 3'' значения фазовой ошибки становятся равными половине значения $\Delta\varphi_n$. В этот момент происходит перевод ИЧФД в режим фазового сравнения и изменение режима насыщения ЭПФС на противоположный. В этом режиме осуществляется окончательная отработка начального значения фазовой ошибки, и при уменьшении ошибки по угловой скорости до нулевого значения (4' и 4'') режим квазиоптимального по быстродействию регулирования завершается. В этот момент на первый вход СМ подается сигнал, пропорциональный $\Delta\omega$, а на второй вход СМ — сигнал $\Delta\varphi$ с третьего выхода БУ. В результате ЭПФС переходит в режим замкнутого управления и происходит окончательная отработка ненулевых значений $\Delta\varphi$ и $\Delta\omega$.

На рис. 7 приведена более простая в схемной реализации структурная схема ЭПФС с квазиоптимальным по быстродействию регулированием перед началом режима синхронизации. В этой схеме отсутствует первый УК (см. рис. 5), упрощена реализация БУ и несколько изменен алгоритм формирования сигналов, организующих квазиоптимальное по быстродействию регулирование ЭПФС.

Сигнал U_n формируется после окончания квазиоптимального по быстродействию регулирования и осуществляет перевод ИЧФД в режим фазового сравнения, на выходе дискриминатора появляется сигнал П, открывающий УК. В результате на первый вход сумматора поступает сигнал, пропорциональный $\Delta\omega$, на второй вход — сигнал $\Delta\varphi$, сформированный на втором выходе БУ, и ЭПФС переходит в режим замкнутого управления.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при проектировании высокоточных электроприводов с улучшенными динамическими показателями в широком диапазоне угловых скоростей.

Библиографический список

- Трахтенберг, Р. М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением / Р. М. Трахтенберг. — М. : Энергоиздат, 1982. — 168 с.
- Цыпкин, Я. З. Релейные автоматические системы / Я. З. Цыпкин. — М. : Наука, 1974. — 576 с.

3. Бубнов, А. В. Современное состояние и перспективы развития теории синхронно-синфазного электропривода : моногр. / А. В. Бубнов, Т. А. Бубнова, В. Л. Федоров. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. — 104 с.

4. Башарин, А. В. Управление электроприводами / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. — Л. : Энергоиздат, 1982. — 392 с.

5. А. с. 531126 СССР, МКИ² H02 P 5/06. Способ коррекции системы регулирования / Р. М. Трахтенберг, Б. А. Староверов ; заявл. 25.01.71 ; опубл. 05.10.76, Бюл. № 37. — 4 с.

6. А. с. 1508334 СССР, МКИ⁴ H02 P 5/06. Стабилизированный электропривод / А. В. Бубнов, В. Г. Кавко, А. М. Сутормин ; заявл. 02.11.87 ; опубл. 15.09.76, Бюл. № 34. — 4 с.

7. А. с. 1302411 СССР, МКИ⁴ H02 P 5/06. Стабилизированный электропривод / А. М. Сутормин, В. Н. Зажирко, В. Г. Кавко ; заявл. 10.07.85 ; опубл. 07.04.87, Бюл. № 13. — 4 с.

8. А. с. 1280685 СССР, МКИ⁴ H02 P 5/06. Электропривод постоянного тока / В. М. Сбоев, Н. А. Завражных, А. П. Протасов ; заявл. 04.11.85 ; опубл. 30.12.86, Бюл. № 48. — 3 с.

9. А. с. 1624649 СССР, МКИ² H02 P 5/06. Стабилизированный электропривод / А. В. Бубнов, Б. М. Ямановский. — № 4647424/24-07 ; заявл. 06.02.89 ; опубл. 30.01.91, Бюл. № 4. — 4 с.

10. Пат. 113095 РФ, МПК H02P 7/28, 7/285 (2006.01). Стабилизированный электропривод / Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Гокова М. В. ; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2011131216/07 ; заявл. 26.07.2011 ; опубл. 27.01.2012, Бюл. № 3. — 2 с.

11. Пат. 2462809 РФ, МПК H02P 6/06. Стабилизированный электропривод / Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Емашов В. А. ; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2011120657/07 ; заявл. 20.05.2011 ; опубл. 27.09.2012, Бюл. № 27. — 2 с.

12. Пат. 143608 РФ, МПК H02P 7/14, H02P 7/285. Стабилизированный электропривод / Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Емашов В. А. ; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2014111384/07 ; заявл. 25.03.2014 ; опубл. 27.07.2014, Бюл. № 21. — 2 с.

13. Пат. 2467465 РФ, МПК H02P 7/14. Стабилизированный электропривод / Бубнов А. В., Бубнова Т. А., Чудинов А. Н. ; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. университет. — № 2 011143084/07 ; заявл. 25.10.2011 ; опубл. 20.11.2012, Бюл. № 32. — 10 с.

14. Пат. 148933 РФ, МПК H03D 13/00. Импульсный частотно-фазовый дискриминатор / Бубнов А. В., Алпысова А. Н. ; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2014118322/08 ; заявл. 06.05.2014 ; опубл. 20.12.2014, Бюл. № 35. — 2 с.

15. Пат. 2585241 РФ, МПК H02P 7/292. Стабилизированный электропривод / Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Четверик А. Н. ; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2015117067/07 ; заявл. 05.05.2015 ; опубл. 27.05.2016, Бюл. № 15. — 2 с.

16. Пат. 134375 РФ, МПК H03D 13/00. Частотно-фазовый дискриминатор / Бубнов А. В., Гокова М. В., Емашов В. А., Чудинов А. Н. ; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2013129066/08 ; заявл. 25.06.2013 ; опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31. — 2 с.

БУБНОВ Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой электрической техники.

Адрес для переписки: bubnov-av@bk.ru

ЧЕТВЕРИК Алина Наилевна, старший преподаватель кафедры электрической техники.

Адрес для переписки: alina.an@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.07.2016 г.

© А. В. Бубнов, А. Н. Четверик

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЧАСТОТНО- ФАЗОВОГО ДИСКРИМИНАТОРА С РАСШИРЕННЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ СИНХРОННО-СИНФАЗНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Синхронно-синфазный электропривод широко используются в тепловизионных и лазерных сканирующих системах благодаря высоким точностным характеристикам в широком диапазоне регулирования угловой скорости. Целью статьи является рассмотрение особенностей применения импульсного частотно-фазового дискриминатора с расширенными функциональными возможностями при реализации различных способов управления электроприводом с фазовой синхронизацией и синхронно-синфазным электроприводом. Предложена классификация способов управления электроприводом с фазовой синхронизацией и синхронно-синфазным электроприводом и представлены функциональные схемы, при реализации которых используются дополнительные функциональные возможности импульсного частотно-фазового дискриминатора: индикация режимов работы и моментов времени изменения режима работы импульсного частотно-фазового дискриминатора.

Ключевые слова: электропривод с фазовой синхронизацией, синхронно-синфазный электропривод, фазовая автоподстройка частоты, логическое устройство сравнения, импульсный частотно-фазовый дискриминатор, способ регулирования.

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) находят широкое применение в обзорно-поисковых и сканирующих системах, в том числе системах лазерного сканирования, в системах технического зрения современных робототехнических комплексов, видеозаписывающей аппаратуры, копировальных установках, что обусловлено их высокими точностными показателями и широким диапазоном регулирования угловой скорости [1].

Функциональная схема синхронно-синфазного электропривода (рис. 1) выполнена в виде двухконтурной системы автоматического управления [2], включающей в себя внутренний контур фазовой автоподстройки частоты вращения ФАПЧВ и внешний контур фазирования, управление которыми осуществляется от блока задания частоты

БЗЧ, формирующего импульсы опорной частоты f_{on} (задания частоты вращения электропривода) и импульсы угловой привязки (задания начального положения вала электродвигателя) F_{on} .

Контур ФАПЧВ состоит из логического устройства сравнения ЛУС частот и фаз двух импульсных последовательностей: задания f'_{on} и обратной связи $f_{oc'}$ формируемой на выходе импульсного датчика частоты вращения ИДЧ, корректирующего устройства КУ, силового преобразователя СП и электродвигателя ЭД. Внешний контур фазирования включает в себя датчик положения вала электродвигателя ДП (формирующий импульсы положения вала электродвигателя F_{oc}) и фазирующий регулятор ФР, содержащий блок определения фазового рассогласования БОФР импульсов частот F_{on} и $F_{oc'}$

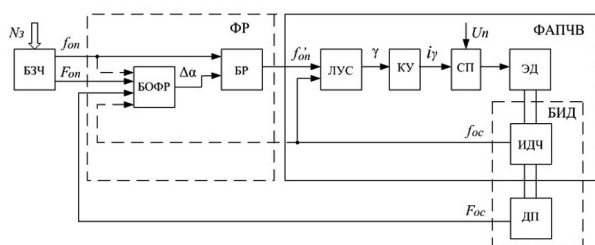


Рис. 1. Функциональная схема синхронно-синфазного электропривода

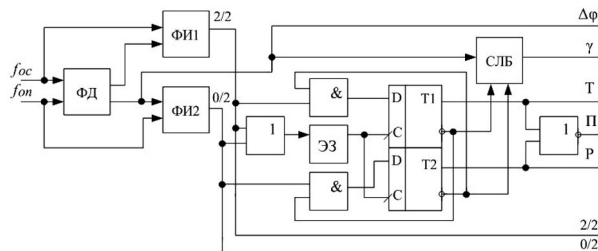


Рис. 2. Функциональная схема ИЧФД с дополнительными функциональными возможностями



Рис. 3. Классификация вариантов применения ИЧФД с расширенными функциональными возможностями

пропорционального угловой ошибки $\Delta\alpha$ электропривода, и блок регулирования БР угловой ошибки, по определенному закону преобразующий импульсы задающей частоты f_{on} в импульсы входной частоты контура ФАПЧВ f'_{on} . Датчик положения и ИДЧ образуют блок импульсных датчиков БИД, расположенных на валу электродвигателя.

В качестве ЛУС широко используется импульсный частотно-фазовый дискриминатор (ИЧФД) [2]. Алгоритм работы ИЧФД основан на обработке порядка следования импульсов частот f_{on} и f_{oc} , и по результатам анализа дискриминатор устанавливается в требуемый режим работы. Импульсный частотно-фазовый дискриминатор функционирует в трех режимах:

- режим насыщения при разгоне (Р) электропривода ($f_{on} > f_{oc}$, $\gamma = 1$);
- режим фазового сравнения (П — пропорциональный) дискриминатора ($f_{on} \approx f_{oc}$, $\gamma = \Delta\phi$, где $\Delta\phi$ — фазовое рассогласование импульсов частот f_{on} и f_{oc});
- режим насыщения при торможении (Т) электропривода ($f_{on} < f_{oc}$, $\gamma = 0$).

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

Функциональная схема ИЧФД [3] приведена на рис. 2, где ФД — фазовый дискриминатор; ФИ — формирователь импульсов; ЭЗ — элемент задержки; СЛБ — схема логической блокировки. В данной схеме реализованы дополнительные функциональные возможности ИЧФД:

- индикация текущего режима работы ИЧФД (Р, П, Т);
- индикация моментов времени изменения режима работы ИЧФД (0/2 — ситуация прохождения нуля импульсов частоты f_{oc} между двумя импульса-

ми частоты f_{on} , 2/2 — ситуация прохождения двух импульсов частоты f_{oc} между двумя импульсами частоты f_{on}).

Дополнительные функциональные возможности схемы ИЧФД могут быть эффективно использованы при построении современных систем синхронно-синфазного электропривода [4].

Целью статьи является рассмотрение особенностей применения ИЧФД с расширенными функциональными возможностями при реализации различных способов управления электроприводом с фазовой синхронизацией (ЭПФС), представляющим собой внутренний контур ССЭ (рис. 1), и синхронно-синфазным электроприводом.

Классификация вариантов применения дополнительных возможностей ИЧФД приведена на рис. 3.

В первую очередь рассмотрим варианты использования в системе автоматического управления (САУ) электропривода сигналов индикации режимов работы ИЧФД.

В ЭПФС, реализующем способ регулирования с введением корректирующих сигналов в основной канал регулирования в режимах насыщения ИЧФД (рис. 4, где СВ — сумматор-вычитатель; ДУ — дифференцирующее устройство, УК — управляемый ключ, ЧИБ — частотно-измерительный блок, С — сумматор [5], сигналы индикации режимов работы Р и Т используются для построения ФД с расширенной до $3\phi_0$ линейной рабочей зоной, где ϕ_0 — угловое расстояние между соседними метками ИДЧ, что позволяет осуществлять дифференцирование сигнала фазовой ошибки в более широком диапазоне изменения $\Delta\phi$).

При реализации способа квазиоптимальной по быстрдействию синхронизации [6] в САУ ЭПФС используется сигнал П индикации режима фазового сравнения ИЧФД для определения момента

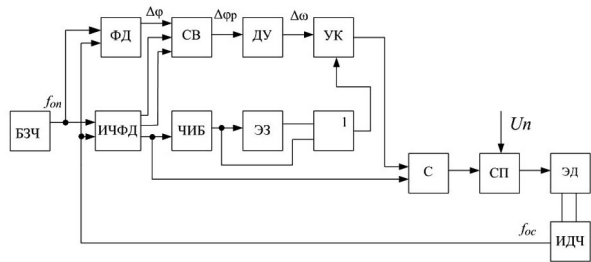


Рис. 4. Функциональная схема ЭПФС с расширенной линейной зоной ФД

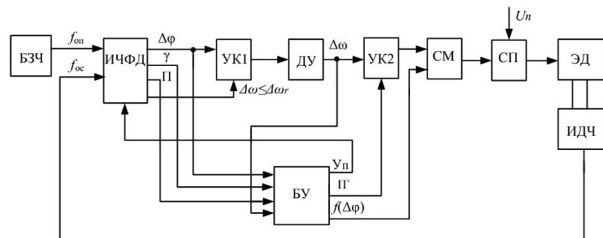


Рис. 5. Функциональная схема ЭПФС с квазиоптимальным по быстродействию регулированием

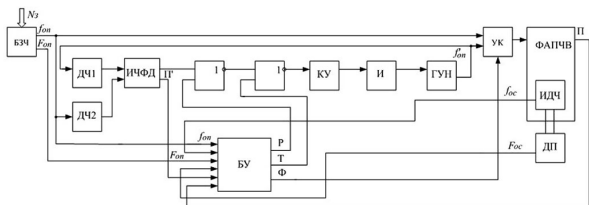


Рис. 6. Функциональная схема ССЭ с квазиоптимальным по быстродействию регулированием в режиме фазирования

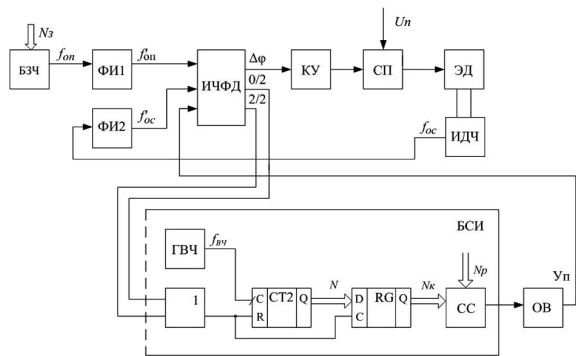


Рис. 7. Функциональная схема ЭПФС с опережающей разблокировкой ИЧФД

времени подключения корректирующего сигнала, пропорционального ошибке по угловой скорости $\Delta\omega$, в основной канал регулирования электропривода (рис 5, где СМ — сумматор, БУ — блок управления).

При реализации квазиоптимального по быстродействию способа фазирования [7] в САУ ССЭ используется сигнал П индикации режима фазового сравнения ИЧФД для определения момента времени запуска процесса фазирования (рис. 6, где ДЧ — делитель частоты, И — интегратор; ГУН — генератор, управляемый напряжением).

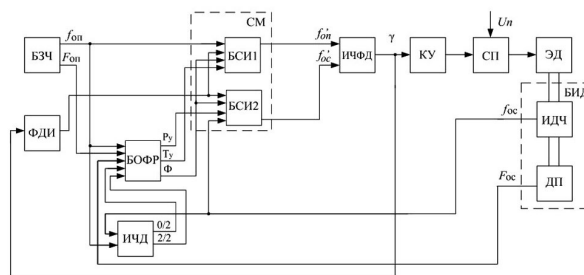


Рис. 8. Функциональная схема ССЭ с пошаговым режимом фазирования

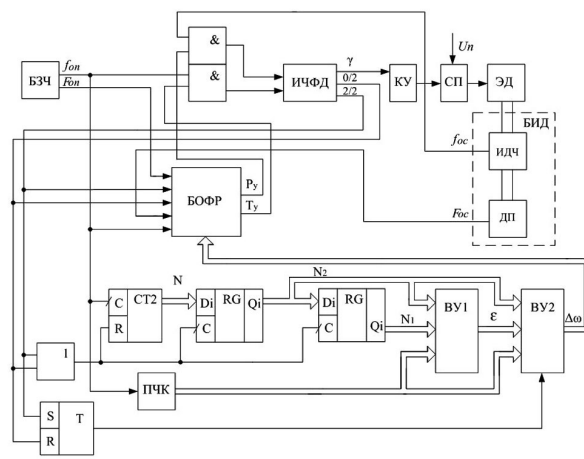


Рис. 9. Функциональная схема ССЭ с предварительным квазиоптимальным по быстродействию режимом фазирования

Рассмотрим варианты использования в системе автоматического управления электропривода сигналов индикации моментов времени (0/2 и 2/2) изменения режимов работы ИЧФД.

В ЭПФС, реализующем способ регулирования с опережающей разблокировкой ИЧФД (рис. 7, где БСИ — блок суммирования импульсов, ГВЧ — генератор высокой частоты, СС — схема сравнения, ОВ — одновибратор), сигналы индикации моментов времени изменения режимов работы ИЧФД используются для косвенного определения $\Delta\omega$ [8] путем подсчета количества импульсов высокой частоты между двумя соседними импульсами 0/2 или 2/2. По результатам измерения вычисляются значения $\Delta\omega$ в моменты прихода импульсов 0/2 или 2/2, используемые для определения момента времени опережающего перевода ЭПФС в режим замкнутого управления.

При реализации пошагового способа фазирования [9] в САУ ССЭ используются сигналы индикации моментов времени изменения режимов работы ИЧФД для непрерывного косвенного измерения угловой ошибки электропривода $\Delta\alpha$ (рис. 8, где ФДИ — формирователь дополнительных импульсов, БСИ — блок суммирования импульсов, СМ — смеситель). Начальное значение угловой ошибки определяется путем подсчета импульсов f_{on} между импульсом угловой привязки F_{on} и импульсом в цепи обратной связи F_{oc} один раз за оборот вала электродвигателя. В моменты прихода импульсов 0/2 или 2/2 происходит корректировка ранее определенного значения $\Delta\alpha$ на величину $\pm\varphi_0$. Данный косвенный метод измерения угловой ошибки

может быть использован при реализации любого способа фазирования ССЭ.

При реализации квазиоптимального по быстродействию способа предварительного фазирования [10, 11] в САУ ССЭ используются сигналы индикации моментов времени изменения режимов работы ИЧФД для косвенного измерения угловой ошибки $\Delta\alpha$ (в БОФР) и ошибки по угловой скорости $\Delta\omega$ [12] электропривода (рис. 9, где ВУ — вычислительное устройство; ПЧК — преобразователь «частота — код») для организации и управления электроприводом в режиме предварительного фазирования.

Анализ рассмотренных вариантов применения ИЧФД с расширенными функциональными возможностями в ЭПФС и ССЭ показывает, что сигналы индикации режимов работы могут использоваться в различных способах управления электроприводом для организации более эффективного функционирования САУ, а сигналы индикации моментов изменения режимов работы ЭПФС целесообразно использовать при реализации косвенных методов измерения угловой ошибки и ошибки по угловой скорости в системах управления электроприводом.

Материалы статьи могут быть использованы при проектировании прецизионных электроприводов для сканирующих систем.

Библиографический список

1. Трахтенберг, Р. М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением / Р. М. Трахтенберг. — М. : Энергоиздат, 1982. — 168 с.
2. Бубнов, А. В. Современное состояние и перспективы развития теории синхронно-синфазного электропривода : моногр. / А. В. Бубнов, Т. А. Бубнова, В. Л. Федоров. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. — 104 с.
3. Пат. 2469461 РФ, МПК H03D 13/00. Частотно-фазовый компаратор / Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Бубнова Т. А. ; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2011134538/08 ; заявл. 17.08.2011 ; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34. — 2 с.
4. Бубнов, А. В. Новые принципы и способы организации управления синхронно-синфазным электроприводом сканирующих систем / А. В. Бубнов, Т. А. Бубнова, А. Н. Чудинов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2012. — № 1 (107). — С. 192–196.
5. А. с. 1508384 СССР, МКИ² H02 P 5/06. Стабилизированный электропривод / А. В. Бубнов, В. Г. Кавко, А. М. Сутормин ; заявл. 02.11.87 ; опубл. 15.09.89, Бюл. № 34. — 4 с.

6. Пат. 2585241 РФ, МПК H02P 7/292 (2006.01). Стабилизированный электропривод / Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Четверик А. Н. ; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2015117067/07 ; заявл. 05.05.2015 ; опубл. 27.05.2016, Бюл. № 15. — 2 с.

7. Пат. 145048 РФ, МПК H02P 5/00, H02P 5/50 (2006.01). Устройство для согласования углового положения синхронно-вращающихся валов электродвигателей постоянного тока / Бубнов А. В., Гокова М. В., Чудинов А. Н. ; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2014117805/07 ; заявл. 29.04.2014 ; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25. — 2 с.

8. Пат. 2467465 РФ, МПК H02P 7/14. Стабилизированный электропривод / Бубнов А. В., Бубнова Т. А., Чудинов А. Н. ; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2011143084/07 ; заявл. 25.10.2011 ; опубл. 20.11.2012, Бюл. № 32. — 10 с.

9. Пат. 163922 РФ, МПК H02P 7/06, H02P 7/14, H02P 7/285 (2006.01). Синхронно-синфазный электропривод / Бубнов А. В., Четверик А. Н., Чудинов А. Н. ; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2016104585/07 ; заявл. 10.02.2016 ; опубл. 20.08.2016, Бюл. № 23. — 2 с.

10. Пат. 145335 РФ, МПК H02P 7/06, H02P 7/285, G05B11/30 (2006.01). Устройство для фазирования вращающегося вала электродвигателя / Бубнов А. В., Емашов В. А., Чудинов А. Н., Гокова М. В. ; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2014115372/07 ; заявл. 16.04.2014 ; опубл. 20.09.2014, Бюл. № 26. — 2 с.

11. Пат. 2475932 РФ, МПК H02P 5/52, G05D 13/62 (2006.01). Способ фазирования вращающегося вала электродвигателя и устройство для его осуществления / Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Емашов В. А. ; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. — № 2011137915/07 ; заявл. 14.09.2011 ; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5. — 2 с.

12. Bubnov, A. V. Measurement methods for angular acceleration and errors for angular velocity of synchrophase electric drive / A. V. Bubnov, V. A. Emashov, A. N. Chudinov, A. N. Alpysova // Measurement Techniques, Vol. 57, № 8, USA, New York, Springer US, 2014. — P. 860–865.

БУБНОВ Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой электрической техники.

Адрес для переписки: bubnov-av@bk.ru

ЧЕТВЕРИК Алина Наилевна, старший преподаватель кафедры электрической техники.

Адрес для переписки: alina.an@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.09.2016 г.

© А. В. Бубнов, А. Н. Четверик

Книжная полка

Важов, В. Техника высоких напряжений : учеб. / В. Важов, В. Лавринович. — М. : Инфра-М, 2016. — 264 с. — ISBN978-5-16-010565-9.

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.

ЦИФРОВОЕ УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИКИ СТАРТЕРНОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА (ИОНИСТОРА)

В статье рассматривается цифровое устройство, позволяющее определить работоспособность свинцово-кислотных аккумуляторов, используемых в качестве стартерных батарей на основе анализа результатов измерения значений: внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи, тока короткого замыкания и напряжения холостого хода. При этом измерения проводятся простым способом без значительных затрат времени и демонтажа аккумуляторных батарей со штатного места. Принцип работы устройства заключается в использовании кратковременного разряда АКБ на суперконденсатор (ионистор). При этом необходимо обеспечить режим работы устройства диагностики близкий к пусковому режиму.

Ключевые слова: кратковременный разряд аккумуляторной батареи, ионистор, микроконтроллер, цифровая обработка.

Надежный пуск двигателей внутреннего сгорания специальной техники, находящейся как на хранении, так и используемой в повседневной жизнедеятельности, является одним из важных факторов, от которых зависит боевая готовность подразделений и частей ВС РФ.

Электростартерный способ пуска с использованием электрической энергии, которая аккумулируется батареями (АКБ), является наиболее распространенным.

По сравнению с другими типами аккумуляторных батарей свинцово-кислотные (СКА) имеют сравнительно малое внутреннее сопротивление, обеспечивающее получение больших токов (500–2000)А при кратковременных разрядах в период пуска. Это одно из достоинств, что определяет их широкое применение в качестве стартерных батарей. На их долю приходится не менее 85 % от общего объема вторичных источников тока. К недостаткам СКА следует отнести изменение внутренних параметров АКБ в процессе эксплуатации и существенный объем регламентных работ по их обслуживанию.

В данной работе рассматривается цифровое устройство, позволяющее определить работоспособность АКБ на основе анализа результатов измерения значений: внутреннего сопротивления АКБ, тока короткого замыкания и напряжения холостого хода. Измерения проводятся простым способом без значительных затрат времени и демонтажа АКБ со штатного места.

Принцип работы устройства заключается в использовании кратковременного разряда АКБ на суперконденсатор (ионистор). При этом необходимо обеспечить режим работы устройства диагностики, близкий к пусковому режиму, т. е. чтобы длительность разряда была соизмерима с длительностью пускового тока (единицы секунд) при пусковом токе не менее тысячи ампер. Это возможно при использовании конденсатора достаточно большой емкости. Для этой цели целесообразно использовать суперконденсаторы (ионисторы). Емкость ионистора может составлять несколько тысяч фарад, а внутреннее сопротивление порядка нескольких тысячных долей Ома [1].

Рассмотрим предлагаемую методику определения внутреннего сопротивления аккумулятора, исходя из переходного процесса заряда ионистора, обеспечивая значение зарядного тока ионистора, близкого к току короткого замыкания аккумулятора и ЭДС аккумулятора.

Указанные величины вычисляются с использованием специальной программы, разработанной авторами, при этом применяется микроконтроллер типа Atmega 16.

Электрическая схема заряда, а также разряда ионистора представлена на рис. 1.

При замыкании силового ключа K ток заряда ионистора (конденсатора), как известно [2], будет определяться выражением:

$$i_{\text{ию}}(t) = \frac{E_{\text{АК}}}{R_{\Sigma}} e^{-\frac{t}{\tau}},$$

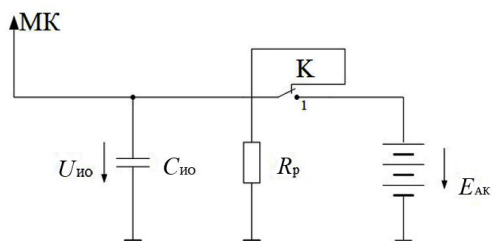


Рис. 1. $E_{ак}$ — ЭДС аккумулятора, K — силовой ключ, $C_{ио}$ — емкость ионистора, R_p — разрядное сопротивление, MK — микроконтроллер

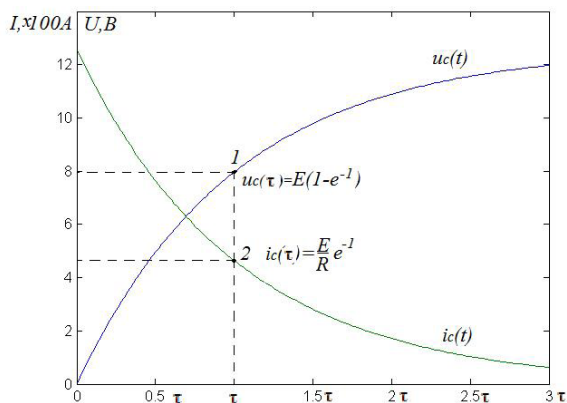


Рис. 2. Изменение тока заряда ионистора и напряжения на $u_{ио}(t)$ после замыкания ключа K

а напряжение на ионисторе:

$$u_{ио}(t) = E_{ак} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

где $\tau = R_{\Sigma} \cdot C_{ио}$ — постоянная времени; $C_{ио}$ — емкость ионистора; R_{Σ} — общее сопротивление цепи.

Общее сопротивление цепи будет складываться из сопротивлений соединительных проводов, внутреннего сопротивления ионистора и внутреннего сопротивления АКБ $R_{ак}$.

Сопротивлением соединительных проводов можно пренебречь в случае использования провода необходимого поперечного сечения, выполненного из материала, обладающего низким удельным сопротивлением [3]. Сопротивление ионистора также много меньше $R_{ак}$. Таким образом, величина тока короткого замыкания в рассматриваемом случае будет зависеть в основном от значения $R_{ак}$.

Максимальное значение тока заряда ионистора (скачок тока) возникает в момент времени $t=0$ (рис. 2) и определяется следующим образом:

$$i_{ио}(0) = \frac{E_{ак}}{R_{\Sigma}} \approx \frac{E_{ак}}{R_{ак}}.$$

К моменту времени $t=\tau$ ток в цепи ионистора уменьшится в 2,73 раза (точка 2, рис. 2) от своего первоначального значения $i_{ио}(0)$.

$$i_{ио}(t=\tau) = \frac{E_{ак}}{R_{ак}} e^{-1} = i_{ио}(0) e^{-1},$$

при этом напряжение достигнет значения, равного

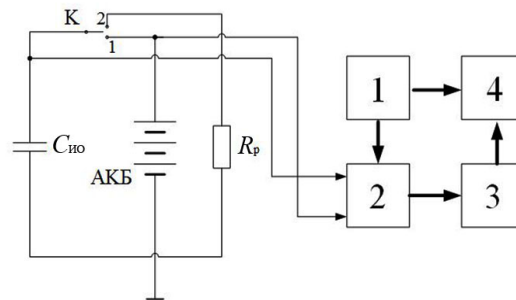


Рис. 3. Блок-схема устройства: исследуемая АКБ, силовой двухпозиционный ключ K , 1 — блок управления, ионистор $C_{ио}$, 2 — аналого-цифровой преобразователь, 3 — арифметико-логическое устройство, 4 — жидкокристаллический индикатор

$$u_{ио}(t=\tau) = E_{ак} (1 - e^{-1}).$$

$E_{ак}$ аккумулятора и интервал времени τ отсчитывается с момента замыкания силового ключа ($t=0$) с использованием разработанной программы (алгоритм работы микроконтроллера изложен ниже).

По численному значению τ и номинальному значению емкости используемого ионистора $C_{ио}$ рассчитывается внутреннее сопротивление аккумулятора:

$$\tau = R_{ак} \cdot C_{ио}; \quad R_{ак} = \frac{\tau}{C_{ио}}.$$

Структурная схема устройства представлена на рис. 3.

Коммутация АКБ и ионистора осуществляется силовым ключом K . Соединительные провода должны иметь достаточное поперечное сечение и целесообразно их выполнить из многожильного провода. Контакты ионистора должны обеспечивать подключение силовых цепей.

Для решения этой задачи наиболее рациональным является разработка устройства диагностики на базе 8-разрядного микроконтроллера, обладающего достаточным быстродействием и памятью, а также возможностью изменения кода программы без доработки аппаратной части системы измерения.

Кроме того, микроконтроллер, на который возложена функция обработки аналоговых сигналов, отсчета временных отрезков, должен отвечать следующим требованиям:

- иметь в составе своей периферии двухканальный аналого-цифровой преобразователь и таймер/счетчик, обладающие достаточными для осуществления измерений разрядностью и частотой преобразований;

- достаточную вычислительную мощность;
- иметь доступные средства отладки.

Принцип работы рассматриваемого цифрового устройства.

После подачи питания устройство переходит в режим ожидания, в этом режиме определяется ЭДС аккумулятора. При замыкании силового ключа K система автоматически переходит в режим контроля характеристик. Происходит включение таймера и осуществляется отсчет времени. Аналоговый сигнал, пропорциональный $u_{ио}$, подается на вход АЦП, после чего он подвергается цифровой обработке, в результате которой определяются мгновенные значения напряжения $u_{ио}$. В момент времени

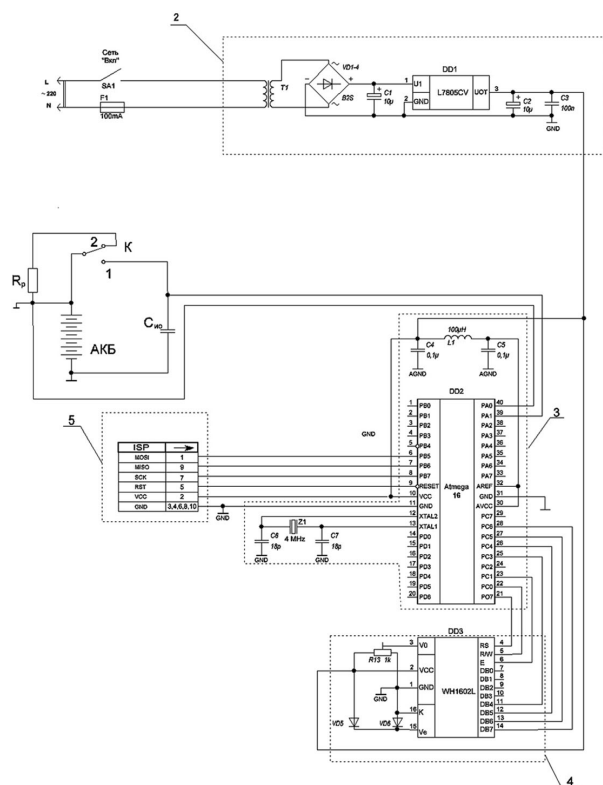


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема устройства:
1 — разъем для ввода программы в микроконтроллер;
2 — источник питания устройства; 3 — микроконтроллер;
4 — жидкокристаллический индикатор

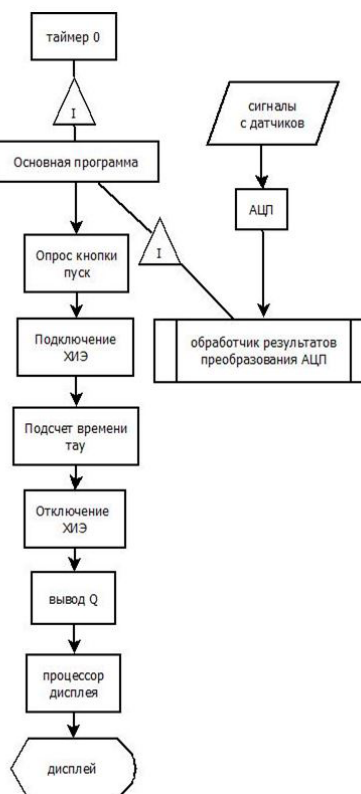


Рис. 5. Блок-схема алгоритма программы

$t = \tau$, когда напряжение на ионисторе достигает $u_{\text{ио}}$ ($t = \tau$), происходит выключение таймера. Измеренное значение временного отрезка τ используется в соответствии с алгоритмом программы для определения значения $R_{\text{ак}}$. По завершению необходимых вычислений на жидкокристаллическом индикаторе фиксируются значения $R_{\text{ак}}, E_{\text{ак}}, I_{\text{ио}} (t = \tau) = I_{\text{кз}}$.

Принципиальная схема предлагаемого устройства изображена на рис. 4.

К моменту окончания процесса заряда ионистора, ток ионистора становится равным нулю, а напряжение на ионисторе будет равно напряжению аккумулятора. Для обеспечения необходимой точности измерений, частота дискретизации АЦП должна обеспечивать не менее тысячи отсчетов в секунду дискретных значений $u_{\text{ио}}$ на интервале времени $[0; \tau]$, а значение инкрементирования таймера должно составлять порядка $\Delta t = 0,001$ сек.

Управляющая программа микроконтроллера [4] состоит из следующих частей:

- 1) подключение внешних библиотек и объявление глобальных переменных;
- 2) инициализация периферийных устройств микроконтроллера;
- 3) обработчик результатов преобразования АЦП;
- 4) обработчик прерывания по переполнению 8-битного таймера T0;
- 5) основной цикл программы.

Блок-схема алгоритма программы микроконтроллера представлена на рис. 5.

Выводы. Предлагаемое устройство диагностирования позволит существенно снизить трудоемкость работ по техническому обслуживанию АКБ, а также может быть использовано при проведении исследований химических источников энергии в различных условиях.

Библиографический список

1. Кузнецов, В. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы) / В. Кузнецов, О. Панькина, Н. Мачковская // Разработка и производство. Компоненты и технологии. — 2005. — Вып. 50. — С. 14—16.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учеб. для техн. вузов по направлениям «Электротехника», «Электротехнологии», «Электромеханика», «Электроэнергетика» и «Приборостроение» для бакалавров / Л. А. Бессонов. — 11-е изд. — М. : Юрайт, 2012. — 317 с. — 1 эл. опт. диск (DVD-ROM). — ISBN 978-5-9916-1451-1.
3. Прикладная электрохимия / Н. П. Федотьев [и др.]. — Л. : Химия, 1967. — 482 с.
4. ГОСТ 19.701м (ИСО 5807-85). Схемы алгоритмов программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения. — Введ. 1992-01-01. — М. : Изд-во стандартов, 1991. — 3 с.

ПОПОВ Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры теоретической и общей электротехники Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

СЫСОЛЯТИН Виктор Юрьевич, кандидат технических наук, преподаватель кафедры электрооборудования и автоматики Омского автобронетанкового инженерного института.

КУРАКИНА Ольга Павловна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры теоретической и общей электротехники ОмГТУ.

Адрес для переписки: kor_toe@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.06.2016 г.

© А. П. Попов, В. Ю. Сысолятин, О. П. Куракина

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕТРОСПЕКТИВНЫХ ДАННЫХ ООО «ОМСКАЯ ЭНЕРГОСБЫТОВАЯ КОМПАНИЯ» ОБ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИИ

Вопросам построения методик прогнозирования электропотребления (ЭП) уделяется большое внимание, поскольку от этого зависят многие показатели эффективности отдельно взятой энергосбытовой компании и в конечном счете тариф для клиентов, сформированный по ценам рынка на сутки вперед (РСВ). Целью исследований является спектральный анализ ретроспективных данных ООО «Омская энергосбытовая компания» на различных интервалах. Проведенный спектральный анализ позволил выявить закономерности временного ряда данных об электропотреблении.

Ключевые слова: анализ данных, прогнозирование, электропотребление.

Введение. В работах [1–3] уже рассматривались аспекты построения моделей прогнозирования ЭП. Однако применения того или иного алгоритма для отдельно взятой энергосбытовой компании путем его простой реализации неприемлемо, поскольку характер электропотребления клиентов может отличаться. Как было показано [4], потребители — физические лица имеют четко выраженную специфику, с циклическими процессами, которые повторяются на всем интервале ретроспективных данных. Профиль потребления юридических лиц может быть обусловлен их особенностями работы, технологическим процессом, загруженностью производства. При этом энергосбытовая компания не всегда располагает данными по отдельно взятому предприятию [5], поэтому задачу приходится решать, оперируя данными точек поставки. Таким образом, проведенный авторами спектральный анализ, результаты которого изложены ниже, позволил выявить закономерности в данных и использовать эти закономерности при построении прогностических моделей.

Постановка задачи. Данные электропотребления по всем точкам поставки представлены в виде протокола измерений ретроспективных данных в виде XML — макета в формате 80020 и содержит данные по электропотреблению за каждый час суток (табл. 1).

Таблица была получена методом программно-го преобразования XML — макета формата 80020 в CSV формат, удобный для выборки данных. Для проведения спектрального анализа были исследованы данные с 2011 по 2015 год.

Теория. Спектральный анализ временных рядов это один из способов для обработки результатов измерений и, в частности, данных электропотребления. В настоящее время методы спектрального ана-

лиза широко применяются в различных областях: в физике, медицине, энергетике, технике, экономике, астрономии, биологии и т. д. Теория спектрального анализа основывается на равнозначности представления функций во временной и частотной областях с помощью преобразований Фурье. Учитывая это обстоятельство, можно построить действенные методы получения характеристик изучаемого сигнала в частотной области тогда, когда во временной области это сделать проблематично.

Общим признаком для временных рядов является наличие в них крупномасштабных изменений (периодические колебания, тренд) и мелкомасштабных компонентов.

На практике из-за неполноты имеющейся информации, применяя спектральный анализ, имеют дело не со строгими характеристиками (спектр мощности), а только с оценками этих характеристик (периодограмма).

Алгоритм спектрального анализа:

Шаг 1. Графическое представление исходного временного ряда.

В большинстве случаев во время визуального изучения графика исходного ряда можно обнаружить либо наличие в данных постоянного слагаемого, либо низкочастотный компонент (тренд). Эти составляющие рекомендуется исключить из данных, так как они могут привести к довольно большому погрешностям высокочастотной области периодограммы.

Шаг 2. Исключение тренда и центрирование ряда.

Для исключения тренда из ряда требуется задание модели. В случае если у природы тренда есть теоретическое объяснение, то он моделируется на основании этой теории. Чаще всего природа тренда неизвестна. В подобных случаях в качестве

Таблица 1

Фрагмент протокола измерений ретроспективных данных за 1 января 2015 г.

Дата	Час суток	Температура, С	Электропотребление, МВт/ч
01.01.2015	1:00AM	-12	718290,0
01.01.2015	2:00AM	-12	695724,0
01.01.2015	3:00AM	-12	678426,0

формальной модели применяют аппроксимацию тренда с использованием линейной комбинации различных полиномов. В этом случае в состав выражения включается и свободный член. Параметры выбранной модели тренда находятся с помощью метода наименьших квадратов, далее значения тренда вычитаются из исходных данных. В простейшем случае эта операция сводится к исключению постоянного слагаемого (центрированию ряда). При этом среднее значение ряда находится по формуле

$$m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k,$$

где N — количество элементов в ряде;

x_k — k -й элемент ряда.

Центрированный ряд из исходного получается следующим образом

$$x_k^o = x_k - m, \quad k=0,1,\dots,N-1.$$

Шаг 3. Графическое представление центрированного ряда.

С помощью графического представления можно убедиться в отсутствии постоянной компоненты в представленном центрированном временном ряде.

Шаг 4. Вычисление периодограммы.

Для вычисления периодограммы используется быстрое преобразование Фурье (БПФ) [6]. Для использования процедуры БПФ исходный временной ряд нужно дополнить нулями таким образом, чтобы длина нового ряда была $N_1 = 2^p \geq N$. Для такого ряда с помощью быстрого преобразования Фурье получают

$$X_j = FFT_j \left\{ x_k^o \right\}_{k=0}^{N_1-1} = \sum_{k=0}^{N_1-1} x_k^o e^{-\frac{2\pi i j k}{N_1}}, \quad j=0,1,\dots,N_1-1,$$

где i — комплексное число.

На основании проведенного БПФ рассчитывают значения периодограммы

$$D_j = \frac{1}{N^2} \left[(\operatorname{Re} X_j)^2 + (\operatorname{Im} X_j)^2 \right], \quad j=0,1,\dots,\frac{N_1}{2}.$$

Отсчеты периодограммы соответствуют частотам

$$v_j = \Delta v j, \quad j=0,1,\dots,\frac{N_1}{2},$$

где $\Delta v = \frac{1}{N_1 \Delta t}$, Δt — временной шаг ряда.

Шаг 5. Оценивание дисперсии временного ряда происходит по формуле

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} (x_k^o)^2.$$

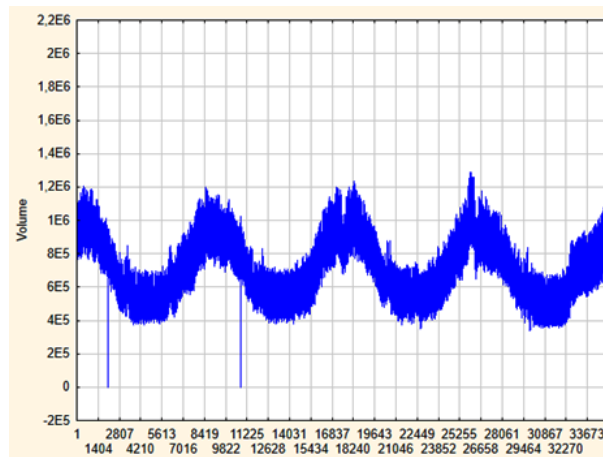


Рис. 1. График почасового электропотребления

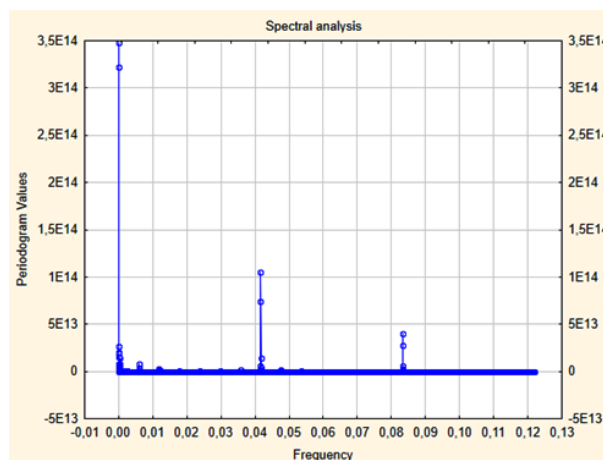


Рис. 2. Фрагмент периодограммы почасового электропотребления

Используя дисперсию временного ряда в дальнейшем можно рассчитать пороговое значение для обнаружения сигнала.

Шаг 6. Графическое представление периодограммы и порога обнаружения сигнала.

С помощью графических данных можно отождествить значимые спектральные линии. Пики периодограммы, находящиеся выше критического уровня $\left(\frac{\sigma_0^2 X_1}{N} \right)$, считаются значимыми, т. е. принадлежат детерминированному компоненту ряда.

Результаты экспериментов. По представленному алгоритму были получены график электропотребления и фрагмент периодограммы (рис. 1, 2).

Оставшаяся часть периодограммы не содержит значимых пиков. Исходя из вычисленного порога обнаружения сигнала, равного $7,37882E+13$ и данных периодограммы, было выделено 4 значимых пика.

Проанализировав выделенные периоды (табл. 2), можно предположить, что два первых отражают годовой период, т. к. в исследуемом периоде присутствовали данные как за високосный, так и за невисокосный год, а два последних — суточный.

Таким образом, с помощью спектрального анализа было выделено два циклических периода — суточный и годовой. В связи с чем при формировании обучающей выборки для прогнозирования электро-

Таблица 2

Полученные частотные характеристики ряда данных об электропотреблении

Frequency	Period	Periodogram
0,000122	8192,000	3,481567E + 14
0,000107	9362,286	3,216944E + 14
0,041672	23,997	1,054145E + 14
0,041656	24,006	7,420106E + 13

потребления целесообразно использовать данные не только текущего года, но и данные за аналогичный период предыдущего года.

Заключение. Представленный анализ позволяет учитывать природу электропотребления. При этом результаты анализа могут быть использованы при формировании обучающих выборок в интеллектуальных алгоритмах прогнозирования электропотребления.

Библиографический список

1. Ziel, F. Efficient modeling and forecasting of electricity spot prices / F. Ziel, R. Steinert, S. Hussman // *Energy Econ.* – 2015. – Vol. 47. – P. 98–111.
2. Hahn, H. Electric load forecasting methods: Tools for decision making / H. Hahn, S. Meyer-Nieberg, S. Pickl // *Eur J Oper Res.* – 2009. – Vol. 199. – P. 902–907.

Книжная полка

621.6/Г15

Галдин, В. Д. Вентиляторы : учеб. пособие / В. Д. Галдин, Г. Г. Кустиков, М. А. Таран. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. – 98 с.

Рассмотрены конструкции и принципы работы радиальных и осевых вентиляторов. Приведены примеры построения аэродинамических характеристик вентиляторов и сети. Описана совместная работа вентиляторов в сети. Предназначено для студентов бакалавриата и магистратуры, обучающихся по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», при выполнении практических работ, курсового проектирования и самостоятельной работы по дисциплинам «Тепломеханическое и вспомогательное оборудование предприятий» и «Отопление, вентиляция, кондиционирование».

Быстрицкий, Г. Ф. Электроснабжение. Силовые трансформаторы : учеб. пособие / Г. Ф. Быстрицкий, Б. И. Кудрин. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2016. – 175 с. – ISBN 978-5-9916-8731-7.

В пособии изложены требования, определяющие выбор числа и мощности трансформаторов главной понижающей и цеховых подстанций; рассмотрены конструктивные схемы трансформаторов и назначение их основных элементов, а также характеристики трансформаторного масла, способы его очистки и сушки. Представлены режимы работы трансформаторов и условия их включения после монтажа и ремонта.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям и специальностям, а также может быть полезно работникам, занимающимся эксплуатацией электрооборудования.

Кривоногов, Н. А. Общая электротехника : учеб. пособие / Н. А. Кривоногов. – Ростов н/Д. : Феникс, 2016. – 222 с. – ISBN 978-5-222-25720-3.

В учебном пособии рассматриваются общие методы анализа линейных и нелинейных электрических и магнитных цепей при постоянных, переменных и переходных токах и напряжениях, электрические машины, основы электропривода и электрических измерений. Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по электротехническим направлениям подготовки бакалавров технических вузов.

3. Грицай, А. С. Краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии с использованием нейронной сети / А. С. Грицай, А. В. Гаак // *Энергорынок.* – 2007. – № 11. – С. 13–15.

4. Соловьева, И. А. Прогнозирование электропотребления с учетом факторов технологической и рыночной среды / И. А. Соловьева, А. П. Дзюба // *Научный диалог.* – 2013. – № 7 (19). – С. 97–113.

5. Грицай, А. С. Особенности построения биллинговой системы для энергосбытовой компании с целью обеспечения максимальной точности прогнозирования / А. С. Грицай // *Динамика систем, механизмов, машин : тез. докл. Междунар. научн.-техн. конф.* – Омск : ОмГТУ, 2009. – С. 250–254.

6. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2006. – 751 с.

ПОТАПОВ Виктор Ильич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой информатики и вычислительной техники, заслуженный деятель науки и техники РФ.

Адрес для переписки: ivt@omgtu.ru

ГРИЦАЙ Александр Сергеевич, старший преподаватель кафедры информатики и вычислительной техники.

Адрес для переписки: aleksandr.gritsay@gmail.com

ТЮНЬКОВ Дмитрий Александрович, магистрант гр. ИВТм-141 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: tyunkov.dima@gmail.com

Статья поступила в редакцию 17.06.2016 г.

© В. И. Потапов, А. С. Грицай, Д. А. Тюньков

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ТОКОСЪЕМА В КОНТАКТЕ «ЩЕТКА—КОЛЛЕКТОР» ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА 2ЭС6

Работоспособность тяговых электродвигателей постоянного тока во многом определяется надежностью коллекторно-щеточного узла. В статье приведены результаты моделирования контактного взаимодействия «щетка—коллектор» в тяговом электродвигателе электровоза 2ЭС6. Рассмотрено влияние конструктивных особенностей щеткодержателя, условий и режимов эксплуатации на площадь контакта «щетка—коллектор» и качество коммутации. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложены рекомендации и технические решения по повышению качества токосъема в контакте «щетка—коллектор» и обеспечению эксплуатационной надежности тяговых электродвигателей.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель постоянного тока, коллекторно-щеточный узел, площадь контакта, качество токосъема, конструкция щеткодержателя.

Работа коллекторно-щеточного узла (КЩУ) предопределяет эксплуатационную надежность тяговых электродвигателей (ТЭД) постоянного тока [1]. На техническое состояние коллекторно-щеточного узла воздействуют две группы факторов: электрической и механической природы [2]. Электрические факторы определяются настройкой коммутации, маркой щеток, асимметрией в магнитной системе и расстановкой щеткодержателей по окружности коллектора, положением щеток относительно геометрической нейтральной, площадью контакта щеток с коллектором и др.

Не менее важным является влияние механических факторов, таких как балансировка якоря и коллектора, монолитность коллектора и качество его обработки, техническое состояние щеткодержателей и давление щеток на коллектор, воздействие внешней и собственной вибраций, динамические удары, связанные с переменным характером нагрузки, и др.

Условия коммутации ТЭД в целом определяют совокупностью условий контактирования щеток с каждой коллекторной пластиной [3]. Одним из важных параметров механики контакта в КЩУ является наработка «зеркала» на рабочей поверхности щеток. Характер распределения тока в щеточном контакте в большей степени зависит от притертости щетки к коллектору, качества его обработки и состояния политуры. Кроме указанных факторов, распределение тока в щеточном контакте в значительной степени зависит от силы нажатия на щетку и места приложения этой силы.

Таким образом, на качество работы КЩУ оказывает влияние как коммутирующая способность щеток (вольт-амперная характеристика), так и состояние рабочей поверхности коллектора [4].

Качество обработки коллектора имеет важное значение. При уменьшении шероховатости коллекторных пластин число точек непосредственного контакта щетки с коллектором увеличивается, что приводит к снижению фактической плотности тока в контакте. Наряду с этим улучшаются условия механического взаимодействия коллектора и щеток [5].

Анализ отказов тяговых электродвигателей ЭДП-810 электровоза 2ЭС6 указывает на весьма существенное влияние технического состояния КЩУ на работоспособность ТЭД и колесно-моторного блока в целом. Основные причины неисправностей ТЭД можно распределить на две группы:

- электрический пробой и заниженное значение сопротивления изоляции обмоток (68 % от общего количества неисправностей);
- нарушения в работе коллекторно-щеточного узла (32 % от общего количества неисправностей).

По данным сервисного локомотивного депо Московка за 2015 год зафиксирован 81 случай unplanned ремонтов тяговых электродвигателей, связанных с нарушениями в работе КЩУ, что составляет 20,8 % от общего количества unplanned ремонтов.

Выявлен повышенный износ электрических щеток ЭГБ1А, причем средний пробег до достижения минимально допустимой высоты щетки составляет 75 тыс. км. Щетки этой марки имеют глубоко

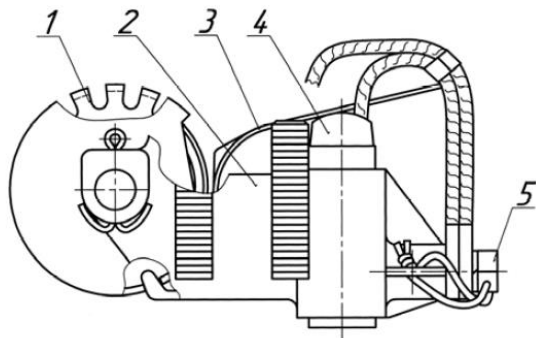


Рис. 1. Конструкция щеткодержателя ТЭД электровоза 2ЭС6

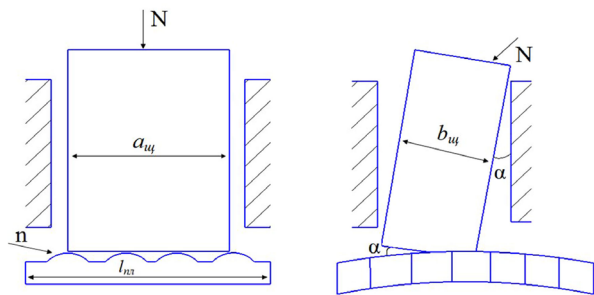


Рис. 2. Расчетная схема

утопленные в тело медные шунты, что при предельном износе приводит к повреждениям коллектора. Отдельные партии электрических щеток имеют разброс размера амортизатора в интервале 20,5–21,0 мм при ширине окна щеткодержателя 20 мм, что в процессе эксплуатации приводит к зависанию щеток с последующим срабатыванием защиты на электровозе и отключением ТЭД. Систематически выявлялись случаи неравномерного износа и перекоса щеток в окнах щеткодержателей.

Щеткодержатель тяговых электродвигателей ЭДП-810 электровозов серии 2ЭС6 (рис. 1) представляет собой корпус 2, в окна которого вставлены две разрезные щетки 4. Нажатие на щетки обеспечивается плоскими хвостовиками 3 спиральных пружин. Спиральные пружины расположены на оси, зафиксированной в корпусе щеткодержателя при помощи шплинта.

Особенностью конструкции щеткодержателя тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 является изменение места приложения силы давления пружины: с ближнего к пружине края щетки на дальний край по мере износа щетки. Это приводит к неравномерному распределению давления хвостовика прижимной пружины по поверхности щетки, что вызывает неравномерный износ щеток и уменьшение фактической площади контакта «щетка – коллектор».

Тяговые электродвигатели электровозов работают в реверсивном режиме. В технологической документации по техническому обслуживанию и ремонту ТЭД для коллекторно-щеточного аппарата устанавливаются допуски на размеры окон щеткодержателей как по ширине, так и по длине [6]. В связи с этим имеет место зазор между щеткодержателем и щеткой, в результате чего щетка в процессе работы может быть установлена на коллекторе с перекосом. Для тяговых электродвигателей

электровозов 2ЭС6 дополнительное неблагоприятное воздействие на расположение щетки в окне щеткодержателя оказывает неравномерное распределение давления прижимной пружины по поверхности щетки, обусловленное конструктивной особенностью щеткодержателя.

Все это может привести к тому, что набегающий край щетки изнашивается быстрее сбегающего, который в результате принимает остроугольную форму. После реверсирования тягового электродвигателя край щетки, который был сбегающим, становится набегающим и образовавшаяся ранее остроугольная кромка начинает скалываться. Происходит засорение межламельных канавок угольными частицами (замыканию соседних коллекторных пластин между собой), на коллекторе возникает искрение, которое может повлечь за собой отказ ТЭД в эксплуатации.

Немаловажным фактором, влияющим на неравномерный износ щеток, является удлинение тяговых плеч электровозов 2ЭС6 (до 900–1000 км). В данном случае даже при минимальных зазорах между щеткой и корпусом щеткодержателя происходит неравномерный износ набегающего и сбегающего краев щеток вследствие длительного вращения электродвигателя в одну сторону. В результате чего после изменения направления движения локомотива происходят явления, подобные вышеописанным.

Одной из основных причин отказов ТЭД является неудовлетворительная работа КЩУ, приводящая к нарушению процесса токосъема [7]. На условия токосъема оказывают существенное влияние геометрические параметры контактирующих поверхностей щеток и пластин коллектора (площадь контакта). Так как щетка является активным элементом коммутационного процесса, то уменьшение площади ее фактического контакта с коллектором приводит к увеличению плотности тока и, как следствие, к повышенному искрообразованию при коммутации секции обмотки якоря.

Величина неравномерного износа щетки определяется размерами площадки контакта между щеткой и коллектором, которая в основном зависит от двух факторов: характера неровности (количество и высота неровностей) в области контакта «щетка – коллектор», а также от значения и направления прижимающей силы хвостовиков спиральных пружин щеткодержателя.

Влияние параметров конструктивных элементов коллекторно-щеточного узла на фактическую площадь контакта «щетка – коллектор» рассмотрим по расчетной схеме (рис. 2).

При обработке рабочей поверхности коллектора на ней появляются микронеровности, размер и количество которых определяются качеством обточки.

На одну неровность на коллекторной пластине приходится нагрузка [8]

$$P = \frac{Nl_{нл}}{na_{щ}}, \quad (1)$$

где N — прижимающая сила хвостовика спиральной пружины щеткодержателя; n — количество неровностей по длине коллекторной пластины (зависит от качества обточки коллектора при ремонте ТЭД); $l_{нл}$ — длина коллекторной пластины; $a_{щ}$ — длина щетки.

Нагрузка P распределяется по площади контакта щетки (плоскости) и неровности коллекторной

пластины (цилиндр), которая является прямоугольной с шириной

$$b = 4\sqrt{\frac{P}{\pi l}(k_1 + k_2)R}, \quad (2)$$

где R — высота неровности; l — длина площадки контакта; k_1, k_2 — коэффициенты, зависящие от упругости материала (соответственно щетки и коллекторной пластины), рассчитываемые по формуле [9]:

$$k_i = \frac{1 - \mu_i^2}{E_i}, \quad (3)$$

где μ_i — коэффициент Пуассона; E_i — модуль упругости материала.

Для оценки величины износа контактирующих поверхностей необходимо найти длину l площадки контакта между щеткой и коллекторной пластиной.

Интенсивный износ материала контактирующих поверхностей прекратится при условии [10]

$$\tau_k \leq \tau_{np}, \quad (4)$$

где τ_k — касательное напряжение на площадке контакта; τ_{np} — предельное касательное напряжение разрушения более мягкого контактирующего материала.

Касательное напряжение на площадке контакта [11]

$$\tau_k = \frac{Pf_{ck}}{S_k}, \quad (5)$$

где f_{ck} — коэффициент трения скольжения щетки по коллекторной пластине;

$S_k = b \cdot l$ — площадь контакта щетки и одной неровности коллекторной пластины.

При условии $\tau_k = \tau_{np}$

$$Pf_{ck} = 4l\sqrt{\frac{P}{\pi l}(k_1 + k_2)R} \cdot \tau_{np}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) получаем значение длины площадки контакта, при которой заканчивается интенсивный износ материала щетки,

$$l = \frac{Pf_{ck}^2 \pi}{16R(k_1 + k_2)\tau_{np}^2} \quad \text{или} \quad l = \frac{Nl_{нн} f_{ck}^2 \pi}{16na_{щ} R(k_1 + k_2)\tau_{np}^2}. \quad (7)$$

Тогда фактическая площадь контакта «щетка — коллектор», через которую будет проходить токосъем,

$$S_{\phi} = \frac{4na_{щ}}{l_{нн}} \sqrt{\frac{PIR(k_1 + k_2)}{\pi}}. \quad (8)$$

При достижении условия $l = \frac{b_{щ}}{\cos \alpha}$ длина площадки контакта достигнет максимального значения (где $b_{щ}$ — ширина щетки; α — угол зазора между щеткой и корпусом щеткодержателя).

В общем виде изменение площади контакта «щетка — коллектор» можно представить как $S = A\sqrt{l}$ (рис. 3).

Интенсивность механического изнашивания материала щетки зависит от величины касательного напряжения на площади контакта «щетка — коллектор»

$$\tau_{кщ} = \frac{Nf_{ck}}{S_{\phi}}. \quad (9)$$

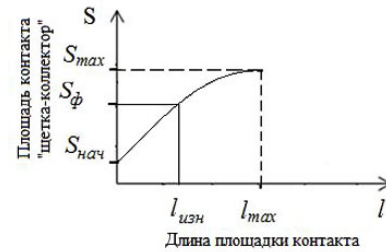


Рис. 3. Зависимость площади контакта «щетка — коллектор» от длины площадки контакта

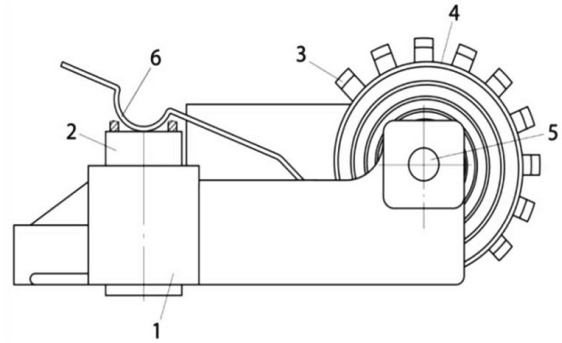


Рис. 4. Усовершенствованный щеткодержатель

При допустимом износе щетки по высоте сила N остается постоянной, коэффициент f_{ck} также является постоянной величиной. Тогда величина касательного напряжения, а значит, и интенсивность изнашивания щетки будут определяться фактической площадью контакта щетки с коллектором. Чем меньше S_{ϕ} , тем больше $\tau_{кщ}$ и выше интенсивность изнашивания материала щетки.

Полученная математическая модель показывает, что при работе коллекторно-щеточного узла ТЭД электровоза 2ЭС6 влияние на фактическую площадь контакта «щетка — коллектор» оказывает конструктивная особенность щеткодержателя, приводящая к неравномерному распределению давления хвостовика прижимной пружины по поверхности щетки, качество обработки коллектора при ремонте (количество и высота неровностей на его поверхности), а также физико-механические свойства щеток и коллекторных пластин [12].

Для обеспечения равномерного распределения давления хвостовика прижимной пружины по поверхности щетки, повышения стабильности площади контакта и качества токосъема в контакте «щетка — коллектор» предложена усовершенствованная конструкция щеткодержателя [13] (рис. 4), включающая корпус 1 с окнами, в которые вставлены две разрезные щетки 2, ось 5, зафиксированную в корпусе при помощи шплинта, на которую насажены два фиксатора 3 и спиральные пружины 4.

Хвостовики спиральных пружин выполнены в виде полуокружности 6, поэтому давление происходит в пределах центральной части щеток на всем диапазоне их допустимого износа по высоте. Это обеспечивает равномерное распределение давления хвостовика прижимной пружины по поверхности щетки и стабильность фактической площади контакта «щетка — коллектор».

Щеткодержатель устанавливается на траверсе. При необходимости смены щеток хвостовики поднимаются и зацепляются смещением в сторону

за один из зубьев соответствующих фиксаторов. После смены щеток хвостовики обратным движением снимаются с фиксаторов и возвращаются в рабочее положение.

В щеткодержателе тягового электродвигателя ЭДП-810 электровоза 2ЭС6 в связи с неравномерным распределением давления пружины на щетку по мере притирки щетки к коллектору фактическая площадь контакта «щетка – коллектор» будет изменяться от $S_{нач}$ до S_{max} (рис. 3), а значит, и будет изменяться интенсивность изнашивания щетки: вначале она будет максимальной, а затем придет к нормативному значению, определенному в документации на данную марку щеток. В щеткодержателе предложенной конструкции фактическая площадь контакта щетки с коллектором остается практически постоянной на всех режимах работы ТЭД, близкой к S_{max} . При этом интенсивность изнашивания материала щетки будет также практически постоянной, соответствующей данной марке щетки.

Предложенный щеткодержатель позволяет повысить качество токосъема в коллекторно-щеточном узле тягового электродвигателя посредством обеспечения равномерного распределения давления хвостовика прижимной пружины по поверхности щетки, повышения стабильности площади контакта и снижения интенсивности механического изнашивания щеток, что приведет к улучшению работы ТЭД в эксплуатации и повышению работоспособности колесно-моторных блоков электровозов 2ЭС6.

Библиографический список

1. Захаров, В. И. Повышение эксплуатационной надежности тяговых электрических машин магистральных электровозов / В. И. Захаров ; под ред. А. Т. Осеева // Повышение ресурса тяговых электродвигателей : сб. докл. и сообщ. науч.-техн. конф. – М., 2004. – С. 32–36.
2. Карасев, М. Ф. Коммутация коллекторных машин постоянного тока / М. Ф. Карасев. – М. : Энергия, 1961. – 224 с.
3. Толкунов, В. П. Теория и практика коммутации машин постоянного тока / В. П. Толкунов. – М. : Энергия, 1979. – 224 с.
4. Авилов, В. Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока : моногр. / В. Д. Авилов. – Омск, 2013. – 356 с.
5. Белан, Д. Ю. Повышение надежности работы коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей / Д. Ю. Белан, В. М. Лузин // Известия Транссиба. – 2010. – № 4 (4). – С. 6–11.
6. Техническое обслуживание и ремонт тягового электродвигателя ЭДП-810 электровоза 2ЭС6. Технологическая инструкция. ПКБ ЦТ.25.0146. – 2012. – 137 с.

7. Шантаренко, С. Г. Термодинамические процессы в тяговом электродвигателе / С. Г. Шантаренко, Д. Ю. Белан, А. А. Лаптев, Е. В. Пономарев // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения : научн.-техн. журн. – 2011. – № 1. – С. 67–72.

8. Шантаренко, С. Г. Контактное взаимодействие на коллекторе и теплоэнергетические процессы в цепи якоря тягового электродвигателя / С. Г. Шантаренко, Д. Ю. Белан, А. А. Лаптев // Вестник транспорта Поволжья : науч.-техн. журн. – 2009. – № 1 (17). – С. 55–62.

9. Кузнецов, В. Ф. Динамическое взаимодействие упругих тел / В. Ф. Кузнецов, С. Г. Шантаренко, Е. В. Пономарев // Повышение динамических качеств подвижного состава и поезда : межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – С. 78–82.

10. Маслов, Е. Н. Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. – М. : Машиностроение, 1974. – 320 с.

11. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.

12. Шантаренко, С. Г. Особенности токосъема в коллекторно-щеточном узле тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 / С. Г. Шантаренко, В. Ф. Кузнецов, О. Д. Юрасов // Известия Транссиба. – 2015. – № 2 (22). – С. 53–58.

13. Пат. 157382 РФ, МПК Н 01 R 39/40. Щеткодержатель для тягового электродвигателя / С. Г. Шантаренко, В. Ф. Кузнецов, О. Д. Юрасов ; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2015116564/07 ; заявл. 29.04.2015 ; опубл. 27.11.2015, Бюл. № 33.

ШАНТАРЕНКО Сергей Георгиевич, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава, проректор по научной работе.

КУЗНЕЦОВ Виктор Федорович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры высшей математики.

ПОНОМАРЕВ Евгений Владимирович, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательской части.

ТАРАНЕНКО Виктор Александрович, аспирант кафедры технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава.

Адрес для переписки: nauka@omgups.ru; nich@omgups.ru

Статья поступила в редакцию 26.08. 2016 г.

© С. Г. Шантаренко, В. Ф. Кузнецов, Е. В. Пономарев, В. А. Тараненко

Книжная полка

621.311/В92

Выпускная квалификационная работа бакалавра по проектированию систем электроснабжения промышленных объектов : учеб. пособие / В. К. Грунин [и др.] ; под общ. ред. В. К. Грунина. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. – 155 с.

Изложены требования к оформлению выпускной работы, описаны структура и этапы разработки ВКР по программе бакалавриата. Подробно рассмотрены вопросы оформления расчетно- пояснительной записки и графического материала, приведен пример выполнения ВКРБ. Изложены требования к подготовке выпускной работы к защите, описана процедура защиты в ГЭК. Предназначено для студентов вузов очной и заочной форм обучения по программе бакалавриата и направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ В ТОПКАХ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ ГАЗОТРУБНОГО КОТЛА

При решении сложных задач, когда объем физических знаний об изучаемом процессе недостаточен, необходимы экспериментальные исследования. Для проведения исследований радиационной составляющей теплового потока была представлена разработанная физическая модели процесса, разработан стенд с применением специально изготовленных измерительных приборов, с тарировкой их и проведение опытов с дальнейшей обработкой результатов исследования, их анализ.

Ключевые слова: радиационно-конвективный теплообмен, газотрубный котел, топка, экспериментальная стенд.

Исследование выполнено в рамках НИР ОмГТУ № 16058 В.

При решении наиболее сложных задач, когда объем физических знаний об изучаемом процессе недостаточен, необходимы исследования в лабораторных условиях. Если же лабораторные исследования проведены достаточно полно и результаты их привели к надежным количественным зависимостям, промышленные исследования могут быть сведены к типовым испытаниям установки.

Основные задачи лабораторных исследований — проверка правильности теоретических предположений, качественное и количественное изучение протекающих процессов или отдельных явлений.

Описание результатов по проделанным экспериментальным исследованиям является заключительным и весьма существенным этапом работы, в котором должны быть отражены все стадии испытаний, а также рекомендованы мероприятия по повышению эффективности работы и повышению экономичности газотрубного котла [1].

На кафедре «Теплоэнергетика» Омского государственного технического университета (ОмГТУ) была разработана и создана экспериментальная установка для исследования радиационно-конвективного теплообмена при движении продуктов сгорания газообразного топлива в каналах различного профиля. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1 [1, 2]. Данная установка состоит из камеры горения (топка) 1, в поперечном сечении которого находятся различные геометрические формы, которая расположена внутри водяной рубашки 2, горелки 3 с предварительной подготовкой топливовоздушной смеси, а также комплекса измерительных приборов 5, 6, 7 [2].

Для измерения радиационной составляющей температуры внутри топочного объема был применен узкоугольный радиометр, спроектированный и изготовленный на кафедре «Теплоэнергетика» в соответствии с рекомендациями [2, 3]. Схема радиометра представлена на рис. 2 [1–3].

Принцип действия радиометра основан на оптическом свойстве эллиптического зеркала [2]. Рав-

новесная температура, которую воспримет шарик термодатчика за счет поглощения сфокусированной на его поверхности энергии, определяется из условия теплового равновесия

$$Q_{\text{пог}} = Q_{\text{отд}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{пог}}$ — количество энергии излучения, поглощенное шариком термодатчика в результате падения на его поверхность сфокусированного зеркалом теплового потока и собственного теплового излучения стенок зеркала; $Q_{\text{отд}}$ — отданное шариком термодатчика количество тепла за счет его теплового излучения, естественной конвекции и теплопроводности электродов.

Раскрывая выражения левой и правой частей уравнения (1) и проводя соответствующие преобразования, находим, что равновесная температура шарика определяется из решения уравнения четвертой степени следующего вида (полагая отражательную способность эллиптического зеркала равной единице) [3]:

$$T^4 + bT - c = 0, \quad (2)$$

где T — абсолютная температура шарика термодатчика;

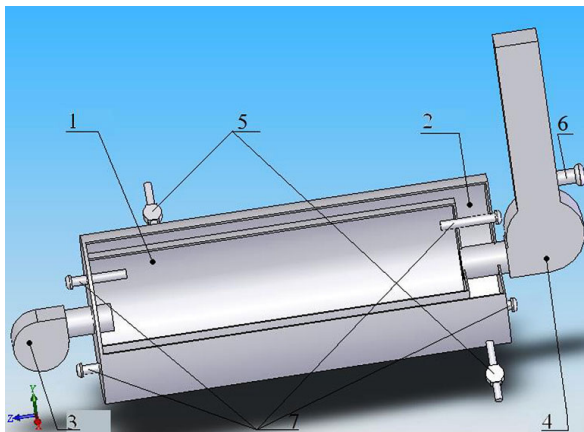
b и c — параметры уравнения, определяемые из выражений:

$$b = \frac{\alpha}{\sigma \cdot a_{\text{ш}}} + \frac{\lambda}{2l \cdot \sigma_{\text{ш}}} \left(\frac{d_3}{d_{\text{ш}}} \right)^2,$$

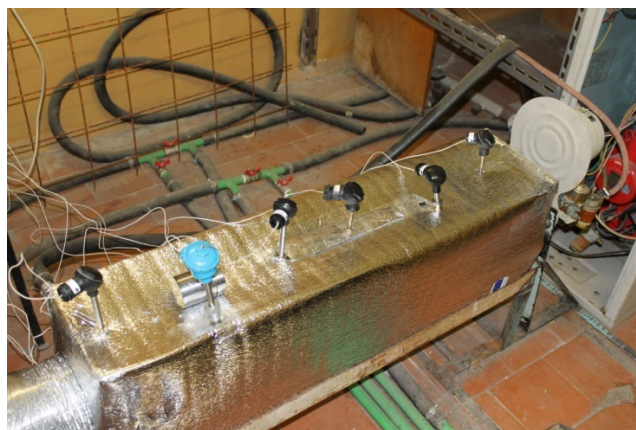
$$c = T_{\text{ст}}^4 + b \cdot T_{\text{ст}} + E_{\text{пад}} \frac{1}{4\sigma} \left(\frac{d_0}{d_{\text{ш}}} \right)^2,$$

где α — коэффициент теплоотдачи естественной конвекцией от шарика термодатчика к пропускаемому через прибор воздуху;

$a_{\text{ш}}$ — поглощательная способность шарика;

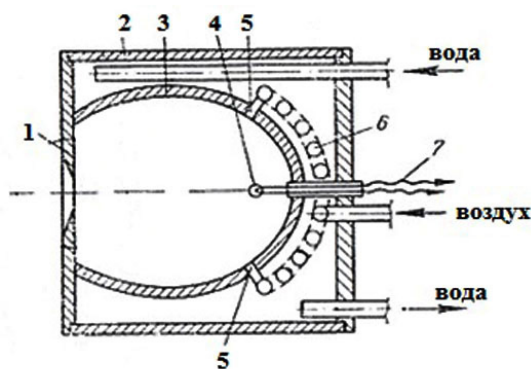


а)



б)

Рис. 1. Принципиальная схема (а) и общий вид (б) экспериментальной установки



а)



б)

Рис. 2. Принципиальная схема (а) и общий вид (б) радиометра с эллиптическим зеркалом

λ — коэффициент теплопроводности материала электродов;

l — длина электродов;

$d_{ш}$, $d_э$ и d_0 — соответственно диаметры шарика, проволоки электродов и отверстия диафрагмы;

$E_{пад}$ — поверхностная плотность падающего на диафрагму потока излучения, величина которой измеряется;

$T_{ст}$ — абсолютная температура стенок эллиптического зеркала радиометра, равная температуре охлаждающей воды и температуре пропускаемого через прибор воздуха.

Как следует из (2), величина T , при всех прочих равных условиях однозначно определяется величиной $E_{пад}$. Прделанные по (2) расчеты показали, что, применяя приборы с отношениями $d_0/d_{ш} \approx 0,5$ и $d_э/d_{ш} \approx 0,1$ и размерами эллиптического зеркала в несколько сантиметров, нетрудно получить радиометры со значением константы $k = \Delta t/E_{пад} = (1,3 - 4,3) \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}/\text{м}^2$, где $\Delta t = t_{ш} - t_{ст}$ превышение равновесной температуры шарика над температурой поверхности стенок зеркала.

Практическое использование радиометра при исследовании теплообмена в энергетических объектах [1–3] показало его положительные качества, что позволяет рекомендовать его для применения в теплотехнических и теплофизических исследованиях [1, 3].

Важное составляющее любого измерения — метод измерения и средства измерения. Несовершенство

каждого компонента способствует появлению погрешности измерения [1].

К прямым измерениям в проводимых теплофизических экспериментах относятся: измерения геометрических размеров топки, расхода жидкости, теплоты сгорания, расхода топлива, температуры жидкости, температуры газовой смеси в топочном объеме, температуры стенок топки, радиационной составляющей, концентрации газовой смеси на выходе.

Тарировка узкоугольного радиометра была проведена на специальном стенде абсолютным методом. Источником теплового излучения использовалось абсолютно черное тело, которое представляет собой медный стержень, с просверленным отверстием с дном в виде конуса. Корпус абсолютно черного тела нагревался нихромовой спиралью. Регулирование температуры нагрева производилось реостатом и контролировалась шестью термопарами типа ТХА, которые были вмонтированы в корпус черного тела. Температура абсолютно черного тела определялась как среднее значение показаний этих термопар [4]. Данные с термопар снимались измерителем ОВЕН ТРМ 210.

Характер тарировочных кривых близок к линейному (рис. 3), что согласуется с научными данными [4].

Погрешности измерения плотности потоков излучения с помощью радиометрического прибора являются следствием его конструктивных особенностей и сводятся в основном к двум ошибкам:

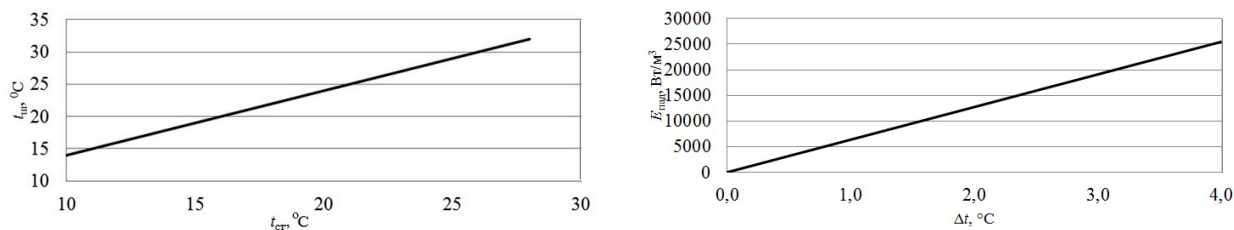


Рис. 3. Тарировочные характеристики радиометра

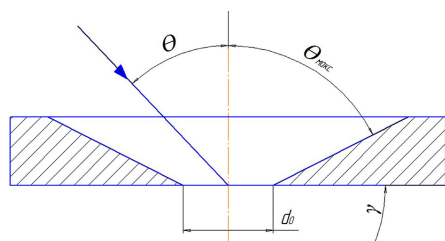


Рис. 4. Разрез диафрагмы радиометра

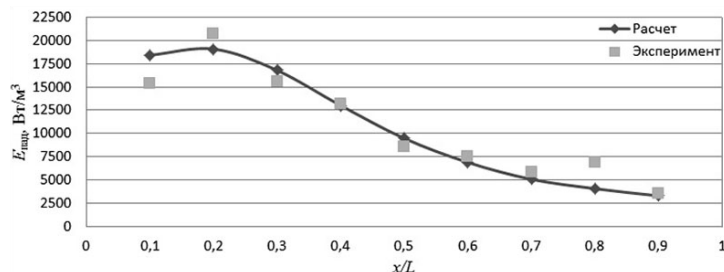


Рис. 5. Расчетные данные распределения падающей радиационной составляющей теплового потока по длине топки: с профилем в форме эллипс (неоребранный)

1) ошибки, возникающей из-за затенения косых лучей диафрагмой радиометра;

2) ошибки, возникающей из-за превышения температуры диафрагмы над температурой стенок зеркала вследствие ее нагрева за счет радиационного и конвективного теплообмена с внешней средой (при производстве измерений).

В соответствии с рис. 4 можно говорить о наличии первой ошибки, связанной с тем обстоятельством, что отверстие диафрагмы в основном пропускает внутрь прибора только те лучи, которые падают на ее поверхность под углами от 0° до $\theta_{\text{макс}}$. Максимальный угол падения $\theta_{\text{макс}}$, при котором лучи еще могут пройти в отверстие диафрагмы, определяется следующим уравнением:

$$\theta_{\text{макс}} = \pi/2 - \gamma, \quad (3)$$

где γ — угол скоса диафрагмы (рис. 4).

Величина возникающей вследствие эффекта экранирования ошибки определяется величиной отсекаемого диафрагмой потока излучения и вычисляется по формуле:

$$\delta_1 = \frac{E_{\text{пад}}^{(\text{изм})} - E_{\text{пад}}^{(\text{ист})}}{E_{\text{пад}}^{(\text{ист})}}, \quad (4)$$

где δ_1 — относительная ошибка измерения плотности падающего потока излучения вследствие эффекта диафрагмирования;

$E_{\text{пад}}^{(\text{изм})}$ — поверхностная плотность падающего на диафрагму потока излучения (измеренная величина);

$E_{\text{пад}}^{(\text{ист})}$ — поверхностная плотность падающего на диафрагму потока излучения (истинная величина).

Очевидно, что для уменьшения величины δ_1 нужно стремиться к уменьшению γ . Проведенные расчеты показывают, что при $\gamma = 5^\circ 40'$ ($\text{tg } \gamma = 0,1$) и равномерном распределении интенсивности полного излучения в зависимости от полярного угла θ и азимута φ в падающем радиационном потоке величина δ_1 вследствие диафрагмирования составляет 1,0 %.

Вторая ошибка радиометра возникает за счет превышения температуры диафрагмы над температурой стенок эллиптического зеркала. Так как диафрагма радиометра воспринимает тепло от окружающей топочной радиометра среды за счет излучения и конвекции и отдает его посредством теплопроводности системе охлаждения, а температура в каждом кольцевом сечении диафрагмы устанавливается из условий теплового равновесия и имеет более высокие значения, чем температура стенок эллиптического зеркала, которое не участвует в теплообмене с внешней средой. Вследствие этой температурной разницы диафрагма будет облучать шарик термодатчика с интенсивностью, большей интенсивности собственного излучения стенок зеркала. Это, в свою очередь, должно привести к некоторому завышению показаний радиометра [2, 3].

На основании изложенного можно считать, что описанный радиометр является довольно точным и чувствительным прибором, предназначенным для измерения величин плотности падающего излучения. Само производство измерений с его помощью сводится к измерению одной электрической величины (термо — э. д. с. термоэлемента), так как температура стенки равняется температуре охлаждающей воды. По значению этой величины и тарировочным данным прибора определяется величина плотности падающего излучения [2, 3].

После проведения ряда опытов по изучению и анализу процессов горения в топках различного профиля и топок с накатанными ребрами были получены результаты по данной работе и определена величина радиационной составляющей теплового потока.

При сравнении теоретических данных, полученных с помощью методики расчета процессов теплопереноса при кинетическом горении газообразного топлива в топке газотрубного котла на базе прикладного программного комплекса ANSYS CFX [5, 6] и опытных данных, разница между теоретическими и экспериментальными распределениями падающего радиационного составляющего

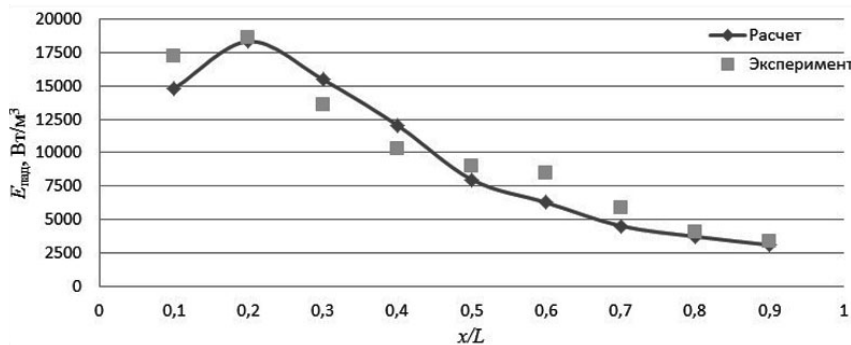


Рис. 6. Расчетные данные распределения падающей радиационной составляющей теплового потока по длине топки с профилем в форме эллипс с оребрением внутри топочного объема

теплового потока по длине топки (рис. 5, 6) составляет у эллипса 12,6 % (рис. 5), а у эллипса с поперечными ребрами — 15,6 % (рис. 6).

Библиографический список

1. Эстеркин, Р. И. Методы теплотехнических измерений и испытаний при сжигании газа / Р. И. Эстеркин, А. С. Иссерлин, М. И. Певзнер. — Л. : Недра, 1972. — 376 с.
2. Михайлов, А. Г. Изучение радиационно-конвективного теплообмена высокотемпературного газового потока в канале / А. Г. Михайлов, С. А. Корнеев, П. А. Батраков, С. В. Теребилов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2012. — № 2 (110). — С. 161–162.
3. Адрианов, В. Н. Основы радиационного и сложного теплообмена / В. Н. Адрианов. — М. : Энергия, 1972. — 464 с.
4. Тамонис, М. М. Радиационный и сложный теплообмен в аппаратах высокотемпературной техники : дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.05 / Тамонис Матас Матович. — Каунас, 1982. — 334 с.
5. Михайлов, А. Г. Численное моделирование процессов теплопереноса при горении газообразного топлива в топочном объеме / А. Г. Михайлов, П. А. Батраков, С. В. Теребилов // Естественные и технические науки. — 2011. — № 5 (55). — С. 354–358.
6. Батраков, П. А. Численное исследование влияния формы топки газотрубного котла на тепловые характеристики / П. А. Батраков, А. Г. Михайлов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2015. — № 10-3. — С. 417–420.

БАТРАКОВ Пётр Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики.
Адрес для переписки: peter_1cool@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14.06.2016 г.

© П. А. Батраков

Книжная полка

Шаров, Ю. Электроэнергетика : учеб. пособие / Ю. Шаров, В. Хорольский. — М. : ИНФРА-М; Форум, 2016. — 384 с. — ISBN 978-5-91134-782-6, 978-5-16-008996-6.

В пособии в систематизированном виде рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с принципами построения, устройством и особенностями функционирования электроэнергетических систем. Учтены отечественные и зарубежные разработки в области создания новейших образцов электротехнических изделий. Цель учебного пособия заключается в получении студентами базовых знаний в вопросах производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии для дальнейшего углубленного изучения специальных дисциплин.

Предназначено для студентов высших учебных заведений и бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика».

Хорольский, В. Прикладные методы для решения задач электроэнергетики и агроинженерии : учеб. пособие / В. Хорольский, М. Шаров. — М. : ИНФРА-М; Форум, 2015. — 176 с. — ISBN 978-5-91134-940-0, 978-5-16-010099-9.

Изложены теоретические и практические положения по использованию прикладных математических методов для решения задач электроэнергетики и агроинженерии. Учтена специфика построения и функционирования электроэнергетических объектов. Приводятся методические положения по теории массового обслуживания, линейному программированию, построению графовых моделей, сетевому планированию и проведению оптимизационных расчетов.

Для студентов вузов по направлениям магистерской подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника» и 110800 «Агроинженерия».

НАБЛЮДАТЕЛЬ МОМЕНТА НАГРУЗКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДВОЙНОЙ БЕЛИЧЬЕЙ КЛЕТКОЙ РОТОРА

В статье рассмотрены результаты разработки и исследования наблюдателя момента нагрузки на валу и переменных состояния асинхронных электродвигателей с двойной беличьей клеткой или с глубокопазными роторами. Для оценки момента нагрузки используется математическое описание на основе наблюдателя Люенбергера полного порядка. Методы исследования: теория автоматического управления и электрических машин. Приведены графические результаты численного моделирования и показана эффективность использования разработанных алгоритмов и методик.

Ключевые слова: бездатчиковое управление, асинхронный двигатель, наблюдатель Люенбергера, оценка момента нагрузки.

Задача по разработке бездатчиковых систем управления асинхронными электроприводами остается актуальной сегодня для многих специалистов данной области. Под бездатчиковым управлением [1–3] понимают системы векторного управления электродвигателем без датчика скорости на валу двигателя (бездатчиковые системы), использующие для управления легко доступные измерению координаты (ток, напряжение). Данные системы применяются при небольших диапазонах изменения скорости (не более 1:100) и требованиях к точности ее поддержания не более $\pm 0,5\%$. В остальных случаях, если скорость вращения вала изменяется в широких пределах (до 1:10000 и более), имеются требования к высокой точности поддержания скорости вращения (до $\pm 0,02\%$ при частотах вращения менее 1 Гц) или есть необходимость позиционирования вала, а также при необходимости регулирования момента на валу электродвигателя на очень низких частотах вращения, применяют методы векторного управления с обратной связью по скорости [4].

В качестве объекта управления используется асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым глубокопазным ротором или ротором с двойной беличьей клеткой. Данные конструкции ротора широко используются и позволяют получить увеличенный пусковой момент.

В настоящее время известен широкий круг методов учета различных конструкций роторов асинхронных машин: эквивалентные схемы замещения (метод зубцовых контуров, эквивалентные каскадные схемы замещения) [5]; методы конечно-элементного и конечно-разностного анализа и другие.

Имеются различные подходы к определению вектора состояния асинхронных двигателей, среди них можно выделить применение наблюдателя Люенбергера [6–7] и алгоритма расширенного фильтра Калмана [8–9]. В данной статье мы будем рассматривать вычислитель момента нагрузки асинхронного двигателя на основе наблюдателя Люенбергера.

Для исследования динамических режимов работы рассматривается трехфазная машина, состоящая из трехфазной обмотки на статоре и трехфазной обмотки на роторе. Для учета конструкции ротора с двойной беличьей клеткой, ротор представляется двумя параллельными ветвями. Каждая из ветвей ротора состоит из активного сопротивления, учитывающего тепловые потери и индуктивности связывающей данную ветвь через соответствующие потокосцепления с другой ветвью ротора и ветвью намагничивания. Таким образом, каждая из ветвей ротора создает свой электромагнитный момент. Результирующий электромагнитный момент при этом будет составлять сумму всех электромагнитных моментов короткозамкнутых обмоток ротора.

Система уравнений для описания асинхронной машины с короткозамкнутым ротором ($\vec{u}_R = 0$) будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{\Psi}_S}{dt} = \vec{u}_S - R_S \vec{i}_S - j\omega_k \vec{\Psi}_S \\ \frac{d\vec{\Psi}_{R1}}{dt} = -R_{R1} \vec{i}_{R1} - j(\omega_k - p_p \omega_m) \vec{\Psi}_{R1} \\ \frac{d\vec{\Psi}_{R2}}{dt} = -R_{R2} \vec{i}_{R2} - j(\omega_k - p_p \omega_m) \vec{\Psi}_{R2} \\ \vec{\Psi}_S = L_S \vec{i}_S + L_m (\vec{i}_{R1} + \vec{i}_{R2}) \\ \vec{\Psi}_{R1} = L_{R1} \vec{i}_{R1} + L_m (\vec{i}_S + \vec{i}_{R2}) \\ \vec{\Psi}_{R2} = L_{R2} \vec{i}_{R2} + L_m (\vec{i}_S + \vec{i}_{R1}) \\ M = k_1 \text{Mod}(\vec{\Psi}_i \times \vec{i}_k) + k_2 \text{Mod}(\vec{\Psi}_j \times \vec{i}_n) \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{M - T_L}{J} \end{cases} \quad (1)$$

где \vec{u}_S , \vec{i}_S , $\vec{\Psi}_S$ — пространственные векторы напряжения, тока и потокосцепления статора соответственно;

\vec{i}_{R1} , \vec{i}_{R2} , $\vec{\Psi}_{R1}$, $\vec{\Psi}_{R2}$ — токи, потокосцепления первой и второй ветвей ротора соответственно;

ω_m, ω_k — частота вращения ротора и частота вращения системы координат;

M — момент на валу машины;

T_L — момент нагрузки рабочего механизма, приведенный к валу.

J — момент инерции на валу машины, учитывающий инерционность как самой машины, так и приведенной к валу инерционности рабочего механизма;

$L_{S'}, L_{R1'}, L_{R2'}, L_m$ — индуктивности статора, ротора и взаимоиндуктивность между статором и ротором соответственно;

p_p — число пар полюсов.

Исключив из (1) $\vec{i}_{R1}, \vec{i}_{R2}$ и $\vec{\Psi}_S$, получим:

$$\begin{cases} \vec{u}_S = R_S \vec{i}_S + k_{iS} \frac{d\vec{i}_S}{dt} + k_{R2} \frac{d\vec{\Psi}_{R1}}{dt} + k_{R1} \frac{d\vec{\Psi}_{R2}}{dt} + \\ + j\omega_k (k_{iS} \vec{i}_S + k_{R2} \vec{\Psi}_{R1} + k_{R1} \vec{\Psi}_{R2}) \\ 0 = -k_{R2} R_{R1} \vec{i}_S + \frac{1}{T_{R1}} \vec{\Psi}_{R1} + \frac{d\vec{\Psi}_{R1}}{dt} - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \vec{\Psi}_{R2} + j(\omega_k - p_p \omega_m) \vec{\Psi}_{R1} \\ 0 = -k_{R1} R_{R2} \vec{i}_S + \frac{1}{T_{R2}} \vec{\Psi}_{R2} + \frac{d\vec{\Psi}_{R2}}{dt} - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \vec{\Psi}_{R1} + j(\omega_k - p_p \omega_m) \vec{\Psi}_{R2} \\ M = \frac{3}{2} p_p k_{R2} \text{Mod}(\vec{\Psi}_{R1} \times \vec{i}_S) + \frac{3}{2} p_p k_{R1} \text{Mod}(\vec{\Psi}_{R2} \times \vec{i}_S) \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{M - T_L}{J} \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $k_{R1} = \frac{L_{R1} L_m - L_m^2}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}$, $k_{R2} = \frac{L_{R2} L_m - L_m^2}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}$, $\sigma = L_{R1} L_{R2} - L_m^2$,

$k_{iS} = \frac{L_S L_{R1} L_{R2} - L_S L_m^2 - L_{R1} L_m^2 - L_{R2} L_m^2 + 2L_m^3}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}$ — безразмерные коэффициенты;

$T_{R1} = \frac{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}{R_{R1} L_{R2}}$, $T_{R2} = \frac{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}{R_{R2} L_{R1}}$ — постоянные времени ветвей ротора.

В неподвижной системе координат ($\omega_k = 0$) с вещественной и мнимой осями α и β соответственно, пространственные вектора принимают вид: $\vec{u}_S = u_{S\alpha} + j u_{S\beta}$, $\vec{i}_S = i_{S\alpha} + j i_{S\beta}$, $\vec{\Psi}_{R1} = \Psi_{R1\alpha} + j \Psi_{R1\beta}$, $\vec{\Psi}_{R2} = \Psi_{R2\alpha} + j \Psi_{R2\beta}$.

После разделения на мнимую и вещественную части система (2) примет следующий вид (3):

$$\begin{cases} u_{S\alpha} = R_S i_{S\alpha} + k_{iS} \frac{di_{S\alpha}}{dt} + k_{R2} \frac{d\Psi_{R1\alpha}}{dt} + k_{R1} \frac{d\Psi_{R2\alpha}}{dt} \\ u_{S\beta} = R_S i_{S\beta} + k_{iS} \frac{di_{S\beta}}{dt} + k_{R2} \frac{d\Psi_{R1\beta}}{dt} + k_{R1} \frac{d\Psi_{R2\beta}}{dt} \\ 0 = -k_{R2} R_{R1} i_{S\alpha} + \frac{1}{T_{R1}} \Psi_{R1\alpha} + \frac{d\Psi_{R1\alpha}}{dt} - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \Psi_{R2\alpha} + p_p \omega_m \Psi_{R1\beta} \\ 0 = -k_{R2} R_{R1} i_{S\beta} + \frac{1}{T_{R1}} \Psi_{R1\beta} + \frac{d\Psi_{R1\beta}}{dt} - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \Psi_{R2\beta} - p_p \omega_m \Psi_{R1\alpha} \\ 0 = -k_{R1} R_{R2} i_{S\alpha} + \frac{1}{T_{R2}} \Psi_{R2\alpha} + \frac{d\Psi_{R2\alpha}}{dt} - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \Psi_{R1\alpha} + p_p \omega_m \Psi_{R2\beta} \\ 0 = -k_{R1} R_{R2} i_{S\beta} + \frac{1}{T_{R2}} \Psi_{R2\beta} + \frac{d\Psi_{R2\beta}}{dt} - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \Psi_{R1\beta} - p_p \omega_m \Psi_{R2\alpha} \\ M = \frac{3}{2} p_p k_{R2} (\Psi_{R1\alpha} i_{S\beta} - \Psi_{R1\beta} i_{S\alpha}) + \frac{3}{2} p_p k_{R1} (\Psi_{R2\alpha} i_{S\beta} - \Psi_{R2\beta} i_{S\alpha}) \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{M - T_L}{J} \end{cases} \quad (3)$$

Система (3) уравнений в операторной форме имеет вид:

$$\begin{cases} u_{S\alpha} = R_S \left(\frac{k_{iS}}{R_S} p + 1 \right) i_{S\alpha} + k_{R2} p \Psi_{R1\alpha} + k_{R1} p \Psi_{R2\alpha} \\ u_{S\beta} = R_S \left(\frac{k_{iS}}{R_S} p + 1 \right) i_{S\beta} + k_{R2} p \Psi_{R1\beta} + k_{R1} p \Psi_{R2\beta} \\ 0 = -k_{R2} R_{R1} i_{S\alpha} + \frac{1}{T_{R1}} (T_{R1} p + 1) \Psi_{R1\alpha} - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \Psi_{R2\alpha} + p_p \omega_m \Psi_{R1\beta} \\ 0 = -k_{R2} R_{R1} i_{S\beta} + \frac{1}{T_{R1}} (T_{R1} p + 1) \Psi_{R1\beta} - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \Psi_{R2\beta} - p_p \omega_m \Psi_{R1\alpha} \\ 0 = -k_{R1} R_{R2} i_{S\alpha} + \frac{1}{T_{R2}} (T_{R2} p + 1) \Psi_{R2\alpha} - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \Psi_{R1\alpha} + p_p \omega_m \Psi_{R2\beta} \\ 0 = -k_{R1} R_{R2} i_{S\beta} + \frac{1}{T_{R2}} (T_{R2} p + 1) \Psi_{R2\beta} - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \Psi_{R1\beta} - p_p \omega_m \Psi_{R2\alpha} \\ M = \frac{3}{2} p_p k_{R2} (\Psi_{R1\alpha} i_{S\beta} - \Psi_{R1\beta} i_{S\alpha}) + \frac{3}{2} p_p k_{R1} (\Psi_{R2\alpha} i_{S\beta} - \Psi_{R2\beta} i_{S\alpha}) \\ \omega_m = \frac{M - T_L}{J p} \end{cases} \quad (4)$$

Для построения электромагнитной подсистемы наблюдателя необходимо в систему уравнений (4) ввести дополнительные слагаемые — скорректированные разницы между измеренными и определенными наблюдателем значениями составляющих тока статора (невязки).

Тогда получим следующую систему уравнений для электромагнитной подсистемы наблюдателя:

$$\begin{cases} R_S \left(\frac{k_{iS}}{R_S} p + 1 \right) \hat{i}_{S\alpha} = u_{S\alpha} - k_{R2} p \hat{\Psi}_{R1\alpha} - k_{R1} p \hat{\Psi}_{R2\alpha} + k_{Lis} \Delta \hat{i}_{S\alpha} \\ R_S \left(\frac{k_{iS}}{R_S} p + 1 \right) \hat{i}_{S\beta} = u_{S\beta} - k_{R2} p \hat{\Psi}_{R1\beta} - k_{R1} p \hat{\Psi}_{R2\beta} + k_{Lis} \Delta \hat{i}_{S\beta} \\ \frac{1}{T_{R1}} (T_{R1} p + 1) \hat{\Psi}_{R1\alpha} = k_{R2} R_{R1} \hat{i}_{S\alpha} + \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \hat{\Psi}_{R2\alpha} - p_p \hat{\omega}_m \hat{\Psi}_{R1\beta} \\ \frac{1}{T_{R1}} (T_{R1} p + 1) \hat{\Psi}_{R1\beta} = k_{R2} R_{R1} \hat{i}_{S\beta} + \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \hat{\Psi}_{R2\beta} + p_p \hat{\omega}_m \hat{\Psi}_{R1\alpha} \\ \frac{1}{T_{R2}} (T_{R2} p + 1) \hat{\Psi}_{R2\alpha} = k_{R1} R_{R2} \hat{i}_{S\alpha} + \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \hat{\Psi}_{R1\alpha} - p_p \hat{\omega}_m \hat{\Psi}_{R2\beta} \\ \frac{1}{T_{R2}} (T_{R2} p + 1) \hat{\Psi}_{R2\beta} = k_{R1} R_{R2} \hat{i}_{S\beta} + \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \hat{\Psi}_{R1\beta} + p_p \hat{\omega}_m \hat{\Psi}_{R2\alpha} \end{cases} \quad (5)$$

где $\hat{\omega}_m$ — оценка угловой скорости;

$\hat{i}_{S\alpha}, \hat{i}_{S\beta}, \hat{\Psi}_{R1\alpha}, \hat{\Psi}_{R1\beta}, \hat{\Psi}_{R2\alpha}, \hat{\Psi}_{R2\beta}$ — оценки проекций пространственных векторов тока статора и потоков сцеплений ротора соответственно;

$\Delta \hat{i}_{S\alpha} = i_{S\alpha} - \hat{i}_{S\alpha}$; $\Delta \hat{i}_{S\beta} = i_{S\beta} - \hat{i}_{S\beta}$ — невязки токов статора;

k_{Lis} — коэффициент усиления невязок тока наблюдателя.

Электромагнитная подсистема наблюдателя приведена на рис. 1.

Механическая подсистема наблюдателя определяется, главным образом, формированием переменной состояния момента нагрузки (6).

Данная переменная состояния образуется как алгебраическая сумма произведений невязок тока и соответствующих составляющих потоков сцепления ротора.

Полученное значение момента нагрузки обрабатывается пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором (ПИД-регулятор).

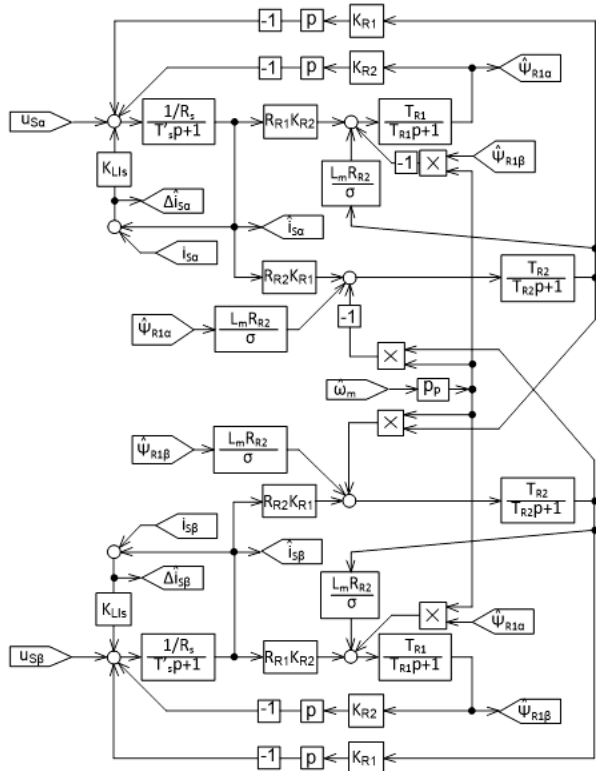


Рис. 1. Электромагнитная подсистема наблюдателя параметров состояния

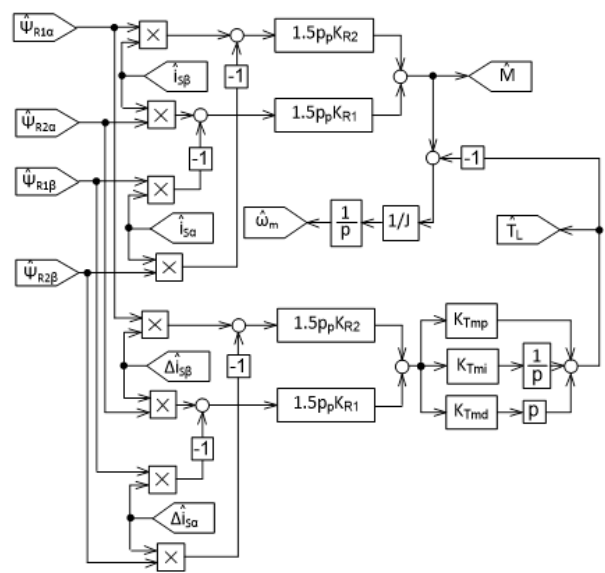


Рис. 2. Механическая подсистема наблюдателя параметров состояния

$$\begin{cases}
 \dot{M} = \frac{3}{2} p_p k_{R2} (\hat{\psi}_{R1\alpha} \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R1\beta} \hat{i}_{S\alpha}) + \frac{3}{2} p_p k_{R1} (\hat{\psi}_{R2\alpha} \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R2\beta} \hat{i}_{S\alpha}) \\
 T_{LP} = K_{Tmp} \left[k_{R2} (\hat{\psi}_{R1\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R1\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha}) + k_{R1} (\hat{\psi}_{R2\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R2\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha}) \right] \\
 T_{LI} = \frac{K_{Tmi}}{p} \left[k_{R2} (\hat{\psi}_{R1\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R1\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha}) + k_{R1} (\hat{\psi}_{R2\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R2\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha}) \right] \\
 T_{LD} = p K_{Tmd} \left[k_{R2} (\hat{\psi}_{R1\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R1\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha}) + k_{R1} (\hat{\psi}_{R2\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R2\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha}) \right] \\
 T_L = \frac{3}{2} p_p (T_{LP} + T_{LI} + T_{LD}) \\
 \omega_m = \frac{M - T_L}{Jp}
 \end{cases} \quad (6)$$

Структурная схема механической подсистемы наблюдателя момента представлена на рис. 2.

Таким образом, совмещая электромагнитную и механическую подсистемы (рис. 1–2) получим общую структуру наблюдателя параметров состояния асинхронного двигателя с двойной беличьей клеткой ротора.

Для исследования режимов работы наблюдателя в среде MatLab были разработаны математические модели асинхронного двигателя (мощностью 1500 Вт и синхронной скоростью вращения 3000 об/мин), а также модель определения момента нагрузки и других параметров состояния по значениям напряжения и тока статорной обмотки. Математическое описание моделей соответствует системам дифференциальных уравнений (4–6). Параметры переходного процесса определялись методом Рунге–Кутты четвертого порядка, с шагом численного интегрирования 1e-7с.

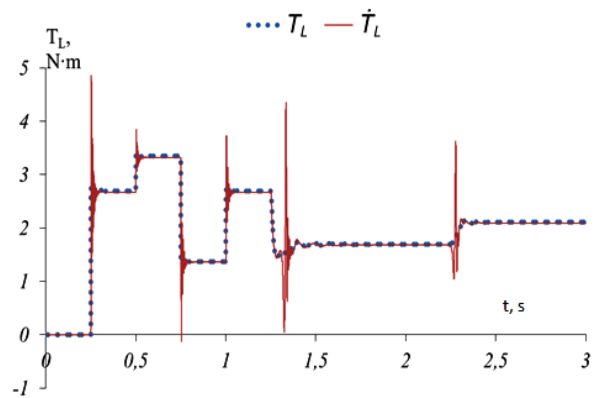


Рис. 3. Графики переходных процессов момента нагрузки асинхронного двигателя (T_L) и его оценки (\hat{T}_L).

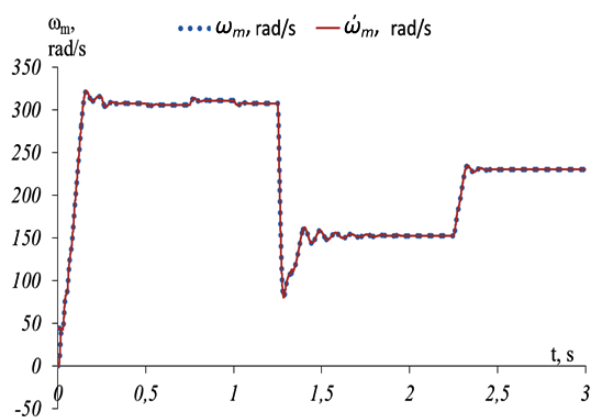


Рис. 4. Графики переходных процессов угловой скорости вращения ротора асинхронного двигателя (ω_m) и его оценки ($\hat{\omega}_m$)

В процессе исследования рассматривалось поведение параметров состояния динамической системы при различных входных воздействиях момента нагрузки (пуск на холостом ходу и наброс нагрузки), частоты и амплитуды питающего напряжения

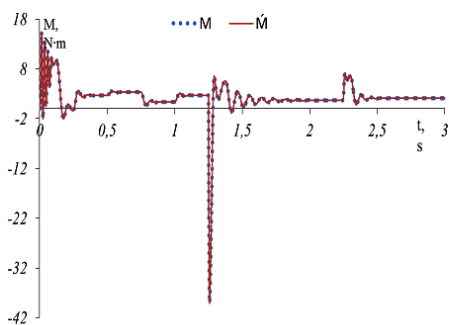


Рис. 5. Графики переходных процессов электромагнитного момента асинхронного двигателя (M) и его оценки (\hat{M})

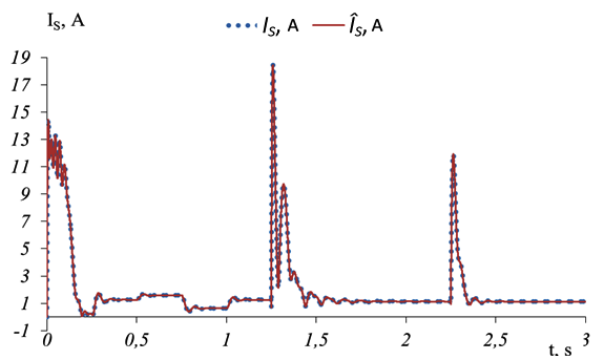


Рис. 6. Графики переходных процессов тока статора асинхронного двигателя (I_s) и его оценки (\hat{I}_s)

(в момент времени 1,25 с — уменьшение в 2 раза частоты и амплитуды напряжения). Характер механической характеристики — вентиляторный, то есть имеет место квадратичная зависимость момента нагрузки от скорости вращения ротора.

На рис. 3–6 представлены совмещенные графические зависимости переходных процессов асинхронного двигателя и наблюдателя. Как видно на рис. 5–7, имеет место практически полное совпадение между характеристиками объекта и наблюдателя. Данный факт говорит о принципиальной возможности применения предложенного наблюдателя параметров состояния асинхронных электродвигателей с двойной беличьей клеткой в системах управления электроприводов.

С другой стороны, на рис. 4 имеются заметные расхождения между динамическими характеристиками объекта и наблюдателя. Проанализировав переходный процесс оценки момента нагрузки, можно сделать вывод о целесообразности применения пассивного фильтра. В качестве пассивного фильтра можно использовать аperiодическое звено первого порядка со следующей передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{k_{FT}}{T_{FT}p + 1}, \quad (7)$$

где k_{FT} — пропорциональный коэффициент фильтра;

T_{FT} — постоянная времени фильтра.

После применения пассивного фильтра получим улучшенные характеристики для наблюдателя момента нагрузки (рис. 7).

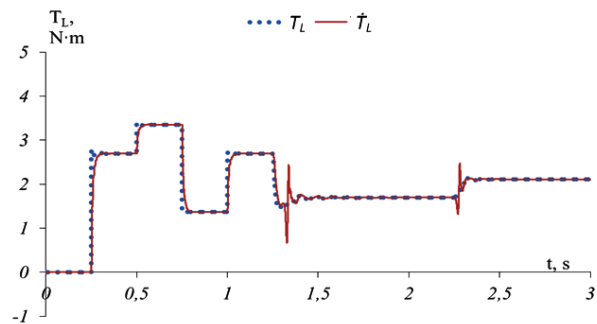


Рис. 7. Совмещенные графики переходных процессов момента нагрузки асинхронного двигателя (T_L) и его оценки (\hat{T}_L) с применением пассивного фильтра

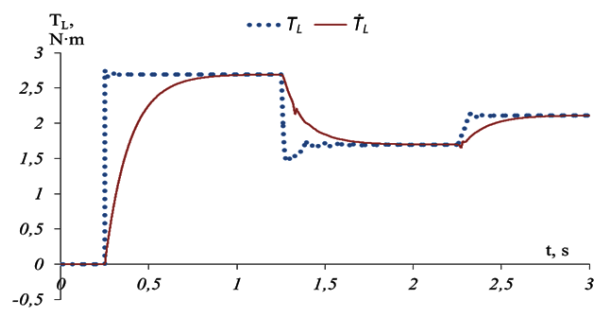


Рис. 8. Совмещенные графики переходных процессов момента нагрузки асинхронного двигателя (T_L) и его оценки (\hat{T}_L) с применением пассивного фильтра и увеличенной T_{FT}

Из графиков, представленных на рис. 5, видно, что при изменении только задающего момента нагрузки система «наблюдатель — фильтр» ведет себя вполне корректно и показывает полную работоспособность. Однако при одновременном изменении задающего момента нагрузки и величин амплитуды и частоты питающего напряжения в моменты времени приблизительно в 1,75 с и в 2,25 с имеется некорректное оценивание величины момента нагрузки. Данную нестабильность поведения можно устранить, увеличив постоянную времени фильтра ($T_{FT} = 13,76$ с), если не применяются высокие требования [10, 11] по быстродействию системы управления. Результаты применения наблюдателя с увеличенной постоянной времени фильтра представлены на рис. 8.

Разработанный наблюдатель момента нагрузки и параметров состояния асинхронного электродвигателя позволяет учитывать конструктивные особенности ротора, такие как двойная беличья клетка или глубокие пазы.

Проведенные численные эксперименты показали работоспособность наблюдателя полного порядка на основе алгоритмов идентификации Люенберга. Для повышения качества оценки момента нагрузки был применен пассивный фильтр.

Разработанный наблюдатель момента нагрузки и угловой скорости ротора можно применить к широкому кругу объектов управления с асинхронными двигателями.

На основе использования наблюдателей такого класса возможно построение систем бездатчикового управления асинхронными электроприводами различного назначения.

1. Афанасьев, К. С. Наблюдатель полного вектора состояния и момента нагрузки асинхронного электродвигателя / К. С. Афанасьев, А. С. Глазырин // Электротехнические комплексы и системы управления. — 2013. — № 4. — С. 24–30.
2. M. K. Metwally. Sensorless speed control of 4-switch three phase inverter fed induction motor drives at very low and zero speed. Alexandria Engineering Journal. Vol. 52, Issue 3, September 2013, P. 327–336. Doi:10.1016/j.aej.2013.05.003.
3. Vas, Peter. Sensorless vector and direct torque control / Peter Vas. — Oxford, UK. : Oxford University Press, 1998. — 768 P. — ISBN 0198564651.
4. D. Arun Dominic, Thanga Raj Chelliah. Analysis of field-oriented controlled induction motor drives under sensor faults and an overview of sensorless schemes. ISA Transactions. Vol. 53, Issue 5, September 2014, P. 1680–1694. Doi:10.1016/j.isatra.2014.04.008.
5. D. Picovici, D. Levy, A. E. Mahdi, T. Coffey. The cascade induction machine: a reliable and controllable motor or generator. Electric Power Systems Research. Vol. 68, Issue 3, March 2004, P. 193–207. Doi:10.1016/j.epsr.2003.06.008.
6. Mabrouk Jouili, Kamel Jarray, Yassine Koubaa, Mohamed Boussak. Luenberger state observer for speed sensorless ISFOC induction motor drives. Electric Power Systems Research. Vol. 89, 2012, P. 139–147. Doi:10.1016/j.epsr.2012.02.014.
7. George Ellis. Chapter 18 – Using the Luenberger Observer in Motion Control. Control System Design Guide (Third Edition), 2004, P. 389–411. Doi:10.1016/B978-012237461-6/50019-9.

8. Zafer Aydogmus, Omur Aydogmus. A comparison of artificial neural network and extended Kalman filter based sensorless speed estimation. Measurement, Vol. 63, March 2015, P. 152–158. Doi:10.1016/j.measurement.2014.12.010.

9. Francesco Alonge, Filippo D'Ippolito, Adriano Fagiolini, Antonino Sferlazza. Extended complex Kalman filter for sensorless control of an induction motor. Control Engineering Practice, Vol. 27, May 2014, P. 1–10. Doi:10.1016/j.conengprac.2014.02.007.

10. Adel Khedher, Mohamed Faouzi Mimouni. Sensorless-adaptive DTC of double star induction motor. Energy Conversion and Management, Vol. 51, Issue 12, December 2010, P. 2878–2892. Doi:10.1016/j.enconman.2010.06.028.

11. S. Hadj Sand, F. M'Sahli, M.F. Mimouni, M. Farza. Adaptive high gain observer based output feedback predictive controller for induction motors. Computers & Electrical Engineering, Vol. 39, Issue 2, February 2013, P. 151–163. Doi:10.1016/j.compeleceng.2012.12.016.

ЛЫСЕНКО Олег Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры электрической техники. Адрес для переписки: deolas@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.06.2016 г.

© О. А. Лысенко

УДК 621.311

В. А. ОЩЕПКОВ
А. О. ШЕПЕЛЕВ
Н. С. КАПИТОНОВ

Омский государственный
технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕТЯХ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ

Техническое состояние электрических сетей значительно влияет на экономические показатели передачи электроэнергии по сетям. На экономичность передачи также влияет режим работы нейтрали. В данной статье рассматривается распределительная сеть, работающая с компенсацией емкостного тока. Определены уровни перенапряжения, возникающие на элементах электрической сети, а также емкостной ток сети и ток реактора.

Ключевые слова: моделирование переходных процессов, сеть с компенсацией емкостных токов, однофазное замыкание на землю, дугогасительный реактор.

В связи тем, что сети с изолированной нейтралью в России имеют большое распространение, вопрос о перенапряжениях, возникающих при замыканиях фазы на землю, является актуальным, несмотря на многочисленные работы, посвященные этому вопросу [1–3]. Особенно остро стоит вопрос с перенапряжениями при возникновении дуговых явлений, связанных с большими токами замыкания

на землю. Вопросы имитационного моделирования с учетом дуговых явлений и будет рассматриваться в этой статье.

Имитационное моделирование переходных процессов, возникающих в распределительных сетях электроэнергетических систем, позволяет получить достаточно достоверную картину изменения токов и напряжений на элементах сети

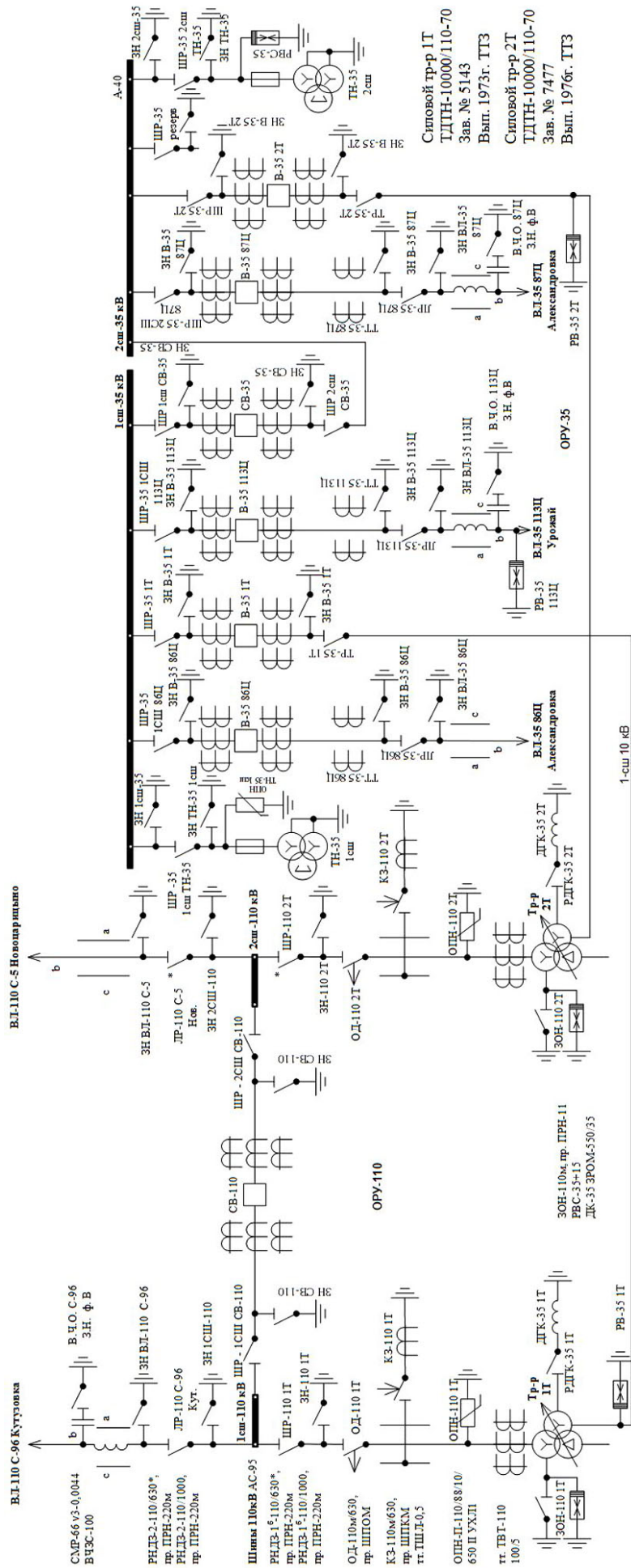


Рис. 1. Однолинейная схема подстанции «Шербакульская»

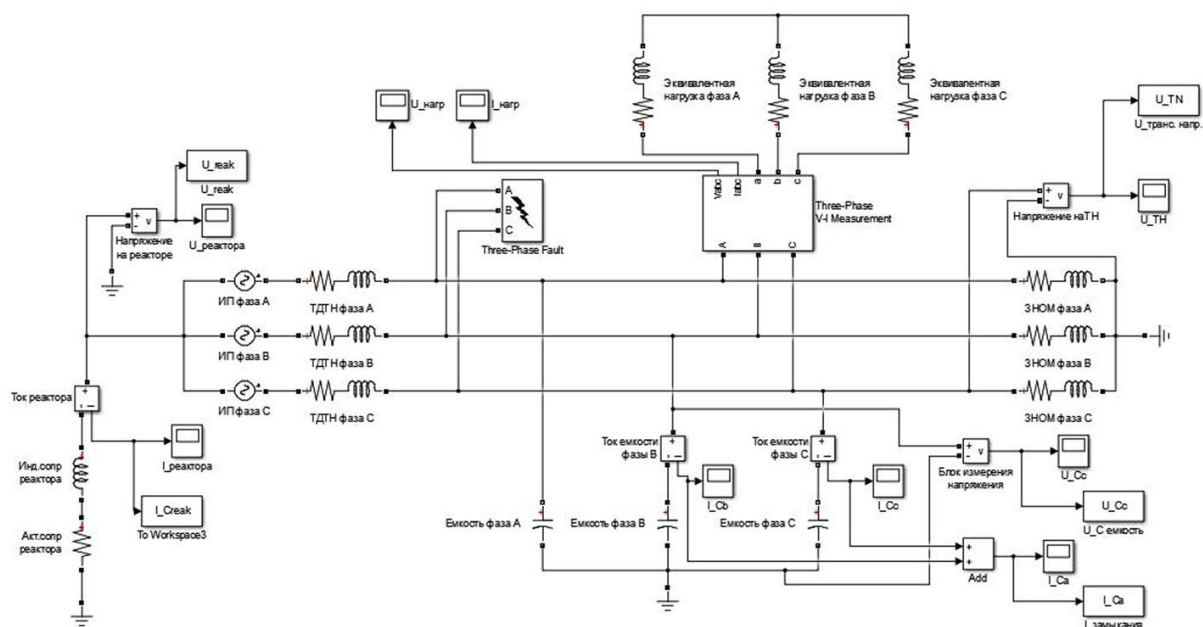


Рис. 2. Имитационная модель подстанции «Шербакульская» 35 кВ с отходящими линиями и установленным дугогасительным реактором

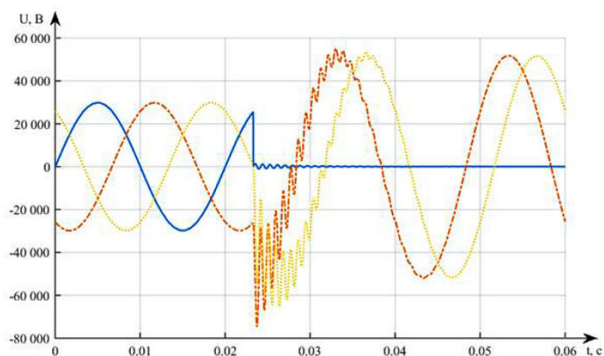


Рис. 3. Напряжения на эквивалентной нагрузке при ОЗЗ

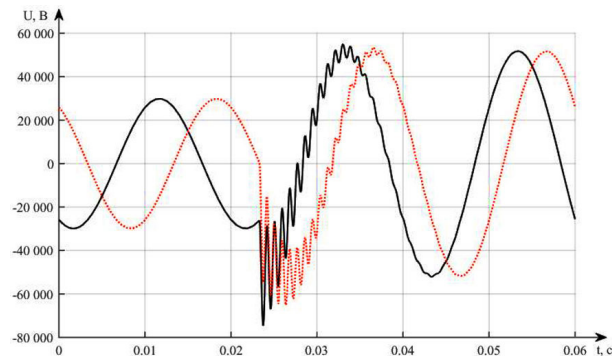


Рис. 4. Напряжения на трансформаторе напряжения при ОЗЗ

при различных начальных условиях. В распределительных сетях, работающих с изолированной нейтралью при однофазном замыкании на землю, возникают недопустимые уровни перенапряжения с точки зрения эксплуатации сетей. В течение переходного процесса, возникающего при замыкании фазы на землю, который обычно длится больше 1 секунды, на высоковольтных обмотках трансформатора напряжения возникают биения напряжения. Такие биения возникают и на секциях шин, питающей подстанции, а также на высоковольтных обмотках трансформатора собственных нужд подстанции. Данные процессы могут привести к ложному срабатыванию релейной защиты, отключению цепей управления на самой подстанции, а также к выходу из строя трансформаторов напряжения [4]. Для устойчивого горения дуги необходимы достаточно большие уровни емкостного тока электрической сети. При превышении значений, указанных в правилах устройства электроустановок [5], необходима компенсация емкостных токов. Компенсация осуществляется с помощью применения дугогасящих реакторов. При однофазном замыкании на землю в сети с компенсацией емкостного тока реактор начинает выдавать в сеть ток, который

отстает от напряжения на угол примерно равный 90 градусам. Исследование проводилось на подстанции «Шербакульская» 110/35/10 кВ (МРСК Сибири-Омскэнерго), однолинейная схема подстанции которой представлена на рис. 1. В данном исследовании интерес представляли процессы, происходящие в сети напряжением 35 кВ.

В исследуемую схему были введены воздушные линии электропередач «Урожай», «Александровка». Далее были определены параметры схемы замещения. В схему замещения вошли: источник питания (питающий трансформатор ТДТН-10000/110), трансформатор напряжения (ЗНОМ-35), эквивалентная емкость присоединений, а также эквивалентная нагрузка. Эквивалентная емкость присоединений определялась с помощью метода зеркальных отображений, представленного в [6], а также на основе данных, используемых в [3]. Эквивалентная нагрузка представлена только отходящими линиями, указанными выше.

Имитационное моделирование переходного процесса при замыкании фазы на землю было осуществлено в программном продукте Matlab SimPower System. При моделировании в среде Matlab был введен ряд допущений:

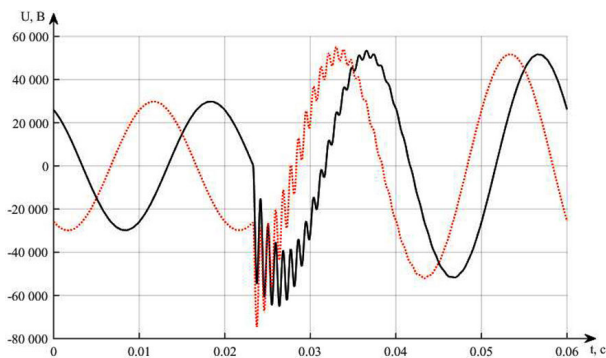


Рис. 5. Напряжения на емкостях присоединений (ОЗЗ)

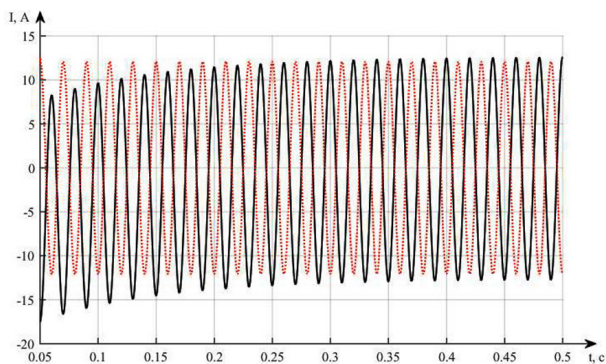


Рис. 6. Графики токов:

- а) пунктирная линия — емкостной ток сети 35 кВ;
б) сплошная линия — индуктивный ток реактора

— не учитывались междуфазные емкости и индуктивности;

— поскольку линии сетей имеют распределенные постоянные, переходные процессы в них при замыканиях на землю имеют волновой характер. Однако вполне приемлемые результаты, подтверждаемые осциллографическими измерениями в действующих сетях, получаются при рассмотрении переходного процесса в упрощенной схеме замыкания на землю [7]. Поэтому распределенностью параметрами линий можно пренебречь.

— не учитываются емкость силовых трансформаторов, шин и межвитковая емкость ТН ввиду их малости;

— обмотка трансформатора напряжения является линейной цепью;

— в диапазоне частот от 50 Гц до 125 кГц индуктивность обмотки измерительного трансформатора напряжения остается практически постоянной.

В соответствии с выше указанными допущениями в среде SimPowerSystem была построена имитационная модель электрической сети при однофазном замыкании на землю. Соответствующая модель представлена на рис. 2. Однофазное замыкание на землю осуществляется с помощью блока Three-Phase Fault.

Подробные характеристики данного имитационного блока представлены в [8]. Картина изменения напряжения на эквивалентной нагрузке при однофазном замыкании представлена на рис. 3. Напряжения на трансформаторе напряжения представлены на рис. 4. Напряжения на эквивалентной емкости присоединений при ОЗЗ представлены на рис. 5.

Наблюдаемые биения напряжений могут привести к ложному срабатыванию защит на подстанции, а также могут привести к вынужденному отключению цепей управления. Присутствующие перенапряжения при частом и длительном воздействии могут привести к выходу из строя трансформаторов напряжения, а также сократить их срок службы до 5 лет [4].

Емкостной ток электрической сети и ток реактора представлены на рис. 6.

Как видно из рис. 6, индуктивный ток реактора полностью компенсирует емкостной ток электрической сети. В соответствии с [9] реактор должен настраиваться на фазную емкость с рассогласованием до 0,2. Поэтому индуктивный ток несколько превосходит емкостной ток сети.

Закключение. Имитационное моделирование режимов работы электрических сетей позволяет достаточно наглядно представить переходные процессы, происходящие при однофазном замыкании на землю.

В распределительных сетях дефекты изоляции не приводят к ухудшению условий электроснабжения потребителей, но существующий дефект требует устранения, так как оборудование находится под повышенным напряжением, особенно при дуговых замыканиях.

При дуговых замыканиях перенапряжения достаточно значительны и длительны и представляют опасность для ослабленной изоляции электрооборудования.

Библиографический список

1. Определение эффективности компенсации емкостных токов однофазного замыкания на землю дугогасительными реакторами различных конструкций на экспериментальном стенде / Д. А. Матвеев и [др.] // Электротехника. — 2015. — № 8. — С. 59–64.
2. Владимиров, Л. В. Моделирование режима однофазного замыкания на землю в распределительной электрической сети с изолированной нейтралью / Л. В. Владимиров, А. А. Вырва, В. А. Ощепков, А. П. Попов, В. И. Суриков // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2012. — № 1 (107). — С. 197–201.
3. Сафонов, Д. Г. Определение напряжения нулевой последовательности с учетом естественной несимметрии параметров воздушной линии электропередачи / Д. Г. Сафонов, В. А. Ощепков, С. С. Гиршин // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2016. — № 1 (145). — С. 58–60.
4. Нагорный, П. Д. Измерительные трансформаторы напряжения и контроль изоляции в сетях 6–35 кВ / П. Д. Нагорный // Промышленная энергетика. — 2002. — № 3 — С. 23–25.
5. Правила устройства электроустановок : нормативно-техн. материал. — 6-е изд с изм., испр. и доп. — СПб. : ДЕАН, 1999. — 926 с. — ISBN 5-88977-070-5.
6. Теоретические основы электротехники : учеб. для вузов. В 3 т. / К. С. Демирчан и [др.]. — 4-е изд., доп. — СПб. : Питер, 2006. — Т. 3. — 377 с. — ISBN 5947235226, 5947236206.
7. Лихачев, Ф. А. Замыкание на землю в сетях с изолированной и с компенсацией емкостных токов / Ф. А. Лихачев. — М. : Энергия, 1971. — 152 с.
8. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab SimPowerSystem и Simulink / И. В. Черных. — М. : ДМК Пресс, 2007. — 288 с. — ISBN 5-94074-395-1.
9. Сирота, И. М. Режимы нейтрали электрических сетей : моногр. / И. М. Сирота, С. Н. Кисленко, А. М. Михайлов. — Киев : Наукова Думка, 1985. — 264 с.

ОЩЕПКОВ Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий. Адрес для переписки: energoowa@mail.ru
ШЕПЕЛЕВ Александр Олегович, ассистент кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

КАПИТОНОВ Никита Сергеевич, студент гр. Э-121 энергетического института. Адрес для переписки: alexshepelev93@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20.06.2016 г.
© В. А. Ощепков, А. О. Шепелев, Н. С. Капитонов

УДК 621.316.722.076.12

**М. С. БАЛАБАНОВ
Р. Н. ХАМИТОВ**

Омский государственный
технический университет

МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА FACTS-УСТРОЙСТВ НА ПРИМЕРЕ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

С целью оптимизации выбора FACTS-устройств для промышленных и сетевых объектов разработано программное обеспечение для ЭВМ. В статье презентуются результаты апробации разработанной методологии по определению оптимального типа FACTS-устройства для сетевых и промышленных объектов. Имитационное моделирование внедрения различных FACTS-устройств на ферросплавном предприятии было выполнено в специализированном ПО DigSILENT (Германия). Доказано, что фильтро-компенсирующее устройство является оптимальным типом FACTS-устройства для работы в составе системы электроснабжения ферросплавных печей.

Ключевые слова: FACTS-устройства, ферросплавные печи, фильтро-компенсирующее устройство, синхронный компенсатор, батареи статических конденсаторов, статический тиристорный компенсатор, активный фильтр.

В настоящее время в мире активно реализуются проекты Smart Grid («Умные Сети»). Базовым кластером данной архитектуры являются FACTS-устройства обеспечивающие уровень их интеллектуализации [1]. Задача по выполнению анализа существующих FACTS-устройств с разработкой методики выбора оптимального типа FACTS-устройства для конкретного узла сети является актуальной в ходе решения практических задач [2].

Для апробации методологии выбора типа FACTS-устройства выбрано ферросплавное производство. В мире наблюдается жесткая конкуренция между ферросплавной отраслью различных стран. Сдача лидирующих позиций производителями происходит, как правило, по основному технико-экономическому показателю — расходу электроэнергии на тонну готовой продукции (кВтч/т) [3, 4]. В этой связи повысить конкурентоспособность отечественных металлургов может исключительно комплексная модернизация с внедрением современного энергосберегающего оборудования — FACTS-устройств [5]. Если ранее энергоснабжающие организации акцентировали внимание потребителей на необходимости компенсации реактивной мощности, то сейчас дополнительно требуется устранять высшие гармонические составляющие, а далее отслеживать и весь спектр искажений в сети со стороны потребителей [6]. Были исследованы технические характеристики современ-

ных FACTS-устройств по способности приведения показателей качества электроэнергии к ГОСТ 32144-2013; оценены основные эксплуатационные показатели линейки оборудования; изучены характеристики программных комплексов, в которых наиболее удачно реализованы возможности для расчета FACTS-устройств: RastrWin, EasyPower, DigSILENT Power Factory, APM CP3A, ANSYS Maxwell и другие [2].

В табл. 1 детально рассмотрен функционал ПО DigSILENT Power Factory с целью имитационного моделирования FACTS-устройств на примере схемы ОСП «ЮФЗ» (ОАО «Кузнецкие ферросплавы», Обособленное структурное подразделение «Юргинский ферросплавный завод», г. Юрга, Кемеровская область, Россия) [2].

Основная нагрузка предприятия «ЮФЗ» — это четыре ферросплавные печи (ФСП).

В рамках программы по построению системы автоматического управления напряжением и реактивной мощностью энергорайона энергоснабжающей организацией было выдвинуто требование к предприятию об обязательном внедрении на «ЮФЗ» FACTS-устройств, обеспечивающих:

— $\operatorname{tg} \varphi \leq 0,29$ ($\cos \varphi = 0,96$) по напряжению 110 кВ;

— уменьшение гармонических искажений тока и напряжения в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013.

Набор стандартных моделей FACTS-устройств, входящих в состав ПО DigSILENT Power Factory (по состоянию на 2015 г.)

Наименование	Обозначение	Наличие модели в DigSilent	Замещающая модель
Устройства компенсации реактивной мощности			
Батареи статических конденсаторов	БСК	Shunt/Filter C	нет
Управляемые батареи статических конденсаторов	УБСК	Shunt/Filter C	нет
Тиристорно управляемые батареи статических конденсаторов	ТУБСК	Shunt/Filter C	нет
Фильтро-компенсирующее устройство	ФКУ	Shunt/Filter RLC	нет
Управляемое фильтро-компенсирующее устройство	УФКУ	Shunt/Filter RLC	нет
Синхронный компенсатор	СК	Synchronous Machine	нет
Тиристорно-реакторная группа	ТРГ	Static Var System	нет
Шунтирующий реактор	ШР	Shunt/Filter RLC	нет
Реакторные группы, коммутируемые выключателями	ВРГ	Shunt/Filter RL	нет
Статический тиристорный компенсатор	СТК	нет	Static Var System + Shunt/Filter RLC
Управляемый шунтирующий реактор с подмагничиванием	УШР	Static Var System	нет
Синхронный статический компенсатор реактивной мощности на базе преобразователя напряжения	СТАТКОМ	нет	Static Generator (возможно только регулирование напряжения)
Асинхронизированный синхронный компенсатор, в том числе с маховиком	АСК	Doubly-Fed Induction Machine	нет
Синхронный статический продольный компенсатор реактивной мощности на базе преобразователя напряжения	ССПК	нет	нет
Устройства регулирования параметров сети			
Неуправляемые устройства продольной компенсации	УПК	Series Capacitor	нет
Управляемые устройства продольной компенсации	УУПК	нет	нет
Фазосдвигающий трансформатор, управляемый тиристорами / фазоповоротное устройство	ФПУ	нет	нет
Фазовращающийся трансформатор	ФВТ	нет	нет
Электрическое торможение	ЭТ	нет	нет
Преобразователи вида тока			
Вставка постоянного тока на обычном тиристоре	ВПТ	PWM Converter / 1 DC Converter	нет
Вставка постоянного тока на основе СТАТКОМов	ВПТН	нет, близкая модель PWM Converter	нет
Асинхронизированный синхронный электромеханический преобразователь частоты	АС ЭМПЧ	нет	нет
Устройства продольно-поперечного регулирования			
Объединенный (параллельно-последовательный) регулятор потоков мощности (на базе двух СТАТКОМов либо двух АСК, соединенных параллельно-последовательно)	ОРПМ	нет, близкая модель PWM Converter	нет
Устройства ограничения токов короткого замыкания			
Токоограничивающие устройства	ТОУ	Series Reactor	нет

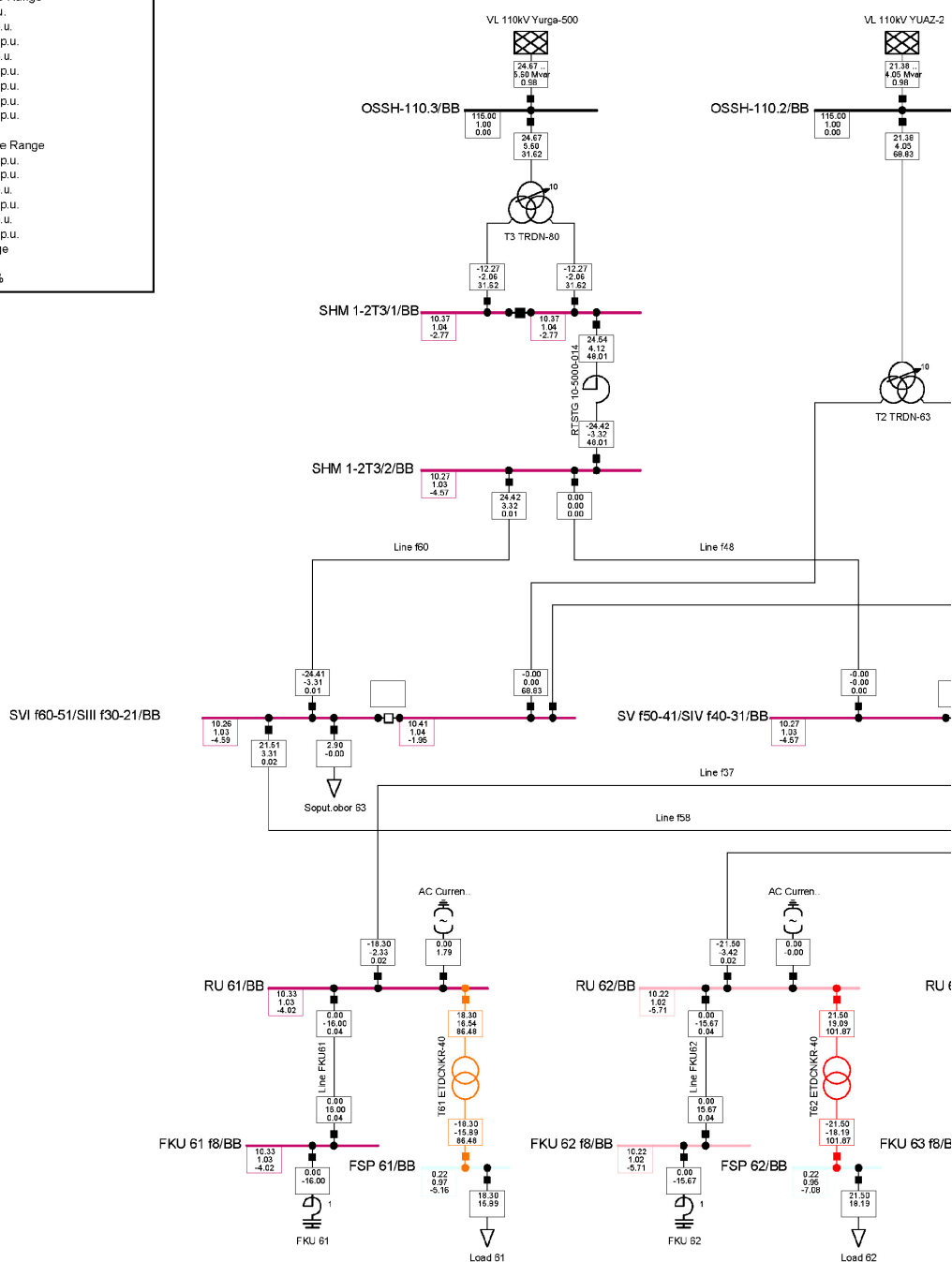
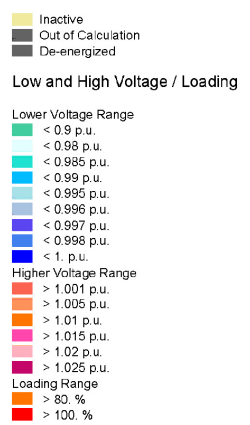


Рис. 1. Пример имитационной модели ФКУ. Фрагмент схемы

С целью построения системы автоматического управления напряжением и реактивной мощностью (САУ НРМ) энергорайона необходимо было определить параметры качества электроэнергии на питающей подстанции и на фидерах ФСП. Особое внимание было уделено выбору типа анализатора качества электроэнергии для выполнения контрольных замеров [2]. В ходе моделирования различных типов FACTS-устройств, рассматриваемых в качестве потенциально подходящих для использования на «ЮФЗ», в ПО DigSILENT были выполнены следующие расчеты [2]:

— расчет потокораспределения существующей схемы;

— расчет потокораспределения схемы после установки четырех FACTS-устройств общей мощностью 60 МВАР;

— расчет потерь в сети после установки четырех FACTS-устройств;

— анализ гармонических искажений;

— расчеты переходных процессов.

Пример имитационной модели ФКУ представлен на рис. 1, где цветом указаны различные уровни напряжения.

Более подробно с графическим изображением используемыми и получаемыми в ходе имитационного моделирования, можно ознакомиться в монографии [2].

Результаты моделирования в ПО DigSILENT с использованием стандартных моделей

FACTS-устройства						
Без FACTS	ФКУ	СК	БСК	СТК	АФ	
Напряжение, кВ						
9,46 – 9,72	10,22 – 10,33	10,19 – 10,29	10,22 – 10,33	10,22 – 10,33	10,19 – 10,29	
Максимальный уровень гармонического искажения по четырем печам. Гармоники с 2 по 13						
2	0,3389	0,8007	0,2707	0,3272	0,5567	н.д.
3	1,5826	0,0018	1,1444	3,6455	0,0023	н.д.
4	0,5625	0,2461	0,3694	3,6269	0,2697	н.д.
5	0,7500	0,3770	0,5873	1,4377	0,9604	н.д.
6	0,6153	0,3514	0,3945	0,8105	0,9529	н.д.
7	0,5896	0,3490	0,4462	1,8461	0,7989	н.д.
8	0,4059	0,2454	0,3265	0,2571	0,7216	н.д.
9	0,3167	0,2060	0,2400	0,1136	0,4184	н.д.
10	0,2476	0,1533	0,1877	0,0604	0,3869	н.д.
11	0,2745	0,1712	0,2212	0,0550	0,4484	н.д.
12	0,2053	0,1287	0,1579	0,0383	0,4325	н.д.
13	0,2213	0,1382	0,1688	0,0292	0,3629	н.д.
н.д.	Настраивается на определенную частоту, гармонические искажения которой необходимо устранить	Усиливает существующие гармонические искажения	Вырабатывает гармонические искажения	В DigSILENT нет возможности анализа гармонического состава данного типа устройства	н.д.	
Импеданс						
н.д.	Величина сопротивления системы при установке ФКУ незначительна, на 3-й гармонике 8,9 Ом.	Величина сопротивления системы при установке СК не изменится.	Величина сопротивления системы при установке БСК изменится значительно. На 4-й гармонике 17,4 Ом и на 7-й гармонике 10,8 Ом.	Величина сопротивления системы при установке СТК изменится незначительно, на 3-й гармонике 8,9 Ом.	В DigSILENT нет возможности анализа данного типа устройства.	

Моделирование показало, что суммарная мощность FACTS-устройств должна составлять 60 МВАр (4x15 МВАр). Уменьшение мощности FACTS-устройства для каждой ФСП на 0,23 МВАр вызывает изменение коэффициента реактивной мощности на рассматриваемом объекте — $\text{tg}\varphi$ на 0,01 [2].

Согласно методологии, реализованной автором в виде ПО «Определение типа FACTS-устройств» [7], предпочтительными FACTS-устройствами для внедрения на «ЮФЗ» являются: АФ, СК, УФКУ, ФКУ. Подробно вопрос обоснования выбора FACTS-устройств представлен в монографии [2]. Результаты эффективности внедрения отмеченных FACTS-устройств приведены в табл. 2 [2]. Дополнительно к перечисленным рассмотрены БСК (для сравнения работы КБ с фильтром и без) и СТК (как устройство близкое по функционалу к АФ).

В ПО DigSILENT СТК представлен моделью Static Var Compensation + Shunt/Filter R-L-C. Дан-

ные базовые модели отражают основные функции СТК — регулирование напряжения на шинах, генерация токов ВГС, фильтрация токов ВГС.

В связи с тем, что АФ обладает максимальным быстродействием, среди всех прочих FACTS-устройств, создание его модели является достаточно сложным процессом. По состоянию на 2015 г. типовой модели АФ в ПО DigSILENT и прочих программных продуктах авторами не обнаружено. В настоящее время предпринимаются попытки создания имитационной модели активного фильтра [8, 9]. Согласно рекомендациям разработчиков ПО DigSILENT, с целью имитации АФ применена модель Static Generator, которая отражает функцию регулировки напряжения.

Важным этапом в ходе принятия решения о типе FACTS-устройств является анализ импеданса сети, который связывает ток и напряжение. При рассмотрении импеданса используется комплексное

представление гармонических сигналов, поскольку именно оно позволяет одновременно учитывать и амплитудные, и фазовые характеристики сигналов и систем. По величине сопротивления сети на разных гармониках можно прогнозировать увеличение тока и изменение его гармонического состава в резонансном контуре, что приводит к возрастанию тепловых потерь в обмотках трансформатора и может приводить к разрушению конденсаторных батарей.

На основании величин импеданса установлено, что в случае применения БСК возможно возникновение опасных резонансных явлений.

Из табл. 2 следует, что задачу повышения напряжения выполняют все устройства (АФ, СК, ФКУ). Гармонические искажения сети усиливаются при установке БСК и СТК (АФ компенсирует все искажения). Наибольшее снижение 3-й, 4-й, 5-й и 8-й гармоник дает установка ФКУ, а наибольшее снижение 2-й, 6-й, 7-й, 9-й и далее дает установка СК.

Имитационное моделирование с использованием ПО DigSILENT систем электроснабжения с различными FACTS-устройствами и исследование режимов работы системы электроснабжения ферросплавных производств ОСП «ЮФЗ», в т.ч. и при различных узлах подключения FACTS-устройств показало, что внедрение АФ для ферросплавного производства имеет необоснованно высокий срок окупаемости (отсутствие рентабельности). Внедрение СК позволило бы успешно решить задачи ТЗ, но стоимость, масса, габаритные размеры оборудования ставят под сомнение рентабельность проекта (даже на основании укрупненного расчета на примере модели КС 15000-11 выпускаемой «Уралмашзавод», г. Екатеринбург в 1960-х годах).

Опыт автора по обследованию ферросплавных заводов на территории СНГ показывает, что в составе электрической схемы питания ФСП FACTS-устройства либо отсутствуют, либо применяются батареи статических конденсаторов (БСК). В сети с ФСП всегда присутствуют высшие гармонические составляющие (ВГС). Установка БСК без реакторов, т.е. без защиты конденсаторных батарей от резонанса на одной из частот ВГС, приводит к преждевременному выходу их из строя. Следует отметить, что негативному влиянию ВГС подвержены все современные конструкции БСК, как отечественного, так и импортного производства [10].

Общие потери активной мощности в сети (согласно расчетам, проведенным в DigSILENT) при установке ФКУ составят — 860 кВт, при установке СК — 950 кВт.

Таким образом, наиболее оптимальным типом FACTS-устройства для ФСП следует считать ФКУ.

Ввод в эксплуатацию ФКУ на «ЮФЗ» позволил стабилизировать режимы горения дуги, уменьшить износ футеровки, уменьшить расход электродов, стабилизировать и поднять напряжение, повысить производительность печей. Основным показателем эффективности работы ферросплавных печей — $\text{tg}\phi$ до внедрения ФКУ составлял в среднем (по 29 печам холдинга «ЧЭМК») значение 0,75. По факту ввода в эксплуатацию ФКУ значение $\text{tg}\phi$ в среднем по эксплуатируемым комплексам печь + ФКУ составляет 0,1.

В проводимых холдингом конкурсах среди ферросплавных печей «ЧЭМК», «КФ», «ЮФЗ» печи

Юргинского завода в период работы с ФКУ уверенно показывают наилучшие результаты по производительности и расходу электроэнергии на тонну продукции, что является подтверждением положительного результата апробации разработанных имитационных моделей FACTS-устройств и методологии их выбора.

Библиографический список

1. Gabriel M. A. Visions for a sustainable energy future. Lilburn, GA: Fairmont Press, 2008. P. 252.
2. Балабанов, М. С. FACTS-устройства. Выбор при проектировании электрооборудования предприятий : моногр. / М. С. Балабанов, Р. Н. Хамитов. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. — 184 с.
3. Steenkamp, J. D., Basson, J. The manganese ferroalloys industry in southern Africa // Journal of the Southern African of mining and metallurgy, Vol. 113, R. 8, 2013. P. 667–676.
4. Kamei, Y., Miyazaki, T., Yamaoka, H. Production test of high-carbon ferromanganese using a shaft type furnace with coke packed-bed injected with highly oxygen enriched air and a large quantity of pulverized coal // Tetsu to hagane-journal of the iron and steel institute of Japan, Vol. 79, R. 4, 1993. P. 449–455.
5. Барсукова, Н. Рынок ферросплавов меняет фаворитов / Н. Барсукова. — Режим доступа: <http://www.infogeo.ru/metalls/press/?act=show&rev=1133#ixzz46dBl3fmC> (дата обращения: 23.04.2016).
6. Боровиков, В. С. О необходимости включения добавочных потерь от высших гармоник тока в технологические потери при передаче электрической энергии / В. С. Боровиков, Н. Н. Харлов, Т. Б. Акимжанов // Известия Томского политехнического ун-та. — 2013. — Т. 322. — № 4. — С 91–93.
7. Свидетельство № 2015617896 РФ. Определение типа FACTS-устройств V 2.0 / М. С. Балабанов ; заявитель и правообладатель ООО «Международная Энергосберегающая Корпорация» ; заявл. 01.06.15 ; зарегистр. 24.07.2015. — 1 с.
8. Ситников, В. Ф. Совершенствование методов и средств управления режимами электроэнергетических систем на основе элементов гибких электропередач (FACTS) : дис. ... д-ра техн. наук / Владимир Федорович Ситников. — Иваново : Изд-во ИГЭУ, 2009. — 297 с.
9. Боровиков, Ю. С. Мультипроцессорная моделирующая система реального времени электроэнергетических систем с активно-адаптивными сетями : дис. ... д-ра техн. наук / Юрий Сергеевич Боровиков. — Томск : Изд-во ТПУ, 2013. — 272 с.
10. Балабанов, М. С. Импортзамещение высоковольтных конденсаторных батарей / М. С. Балабанов // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов : межвузовский сб. науч. тр. / отв. ред. В. А. Шабанов ; редкол. : С. Г. Конесев [и др.]. — Уфа : Изд-во УГНТУ, 2015. — С. 209–212.

БАЛАБАНОВ Михаил Станиславович, соискатель по кафедре электрической техники Омского государственного технического университета (ОмГТУ); главный инженер ООО «Международная Энергосберегающая Корпорация», г. Санкт-Петербург. Адрес для переписки: balabanovms@mail.ru
ХАМИТОВ Рустам Нуриманович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры электрической техники ОмГТУ. Адрес для переписки: apple_27@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.06.2016 г.

© М. С. Балабанов, Р. Н. Хамитов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ ПРИ НЕСИММЕТРИИ НАГРУЗКИ

Проанализирован способ расчета увеличения потерь мощности в четырехпроводных сетях с нулевым проводом, при наличии амплитудно-фазовой несимметрии нагрузки. Определено, что для расчета потерь мощности необходимо рассчитать ток прямой последовательности в исходном (несимметричном) режиме работы системы и ток прямой последовательности после корректирующих мероприятий.

Ключевые слова: качество электрической энергии, несимметричная нагрузка, потери мощности.

Одним из наиболее часто встречающихся факторов, ухудшающих качество электрической энергии в системах электроснабжения потребителей различного уровня напряжений, является несимметрия трехфазных напряжений и токов [1–5]. Особенно актуальной данная проблема является для широко распространенных в нашей стране сетей низкого напряжения, которые составляют около 40 % от суммарной протяженности всех сетей России [6].

Такие сети, как правило, оборудованы трансформаторами со схемой соединения вторичных обмоток по типу звезда с нулем, выполнены в четырехпроводном исполнении (три фазы и ноль) и при этом обладают наибольшим сопротивлением нулевой последовательности (рис. 1).

В общем виде выражение для нахождения величины потерь мощности в несимметричном режиме имеет следующий вид [1]:

$$\Delta P_{\text{НЕС}} = \Delta P_{\text{СИМ}} K_H, \quad (1)$$

где K_H — коэффициент дополнительных потерь мощности, рассчитанный в зависимости от выбранного метода расчета; $\Delta P_{\text{СИМ}}$ — потери мощности в симметричном режиме, т. е. только при наличии токов прямой последовательности.

Потери мощности в симметричном режиме определяются согласно выражению:

$$\Delta P_{\text{СИМ}} = I_{\text{СИМ}}^2 R, \quad (2)$$

где $I_{\text{СИМ}}$ — ток прямой последовательности в симметричном режиме; R — активное сопротивление фазного провода.

Расчет потерь мощности в распределительной сетях 0,4 кВ при наличии отклонений показателей качества электрической энергии, характеризующих уровень несимметрии напряжений и токов рассмотрен в ряде публикаций [7–9 и др.].

В большинстве из них коэффициент K_H предлагается определять по формуле:

$$K_H = 1 + K_{2I}^2 + K_{0I}^2 \left(1 + 3 \frac{R_H}{R} \right), \quad (3)$$

где $K_{2I} = I_2/I_1$ — коэффициент несимметрии тока по обратной последовательности; $K_{0I} = I_0/I_1$ — коэффициент несимметрии тока по нулевой последовательности; R_H и R_ϕ — активные сопротивления нулевого и фазного проводов.

С учетом (1)–(3) определяется уравнение для расчета величины увеличения потерь мощности в несимметричном режиме по сравнению с симметричным:

$$\frac{\Delta P_{\text{НЕС}}}{\Delta P_{\text{СИМ}}} = 1 + K_{2I}^2 + K_{0I}^2 \left(1 + 3 \frac{R_H}{R} \right). \quad (4)$$

Определим насколько выражение (4) в полной мере учитывает все характеристики системы электроснабжения при наличии длительного несимметричного режима. Для этого проанализируем влияние несимметрии токов на дополнительные потери мощности на примере трехфазной цепи с нулевым проводом.

Допустим, что нагрузка исследуемой сети является несимметричной и токи протекающие по ее участкам будут образовывать несимметричную систему токов прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 2). В таком случае по нулевому проводу распределительной сети будет протекать ток I_H .

В соответствии с методом симметричных составляющих любую несимметричную систему трех токов и напряжений можно однозначно представить в виде трех систем: прямой, обратной и нулевой последовательности, которые различаются порядком чередования фаз. Запишем выражение метода симметричных составляющих для определения токов, протекающих в линиях:

$$\begin{cases} I_A = I_1 \left(1 + \frac{I_2}{I_1} + \frac{I_0}{I_1} \right) \\ I_B = I_1 \left(a^2 + a \frac{I_2}{I_1} + \frac{I_0}{I_1} \right) \\ I_C = I_1 \left(a + a^2 \frac{I_2}{I_1} + \frac{I_0}{I_1} \right) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_A = I_1 (1 + K_{2I} + K_{0I}) \\ I_B = I_1 (a^2 + a K_{2I} + K_{0I}) \\ I_C = I_1 (a + a^2 K_{2I} + K_{0I}) \end{cases} \quad (5)$$

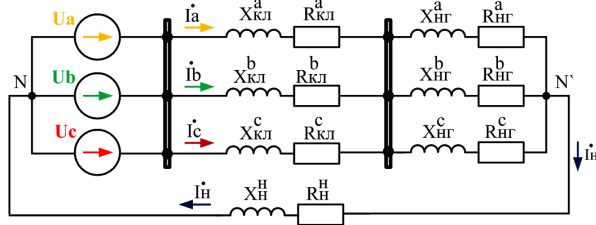


Рис. 1. Схема соединения распределительной сети звезда-звезда с нулевым проводом

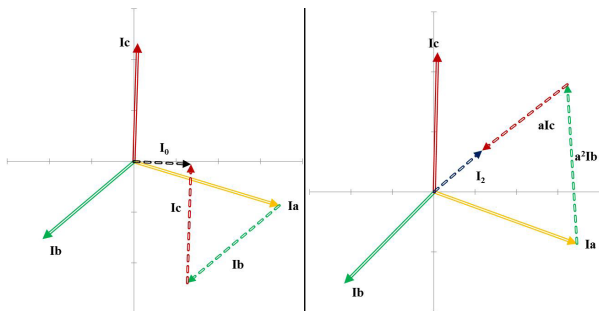


Рис. 2. Векторные диаграммы токов нулевой и обратной последовательности при наличии амплитудно-фазовой несимметрии

где I_1 — ток прямой последовательности; I_2 — ток обратной последовательности; I_0 — ток нулевой последовательности.

В общем случае потери в токоведущих частях четырехпроводной кабельной линии определяются как сумма потерь мощностей в каждом проводнике [10]:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} &= \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C + \Delta P_H = \\ &= I_A^2 R_A + I_B^2 R_B + I_C^2 R_C + I_H^2 R_H, \end{aligned} \quad (6)$$

где $I_H = I_A + I_B + I_C$ — ток нулевого проводника; R_A, R_B, R_C — активные сопротивления жил кабеля; R_H — активное сопротивление нулевого провода.

Из соотношений метода симметричных составляющих (5) ток нулевой последовательности I_0 определяется как:

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C) = \frac{I_H}{3}. \quad (7)$$

Из выражения (8) следует, что величина тока, протекающего в нулевом проводнике, равна утроенному произведению тока нулевой последовательности:

$$I_H = 3I_0. \quad (8)$$

Принимая во внимание выражения (6) – (8), запишем систему уравнений для определения превышения потерь мощности в каждой фазе в несимметричном режиме над потерями мощности в симметричном:

$$\begin{cases} \Delta P_{АНЕС} = I_1^2 R_A + I_2^2 R_A + I_0^2 R_A + 3I_0^2 R_H; \\ \Delta P_{ВНЕС} = I_1^2 R_B + I_2^2 R_B + I_0^2 R_B + 3I_0^2 R_H; \\ \Delta P_{СНЕС} = I_1^2 R_C + I_2^2 R_C + I_0^2 R_C + 3I_0^2 R_H. \end{cases} \quad (9)$$

Выразим потери мощности в каждой из фаз (9) через коэффициенты K_{2l} и K_{0l} , при этом учтем — для рассматриваемой схемы применимо равенство сопротивлений $R_A = R_B = R_C = R$:

$$\begin{cases} \Delta P_{АНЕС} = I_1^2 R \left(1 + K_{2l}^2 + K_{0l}^2 \left(1 + 3 \frac{R_H}{R} \right) \right); \\ \Delta P_{ВНЕС} = I_1^2 R \left(a^2 + aK_{2l}^2 + K_{0l}^2 \left(1 + 3 \frac{R_H}{R} \right) \right); \\ \Delta P_{СНЕС} = I_1^2 R \left(a + a^2 K_{2l}^2 + K_{0l}^2 \left(1 + 3 \frac{R_H}{R} \right) \right). \end{cases} \quad (10)$$

В случае если нагрузка является симметричной, то токи обратной последовательности отсутствуют, ток через нулевой провод не протекает, поэтому система уравнений для расчета потерь мощности при симметрии режима имеет вид:

$$\begin{cases} \Delta P_{АСИМ} = I_{1СИМ}^2 R; \\ \Delta P_{ВСИМ} = a^2 I_{1СИМ}^2 R; \\ \Delta P_{ССИМ} = a I_{1СИМ}^2 R. \end{cases} \quad (11)$$

Для определения превышения потерь мощности в несимметричном режиме по сравнению с симметричным разделим пофазно выражения (10) и (11).

После преобразования полученных уравнений получим:

$$\begin{cases} \Delta P_{АНС} = K_{IC}^2 \left(1 + K_{2l}^2 + K_{0l}^2 \left(1 + 3 \frac{R_H}{R} \right) \right); \\ \Delta P_{ВНС} = K_{IC}^2 \left(a^2 + aK_{2l}^2 + K_{0l}^2 \left(1 + 3 \frac{R_H}{R} \right) \right); \\ \Delta P_{СНС} = K_{IC}^2 \left(a + a^2 K_{2l}^2 + K_{0l}^2 \left(1 + 3 \frac{R_H}{R} \right) \right), \end{cases} \quad (12)$$

где $\Delta P_{АНС} = \Delta P_{НЕС} / \Delta P_{СИМ}$ — отношение потерь мощности в несимметричном режиме к потерям мощности в симметричном режиме работы; $K_{IC}^2 = I_{НЕСИМ}^2 / I_{СИМ}^2$ — отношение токов прямой последовательности в несимметричном и симметричном режиме работы.

Запишем выражение для нахождения величины потерь мощности в несимметричном режиме (1) в следующем виде:

$$\Delta P_{НЕС} = K_{ДПН} \Delta P_{СИМ}, \quad (13)$$

где $K_{ДПН}$ — коэффициент дополнительных потерь мощности.

Принимая во внимание систему уравнений (12) и формулу (13), получаем, что коэффициент $K_{ДПН}$ возможно определить из выражения:

$$K_{ДПН} = K_{IC}^2 \left(1 + K_{2l}^2 + K_{0l}^2 \left(1 + 3 \frac{R_H}{R} \right) \right). \quad (14)$$

Таким образом, принимая во внимание (11), (13) и (14), получим выражение для определения величины потерь мощности в несимметричном режиме, с помощью соотношений между токами различных последовательностей, то есть с учетом наличия не только амплитудной, но и фазовой (угловой) несимметрии токов:

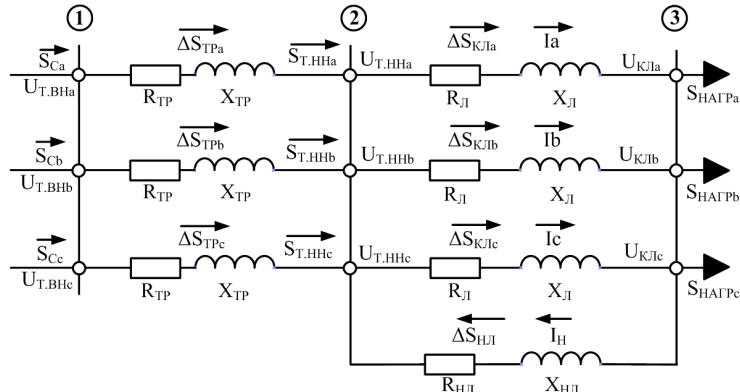


Рис 3. Схема замещения для расчета токов прямой последовательности I_1 в несимметричном режиме работы

$$\frac{\Delta P_{НЕС}}{\Delta P_{СИМ}} = K_{ДНН} = K_{IC}^2 \left(1 + K_{2I}^2 + K_{0I}^2 \left(1 + 3 \frac{R_H}{R} \right) \right). \quad (15)$$

Уравнения (4) и (15) отличаются друга от друга на величину коэффициента K_{IC} , который учитывает отношение токов прямой последовательности в несимметричном и симметричном режиме работы.

Таким образом, выражение для определения K_{IC} имеет вид:

$$K_{IC} = \frac{I_{1НЕСИМ}}{I_{1СИМ}}, \quad (16)$$

где $I_{1НЕСИМ}$ — ток прямой последовательности в несимметричном (исходном) режиме работы системы, рассчитанный на основании данных прямых измерений; $I_{1СИМ}$ — ток прямой последовательности в симметричном режиме работы, определенный расчетным способом.

Для определения тока прямой последовательности исходного режима $I_{1НЕСИМ}$ из уравнения (16) схему, представленную на рис. 1, изобразим в виде, представленном на рис. 3.

Согласно данной схеме (рис. 3), ток прямой последовательности I_1 в несимметричном (исходном) режиме работы системы рассчитываем на основании измеренных в узле 2 значений фазных токов I_A, I_B, I_C с помощью метода симметричных составляющих:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C); \\ I_2 = \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + aI_C); \\ I_0 = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C). \end{cases} \quad (17)$$

На основе системы уравнений (17) с учетом известных из данных прямых измерений в узле 2 (рис. 3) величин мощностей $S_{Т.НН}$ и напряжений $U_{Т.НН}$ определим уравнения для расчета токов симметричных составляющих исследуемой схемы:

$$\begin{cases} I_{1НЕСИМ} = \frac{1}{3} \left(\frac{S_{Т.ННa}}{U_{Т.ННa}} + a \frac{S_{Т.ННb}}{U_{Т.ННb}} + a^2 \frac{S_{Т.ННc}}{U_{Т.ННc}} \right); \\ I_{2НЕСИМ} = \frac{1}{3} \left(\frac{S_{Т.ННa}}{U_{Т.ННa}} + a^2 \frac{S_{Т.ННb}}{U_{Т.ННb}} + \frac{S_{Т.ННc}}{U_{Т.ННc}} \right); \\ I_{0НЕСИМ} = \frac{1}{3} \left(\frac{S_{Т.ННa}}{U_{Т.ННa}} + \frac{S_{Т.ННb}}{U_{Т.ННb}} + \frac{S_{Т.ННc}}{U_{Т.ННc}} \right). \end{cases} \quad (18)$$

Таким образом, из системы (18) получим искомого выражение для расчета тока прямой последовательности исходного режима $I_{1НЕСИМ}$:

$$I_{1НЕСИМ} = \frac{1}{3} \left(\frac{S_{Т.ННa}}{U_{Т.ННa}} + a \frac{S_{Т.ННb}}{U_{Т.ННb}} + a^2 \frac{S_{Т.ННc}}{U_{Т.ННc}} \right). \quad (19)$$

Расчет тока прямой последовательности симметричного режима $I_{1СИМ}$, то есть тока режима после корректирующих несимметрию мероприятий, представляет собой более сложную задачу. Обусловлено это наличием различных вариантов расчета в зависимости от полноты исходных данных, необходимых для вычислений. В связи с вышеуказанным возникает актуальная необходимость разработки алгоритма для расчета коэффициента K_{IC} и определения более точных величин дополнительных потерь мощности, вызванных наличием несимметричного режима.

Библиографический список

1. Дед, А. В. Амплитудно-фазовая несимметрия токов и потери мощности в элементах систем электроснабжения / А. В. Дед [и др.] // Инновационная наука. — 2015. — №. 11-2. — С. 51–54.
2. Дед, А. В. Сравнение методов расчета коэффициентов учета несимметрии распределения нагрузок при оценке потерь мощности / А. В. Дед, А. В. Паршукова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2015. — № 9. — С. 221–225.
3. Добрусин, Л. А. Проблема качества электроэнергии и электросбережения в России / Л. А. Добрусин // Энергоэксперт. — 2008. — № 4. — С. 30–35.
4. Лютаевич, А. Г. Вопросы моделирования устройств обеспечения качества электрической энергии / А. Г. Лютаевич, В. Н. Горюнов, С. Ю. Долингер, К. В. Хацевский // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 1 (117). — С. 168–173.
5. Хацевский, К. В. Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения / К. В. Хацевский, Ю. М. Денчик, В. И. Клеутин, Д. А. Зубанов, А. В. Бубнов, В. В. Харламов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2012. — № 2 (110). — С. 212–214.
6. Воротницкий, В. Э. Методы расчета потерь электроэнергии в электрических сетях 0,38 кВ / В. Э. Воротницкий, С. В. Заслонов, М. А. Калинкина. — Режим доступа : <http://www.rtp3.ru/files/8.doc> (дата обращения: 10.09.2016).
7. Косоухов, Ф. Д. Несимметрия напряжений и токов в сельских распределительных сетях / Ф. Д. Косоухов, И. В. Намумов. — Иркутск, 2003. — 260 с.

8. Метод расчёта показателей несимметрии напряжений и токов в сетях 0,38 кВ / Ф. Д. Косоухов [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. Спец. выпуск. — 2008. — С. 156–159.

9. Гринкруг, М. С. Управление несимметрией токов в распределительных сетях низкого напряжения / М. С. Гринкруг, И. А. Митин // Известия высших учебных заведений. — 2009. — №. 3-4. — С. 80–84.

10. Дед, А. В. Дополнительные потери мощности при амплитудно-фазовой несимметрии напряжений и токов /

А. В. Дед [и др.] // Инновационная наука. — 2015. — № 11-2. — С. 54–57.

ДЕД Александр Викторович, старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Адрес для переписки: ded_av@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.09.2016 г.

© А. В. Дед

УДК 621.311

А. В. ДЕД

Омский государственный
технический университет

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

Представлен разработанный алгоритм расчета потерь мощности в четырехпроводных сетях с нулевым проводом, при наличии длительного несимметричного режима работы. Алгоритм включает в себя расчеты энергетических параметров исследуемого участка распределительной сети до и после проведения мероприятия по выравниванию (симметрированию) уровня подключенной нагрузки.

Ключевые слова: качество электрической энергии, несимметричная нагрузка, потери мощности.

Уровень потерь в электрических сетях России при ее передаче и распределении составляет величину в размере 11 % от полезного отпуска, что, в свою очередь, в 1,6 раза выше аналогичного показателя иностранных сетевых компаний, который держится в пределах 6–8 % [1].

Одной из причин высокого уровня потерь электроэнергии является наличие неоптимальных режимов работы электрических сетей, в том числе режимов длительной несимметрии токов и напряжений [2, 3].

Увеличение потерь мощности по сравнению с симметричным режимом при функционировании электрических сетей в несимметричных режимах различного типа определяется согласно ниже приведенному уравнению [4]:

$$\Delta P_{\text{НЕС}} = K_{\text{ДПН}} \Delta P_{\text{СИМ}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{ДПН}}$ — коэффициент дополнительных потерь мощности; $\Delta P_{\text{СИМ}}$ — потери мощности в симметричном режиме работы.

Коэффициент дополнительных потерь мощности $K_{\text{ДПН}}$ для четырехпроводных систем с нулевым проводом можно определить из выражения [4]:

$$K_{\text{ДПН}} = K_{\text{IC}}^2 \left(1 + K_{2l}^2 + K_{0l}^2 \left(1 + 3 \frac{R_{\text{H}}}{R} \right) \right). \quad (2)$$

Значение коэффициента K_{IC} , определяющего отношения токов прямой последовательности при симметричном и несимметричном характере нагрузки, рассчитывается как:

$$K_{\text{IC}} = \frac{I_{\text{НЕСИМ}}}{I_{\text{СИМ}}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{НЕСИМ}}$ — ток прямой последовательности исходного несимметричного режима, определенный из данных измерений; $I_{\text{СИМ}}$ — ток прямой последовательности скорректированного (симметричного) режима работы.

В несимметричном режиме работы системы значение тока прямой последовательности $I_{\text{НЕСИМ}}$ возможно определить, используя метод симметричных составляющих [5].

Таким образом, выражение для вычисления величины тока прямой последовательности исходного режима $I_{\text{НЕСИМ}}$ имеет вид:

$$I_{\text{НЕСИМ}} = \frac{1}{3} (I_A + aI_B + a^2I_C) = \frac{1}{3} \left(\frac{S_{\text{T.ННa}}}{U_{\text{T.ННa}}} + a \frac{S_{\text{T.ННb}}}{U_{\text{T.ННb}}} + a^2 \frac{S_{\text{T.ННc}}}{U_{\text{T.ННc}}} \right). \quad (4)$$

Расчет в таком случае проводится на основании полученных в ходе прямых измерений, как правило,

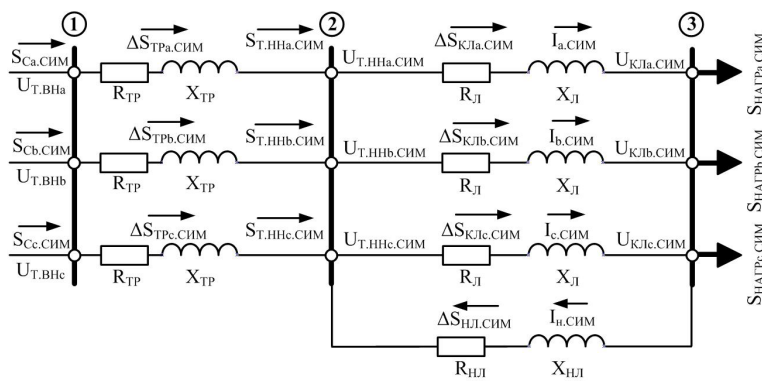


Рис. 1. Схема замещения для расчета токов прямой последовательности I_1 в несимметричном режиме работы

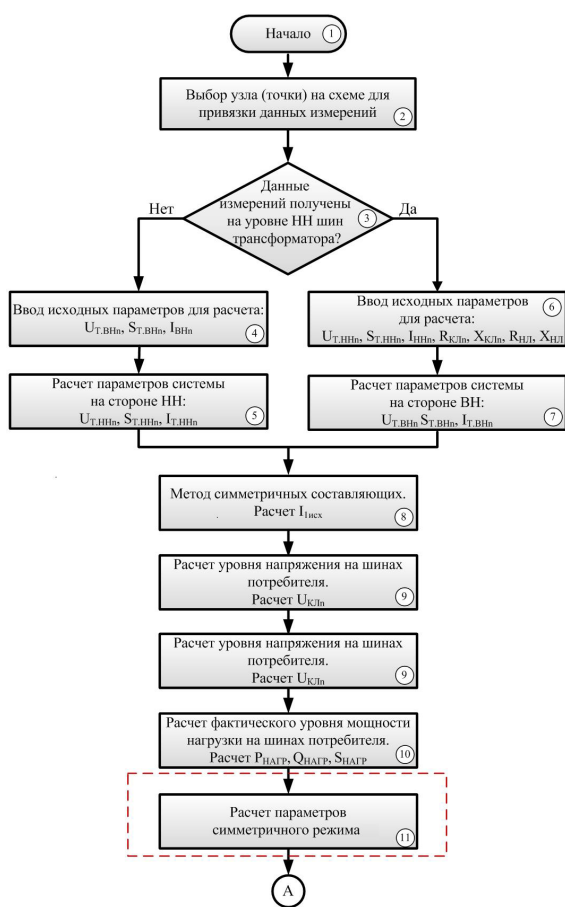


Рис. 2. Блок-схема расчета параметров несимметричного режима. Начало расчета

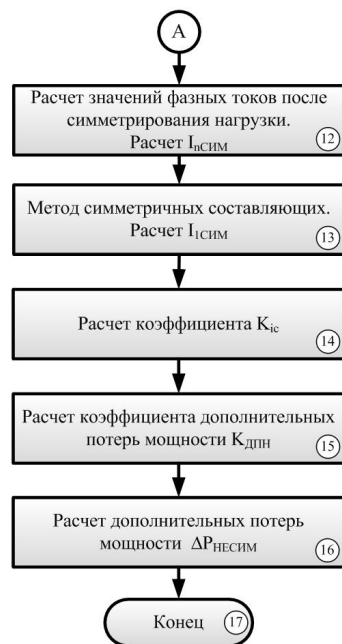


Рис. 3. Блок-схема расчета параметров несимметричного режима. Окончание расчета

исследуемой системы известны в качестве исходных данных. В общем виде уравнение для вычисления тока прямой последовательности симметрично-го режима $I_{1СИМ}$ записывается в виде:

$$I_{1СИМ} = \frac{1}{3} (I_{АСИМ} + aI_{ВСИМ} + a^2I_{ССИМ}) = \frac{1}{3} \left(\frac{S_{Т.ннa.CИМ}}{U_{Т.ннa.CИМ}} + a \frac{S_{Т.ннб.CИМ}}{U_{Т.ннб.CИМ}} + a^2 \frac{S_{Т.ннc.CИМ}}{U_{Т.ннc.CИМ}} \right), \quad (5)$$

на стороне низкого напряжения трансформатора, значений фазных токов $I_{A'}$, $I_{B'}$, $I_{C'}$ либо величин мощностей $S_{Т.ннa}$, $S_{Т.ннб}$, $S_{Т.ннc}$ и напряжений $U_{Т.ннa}$, $U_{Т.ннб}$, $U_{Т.ннc}$ соответственно.

Определение величины тока прямой последовательности $I_{1СИМ}$, то есть тока симметричного режима, существующего в сети после проведения технических действий корректирующих несимметрию, представляет собой более сложную, многоуровневую задачу. Схема замещения для расчета токов прямой последовательности $I_{1СИМ}$ представлена на рис. 1.

Нахождение величины $I_{1СИМ}$ в первую очередь, зависит от того, какие энергетические параметры

где $I_{нСИМ}$ — токи, протекающие в каждой из фаз при симметричной нагрузке; $S_{Т.ннa.CИМ}$ — полные мощности каждой из фаз при симметричной нагрузке; $U_{Т.ннa.CИМ}$ — напряжения каждой из фаз при симметричной нагрузке.

Как видно из (5), для определения $I_{1СИМ}$ необходимо определить с учетом скорректированного распределения нагрузки $S_{Т.ннa.CИМ}$ значения токов каждой из фаз $I_{нСИМ}$ и соответствующие им значения фазных напряжений $U_{Т.ннa.CИМ}$.

В ходе решения выше поставленной задачи был разработан алгоритм (рис. 2, 3) для расчета коэффициента $K_{ис}$ и определения дополнительных потерь

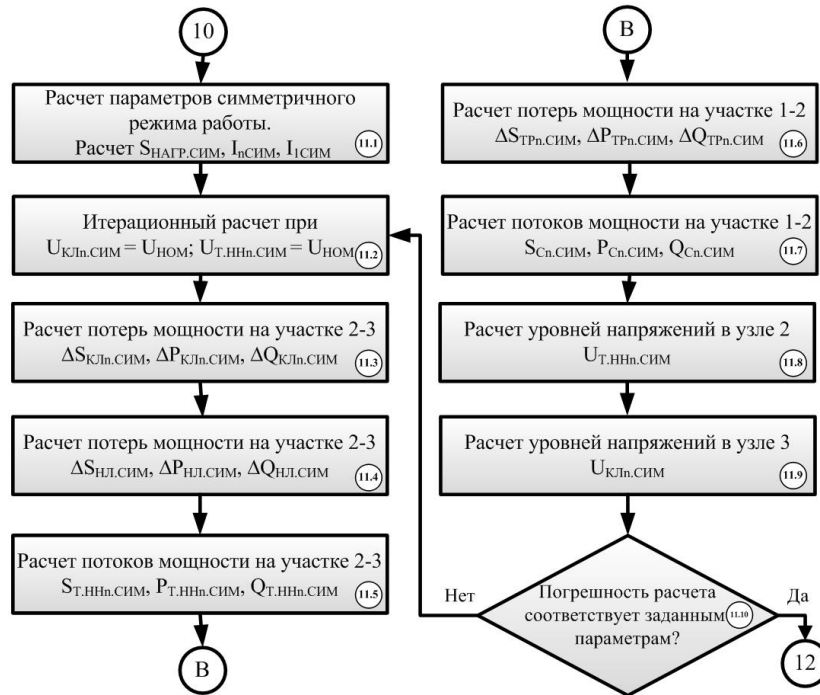


Рис. 4. Блок-схема расчета параметров симметричного режима

мощности, вызванных наличием несимметричного режима.

Алгоритм предусматривает возможность наличия нескольких вариантов исходных для расчета данных, в связи с чем последовательность расчета исследуемого режима может быть следующей:

1. При известных исходных данных на стороне высшего напряжения трансформатора центра питания определяются значения $U_{Т.НН'}$, $I_{Т.НН'}$, $S_{Т.НН}$ на стороне низкого напряжения трансформатора.

2. В случае задания в качестве исходных данных параметров со стороны низкого напряжения трансформатора центра питания определяются параметры $U_{Т.ВН'}$, $I_{Т.ВН'}$, $S_{Т.ВН}$ на стороне высокого напряжения трансформатора.

3. С помощью метода расчета уровней напряжений в конце линии по данным начала [6] определяются величины напряжений на стороне потребителя $U_{КЛд'}$, $U_{КЛв'}$, $U_{КЛс'}$.

4. По методу расчета мощностей в конце линии по известным данным начала [6] с учетом потерь $\Delta S_{КЛ}$ в линиях электропередач и потерь $\Delta S_{НА}$ в нулевом проводнике при несимметрии нагрузки рассчитываются фактические величины мощностей $P_{НАГР'}$, $Q_{НАГР'}$, $S_{НАГР'}$ подключенных со стороны потребителя.

5. Определяются значения мощностей нагрузки потребителя $P_{НАГР.СИМ'}$, $Q_{НАГР.СИМ'}$, $S_{НАГР.СИМ}$ после симметрирования режима работы.

6. На основе расчета разомкнутой сети при заданных мощностях нагрузки и напряжении источника питания $U_{Т.ВНд'}$, $U_{Т.ВНв'}$, $U_{Т.ВНс'}$ определяются значения потоков и потерь мощности $S_{С.СИМ'}$, $S_{Т.НН.СИМ'}$ и $\Delta S_{Тр.СИМ'}$, $\Delta S_{КЛ.СИМ}$ в характерных точках и элементах схемы при «новых симметричных» уровнях напряжений и мощностях нагрузки $P_{НАГР.СИМ'}$, $Q_{НАГР.СИМ'}$, $S_{НАГР.СИМ}$ [6].

При этом напряжение источника питания $U_{Т.ВН'}$ определенное в пункте 2 данного алгоритма или заданное в качестве исходных данных, принимается за постоянную величину — $U_{Т.ВН} = const$, а мощность $S_{Т.ВН} = var$ [6].

7. После симметрирования нагрузки потребителя определяются значения фазных токов $I_{Асим'}$, $I_{Всим'}$, $I_{Ссим'}$.

8. По известным величинам фазных токов $I_{Асим'}$, $I_{Всим'}$, $I_{Ссим'}$ вычисляются значения симметричных составляющих токов $I_{1сим'}$, $I_{2сим'}$, $I_{0сим'}$.

9. Рассчитывается коэффициент K_{IC} как отношение токов прямой последовательности в несимметричном к току прямой последовательности в симметричном режиме работы.

10. Определяется коэффициент дополнительных потерь мощности $K_{ДПН'}$ определяющий превышение потерь в несимметричном режиме над потерями в симметричном режиме работы.

11. Определяется величина потерь мощности $\Delta P_{НЕСИМ'}$ вызванных несимметричным режимом работы.

При расчете в соответствии с разработанным алгоритмом необходимо учитывать тот факт, что на уровень напряжения $U_{Т.ВН'}$ передаваемый со стороны системы, потребитель, на чьем балансе находится трансформаторная подстанция, повлиять не может.

В связи с этим определенный в точке 1 (рис. 1) расчетным способом (либо путем прямых измерений) уровень напряжения $U_{Т.ВН}$ необходимо принимать за напряжение источника бесконечной мощности ($U_{Т.ВН} = const$), напряжение на зажимах которого остается практически неизменным при любых изменениях тока в подключенной к нему цепи [7].

Значения уровней напряжения $U_{Т.ВН}$ необходимы для расчета режима системы электроснабжения при «симметричном» режиме. В случае, если расчет ведется по известным данным со стороны высокого напряжения трансформатора, необходимо определить потери мощности в обмотках трансформатора ΔP_T , ΔQ_T и ΔS_T обусловленные наличием несимметричной (исходной) нагрузки на стороне низкого напряжения.

На рис. 4 представлена блок-схема вспомогательного расчета параметров симметричного режима,

которая является частью структурной схемы общего алгоритма (рис. 2, 3) и реализует расчет параметров исследуемой схемы методом итераций (последовательных приближений).

Библиографический список

1. Добрусин, Л. А. Повышение энергоэффективности электросетевого комплекса России / Л. А. Добрусин // Энергосбережение. — 2013. — № 7. — С. 54–60.
2. Долингер, С. Ю. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения / С. Ю. Долингер, А. Г. Лютаревич, В. Н. Горюнов [и др.] // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 2 (120). — С. 178–183.
3. Дед, А. В. Оценка дополнительных потерь мощности в электрических сетях 0,38 кВ на основе экспериментальных данных / А. В. Дед, С. В. Бирюков, А. В. Паршукова // Успехи современного естествознания. — 2014. — № 11-3. — С. 64–67.
4. Дед, А. В. Метод расчета дополнительных потерь мощности при несимметрии режима работы систем электроснабже-

ния / А. В. Дед, А. В. Паршукова // Инновационная наука. — 2015. — № 10-1. — С. 61–65.

5. Электромагнитная совместимость потребителей : моногр. / И. В. Жежеленко [и др.]. — М. : Машиностроение, 2012. — 351 с.
6. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети : учеб. для вузов / В. И. Идельчик. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.
7. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций : учеб. / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 648 с.

ДЕД Александр Викторович, старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Адрес для переписки: ded_av@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.09.2016 г.

© А. В. Дед

УДК 621.382

Д. Н. ШЕЛКОВНИКОВ

Омский государственный
технический университет

ПЕРСПЕКТИВНАЯ СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ОТ ГОЛОЛЕДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Рассмотрены возможности мониторинга воздушных линий электропередачи с использованием весовых датчиков, позволяющих контролировать состояние проводов под воздействием гололедной нагрузки.

Предложен способ удаления гололедных образований с воздушных линий электропередачи, сущность которого состоит в подаче на провода напряжения высокой частоты, в результате чего проявляется скин-эффект и на поверхности проводника создается повышенная температуры, которая препятствует образованию гололеда.

Ключевые слова: линия электропередачи (ЛЭП), удаление гололедных образований на ЛЭП, диагностика ЛЭП, воздушные линии электропередачи.

В настоящее время специалистами Южнороссийского государственного технического университета (г. Новочеркасск Ростовской области) и предприятиями ОАО «Межрегиональная распределительная сетевая компания Юга» (МРСК Юга) разработано несколько систем обнаружения гололедных образований на проводах воздушных линий (ВЛ) с использованием весовых датчиков. Эти системы внедрены для опытной эксплуатации в ОАО «Ростовэнерго», ОАО «Кубаньэнерго», ОАО «Волгоградэнерго», входящих в состав МРСК Юга. Эксплуатация этих систем показала хорошую работоспособность, обеспечивающую возможность повышения эффективности плавки гололеда на проводах ЛЭП [1]. Однако при этом была выявлена необходимость доработки информационной части системы с целью повышения ее надежности и снижения затрат на монтаж системы и ее техническое обслуживание [2].

1. Опыт эксплуатации «Системы раннего обнаружения гололеда» в ОАО «Ростовэнерго».

В ОАО «Ростовэнерго» эксплуатируется 17 датчиков телеизмерения гололедной нагрузки, входящих в систему телеизмерения гололедной нагрузки (СТГН), в том числе:

- 5 комплектов на ВЛ 110 кВ;
- 6 комплектов на ВЛ 35 кВ;
- 6 комплектов на ВЛ 10 кВ.

Система состоит из:

- постов телеизмерения внешних и внутренних воздействий на проводах и тросах ВЛ;
- системы передачи информации;
- пункта сбора, обработки и отображения информации — АРМ (автоматизированное рабочее место) диспетчера сетей.

Посты телеизмерения устанавливаются в местах наиболее вероятного образования максимальных внешних и внутренних воздействий (гололедно-

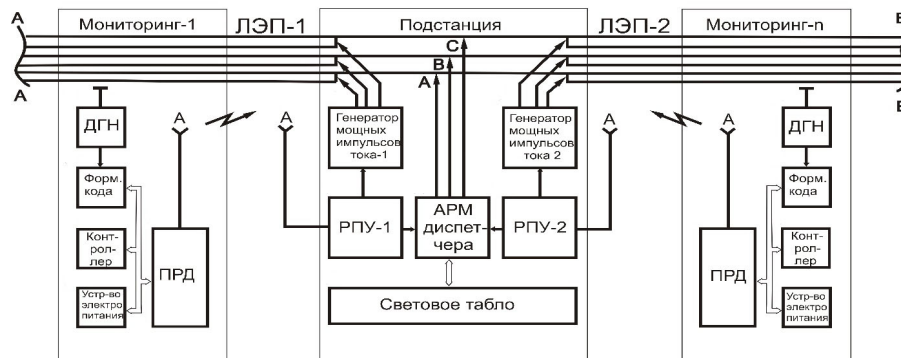


Рис. 1. Функциональная схема устройства автоматизированной защиты ЛЭП от гололедных образований

ветровых нагрузок) на промежуточных опорах ВЛ и состоят из специальных комбинированных тензометрических датчиков, соединенных последовательно с гирляндами изоляторов, контроллера, передающего радиомодема, аккумуляторных батарей и устройств подзарядки.

В результате эксплуатации установлены технические характеристики системы мониторинга воздушных линий электропередачи:

- вероятность правильного обнаружения отложений — 0,88;
- точность измерения силовых нагрузок $+/- 5$ кг;
- вероятность правильного обнаружения предвестника пляски проводов — 0,7.

2. Опыт эксплуатации «Системы раннего обнаружения гололеда» в ОАО «Кубаньэнерго».

ОАО «Кубаньэнерго» одним из первых в регионе начало работу по внедрению в Сочинских электрических сетях «Системы раннего обнаружения гололеда» (СОРГ), которая позже была преобразована в «Автоматизированную информационную систему контроля гололедной нагрузки» (АИСКГН) на ВЛ.

Система позволяет с диспетчерских пунктов ОАО «Кубаньэнерго» получать информацию о температуре окружающего воздуха и толщине стенки гололеда на проводах и грозозащитных тросах.

На опорах ВЛ устанавливают:

- датчики веса, которые позволяют определять толщину стенки гололеда;
- датчик температуры и реле времени.

Передача информации происходит по GSM каналом на диспетчерские пункты, где специальное программное обеспечение обрабатывает информацию и выдает данные в табличном и графическом виде.

Система связи GSM позволяет просматривать видеoinформацию на мониторе компьютера по запросу диспетчера.

3. Опыт эксплуатации «Автоматизированной информационной системы контроля гололедной нагрузки» в ОАО «Волгоградэнерго».

В сетях филиала ОАО «Волгоградэнерго» установлено 20 датчиков «Автоматизированной информационной системы контроля гололедной нагрузки» (АИСКГН). Специалисты успешно используют разработанную современную и надёжную информационную систему мониторинга. Эта система позволяет проводить измерения внешних и внутренних механических воздействий на провода, наиболее

опасными из которых являются гололедные отложения.

Пункт сбора, обработки и отображения информации состоит из принимающего радиомодема, компьютера и программного обеспечения. На экране дисплея отображаются графики измерения температуры и величины гололедных отложений [3].

Рассмотренные положительные результаты опытной эксплуатации систем мониторинга с использованием весовых датчиков в энергосистемах Межрегиональной распределительной сетевой компании Юга, позволяет перейти к завершающему этапу разработки автоматизированной системы защиты ЛЭП от гололедных образований. В настоящее время гололедные образования удаляют путём существующей в РФ плавки гололеда большими токами с отключением электроэнергии от потребителей [4]. Этот метод удаления гололедных образований с линий электропередачи является весьма затратным и небезопасным для людей окружения.

Рассмотрим актуальную проблему удаления снежно-ледового образования с проводов линий электропередачи (ЛЭП), не прерывая подачу электроэнергии потребителям.

Процесс автоматизации защиты ЛЭП от гололеда состоит в том, что посредством автономных мониторингов, установленных на опорах вдоль линий электропередачи, по радиоканалу сообщается в диспетчерский пункт цифровой код с указанием данных о месте нахождения мониторинга (порядковый номер опоры), вида аварийной ситуации и команды на включение системы автоматизированной защиты линий электропередачи от гололедных образований [5]. Каждое устройство мониторинга включает в себя:

- датчик гололедной нагрузки (ДГН) типа динамометра, встроенного в гирлянды изоляторов [6];
- радиопередатчик (ПРД) с формирователем идентификационного кода, в котором содержатся данные о координатах места расположения этого мониторинга и данные о состоянии проводных линий;
- формирователь цифрового кода;
- источник электропитания в составе малогабаритного ветряного или солнечного источника электроэнергии, аккумулятора и преобразователя напряжений для электропитания радиопередатчика.

Функциональная схема устройства системы автоматизированной защиты линий электропередачи от гололедных образований, включающая в себя

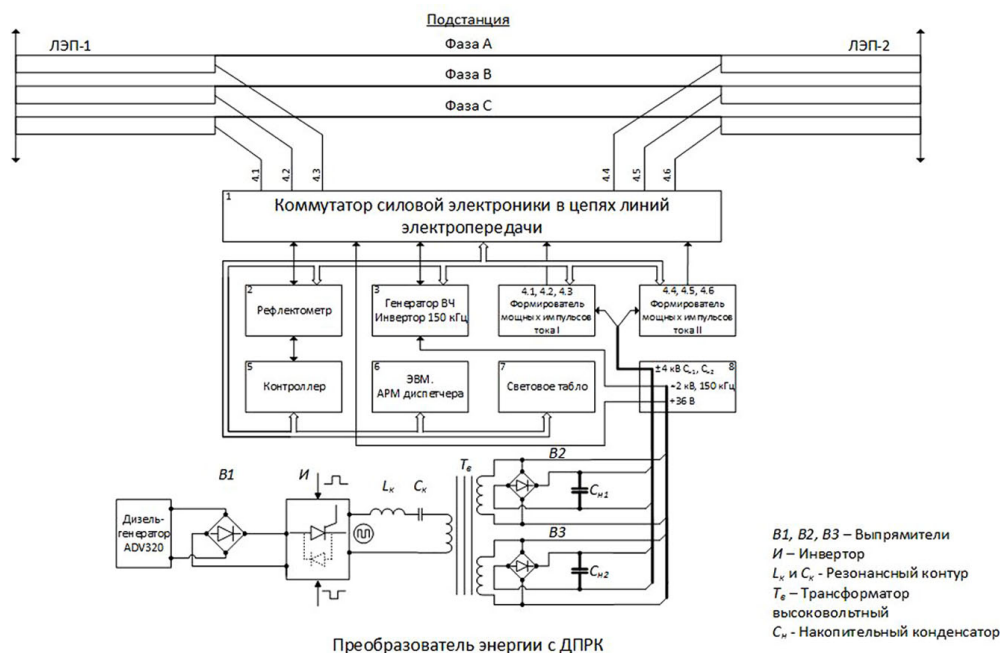


Рис. 2. Функциональная схема устройства для автоматизированного удаления гололедных образований с линий электропередачи (ЛЭП). Мобильный вариант

функциональные схемы мониторингов, приведена на рис. 1.

В зависимости от показаний датчика веса провода формируется одна из команд: «Обрыв», когда датчик фиксирует вес провода ниже установленного предела; «Норма», когда датчик фиксирует вес провода в пределах нормы; «Гололед», когда датчик фиксирует вес провода выше установленного предела, что говорит об опасности возникающего гололедного образования с необходимостью передачи команды в диспетчерский пункт на включение автоматизированного устройства защиты ЛЭП.

Сформированные в передатчике структуры кодов представляют собой 6-разрядное число в десятичной форме [7].

Радиопередатчик работает в УКВ диапазоне 156 – 174 МГц. Для передачи на подстанцию сигнала от мониторинга используется метод время – импульсной модуляции (ВИМ) [7]. Сущность метода передачи цифрового кода состоит в том, что это сообщение определяется временным интервалом, начало и конец которого сообщаются корреспонденту передачей только двух соответствующих коротких радиоимпульсов. А число тактовых импульсов определенной частоты следования, подсчитанное в данном интервале в десятичной форме исчисления, и есть отображение переданного сообщения.

Излучение радиосигнала в течение этого интервала не требуется. Тем самым достигается высокая надёжность передачи сообщения и экономия электроэнергии от автономного источника электропитания.

Энергетические расчеты параметров мощных импульсов тока для удаления гололедных образований с проводов линий электропередачи марки АС-50 длиной 50 км следующие [8]:

1. Рабочий импульс, $\tau = 5$ мс.
2. Ток в импульсе $I_{\max} = 2148$ А.
3. Емкость накопительного конденсатора

$C_{\text{общ}} = 0,15$ Ф.
(батарея из 27 шт. типа К75-88Б, $C = 5600$ мкФ, $U = 4$ кВ)

При этом температура нагрева проводов

$$T_2 - T_1 = Q/M_2 \cdot c_{\text{YA}} = \\ = 288,0 \cdot 10^3 / 20 \cdot 10^3 \cdot 8,8 \cdot 10^{-2} = 163,6 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где T_1 — начальная температура провода ЛЭП;
 T_2 — конечная температура провода ЛЭП;
 Q — количество тепла;
 M_2 — масса провода длиной 50 км;
 C_{YA} — удельная теплоемкость провода ЛЭП.

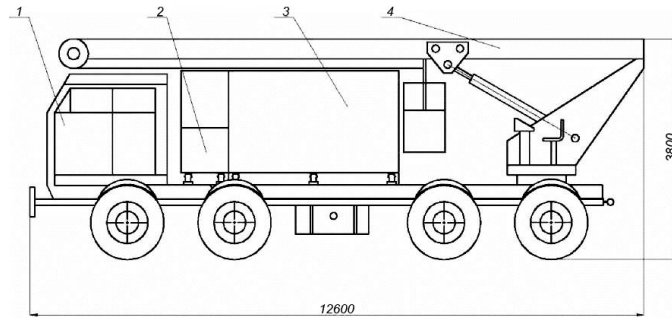
Для удаления гололедного образования с проводов достаточно двух импульсов с интервалом их следования 4 сек. При передаче первого импульса формируется талая прослойка между проводом и гололедной муфтой, при воздействии второго импульса возникает термодинамическое встряхивание провода, при котором гололедная муфта легко отслаивается от провода и удаляется.

Сущность удаления гололедных образований с линий электропередачи (ЛЭП) состоит в использовании способа разогревания проводов путем подачи на них напряжения высокой частоты [9], отличительной характеристикой которого является скин-эффект [10]. Известно также, что в однородном проводнике переменный ток высокой частоты, в отличие от постоянного, не распределяется равномерно по сечению проводника, а концентрируется на его поверхности, занимая очень тонкий слой. На рис. 2 предложена функциональная схема устройства для автоматизированного удаления гололедных образований с линий электропередачи (ЛЭП), мобильный вариант [11]. Устройство включает в себя управляемые гальванически развязанные генераторы мощных импульсов тока, подключенные посредством импульсных трансформаторов в провода соответствующей расщепленной фазы линий электропередачи (4.1 – 4.6).

Устройство содержит подстанцию, содержащую объединенные в локальную сеть рефлектометр, генератор ВЧ импульсов тока, управляемые гальванически развязанные генераторы мощных импульсов



UAZ-3909



Подъемник АПТ-50

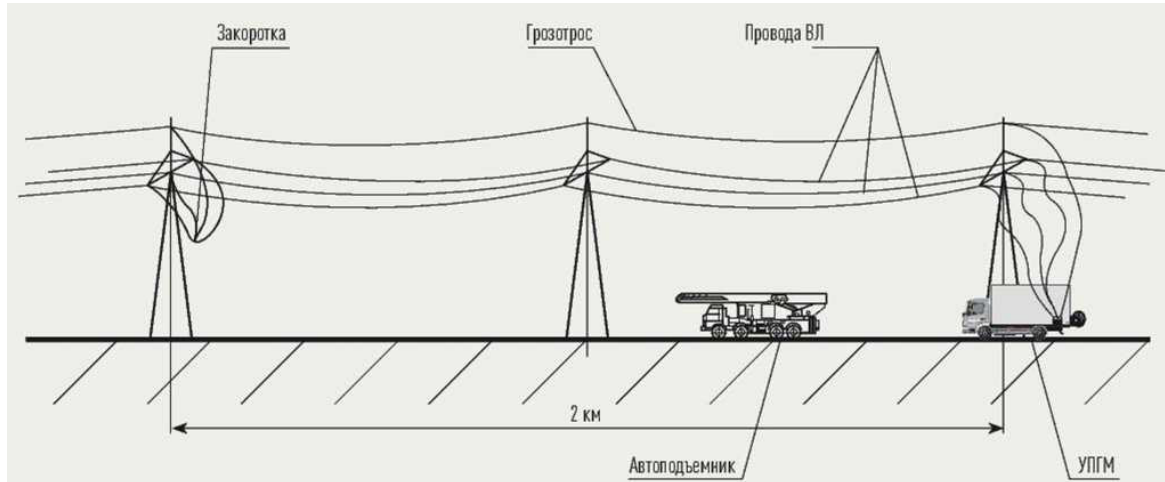


Рис. 3. Ремонтно-восстановительные работы на ЛЭП

тока, общее количество которых соответствует числу контролируемых ЛЭП, соединенных с коммутатором силовой электроники, обеспечивающим подключение в соответствующие расщепленные фазы линий электропередачи. В схему также входят контроллер, связанный с рефлектометром, автоматизированное рабочее место диспетчера с ЭВМ, световое табло и блок электропитания. Блок электропитания представляет собой преобразователь энергии с ДПРК.

Для получения мощных источников энергии с целевым применением их в системе защиты ЛЭП от гололёдных образований предложен преобразователь энергии с дозирующим последовательным резонансным контуром (ДПРК) (рис. 2) [12]. Сущность преобразования состоит в том, что из сетевого напряжения или напряжения от дизель-генератора ADV-320 выпрямленное напряжение через выпрямитель В1 поступает на инвертор И, в котором напряжение усиливается и преобразуется в симметричную прямоугольную импульсную форму типа «Меандр» (без постоянной составляющей). Далее через резонансный контур L_k и C_k напряжение дополнительно усиливается высоковольтным трансформатором T_B и поступает в блок электропитания на частоте 150 кГц для дальнейшей коммутации по назначению. Это же напряжение частотой 150 кГц после выпрямителя В2 используется для зарядки накопительного конденсатора C_H для формирования мощных импульсов тока (4.1–4.6).

Мобильный вариант. Предназначен для работы в полевых условиях для выполнения аварийно-восстановительных работ на линиях электропередачи (ЛЭП). Конструктивно вся аппаратура размещается в салоне автомобиля UAZ-3909 (рис. 3).

Объём кузова позволяет разместить также дизельную электростанцию серии ADV320, которая в рабочем положении размещается вне кузова. Аппаратурный комплекс обеспечивает оперативную защиту всех типов линий электропередачи (ЛЭП) от гололёдных образований.

По служебному положению мобильный вариант заменяет собой центральный пункт управления (диспетчерская, дежурные операторы — 2 чел.). Связь между центральным пунктом управления и ремонтными бригадами осуществляется по радиоканалам УКВ.

Стационарный вариант диспетчерского пункта управления также комплектуется электронной аппаратурой в том же составе и количестве, что и мобильный вариант. Т. е. полная взаимозаменяемость по комплектации электронной аппаратурой, в том числе силовыми электронными модулями.

Заключение. Для проведения плановых заводских и государственных испытаний опытного образца рассмотренной системы защиты линий электропередачи от гололедных образований рекомендуется предварительно произвести натурные испытания на действующей ЛЭП.

Рассмотренные в данной работе основные изделия защищены патентами Российской Федерации на изобретения:

- № 2404497 от 20.11.2010, Бюл. № 32;
- № 2478245 от 27.03.2013, Бюл. № 9;
- № 2520581 от 28.04.2014, Бюл. № 18.

Библиографический список

1. Сизова, Е. Испытания на прочность / Е. Сизова // Энергоназор. — 2014. — № 11 (63). — С. 8.

2. Сравнение систем обнаружения гололеда на линиях электропередачи, использующих методы взвешивания проводов и локационного зондирования / Р. Г. Мишулин [и др.] // Энергетика глазами молодежи : науч. тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. — Новочеркасск : Изд-во ЮРГПУ (НПИ), 2013. — Т. 1. — С. 514—518.

3. Внедрение автоматизированной системы наблюдения за гололедом в Камышинских электрических сетях / Н. Ю. Шевченко [и др.] // Современные проблемы науки и образования. — 2009. — № 5. — С. 127—132.

4. Методические указания по плавке гололеда переменным током. Ч. 1. МУ 34-70-027-82, РД 34.20.511, СО 153-34.20.511 / Сост. В. В. Бургсдорф, Л. Г. Никитина, Л. А. Никонец, П. Р. Хрущ // М-во энергетики и электрификации СССР [и др.]. : [введ. 01.01.1983. : изм. 07.10.2006.] — Режим доступа : <http://www.gost-info.com/doc/1624488/Methodicheskie-ukazaniia-po-plavke-gololeda-peremennym-tokom-Chast-I> (дата обращения: 10.06.2016).

5. Пат. 2478245 Российская Федерация, МПК H02G 7/16. Устройство для удаления снежно-ледового покрытия с проводов линий электропередачи / Шелковников Н. Д., Шелковников Д. Н., Мачихина И. В., Аристов В. К. ; заявитель и патентообладатель Шелковников Н. Д., Шелковников Д. Н. ; заявл. 22.09.2011. ; опубл. 27.03.2013, Бюл. № 9.

6. Датчик гололедной нагрузки (ДГН). — Режим доступа : http://www.elna-severplus.ru/datchik_gololeda.html/. — Загл. с экрана (дата обращения: 10.07.2016).

7. Пат. № 2222104 Российская Федерация, (51) МПК H04B 7/00. Способ передачи цифровых сообщений / Шелковников Н. Д. ; заявитель и патентообладатель гос. унитарное предприятие — Омский научно-исследовательский институт приборостроения. — № 2000116139/09 ; заявл. 19.06.2000 ; опубл. 20.01.2004, Бюл. № 2.

8. Пат. № 2404497 Российская Федерация, МПК H02G 7/16 (2006.01). Способ удаления снежно-ледового покрова с проводов линий электропередачи / Шелковников Н. Д., Шелковников Д. Н. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Омский государственный технический университет. — № 2009111643/07 ; заявл. 30.03.2009.

9. Пат. № 2520581 Российская Федерация, МПК H02G 7/16. Устройство для удаления снежно-ледового покрытия с проводов линий электропередачи / Шелковников Н. Д., Шелковников Д. Н. ; заявитель и патентообладатель Шелковников Д. Н., Шелковников Н. Д. — № 2012155399/07 ; заявл. 19.12.2012 ; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18.

10. Калашников, С. Г. Электричество / С. Г. Калашников. — 5-е изд. — М. : Наука, 1985. — 576 с.

11. Шелковников, Д. Н. Перспективные способ и устройство защиты линий электропередачи от снежно-ледового образования / Н. Д. Шелковников, Д. Н. Шелковников // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2016. — № 3 (147). — С. 73—76.

12. Быстров, Ю. А. Электронные цепи и микросхемотехника / Ю. А. Быстров, И. Г. Мироненко. — М. : Высшая школа, 2002. — 384 с.

ШЕЛКОВНИКОВ Дмитрий Николаевич, соискатель по кафедре электрической техники Омского государственного технического университета; региональный представитель Сибирского института бизнеса и информационных технологий (СИБИТ), г. Омск.

Адрес для переписки: hirurg66@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.06.2016 г.

© Д. Н. Шелковников

Книжная полка

Бессонов, Л. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учеб. В 2 ч. / Л. Бессонов. — 12-е изд., испр. и доп. — М. : Юрайт, 2016. — Ч. 2. — 348 с. — ISBN 978-5-9916-9302-8, 978-5-9916-9340-0.

Данный учебник состоит из двух частей и рассматривает традиционные и новые вопросы теории линейных и нелинейных электрических цепей. К традиционным относятся методы расчета токов и напряжений при постоянных, синусоидальных и других видах воздействий, теория двух- и четырехполюсников, электрические фильтры, электрические и магнитные линии с распределенными параметрами, расчет переходных процессов классическим, операторным методами, методом интеграла Дюамеля, обобщенных функций, методом пространства состояний, преобразования Фурье и т.д.

К числу новых вопросов относятся физические причины, условия возникновения и канаты действия нелинейной, неявно выраженной обратной связи в нелинейных электрических цепях переменного тока, приводящие к возникновению в них колебаний, получивших название «странные аттракторы», метод расчета установившегося режима работы обобщенной цепи переменного тока с учетом высших гармоник, макрометод расчета переходных процессов в мостовой выпрямительной схеме с предвключенным сопротивлением в цепи переменного тока, основные положения вейвлет-преобразования сигналов и т.д. По всем вопросам курса даны примеры с подробными решениями. В конце каждой главы — вопросы и задачи для самопроверки.

Для студентов и преподавателей высших учебных заведений, инженеров, аспирантов и научных работников, электротехнических и близких к ним специальностей.