

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.313.333.1

А. В. БУБНОВ
Г. В. МАЛЬГИН
В. Д. РОВКИН

Омский государственный
технический университет,
г. Омск
Нижевартовский
государственный университет,
г. Нижневартовск

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ПУСКЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ФАЗНЫМ РОТОРОМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЕГО РАБОТЫ

В статье рассмотрен подход к оптимизации параметров системы управления асинхронного электропривода с фазным ротором с помощью численного моделирования электротехнического комплекса. Реализована численная модель электротехнического комплекса «Асинхронный двигатель с фазным ротором — Производственный механизм». Модель реализована в программном продукте «AdFr» в среде визуального программирования Delphi. В качестве инструмента расчета использован специализированный численный метод и алгоритм, реализованный в виде визуальных компонентов MIntegr и MVisual. Рассмотрены особенности анализа динамических режимов с учетом дискретно-непрерывного характера системы управления. Смоделированные режимы работы электропривода могут быть использованы для формирования требуемых динамических характеристик. Приведено сравнение параметров системы управления, полученных по разработанной методике и по классической методике формирования переходных режимов.

Ключевые слова: релейно-контактная система управления, асинхронный электропривод, фазный ротор, численное моделирование, численный метод, математическая модель, программный продукт.

Введение. Снижение себестоимости и повышение качества выпускаемой продукции, повышение энергоэффективности и ресурсосбережение во многом связано с широким использованием автоматизированного и автоматического электро-

привода [1, 2]. В современных производственных процессах задачи, решаемые регулирующими электроприводами, постоянно расширяются [3]. Эти процессы сопровождаются усложнением систем управления электроприводами при повышающихся

требованиях к надежности электроприводов, обеспечению простоты и удобства их управления, обслуживания и эксплуатации, снижению их массогабаритных показателей, а также капитальных затрат на создание электроприводов [4, 5].

Асинхронный электропривод с фазным ротором продолжает занимать значительное место на российском рынке управляемых электроприводов. В частности, большинство мостовых кранов выпускается с применением асинхронного электропривода с фазным ротором в механизмах подъема груза, передвижения тележки и передвижения моста. К общепризнанным достоинствам такого привода относятся: регулируемый пусковой момент и пусковой ток, высокая перегрузочная способность, высокая надёжность и простота как самого электродвигателя, так и релейно-контактной системы управления, невысокие капитальные затраты на сооружение электропривода и хорошие энергетические показатели электропривода (коэффициент мощности, к.п.д.) на рабочей характеристике.

Регулирование координат электропривода с фазным ротором в большинстве технологических механизмов осуществляется в переходных режимах работы: пуск и торможение. Время работы в этих режимах составляет доли процента от всего времени рабочего цикла и зависит от параметров электродвигателя и механической части технологического механизма. Однако именно в этих режимах и электродвигатель, и все остальные части механизма подвергаются наибольшей нагрузке (пусковой ток, динамический момент на валах механизма, повышенный нагрев).

Простота и надежность системы управления основываются на невысоких требованиях к точности формирования динамических характеристик. Как правило, используются системы управления, состоящие из секционных пусковых и тормозных реостатов, и их переключение осуществляется в функции времени. Отметим, что в большинстве промышленных систем с применением фазного электродвигателя обратные связи отсутствуют.

Математическая модель асинхронного электропривода. Общая модель электротехнического комплекса [6] содержит модели: электромеханического преобразователя энергии (электродвигателя), системы управления и производственного механизма. Переменные математических моделей физически разнородных подсистем электротехнического комплекса взаимосвязаны между собой и оказывают друг на друга взаимовлияние. Огромное разнообразие производственных и технологических механизмов, имеющих в своем составе регулируемый асинхронный привод, обладает сложной механической подсистемой, значительно влияющей на динамику всего комплекса.

Большое количество трудов российских и зарубежных ученых посвящены развитию теории асинхронных электроприводов. Однако отметим, что в большинстве из них рассматриваются проблемы исследования переходных режимов в электроприводах с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором в различных режимах работы.

В современной науке накоплен значительный опыт моделирования динамики электротехнических комплексов, включающих в свой состав асинхронный электропривод. При численном моделировании переходных процессов исходной является математическая модель асинхронного двигателя, записанная в фазных координатах.

Такая математическая модель позволяет рассчитать любые, в том числе и несимметричные режимы работы асинхронного электропривода, т.е. получить координаты электропривода в динамике при несимметрии параметров одной или нескольких фаз статора и ротора, несимметрии питающего напряжения и т.д. Математическая модель в фазной (не преобразованной) системе координат записывается непосредственно по законам Кирхгофа и ее удобнее решать с применением численных методов, ориентированных на системы дифференциальных уравнений, не преобразованных к нормальной форме Коши. Это, кроме всего прочего, позволяет непосредственно из системы дифференциально-алгебраических уравнений определять величины, которые возможно измерить в ходе натурального эксперимента. Наличие в электротехническом комплексе подсистем разной физической природы с разной скоростью протекания переходных процессов приводит к наличию свойства жесткости у системы дифференциально-алгебраических уравнений, составляющих математическую модель комплекса. Таким образом, для решения таких систем уравнений необходимо использовать численные методы и алгоритмы, обладающие свойством жесткой устойчивости. Свойство жесткости системы уравнений математической модели проявляется сильнее при введении в модель электротехнического комплекса непрерывных моделей быстродействующих полупроводниковых (диод, тиристор, транзистор) и релейных приборов.

Приведем далее известную систему дифференциально-алгебраических уравнений, составляющих фазную модель асинхронного электродвигателя [7]:

для обмоток статора

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_A}{dt} &= u_A - R_A i_A, \quad u_A = f(t, \omega, M, \dots); \\ \frac{d\Psi_B}{dt} &= u_B - R_B i_B, \quad u_B = f(t, \omega, M, \dots); \\ \frac{d\Psi_C}{dt} &= u_C - R_C i_C, \quad u_C = f(t, \omega, M, \dots); \end{aligned} \quad (1)$$

для обмоток ротора

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_a}{dt} &= -R_a i_a, \quad R_a = f(t, \omega, M), \\ \frac{d\Psi_b}{dt} &= -R_b i_b, \quad R_b = f(t, \omega, M), \\ \frac{d\Psi_c}{dt} &= -R_c i_c, \quad R_c = f(t, \omega, M), \end{aligned} \quad (2)$$

где $u_A, u_B, u_C, u_a, u_b, u_c$ — мгновенные значения фазных напряжений статора и ротора; $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$ — мгновенные значения фазных токов статора и ротора; $R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c$ — активные сопротивления фаз статора и ротора; $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$ — полные потокосцепления фаз статора и ротора.

Полные потокосцепления фаз (уравнения преобразованы) — это сумма произведений собственных индуктивностей фаз на токи в данных фазах и взаимных индуктивностей между данной фазой и другими фазами на токи в других фазах:

$$\begin{aligned} \Psi_A &= L_A i_A - \frac{1}{2} M (i_B + i_C) + M [i_a \cos(p\gamma) - \\ &- i_b \left(\frac{1}{2} \cos(p\gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(p\gamma) \right) + \end{aligned}$$

$$+ i_c \left[-\frac{1}{2} \cos(p\gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(p\gamma) \right],$$

$$\begin{aligned} \Psi_B &= L_B i_B - \frac{1}{2} M (i_A + i_C) + \\ &+ M \left[i_A \left(-\frac{1}{2} \cos(p\gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(p\gamma) \right) + \right. \\ &+ \left. i_B \cos(p\gamma) - i_C \left(\frac{1}{2} \cos(p\gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(p\gamma) \right) \right], \\ \Psi_C &= L_C i_C - \frac{1}{2} M (i_A + i_B) + \\ &+ M \left[-i_A \left(\frac{1}{2} \cos(p\gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(p\gamma) \right) + \right. \\ &+ \left. i_B \left(-\frac{1}{2} \cos(p\gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(p\gamma) \right) + i_C \cos(p\gamma) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Psi_a &= M \left[i_A \cos(p\gamma) + i_B \left(-\frac{1}{2} \cos(p\gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(p\gamma) \right) - \right. \\ &- \left. i_C \left(\frac{1}{2} \cos(p\gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(p\gamma) \right) \right] + L_a i_a - \frac{1}{2} M (i_b + i_c), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Psi_b &= M \left[-i_A \left(\frac{1}{2} \cos(p\gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(p\gamma) \right) + i_B \cos(p\gamma) + \right. \\ &+ \left. i_C \left(-\frac{1}{2} \cos(p\gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(p\gamma) \right) \right] + L_b i_b - \frac{1}{2} M (i_a + i_c), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Psi_c &= M \left[i_A \left(-\frac{1}{2} \cos(p\gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(p\gamma) \right) - \right. \\ &- \left. i_B \left(\frac{1}{2} \cos(p\gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(p\gamma) \right) + \right. \\ &+ \left. i_C \cos(p\gamma) \right] + L_c i_c - \frac{1}{2} M (i_a + i_b), \end{aligned}$$

где L — собственные индуктивности фаз; p — число пар полюсов; M — взаимные индуктивности между фазами обмоток статора и ротора.

В уравнения механической подсистемы входит мгновенное значение электромагнитного момента асинхронного двигателя. Он определяется как частная производная общего запаса электромагнитной энергии по геометрическому углу поворота ротора γ .

$$M_e = \frac{\partial W_{эм}}{\partial \gamma}. \quad (4)$$

Опуская некоторые известные преобразования, приведем уравнение для мгновенного значения электромагнитного момента, выраженного через реальные фазные токи статора и ротора асинхронного двигателя, угла поворота ротора и взаимную индуктивность:

$$\begin{aligned} M_e &= \frac{1}{2} p M [(-2(i_A i_a + i_B i_b + i_C i_c) + i_A i_b + \\ &+ i_A i_c + i_B i_a + i_B i_c + i_C i_a + i_C i_b) \sin(p\gamma) + \\ &+ \sqrt{3}(i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b - i_A i_b - i_B i_c - i_C i_a) \cos(p\gamma)]. \end{aligned} \quad (5)$$

Механическая подсистема асинхронного электродвигателя описывается уравнениями движения:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_e - \alpha\omega - k\gamma - M_m(t, \gamma, \dots)). \quad (6)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega. \quad (7)$$

Инструмент исследования динамики электротехнического комплекса. Традиционным способом решения систем смешанных дифференциально-алгебраических уравнений (1–3), (6–7) является приведение ее к нормальной форме Коши и применение одного из распространенных численных методов (Рунге–Кутта, Адамса–Башфорта и др.) [8–10]. Операция приведения системы уравнений к нормальной форме Коши является трудоемкой, а при наличии нелинейностей в моделях отдельных элементов системы часто не имеет аналитического решения.

Для решения систем смешанных дифференциально-алгебраических уравнений без приведения к нормальной форме Коши разработан ряд численных методов, специально ориентированных на специфические свойства математических моделей электротехнических комплексов:

- смешанная система дифференциально-алгебраических уравнений;
- наличие свойства жесткости (из-за большого различия постоянных времени переходных процессов в электрической, магнитной и механической подсистемах);
- дискретно-непрерывный характер системы управления.

Практика разработки научных и инженерных программных средств для задач анализа и синтеза моделей сложных электротехнических комплексов с учетом взаимосвязи процессов с различной физической природой [11] показала, что наиболее часто программные продукты выполняются на алгоритмических языках высокого уровня.

Современная тенденция развития программирования направлена на разработку и совершенствование средств так называемого визуального объектно-ориентированного программирования. При таком подходе разработчик новых программ пользуется какой-либо интегрированной средой разработки программ, которая включает в себя:

- встроенный редактор кода;
- палитру компонентов, которые являются фактически готовыми частями программы и выполняют различные функции, стандартная палитра может быть дополнена собственными компонентами и компонентами, полученными от других разработчиков или фирм-разработчиков;
- встроенный компилятор;
- встроенный отладчик программы;
- встроенная система помощи и т. д.

Визуальный подход к процессу программирования позволяет значительно сократить время на разработку и написание программы. Фактически разработчик программы проектирует внешний вид программы и ее функциональное назначение, затем собирает большую часть программы из стандартных или разработанных компонентов, настраивает их, и при этом интегрированная среда разработки самостоятельно формирует эту часть кода программы. Затем разработчик вставляет свою часть кода, формирующую функциональную часть программы.

Современные средства разработки прикладного программного обеспечения для научных и инженерных целей отличаются широким набором

стандартных компонентов, мощным отладчиком программ, удобным редактором кода, быстродействующим компилятором, хорошей системой помощи, содержащей большое количество примеров и большим количеством сервисных функций, облегчающих процесс написания и отладки программ.

Для построения наиболее эффективных процедур численного моделирования электротехнических комплексов разработан широкий арсенал методов, ориентированных на форму записи моделей электротехнических комплексов и специфические свойства этих моделей.

Математические модели ЭТК накладывают специфические требования на численный метод:

— формула метода должна учитывать специфическую форму записи математической модели электротехнических комплексов в виде дифференциально-алгебраической системы уравнений;

— наличие в составе электротехнических комплексов подсистем различной физической природы приводит к жесткости полученной системы уравнений, кроме того, жесткость может усиливаться за счет наличия в составе электротехнических комплексов элементов имеющих дискретный характер изменения параметров (полупроводниковые приборы, электромеханические коммутаторы и пр.), что требует наличия свойства жесткой устойчивости численного метода;

— наличие дискретных элементов в составе электротехнических комплексов требует от численного метода свойств плотной выдачи результатов расчета для поиска заранее неизвестных моментов коммутации дискретных элементов.

Удовлетворяют данным требованиям семейство канонических методов, из которых, в частности, построены канонические «дискретно-непрерывные» методы:

$$x_3 = \alpha_0 x_0 + \alpha_1 x_1 + h[A_T - haA_T]^{-1} \times \left(\beta_0 f[x(t); t + \gamma_0 h] + \beta_1 f[x(t+h); t + \gamma_1 h] + \beta_2 f[x(t+2h); t + \gamma_2 h] \right), \quad (8)$$

$$x_3 = \alpha_0 x_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + h[A_T - haA_T]^{-1} \times \left(\beta_0 f[x(t); t + \gamma_0 h] + \beta_1 f[x(t+h); t + \gamma_1 h] + \beta_2 f[x(t+2h); t + \gamma_2 h] + \beta_3 f[x(t+3h); t + \gamma_3 h] \right). \quad (9)$$

Предложенный набор канонических численных методов (8), (9) с различными наборами коэффициентов реализован в виде компонентов MIntegr и MVisual для среды визуального программирования Delphi. Эти компоненты представлены в палитре компонент на странице MagComp_4. Компонент MVisual отличается от MIntegr наличием специального окна, позволяющего наблюдать и редактировать большинство параметров и значений, используемых в процессе расчета каждого шага переходного процесса (рис. 1). В компонентах MIntegr и MVisual реализован алгоритм численного интегрирования с использованием канонических численных методов с автоматическим выбором шага интегрирования и оценкой погрешности. Дополнительно в программных продуктах MaG и MIntegr реализован встроенный алгоритм поиска моментов коммутации дискретных элементов, изменяющих свои внутренние параметры в зависимости как от переменных, которые являются переменными состояния, так и от других зависимых и независимых переменных.

Исследование динамических режимов работы электротехнического комплекса. Разработанные методы и прикладные программные продукты (рис. 2) позволяют получить характеристики переходных процессов при пуске, останове асинхронного управляемого электропривода, а также при сбросе и набросе нагрузки (при переменной нагрузке).

В приведенном численном эксперименте использовался регулируемый асинхронный электропривод с фазным ротором и пятисекционным реостатом. Система управления — релейно-контактная. При срабатывании контактов секционного реостата происходит дискретное изменение параметров математической модели электротехнического комплекса.

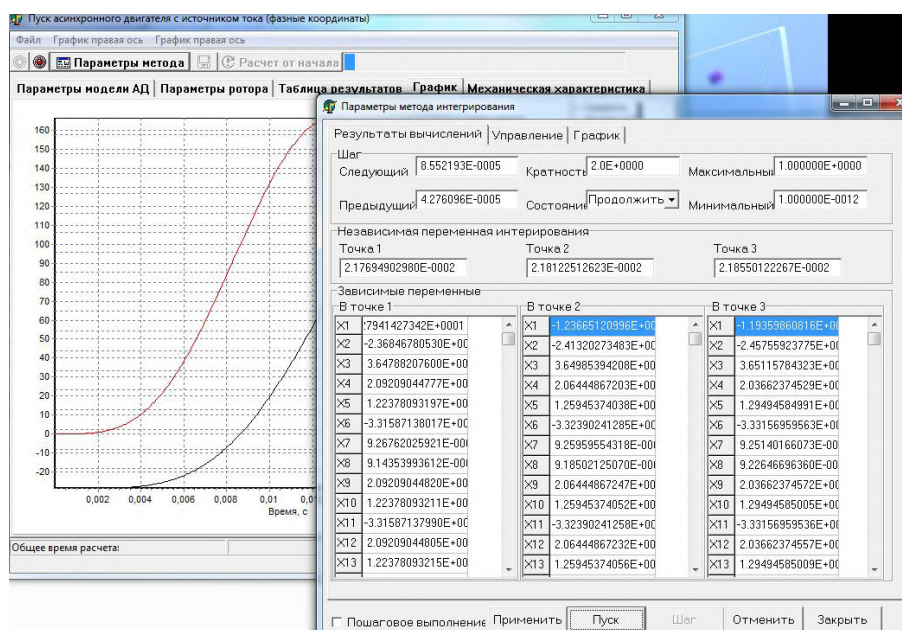


Рис. 1. Демонстрация визуальных компонентов MVisual и MIntegr при расчете динамики пуска асинхронного двигателя с фазным ротором

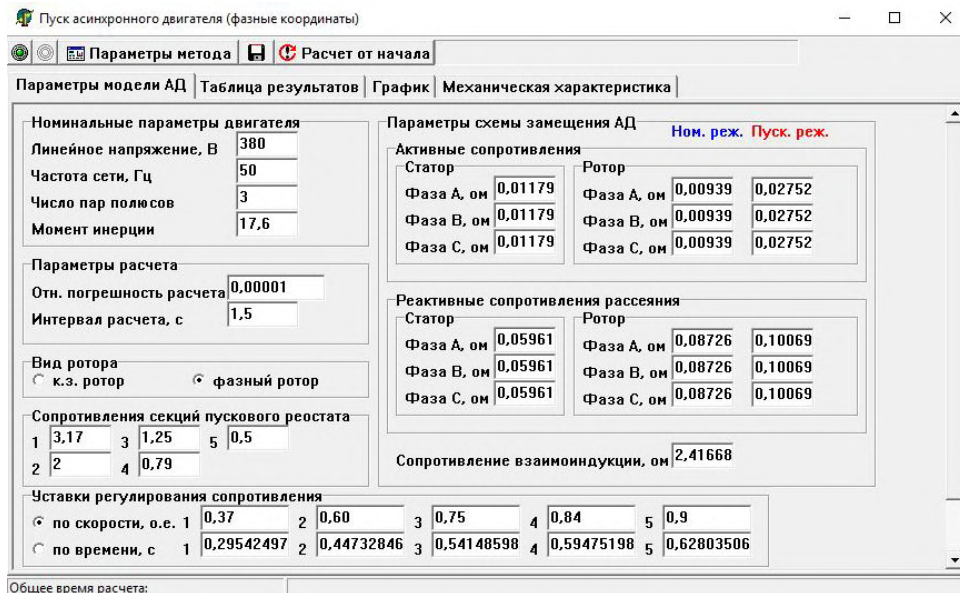


Рис. 2. Окно ввода параметров математической модели электротехнического комплекса

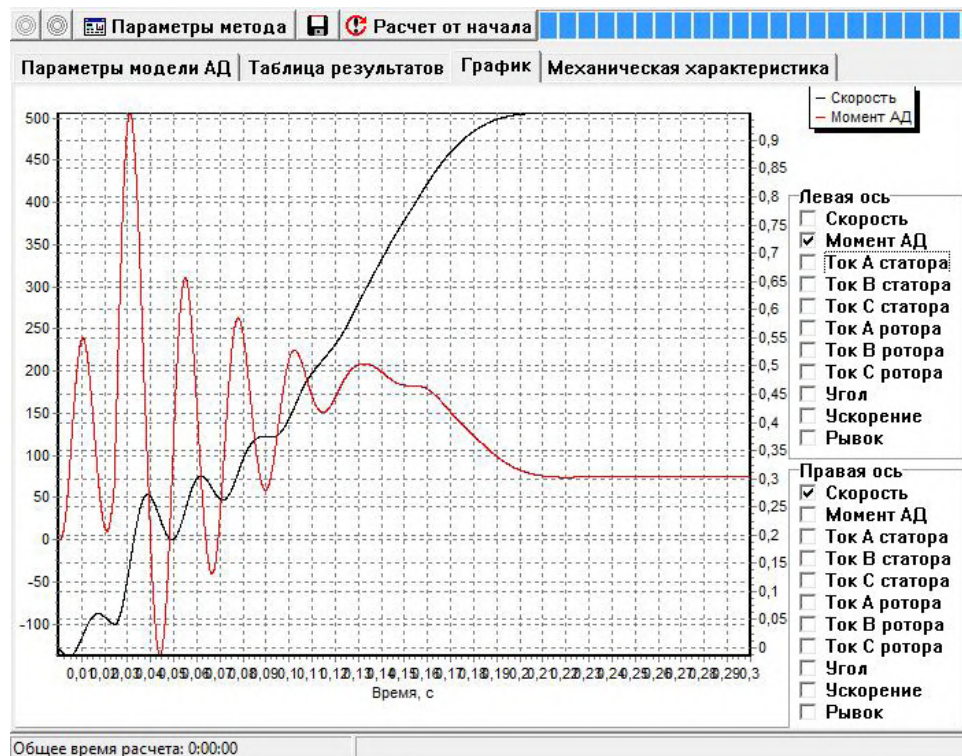


Рис. 3. Эксперимент 1: Результаты расчета переходных процессов пуска асинхронного электродвигателя (электромагнитный момент и скорость)

Рассчитаны переходные процессы пуска для двух законов управления секционными реостатами.

Численный эксперимент 1. Традиционный метод определения уставок реле времени релейно-контактной системы управления — по статическим механическим характеристикам асинхронного электродвигателя графоаналитическим методом. Пуск осуществляется в функции времени.

Результаты расчета переходных процессов представлены на рис. 3–4.

Численный эксперимент 2. Анализ результатов численного эксперимента 1 показывает, что в процессе регулирования не обеспечивается разгон до желаемых скоростей, соответствующих заданному переключающему моменту на валу электропривода, в том числе не обеспечиваются равные максимальные ускорения на пусковых ступенях, что приводит к неравномерным значительным броскам динамического момента, рывкам в механике и броскам мгновенного значения тока в фазах

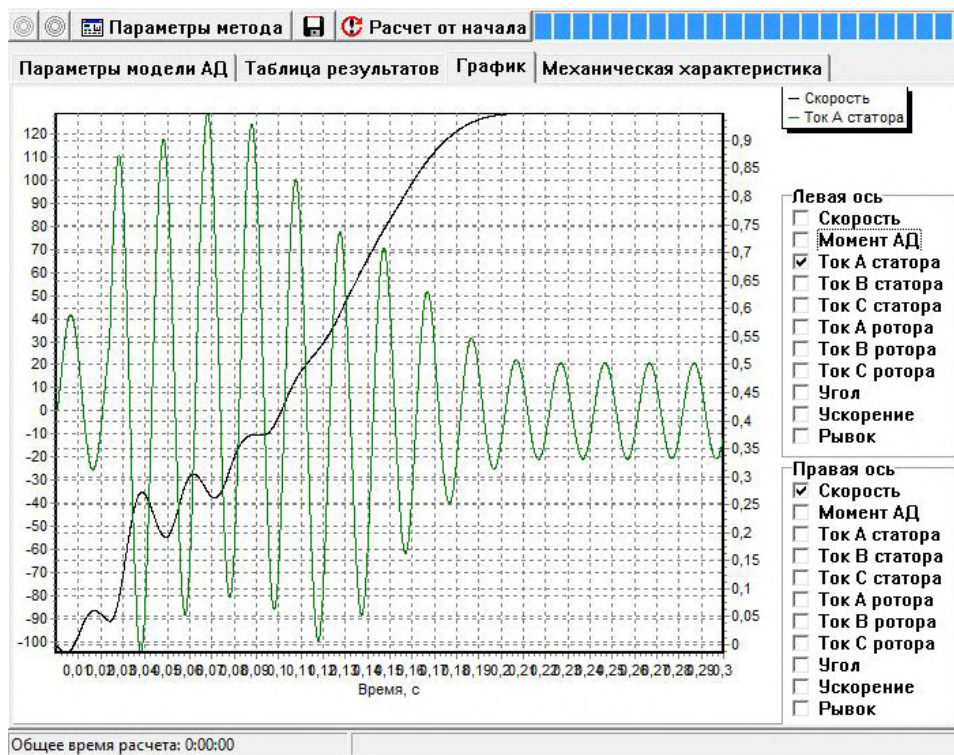


Рис. 4. Эксперимент 1: Результаты расчета переходных процессов пуска асинхронного электродвигателя (ток фазы А статора и скорость)

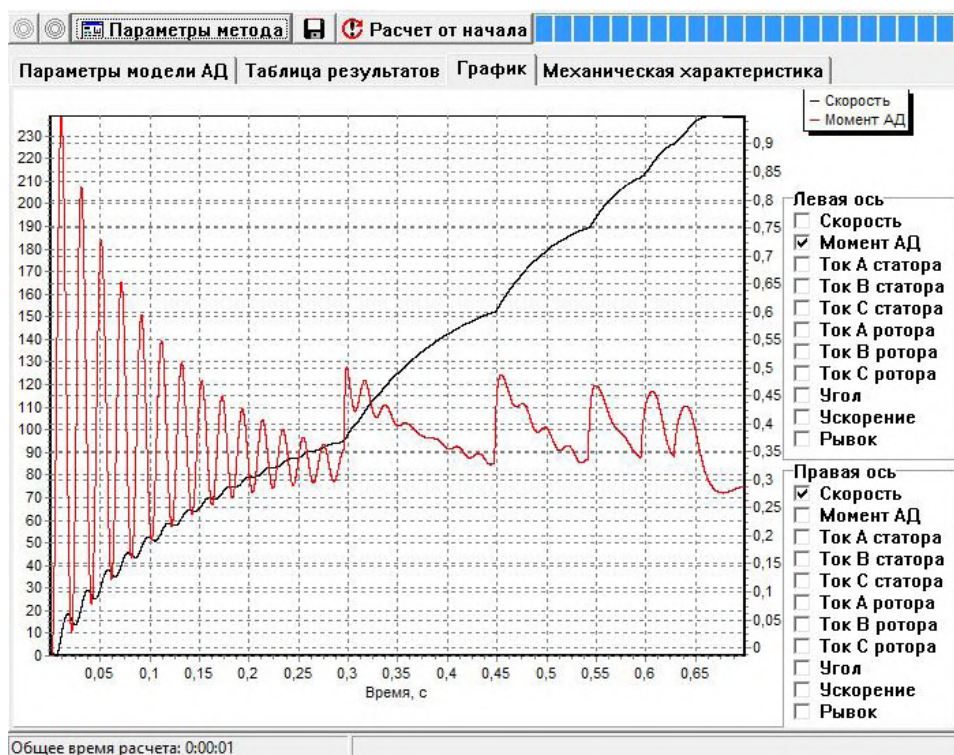


Рис. 5. Эксперимент 2: Результаты расчета переходных процессов пуска асинхронного электродвигателя (электромагнитный момент и скорость)

электродвигателя. Таким образом, не обеспечивается желаемое качество пускового режима асинхронного электропривода.

Для повышения качества переходных процессов смоделируем автоматический пуск электропривода в функции скорости.

Результаты расчета переходных процессов представлены на рис. 5–6.

Выводы. Анализ полученных в «численном эксперименте 2» динамических характеристик позволяет определить оптимальные уставки реле времени для использования в релейно-контактной схеме,

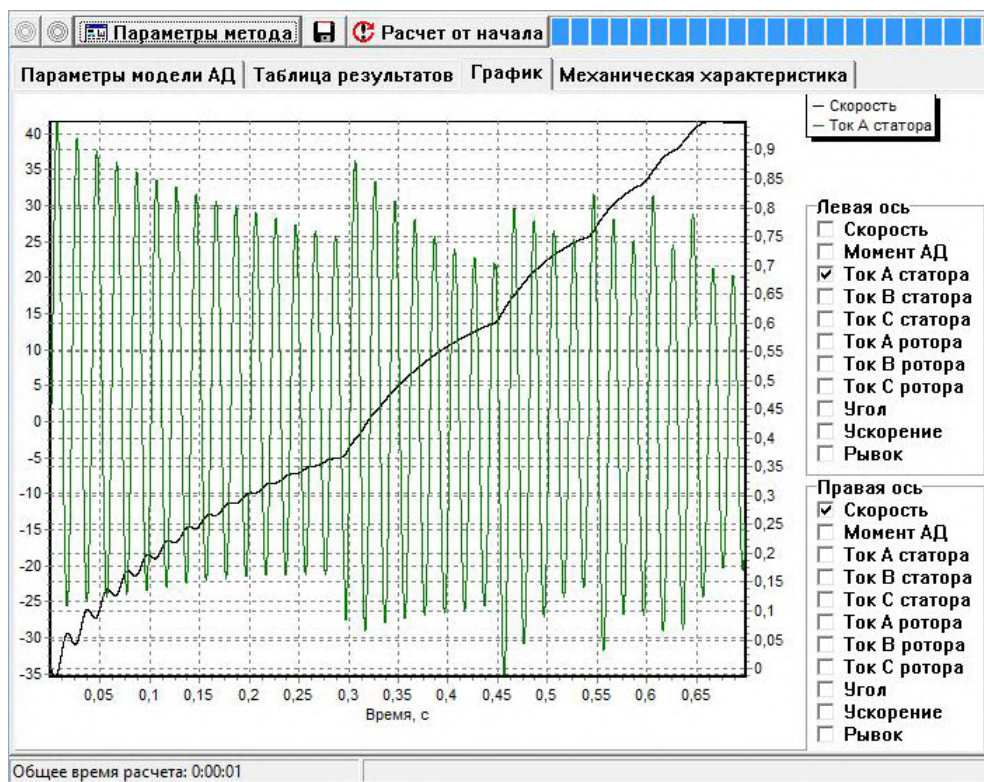


Рис. 6. Эксперимент 2: Результаты расчета переходных процессов пуска асинхронного электродвигателя (ток фазы А статора и скорость)

Таблица 1

	Номер секций пусковых реостатов				
	1	2	3	4	5
Традиционная методика: время разгона электропривода на ступени (с)	0,151	0,095	0,061	0,038	0,024
Разработанная методика: время разгона электропривода на ступени (с)	0,295	0,152	0,094	0,053	0,033

реализующей пуск асинхронного электропривода. При этом мгновенные значения токов, электромагнитного момента, ускорения электропривода не превышают заданных значений, однако несколько увеличивается общее время пуска (табл. 1).

Библиографический список

1. Malgin G. V., Veynblat A. V. Using the Potential of Energy and Resource Conservation in Oil Field Power Supply Networks // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2016. IEEE, 2016. P. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819044.
2. Shekochihin A. V., Bubnov A. V., Shekochihina I. A., Kirichenko A. N. & Barskov V. V. State estimation programs application for computation problems solution of electrical power systems steady-state modes based on operating restrictions // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2014. IEEE, 2014. P. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005693.
3. Bubnov A. V., Chudinov A. N., Emashov V. A. Tracking Mode Implementation Features for the Synchrophase Electric Drive // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2016. IEEE, 2016. P. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7818990.
4. Bepalov A. V., Malgin G. V., Weinblat A. V. Possibility of adjusting submersible motors at borehole fluid production // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 11–13 Nov., 2014. IEEE, 2014. P. 1, 6. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005638.
5. Бубнов А. В., Бубнова Т. А., Чуудинов А. Н. Новые принципы и способы организации управления синхронно-сифазным электроприводом сканирующих систем // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2012. № 1 (107). С. 192–196.
6. Ковалев В. З., Мальгин Г. В., Архипова О. В. Математическое моделирование электротехнических комплексов нефтедобычи в задачах энергосбережения: моногр. Ханты-Мансийск: Полиграфист. 2008. 222 с.
7. Беспалов А. В., Мальгин Г. В., Щербаков А. Г. Динамические режимы электротехнического комплекса, содержащего асинхронный двигатель с фазным ротором // Омский научный вестник. 2005. № 1. С. 135–141.
8. Enright W. H., Hull T. E., Linberg B. Compaing numerical methods for stiff systems of ordinary differential equations // BIT. 1975. 15. № 1. P. 10–48.
9. Gear C. W. Multirate linear multistep methods // BIT 24. 1984. P. 484–502.
10. Lambert J. D. Computational Methods in Ordinary Differential Equations. (Introductory Mathematics for Scientists and Engineers). John Wiley & Sons: London/New York/Sydney/Toronto, 1973. XV + 278 P.

11. Сушков В. В., Велиев М. К., Гладких Т. Д., Мальгин Г. В. Экономия электроэнергии и снижение потерь в электротехнических комплексах нефтегазодобычи: моногр. Нижневартовск: Изд-во Нижневартовского гос. ун-та. 2015. 219 с.

БУБНОВ Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрическая техника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).
Адрес для переписки: bubnov-av@bk.ru

МАЛЬГИН Геннадий Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Энергетика» Нижневартовского государственного университета.

Адрес для переписки: mag_@list.ru

РОВКИН Вячеслав Дмитриевич, аспирант кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ.

Адрес для переписки: rovkin.vd@gmail.com

Статья поступила в редакцию 02.02.2017 г.

© А. В. Бубнов, Г. В. Мальгин, В. Д. Ровкин

УДК 629.436

В. Р. ВЕДРУЧЕНКО
В. В. КРАЙНОВ
Е. С. ЛАЗАРЕВ
П. В. ЛИТВИНОВ

Омский государственный
университет путей сообщения,
г. Омск

ИНДИЦИРОВАНИЕ КАК МЕТОД РЕГУЛИРОВАНИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Сформированы требования к индикаторной диаграмме дизеля как к основному экспериментальному материалу при испытаниях и исследованиях двигателя на разных по свойствам топливах. Приведена классификация индикаторов и рекомендации по их выбору для конкретных условий испытания дизеля. Рассмотрены различные конфигурации индикаторных диаграмм рабочего процесса двигателя и их связь с особенностями регулировки параметров рабочего процесса, необходимых при переводе дизеля на другие сорта и марки топлива. Проанализированы современные измерительные комплексы для диагностирования и визуального наблюдения за развитием рабочего процесса дизельного двигателя.

Ключевые слова: индикаторная диаграмма, альтернативное топливо, давление газов в цилиндре, угол опережения впрыска топлива.

Введение. Рабочий процесс, протекающий в цилиндрах дизеля, определяет основные показатели двигателя — мощность, удельный расход топлива, максимальные нагрузки в деталях и температурное состояние деталей цилиндропоршневой группы [1–5]. Главные задачи при исследовании рабочего процесса состоят в установлении зависимостей основных его показателей от различных конструктивных параметров, при которых достигаются наилучшие показатели рабочего процесса [1, 2, 4, 5].

Основным экспериментальным материалом, служащим для оценки совершенства рабочего процесса, протекающего в цилиндре дизеля, является индикаторная диаграмма процесса и часовой расход топлива [3, 5]. Из индикаторной диаграммы можно получить при соответствующей обработке большинство параметров, характеризующих рабо-

чий процесс, — среднее индикаторное давление P_i , давление сжатия P_c , максимальное давление сгорания P_{max} , скорость нарастания $dp/d\phi$, характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля (закон выгорания топлива $x_i = f(\phi)$, скорость тепловыделения $dx_i/d\phi = f(\phi)$, продолжительность сгорания q_i), температуру газа в цилиндре в любой момент времени и многие другие параметры. По часовому расходу топлива определяют средний индикаторный и средний эффективный (при известной эффективной мощности дизеля) расход топлива [3–5].

Таким образом, для оценки качества рабочего процесса дизеля основными параметрами, подлежащими измерению, являются эффективная мощность (крутящий момент и частота вращения коленчатого вала), часовой расход топлива и индикаторная диаграмма [1, 2, 4, 5].

Индикаторная диаграмма давления в цилиндре двигателя является наиболее существенной частью экспериментального материала, используемого при исследовании рабочего процесса [1–3, 5]. В зависимости от целей и задач исследования к индикаторам давлений предъявляют различные требования, которым полностью не удовлетворяет ни один из существующих индикаторов [1, 2, 5].

Выбор типа индикатора. Все существующие типы индикаторов классифицируются по виду записываемых диаграмм и по принципу работы [1, 2]. В зависимости от вида записываемой диаграммы различают индикаторы, записывающие изменение давления в зависимости от перемещения поршня (свёрнутые диаграммы), и изменение давления в зависимости от времени или угла поворота коленчатого вала (развёрнутые диаграммы). Первый вид наиболее удобен в эксплуатационных условиях для быстрого определения величины среднего индикаторного давления. Второй вид необходим при исследовании динамики тепловыделения, процесса газообмена и для решения других задач [4]. Свёрнутые индикаторные диаграммы имеют погрешности, связанные с работой привода [1, 5].

По принципу работы индикаторы делят на механические, электрические (электронные) и стробоскопические [1, 2].

Современная практика ориентируется на применение электронных индикаторов, обладающих практически неограниченными возможностями по частоте (до 2000 об/мин), и погрешность используемых датчиков не превышает 0,2 % [1, 2].

Например, в комплект индикатора фирмы «Аутроник» входят [1, 4]:

- персональный компьютер с программным обеспечением по обработке индикаторных диаграмм и принтером;

- переносные или стационарно устанавливаемые тензодатчики давления газов с пределами измерения до 10...15 или 20 МПа и точностью 1 %; допустимая температура 300 °С. В последней модификации прибора фирма перешла на пьезокварцевые датчики фирмы «Кистлер», допускающие температуры до 400 °С;

- переносной тензодатчик измерения давления топлива с пределами измерения 0–100 или 200 МПа и точностью 1 %. Допустимая температура 150 °С;

- тензодатчик давления наддувочного воздуха;

- индуктивный датчик для точного определения положения рабочего поршня и скорости вращения коленчатого вала.

Результат измерений в виде кривых давлений и цифровых значений измеренных параметров выводятся на цветной дисплей и печатающее устройство. Встроенный в систему микропроцессор позволяет сохранять в памяти данные измерений, а также сопоставлять новые данные с прежними или эталонными.

Результаты индицирования и их анализ.

На рис. 1 приведена типовая индикаторная диаграмма дизельного двигателя фирмы «Бурмейстер и Вайн» [1], снятая при отлаженной топливной аппаратуре, исправных индикаторе и его приводе.

Заметим, что нормальному состоянию привода индикатора должно соответствовать совпадение линий сжатия (2) и расширения (7) диаграммы. На практике часто на одной ленте индикаторной бумаги часто снимают и свёрнутую (6) и развёрнутую (8) диаграммы, что позволяет учитывать характер протекания рабочего процесса дизеля вблизи ВМТ.

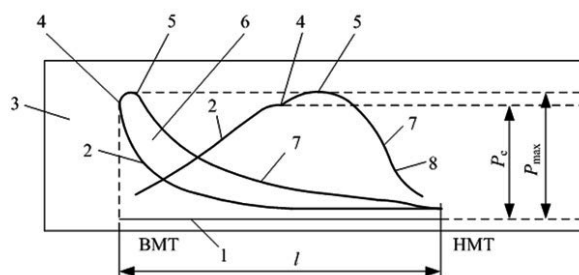


Рис. 1 Типовая индикаторная диаграмма дизеля:
1 — атмосферная линия; 2 — линия сжатия;
3 — индикаторная бумага; 4 — воспламенение;
5 — сгорание; 6 — нормальная индикаторная диаграмма;
7 — линия расширения;
8 — развёрнутая индикаторная диаграмма;
l — длина индикаторной диаграммы;
ВМТ — верхняя мертвая точка;
НМТ — нижняя мертвая точка; P_c — давление сжатия;
 P_{max} — максимальное давление сжатия

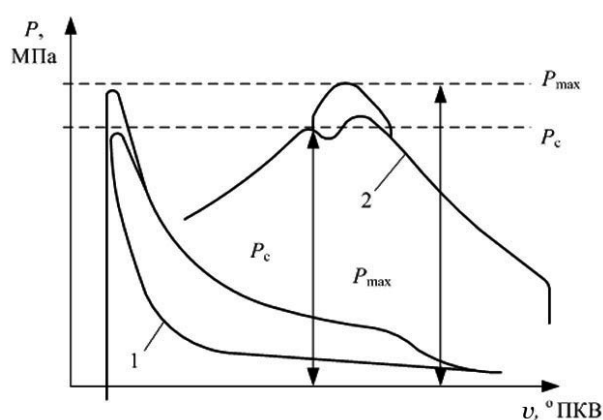


Рис. 2. Индикаторная диаграмма при позднем впрыске топлива в цилиндр
(P_c — в норме; P_{max} — низкое):
1 — свёрнутая; 2 — развёрнутая

На рис. 2 показана индикаторная диаграмма дизеля, снятая при слишком позднем впрыске топлива в цилиндр. При этом давление сжатия (P_c) в норме, а максимальное давление сгорания (P_{max}) низкое. Это может случиться из-за следующих дефектов: неисправности форсунок, низкого давления впрыска топлива или низкого качества самого топлива, малого опережения угла впрыска топлива. Одновременно снижается давление P_{max} , растёт температура выпускных газов t_r .

При слишком раннем впрыске топлива (рис. 3) P_{max} повышается сверх нормы при удовлетворительном значении P_c . Для нормализации рабочего процесса необходимо уменьшить угол опережения впрыска топлива, а при увеличении нагрузки проверяют P_{max} , чтобы оно не превышало допустимое значение для данного типа дизеля.

Если P_c и P_{max} (рис. 4) ниже нормы, то возможны следующие причины этого: прорыв газов через поршневые кольца, неплотность седла выпускного клапана, низкое давление наддувочного воздуха и др. При этом значение характеризует экономичность протекания рабочего процесса и уровень механической напряжённости, а отклонение от среднего значения должно быть в пределах $\pm 2,5$ % от среднего. Уменьшение значения P_c свидетельствует о падении

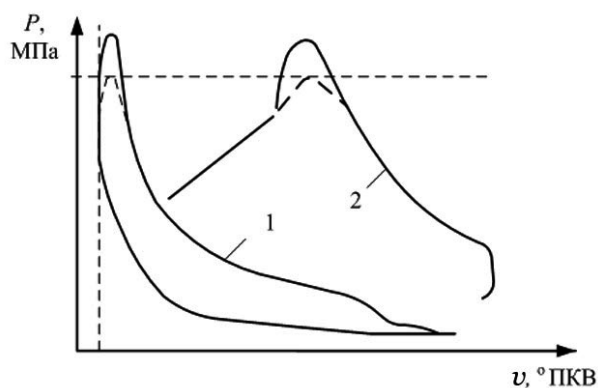


Рис. 3. Индикаторная диаграмма при раннем впрыске топлива в цилиндр (P_{\max} — выше нормы, P_c — удовлетворительное):
1 — свернутая; 2 — развернутая

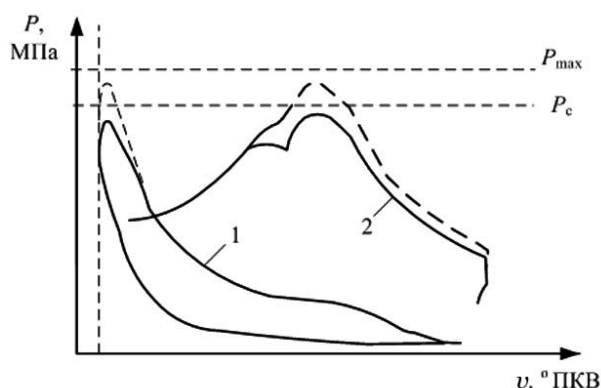


Рис. 4. Индикаторная диаграмма при значениях P_{\max} и P_c ниже нормы:
1 — свернутая; 2 — развернутая

давления наддува, потере плотности клапанов и износе деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ). Регулирование P_{\max} достигается путём изменения угла опережения впрыска топлива.

Регулировки при использовании альтернативных видов топлива. Наряду с использованием традиционных углеводородных топлив в судовых, стационарных и транспортных дизелях возможно применение искусственных или синтетических топлив не нефтяного происхождения (альтернативных) как в чистом виде, так и в качестве добавок к углеводородным моторным топливам (нефтяного происхождения) [4, 6, 7].

По прогнозам фирмы Даймлер-Бенц (ФРГ) в будущем наиболее вероятно использование следующих альтернативных топлив для дизелей: дизельное топливо из угля, растительные масла и их производные эфиры, спирты и их производные. В ряде стран предполагается использование в качестве сырья для топлива битуминозных песков и сланцев [2, 7].

Свойства искусственных жидких топлив (ИЖТ) изменяются в ещё более широком диапазоне, чем у выпускаемых ныне, и перспективных нефтяных топлив. Это выражается, прежде всего, в снижении цетанового числа (ЦЧ), повышении температур помутнения и застывания (отказы в работе при низких температурах окружающего воздуха), в увеличении содержания серы и образовании ок-

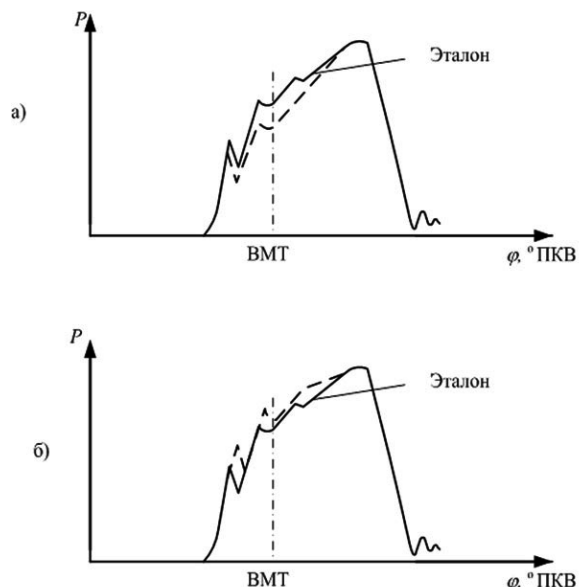


Рис. 5. Осциллограммы подачи топлива в дизеле при регулировках давления затяга пружины форсунки:
а — затяг пружины форсунки ослаблен;
б — затяг пружины форсунки чрезмерный

сида серы и кислот, увеличению воды и примесей и др. Так, топлива из угля содержат около 9,5–11 %, а из сланцев 10,5–12 % водорода, углерода — 80–89 %. В этих топливах (без специальной очистки) может быть повышенное содержание серы, азота, кислородсодержащих соединений.

В ряде стран, например в Японии, переход на газовое топливо рассматривается как радикальная мера снижения вредных выбросов автомобилей.

Однако топлива разных сортов и марок, в том числе альтернативные, обладают разными значениями вязкости, плотности, сжимаемости, фракционным составом, составом горючих элементов и т.д. Поэтому характер индикаторной диаграммы будет различным в связи с различной скоростью сгорания и тепловыделения, что проявляется в величине периода задержки воспламенения (ПЗВ). Величина ПЗВ предопределяет индикаторные показатели двигателя и конфигурацию индикаторной диаграммы [4].

Наиболее доступными мероприятиями по регулировкам двигателя при этом является изменение угла опережения впрыска топлива и изменение величины усилия затяга пружины форсунки [8].

Результаты названных технических мероприятий (регулировок) отображаются индикаторной диаграммой двигателя при сравнении с её эталонной конфигурацией на стандартном дизельном топливе [8].

Анализ процесса впрыска по осциллограммам.

На рис. 5 приведены осциллограммы подачи топлива в цилиндр дизеля при разных значениях усилия затяга пружины форсунки [4].

Анализ опыта эксплуатации дизелей и выполненные исследования с индицированием и осциллографированием показывают, что физическая сущность топливоподачи в дизелях в целом проявляется в регулировочных и рабочих характеристиках топливной аппаратуры [1, 2, 4]. Поэтому, когда практика эксплуатации ставит инженера-механика перед необходимостью анализа причин изменения

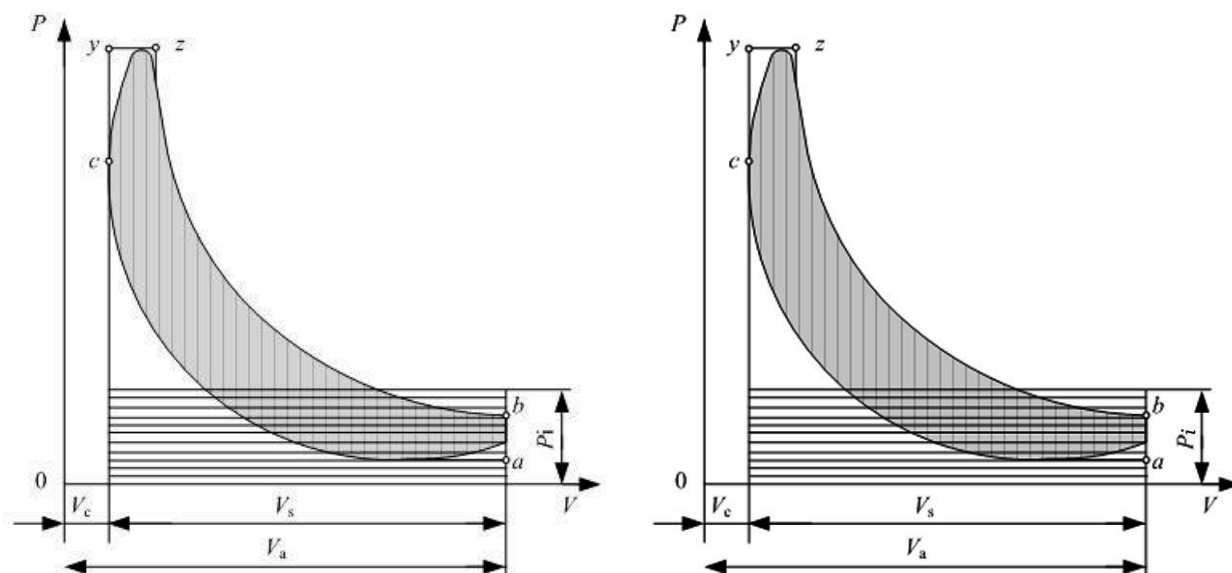


Рис. 6. Определение среднего индикаторного давления графическим способом на свернутой индикаторной диаграмме:

P_i — среднее индикаторное давление; V_s — рабочий объем цилиндра;
 V_c — объем камеры сжатия; a, b, c, y, z — характерные точки цикла дизеля

энергетических и экономических показателей работы дизеля или надёжности элементов деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ), при условии стабильности воздухообеспечения цилиндров причину следует искать прежде всего в нарушении регулировочных или рабочих параметров топливной аппаратуры [4].

Правила технической эксплуатации регламентируют уровни допустимых отклонений параметров от их среднего (по цилиндрам) значения [1, 4].

Из кривых на рис. 5а видно, что открытие иглы форсунки происходит раньше эталона при более низком давлении, что свидетельствует об ослаблении затяга пружины иглы форсунки при её поломке.

Из кривых на рис. 5б видно, что давление открытия иглы выше нормального, и поэтому игла открывается позже. Из этого следует, что позже начинается и начало подачи топлива. Причина — затяг пружины иглы форсунки превышает нормальную величину, принятую установленными правилами эксплуатации дизелей данного типа [5].

Как уже было определено выше, результаты индицирования позволяют получить непосредственно на экране осциллографа как развёрнутую, так и свёрнутую индикаторные диаграммы (рис. 1). Последняя используется обычно для определения значения среднего индикаторного давления P_i [7]. На практике для удобства ведения расчётов и сравнения разных двигателей переменные по ходу поршня давления можно заменить постоянным (фиктивным) давлением, обеспечивающим получение той же работы, что и цикл с переменным давлением. Данное давление называется средним индикаторным давлением P_i . Графически среднее индикаторное давление (рис. 6) представляет собой высоту прямоугольника, площадь которого равна площади индикаторной диаграммы, а основание — длине диаграммы [7].

Выбор технических средств индицирования дизеля. Для наблюдения и регистрации мгновенных значений электрических сигналов, пропорциональных быстро изменяющимся давлениям в рабочих

цилиндрах дизелей, в настоящее время используются электрические индикаторы в составе электрических комплексов [1, 2].

Так, фирма «Аутроник» выпускает комплексы НК-5 [1, 4]. С помощью этого комплекса можно получить наиболее полную информацию о протекании рабочего процесса во всех цилиндрах двигателя и распознать возникающие в нём нарушения, в том числе и в работе топливной аппаратуры. С этой целью предусмотрен датчик высокого давления, устанавливаемый на топливопроводе высокого давления у форсунки. Кроме того, для данных целей предусмотрены следующие датчики: давления наддува, ВМТ, угла поворота вала, а также давления газов в цилиндре.

Измерительная система Diesel Master 1000 [1] предназначена для непрерывного контроля нагрузки дизеля и параметрической диагностики рабочего процесса в его цилиндрах. Система предназначена для использования на дизелях при частотах вращения от 30 до 3000 мин⁻¹.

В состав системы входят:

- персональный компьютер ДМ1000-РС, рабочее место оператора;
- блок аппаратного интерфейса;
- датчики частоты вращения, давления газа, впрыска топлива и положения рейки топливного насоса.

На рис. 7 приведена схема комплекса «Дизель-Адмирал», разработанного отечественными специалистами [1]. Комплекс создан на базе разработанных уникальных высокотемпературных неохлаждаемых датчиков давления газа и специального программного обеспечения, использующего современные компьютеры типа WorkStation.

Специализированный комплекс «Дизель-Адмирал» предназначен для контроля рабочего процесса, измерения, обработки и протоколирования теплотехнических параметров дизеля.

Разработанные датчики и комплексы контроля широко используются на судах и кораблях, на железнодорожном и автомобильном транспорте. Датчиками и комплексами серии «Дизель-Адмирал»

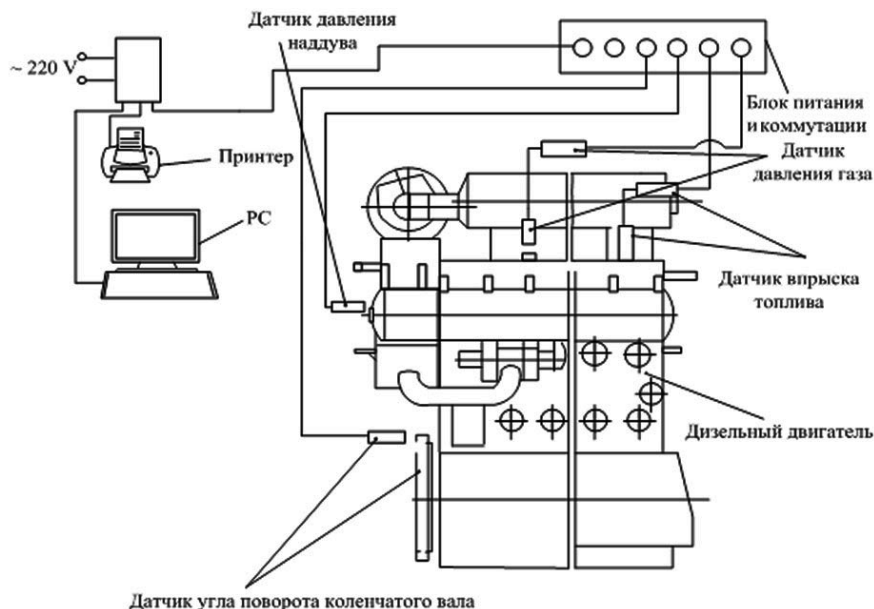


Рис. 7. Схема комплекса теплотехнического контроля «Дизель-Адмирал»

оснащены дизельные стенды научных, учебных, производственных и ремонтных предприятий [1].

Наиболее простым вариантом таких систем являются переносные электронные индикаторы, включающие пьезокварцевый датчик давления, датчик частоты вращения и ВМТ и переносной электронный регистрирующий блок [4]. После завершения индицирования всех цилиндров двигателя информация переписывается в обычный персональный компьютер, в котором обрабатывается по специальной программе. Преимуществом электронных индикаторов является возможность индицировать любые двигатели, отсутствие ручной обработки диаграмм и удобство хранения и передачи информации.

Заметим, что в наших исследованиях по индицированию дизелей разной размерности [8] был создан измерительный комплекс, включающий в себя двухлучевой электронный низкочастотный осциллограф С1-19, тензометрическая станция УНТС-12, комплект тензометрических датчиков давления типа ДДТ-100, другие устройства и приборы. Названные элементы, как правило, составляют основу современных измерительных комплексов для индицирования дизелей.

Выводы.

1. Индикаторная диаграмма является основным экспериментальным материалом для оценки качества рабочего процесса дизельного двигателя.

2. Достоверность параметров рабочего процесса двигателя, полученных с помощью индикаторной диаграммы, определяется выбором типа сертифицированных индикатора и датчиков давления и тарировкой всей измерительной системы.

3. При переводе дизеля на работу с использованием альтернативных видов топлива индицирование является наиболее эффективным приемом диагностирования и регулирования параметров рабочего процесса для приближения их значений к таковым при работе на стандартном дизельном топливе.

4. Наиболее информативными методами индицирования двигателей является использование унифицированных диагностических комплексов на базе современных ПЭВМ.

Библиографический список

1. Пахомов Ю. А. Основы научных исследований и испытаний тепловых двигателей. М.: Транслит, 2014. 432 с.
2. Прокопенко Н. И. Экспериментальные исследования двигателей внутреннего сгорания. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Лань. 2010. 592 с. ISBN 978-5-8114-1047-7.
3. Стефановский Б. С., Скобцов Е. А., Корсин Е. К. [и др.]. Испытания двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1972. 368 с.
4. Возницкий И. В., Пунда А. С. Судовые двигатели внутреннего сгорания. М.: Моркнига, 2010. 382 с.
5. Райков И. Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания. М.: Высшая школа, 1975. 320 с.
6. Епифанов, В. С. Применение природного газа в судовых энергетических установках // Речной транспорт. 2008. № 4. С. 77–84.
7. Фомин Ю. Я. [и др.]. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Л.: Судостроение, 1989. 344 с.
8. Ведрученко В. Р. Методика индицирования среднеоборотного судового дизеля // Передовой опыт и новая техника: сб. ЦБНТИ МРФ / Центральное бюро научно-технической информации Минречфлота. М., 1981. Вып. 4. С. 37–42.

ВЕДРУЧЕНКО Виктор Родионович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Теплоэнергетика».

Адрес для переписки: vedruchenkovr@mail.ru

КРАЙНОВ Василий Васильевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теплоэнергетика».

Адрес для переписки: KrainovVV@omgups.ru

ЛАЗАРЕВ Евгений Сергеевич, преподаватель, инженер кафедры «Теплоэнергетика».

Адрес для переписки: Incoe@yandex.ru

ЛИТВИНОВ Павел Васильевич, аспирант кафедры «Теплоэнергетика».

Адрес для переписки: p_vasilich55@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.03.2017 г.

© В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, Е. С. Лазарев,

П. В. Литвинов

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ С НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТОЙ В РЕЖИМЕ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА

В статье рассмотрен вопрос уменьшения гармонических искажений, связанный с ростом нелинейной нагрузки в виде частотно-регулируемых асинхронных двигателей, импульсных источников питания, инверторов синусоидального напряжения, корректоров коэффициента мощности.

Использован имитационный и экспериментальный метод исследования. Метод имитационного моделирования основан на использовании алгоритмических моделей, реализуемых на ЭВМ, для исследования процесса функционирования систем. Метод экспериментального исследования заключается в анализе полученных осциллограмм и сопоставлении результатов имитационной и физической модели.

По результатам исследования предложена широтно-импульсная модуляция с хаотически изменяющейся несущей частотой. Подход такого рода позволил уменьшить уровень амплитуд гармоник высшего порядка, электромагнитных помех и улучшить качество генерируемого выходного напряжения. Проведенные в работе исследования могут быть использованы на стадии проектировки устройств силовой электроники, а также для проведения дальнейших исследований, направленных на применение детерминированного хаоса в электротехнике.

Цель работы: улучшение спектрального состава и качества напряжения приборов силовой электроники с помощью хаотического изменения несущей частоты широтно-импульсной модуляции.

Ключевые слова: широтно-импульсная модуляция, силовая электроника, преобразователи частоты, детерминированный хаос.

Введение. Концепция детерминированного хаоса на начальном этапе развития считалась необычным явлением, которое никогда не возникало при решении практических задач и интересовало лишь узкий круг ученых. Однако в дальнейшем хаотическая динамика была обнаружена в огромном числе различных систем. Дальнейшее развитие выявило целый ряд практических задач, где хаотические режимы действительно возникали, оказываясь иногда вредными, а иногда — полезными. Следовательно, возникли практически важные классы задач, когда нелинейной системой необходимо управлять, уменьшая или, наоборот, увеличивая степень ее хаотичности. Также стали активно развиваться способы решения подобных задач. Исследования последних лет направлены на обнаружение принципиально новых типов движений в детерминированных системах. Однако термин «случайный» имеет вполне определенное значение. Другими словами, траектории случайного движения нельзя многократно и однозначно воспроизвести ни в численном, ни в физическом экспериментах [1–3].

В электротехнике режимы детерминированного хаоса по причине своих особенностей в некоторых случаях могут привести к авариям в электрооборудовании, ложными срабатываниями устройств релейной защиты, увеличением диссипации энергии и т. д. В других случаях, наоборот, использование режимов детерминированного хаоса способствует увеличению КПД и уменьшению электромагнитного излучения [4]. Вследствие этого встает актуальная задача не только по обнаружению и идентификации режимов детерминированного хаоса, но и задача по внедрению его в электротехнические системы.

Так, например, для управления полупроводниковыми приборами в силовой электронике используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Для питания установок электропривода переменного тока и в различных системах электропитания используют преобразователи напряжения, корректоры коэффициента мощности и активные выпрямители. Чтобы обеспечить высокое качество электроэнергии применяют различные виды широтно-импульс-

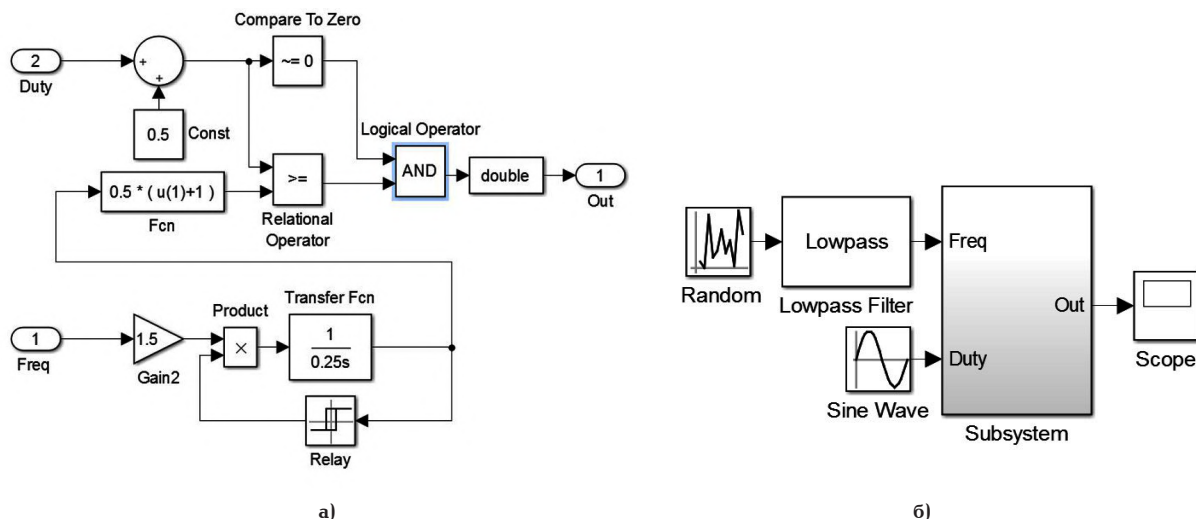


Рис. 1. Имитационная модель формирования ШИМ с хаотически изменяющейся несущей частотой

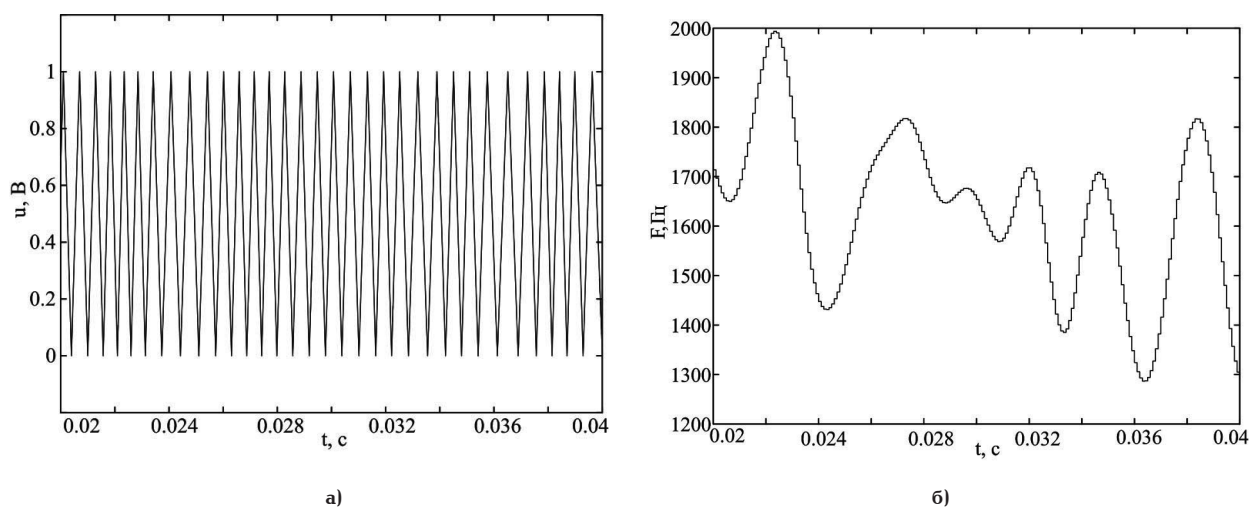


Рис. 2. Хаотическое изменение треугольного сигнала несущей частоты ШИМ (а). Сигнал задания несущей частоты (б)

ной модуляции [5]. Теоретически фронты импульса идеального ШИМ-сигнала должны иметь нулевое время нарастания и спада. Быстрое нарастание и спад импульсного сигнала минимизируют время переходного процесса и связанные с ним динамические потери полупроводниковых устройств. ШИМ обладает простотой реализации, однако существенным недостатком является высокий уровень гармоник и электромагнитных помех, что значительно ухудшает электромагнитную совместимость [6].

В связи с вышеизложенным данная работа направлена на улучшение спектрального состава напряжения с помощью хаотического изменения несущей частоты ШИМ. Основной принцип предложенного метода заключается в том, что при сохранении коэффициента заполнения в каждый момент времени частота импульсов находится в режиме детерминированного хаоса.

Имитационная модель. Для решения поставленной задачи в программе *Matlab* была разработана имитационная модель, способная сформировать синусоидальное напряжение по предложенному методу. Главное условие в процессе формирования синусоидального напряжения — это сохранение амплитуды основной гармоники и улучшение спек-

трального состава, поэтому диапазон хаотически изменяющейся частоты должен находиться на заданном уровне.

Представленную на рис. 1 модель можно условно разбить на две части: генератор управляемый напряжением (ГУН) с выходным сигналом треугольной формы и блоки формирования ШИМ.

На вход *Freq* подается хаотически изменяющийся сигнал задания несущей частоты (рис. 2б) и гистерезисный блок переключается из одного устойчивого состояния в другое всякий раз, когда выход передаточной функции пересекает значения от -1 до 1 . Полученный таким способом треугольный сигнал имеет постоянную амплитуду с хаотической частотой (рис. 2а). Отметим, что диапазон изменения частоты не превышает 1 кГц . В процессе экспериментов установлено, что превышение диапазона более чем на $1,5\text{ кГц}$ ведет к ухудшению формы синусоидального напряжения.

Рабочий цикл генератора задается входом *Duty*. Значение от 0 до 1 определяет процент выходного импульса. Таким образом, разработанная модель подходит для формирования ШИМ с периодической и хаотической несущей частотой. Очевидно, что изменяя величину рабочего цикла

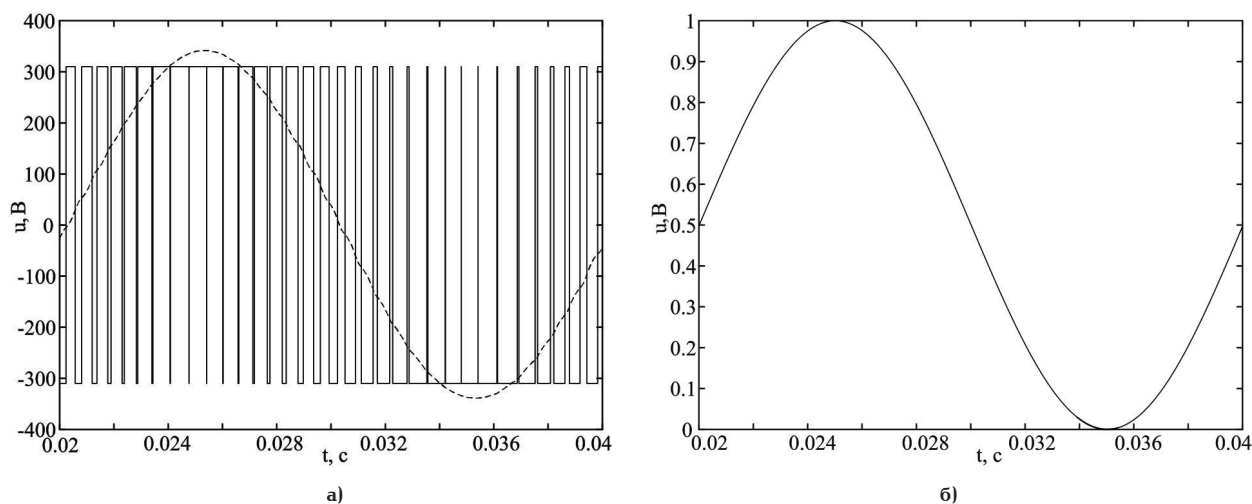


Рис. 3. Выходной ШИМ сигнал *Out* модели с хаотически изменяющейся несущей частотой (а); сигнал задания рабочего цикла (б)

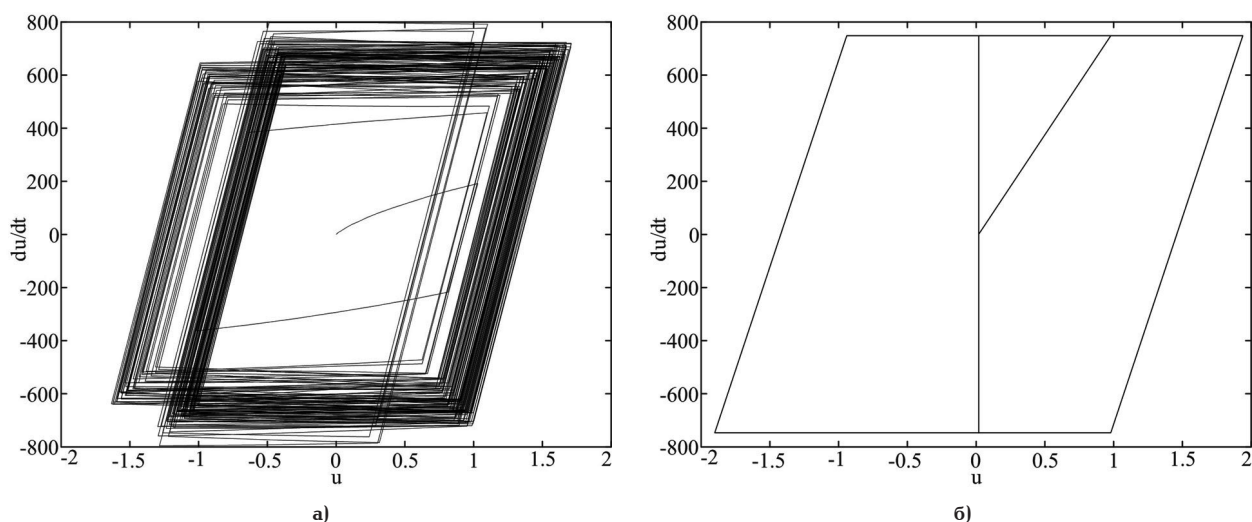


Рис. 4. Режим детерминированного хаоса (а); периодический режим (б)

по синусоидальному закону, на выходе модели сформируется синусоидальная широтно-импульсная модуляция с хаотической несущей частотой. Чтобы выделить основную гармонику 50 Гц использовался LC-фильтр, рассчитанный по методике [7]. Схема фильтра в работе не приведена. На рис. 3а представлен сигнал с выхода модели *Out* и сигнал задания рабочего цикла (рис. 3б).

Фазовый портрет хаотических и периодических колебаний, снятый с выхода бока передаточной функции, показан на рис. 4.

Странный аттрактор (рис. 4а) свидетельствует о сложной геометрической структуре. Отличительная особенность странных аттракторов состоит в наличии свойства масштабной инвариантности, выражающегося в повторяемости их структуры на всех более мелких масштабах.

Результаты моделирования. Для сравнения сопоставим результаты, полученные в ходе исследования, и покажем работу модели при периодическом и хаотическом сигнале задания несущей частоты. На рис. 5а представлены зависимости синусоидального напряжения сформированными с помощью периодической и хаотической несущей ШИМ, а также их разность (рис. 5б).

Проанализировав графики, можно сделать вывод о том, что амплитуда и форма синусоидального напряжения при хаотической частотной модуляции остается неизменной.

Проведем спектральный анализ напряжения ШИМ и сравним его с «классическим» методом формирования синусоидального напряжения [8]. На рис. 6 приведены частотные спектры ШИМ.

Спектральный состав напряжения для периодического сигнала (рис. 6б) указывает на то, что спектр состоит исключительно из дискретных частотных составляющих. Периодический режим представлен рядом Фурье, содержащим некоторую составляющую с циклической частотой, и гармониками, которые расположены равномерно по частоте.

Частотный спектр для напряжения, показанного на рис. 6а, в отличие от непериодического сигнала, является широкополосным и непрерывным. Анализ спектров напряжения показывает, что амплитуда гармоник напряжения значительно ниже у системы, работающей в хаосе, хотя энергия в первом и во втором случае одинакова.

Реализация физической модели. В качестве аппаратной платформы для реализации имитационной модели использовалась отладочная

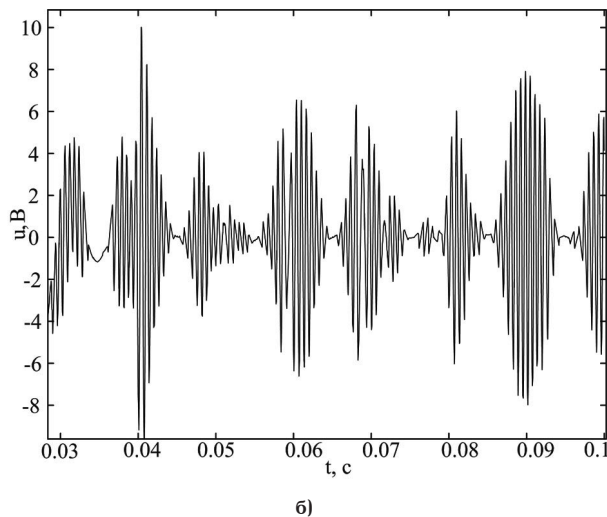
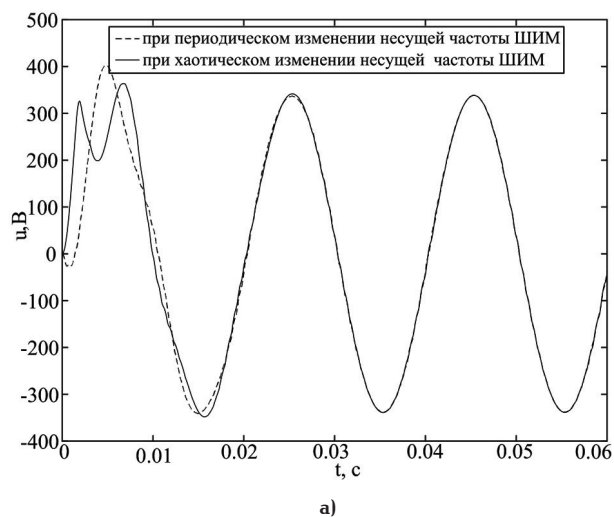


Рис. 5. Синусоидальное напряжение, сформированное с помощью периодической и хаотической несущей частоты ШИМ (а); разность напряжений (б)

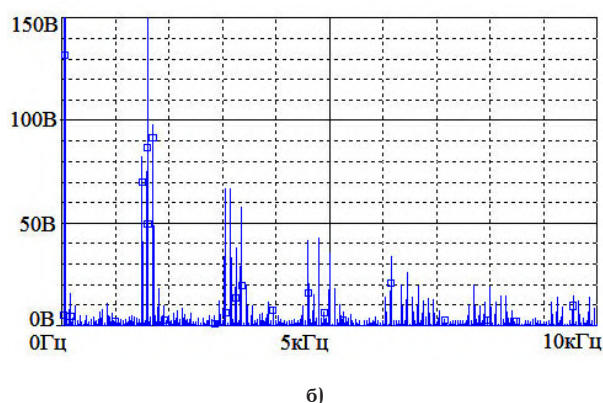
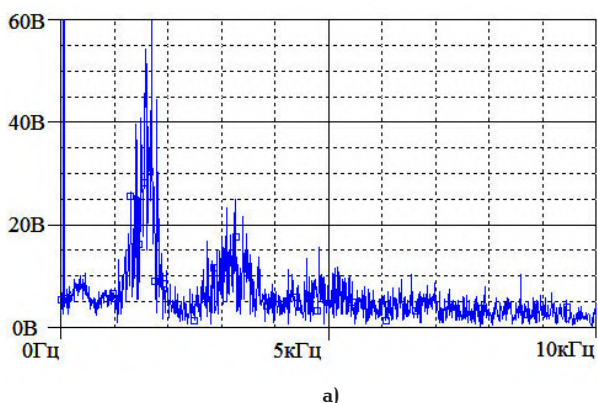


Рис. 6. Хаотическое задание сигнала несущей частоты (а); периодическое задание сигнала несущей частоты (б)

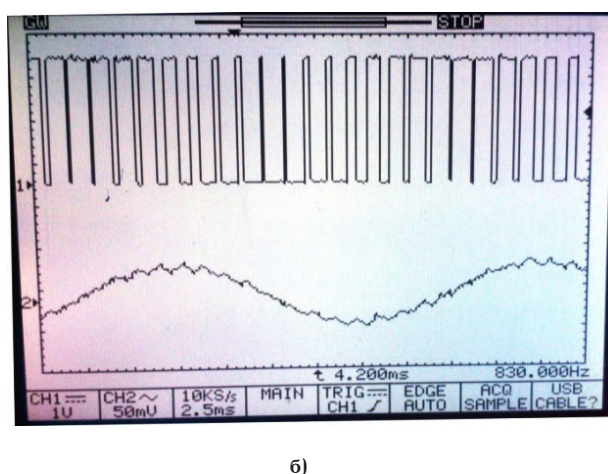
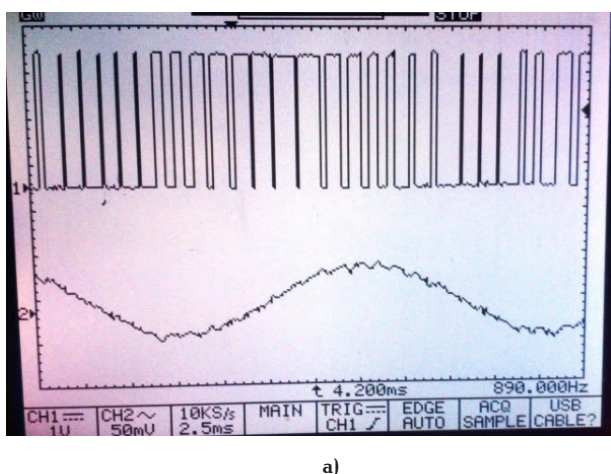


Рис. 7. Формирование синусоидального напряжения с помощью хаотической несущей ШИМ (а); формирование синусоидального напряжения с помощью периодической несущей ШИМ (б)

плата *STM32F4DISCOVERY*. Микроконтроллер *STM32F407VGT* содержит всю необходимую периферию и позволяет выполнять сложные численные алгоритмы. Процессорное ядро микроконтроллера работает на частоте 168 МГц, расчет одного цикла составляет 150 мкс, частота дискретизации алгорит-

ма 100 мкс. Сгенерированный в программе *Matlab* с помощью встроенного средства *Embedded Coder* код Си был адаптирован под конфигурацию микроконтроллера. Компиляции исходного кода программы осуществлялась с помощью *KEIL u Vision 4.73.0.0*. Размер скомпилированного hex-файла про-

граммы составляет 26 Кбайт. Осциллограммы работы модели, снятые с отладочной платы, проиллюстрированы на рис. 7.

Заключение. Проблемам по снижению высших гармоник в электрических сетях уделяется все большее внимание. Возникновение гармоник высшего порядка приводит к снижению надежности энергосистемы. В случае, если нелинейная нагрузка становится больше общей нагрузки, то целесообразно уделить внимание гармоническому составу напряжения и принять все необходимые меры по его снижению. Проведенное в настоящей статье исследование в некоторых случаях решит перечисленные проблемы. Поэтому предложенный метод целесообразно использовать на стадии проектирования устройств силовой электроники, что в дальнейшем поможет предотвратить проблемы, связанные с гармоническим составом, и снизить вероятность побочных эффектов.

Библиографический список

1. Калянов Э. В. Хаотические колебания в связанной системе бистабильных генераторов // Журнал технической физики. 2012. Т. 82, № 3. С. 1–6.
2. Федоров В. К., Рысев Д. В., Рысев П. В., Федоров Д. В., Федянин В. В., Захаров И. Л. Пространственно-временная самоорганизация распределенных активных сред и устойчивых диссипативных структур-систем // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. Т. 3, № 1. С. 181–184.
3. Федоров В. К., Рысев Д. В., Федянин В. В., Федоров И. В., Польшцев Л. Г., Федоров Д. В., Шелест С. Н. Синхронизация хаотических автоколебаний в пространстве состояний электроэнергетических, электрических и электронных систем как фактор самоорганизации // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2012. № 3 (113). С. 196–205.
4. Федоров В. К., Федянин В. В. Особенности режимов детерминированного хаоса преобразователей постоянного напряжения для ветро- и геотермоэлектростанций // Известия Томского политехнического университета. 2016. Т. 327, № 3. С. 47–56.
5. Дудкин М. М., Брылина О. Г., Цытович Л. И. Динамические характеристики разветвляющегося преобразователя с частотно-широотно-импульсной модуляцией // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2014. Т. 14, № 3. С. 46–54.
6. Desai J. V., Dadhich P. K., Bhatt P. K. Investigations on Harmonics in Smart Distribution Grid with Solar PV Integration // Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy. 2016. Т. 1, № 1. С. 11.
7. Крючков В. В., Малышков Г. М., Соловьев И. Н. Кодовое широтно-импульсное регулирование для инверторов // Практическая силовая электроника. 2001. № 1. С. 1–16.
8. Qazalbash A. A. [et al.]. Design and implementation of microcontroller based PWM technique for sine wave inverter // Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2009. POWERENG'09. International Conference on. IEEE, 2009. С. 163–167.

ФЕДОРОВ Владимир Кузьмич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий». **ФЕДЯНИН Виктор Викторович**, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий». **ФЕДОРОВ Дмитрий Владимирович**, аспирант кафедры «Электрическая техника».

Адрес для переписки: k13201@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 16.02.2017 г.

© В. К. Федоров, В. В. Федянин, Д. В. Федоров

Книжная полка

Конюхова, Е. А. Проектирование систем электроснабжения промышленных предприятий (теория и примеры) : учеб. пособие / Е. А. Конюхова. – М. : Русайнс, 2017. – 160 с. – ISBN 978-5-4365-1136-8.

Настоящее издание является учебным пособием для высших специальных учебных заведений, для студентов, обучающихся по профилю «Электроснабжение» направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника», но может быть полезным и для инженерно-технических работников в области проектирования систем электроснабжения. Данное учебное пособие содержит базовый объем сведений, необходимых для выполнения курсового проекта по электроснабжению промышленных предприятий. Его содержание соотносится с учебником Конюховой Е. А. «Электроснабжение», Издательский дом МЭИ, 2014. В учебном пособии рассмотрен ряд задач, возникающих при проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий напряжением выше и до 1 кВ. Приведены теоретические методики и практические примеры определения расчетных электрических нагрузок по подразделениям и в целом для промышленного предприятия, выбора варианта выполнения системы внешнего и внутривзаводского электроснабжения, включая линии электропередач, трансформаторы главной понизительной и цеховых подстанций, с учетом компенсации реактивной мощности, а также выбора электрооборудования этой сети. В приложениях приведены стоимостные и технические данные на электрооборудование по сведениям на 2015 г.

Малафеев, С. И. Надежность электроснабжения. Примеры и задачи / С. И. Малафеев, А. И. Копейкин. – СПб. : Лань, 2017. – 368 с. – ISBN 978-5-8114-1876-3.

Рассмотрены основные понятия теории надежности электроснабжения технических систем. Приведены сведения о физических процессах нарушения работоспособности систем электроснабжения, математических методах расчетов надежности, мероприятиях, направленных на повышение надежности и живучести объектов. Даны примеры решения типовых задач надежности электроснабжения. Приведены задания для самостоятельной работы. Для студентов высших учебных заведений.

ВЫБОР МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ

Рассмотрен способ повышения эффективности ввода мероприятий, направленных на минимизацию потерь электроэнергии на примере простейшей электрической сети. Представлены результаты сравнительных расчетов без учета и с учетом температуры элементов сети (линий и трансформаторов), произведена оценка погрешности расчета сроков окупаемости и приведенных затрат, возникающей в результате неучета тепловых процессов. На основании полученных результатов может быть разработана методика для разветвленных систем электроснабжения, направленная на уменьшение величины потерь электроэнергии в распределительном комплексе МРСК.

Ключевые слова: мероприятия по снижению потерь энергии, тепловые процессы, температурная зависимость сопротивления, линии электропередачи, трансформаторы, электрическая сеть.

В настоящее время актуальна задача исследования тепловых режимов элементов электрической сети. Информация о влиянии факторов окружающей среды на температуру проводов становится все более доступной в связи многочисленными исследованиями данных явлений за рубежом в рамках реализации концепции умных сетей.

Эта концепция подразумевает создание алгоритмов управления режимами электрической сети в реальном времени, частной целью которого является минимизация величины потерь энергии на ее передачу.

Цель определения температуры элементов сети в решении как минимум двух следующих задач:

1. *Определение пропускной способности элементов сети (линий и трансформаторов).* Вычисление максимально допустимой нагрузки с учетом климатических факторов во избежание теплового преждевременного разрушения изоляции, старения контактных соединений и нежелательного увеличения стрелы провеса проводов со всеми неблагоприятными последствиями [1–3].

2. *Определение оптимального вектора управляющего воздействия в задаче повышения экономической эффективности эксплуатации электрических сетей.* Иными словами, введение мероприятий по снижению потерь активной мощности и электрической энергии с учетом температурной зависимости сопротивления.

Для наиболее эффективного решения задачи второго рода достаточно давно указывалось на необходимость учета ряда факторов [4], которые в значительной степени влияют на потери энергии. К этим факторам относятся: температура окружающей среды, скорость ветра, солнечная радиация, давление, высота над уровнем моря и др.

Реальная электрическая сеть является сложным объектом исследования в силу постоянно изменяющихся во времени параметров — электрических нагрузок, напряжений в узлах, активных сопротивлений. Это свидетельствует о том, что актуальна задача формирования математической модели электрической сети, на основании которой возможно управление потерями электрической энергии с учетом вышеперечисленных параметров, в том числе и в задаче применения современных технологий при модернизации существующих линий электропередачи [5]. В настоящее время существует множество способов приведения величины потерь электроэнергии к экономически допустимому уровню. Однако максимальную эффективность решения данной задачи может обеспечить только комплексный подход к поиску оптимальных способов выбора мероприятий и путей их реализации. Основным смыслом данного подхода заключается в том, что рассматриваются не только отдельные мероприятия, но и их комбинации. Решением задачи является оптимальная комбинация мероприятий. Необходи-

мость комплексного выбора мероприятий связана с тем, что отдельные мероприятия по снижению потерь не являются взаимно независимыми. Поэтому при выборе мероприятий «по отдельности» результаты будут различными в зависимости от того, в какой последовательности рассматривались эти мероприятия. В то же время эта последовательность произвольна и не имеет никакого отношения к реальному вводу мероприятий, что говорит о несовершенстве выбора мероприятий «по отдельности».

Поскольку значительная доля потерь электрической энергии сконцентрирована в распределительных сетях, а именно в линиях и трансформаторах, то в задаче расчета потерь электроэнергии необходимо учитывать тепловые процессы именно в этих элементах. Соответствующие математические модели, использовавшиеся в данных расчетах, детально представлены в [6–12].

Ниже в качестве критериев оптимального внедрения мероприятий используются *сроки окупаемости* и *приведенные затраты*. Схема электрической сети, для которой произведены расчеты, представлена на рис. 1.

В данной сети можно выделить следующие мероприятия по снижению потерь: компенсация реактивной мощности 0,4 кВ и 10 кВ, замена проводов линии на провода большего сечения, замена трансформаторов. Перечень комбинаций этих мероприятий сведен в табл. 1. Общее число комбинаций из n мероприятий можно определить через числа сочетаний

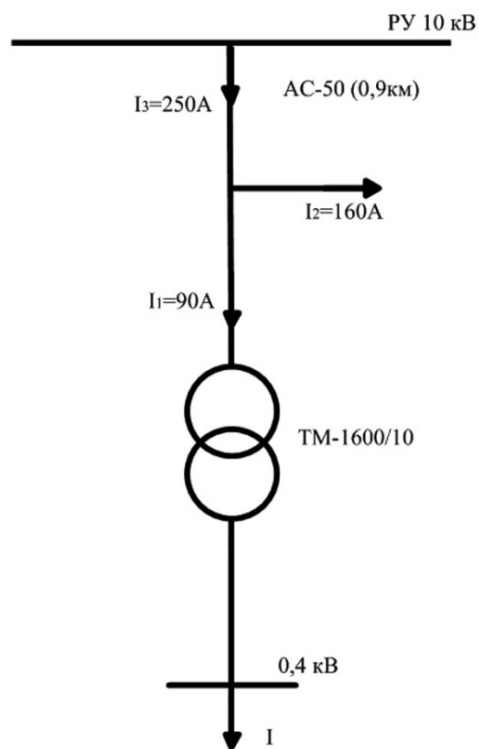


Рис. 1. Расчетная схема

Таблица 1

Расчетные комбинации мероприятий по снижению потерь электроэнергии

№	Намечаемые мероприятия	Капиталовложения, руб.
1	Установка низковольтной БСК УКМ58-0,4-700-50УЗ	248000
2	Установка высоковольтной БСК 6КЭПЗ-10,5-200-ЗУЗ	149205
3	Замена проводов АС-50 на СИП-3 1х70	54000
4	Замена трансформатора ТМ-1600/10 на ТМ-2500/10	1110000
5	Установка БСК УКМ58-0,4-700-50УЗ и 6КЭПЗ-10,5-200-ЗУЗ	397205
6	Установка УКМ58-0,4-700-50УЗ и замена провода АС-50 на СИП-3 1х70	302000
7	Установка БСК 6КЭПЗ-10,5-200-ЗУЗ и замена трансформатора ТМ-1600/10 на ТМ-2500/10	1259205
8	Установка БСК 7КЭПЗ-10,5-200-ЗУЗ и замена провода АС-50 на СИП-3 1х70	203205
9	Установка БСК УКМ58-0,4-700-50УЗ, 6КЭПЗ-10,5-200-ЗУЗ и замена провода АС-50 на СИП-3 1х70	451205
10	Установка БСК УКМ58-0,4-700-50УЗ и замена трансформатора ТМ-1600/10 на ТМ-2500/10	1358000
11	Установка БСК УКМ58-0,4-700-50УЗ, 6КЭПЗ-10,5-200-ЗУЗ и замена трансформатора ТМ-1600/10 на ТМ-2500/10	1507205
12	Замена провода АС-50 на СИП-3 1х70 и замена трансформатора ТМ-1600/10 на ТМ-2500/10	1164000
13	Замена провода АС-50 на СИП-3 1х70, замена трансформатора ТМ-1600/10 на ТМ-2500/10 и установка БСК УКМ58-0,4-700-50УЗ	1412000
14	Замена провода АС-50 на СИП-3 1х70, замена трансформатора ТМ-1600/10 на ТМ-2500/10 и установка БСК 6КЭПЗ-10,5-200-ЗУЗ	1313205
15	Замена провода АС-50 на СИП-3 1х70, замена трансформатора ТМ-1600/10 на ТМ-2500/10, установка УКМ58-0,4-700-50УЗ и БСК 6КЭПЗ-10,5-200-ЗУЗ	1561205

Таблица 2

Параметры линий

Марка провода	Длина L, км	Активное сопротивление при 20 °С $R_{\lambda 20}$, Ом/км	Средняя цена, руб/м
АС-50	0,9	0,000595	42
СИП-3 1x70		0,000493	60

Таблица 4

Параметры БСК

U, кВ	Тип БСК	Q _{к.у.} , квар.	Стоимость БСК, руб.
0,4	БСК УКМ58-0,4-700-50У3	700	248000
10	6 КЭПЗ-10,5-200-ЗУ3	1200	149205

Таблица 5

Токи и мощности в сети

Параметр режима	Значение параметра до компенсации	Значение параметра после компенсации
I ₁	90 А	77 А
I ₂	160 А	136 А
I ₃	250 А	213 А
S ₁	1324 + j821	1324 + j121
S ₂	2355 + j1460	2355 + j260
S ₃	3680 + j2281	3679 + j381
cosf	0,85	0,99

Таблица 3

Параметры трансформаторов

Марка трансформатора	$\Delta P_{кз}$, кВт	$\Delta P_{хх}$, кВт	Цена, руб.
ТМ-1600/10	18	2,35	760000
ТМ-2500/10	26,5	3,85	1110000

Таблица 6

Результаты расчета без учета температуры элементов сети

№ мероприятия	Капиталовложения, руб.	$\Sigma \Delta P_{\lambda}$, кВт	$\Sigma \Delta P_{\text{ТРАНС}}$, кВт	$\Sigma \Delta P$, кВт	Ток, год	$\Sigma \Delta W$, кВт·ч	3, руб
0	—	100,406	18,770	119,176	—	595883,8	1953899
3	54000	83,193	18,770	101,964	0,19	509821,3	1642174
2	149205	82,053	18,770	100,824	0,49	504120,5	1642878
8	203205	67,987	18,770	86,757	0,39	433788,9	1428562
1	248000	90,235	14,369	104,604	1,00	523024,5	1723031
6	302000	74,766	14,369	89,135	0,64	445679,8	1486274
5	397205	72,885	14,369	87,254	0,74	436273,5	1475119
9	451205	60,390	14,369	74,760	0,65	373800,4	1285951
4	1110000	100,406	14,385	114,792	22,42	573960,0	2057562
10	1358000	90,235	11,468	101,703	5,55	508518,0	1897500
13	1412000	74,766	11,468	86,234	2,87	431173,3	1660743
11	1507205	72,885	11,468	84,353	2,93	421767,0	1649588
15	1561205	60,390	11,468	71,858	2,19	359293,9	1460420

по очевидной формуле $N = \sum_{k=1}^n C_n^k$. В данном случае при $n = 4$ получаем $N = 15$.

Информация о стоимости и справочных характеристиках электрооборудования представлена в табл. 2–4 [13]. Мощности и токи нагрузок с учетом их изменения при компенсации реактивной мощности

приведены в табл. 5. Для наглядности и упрощения расчетов БСК выбраны по критерию максимального повышения коэффициента мощности; такой подход не всегда обеспечивает максимальную экономичность режима самой системы электроснабжения, однако способствует более существенному снижению потерь в питающих сетях (табл. 1–5).

Результаты расчета с учетом температуры элементов сети

№ мероприятия	Капиталовложения, руб.	$\Sigma \Delta P_{\text{Л}},$ кВт	$\Sigma \Delta P_{\text{ТРАНС}},$ кВт	$\Sigma \Delta P,$ кВт	Ток, год	$\Sigma \Delta W,$ кВт·ч	З, руб
0	—	124,593	15,749	140,342	—	701710	2292542
3	54000	95,046	15,749	110,795	0,114	553975	1783466
2	149205	96,93	15,749	112,679	0,331	563395	1832556
8	203205	75,123	15,749	90,872	0,26	454360	1494390
1	248000	108,963	11,762	120,725	0,755	603625	1980952
6	302000	83,847	11,762	95,609	0,431	478045	1589842
5	397205	84,006	11,762	95,768	0,539	478840	1611332
9	451205	65,631	11,762	77,393	0,459	386965	1328078
4	1110000	124,593	11,617	136,21	24,42	681050	2400250
10	1358000	108,963	8,819	117,782	4,17	588910	2154754
13	1412000	83,847	8,819	92,666	1,943	463330	1763644
11	1507205	84,006	8,819	92,825	2,104	464125	1785134
15	1561205	65,631	8,819	74,45	1,547	372250	1501880

Таблица 8

Сравнение результатов расчета с учетом и без учета температуры элементов сети

№ меро- приятия.	З, руб	З, руб	$\epsilon_{\text{З}},$ %	Ток _т , год.	Ток, год.	$\epsilon_{\text{Ток}},$ %
0	2292542	1953899	14,7	—	—	
1	1980952	1723031	13,0	0,75	1,00	32,5
2	1832556	1642878	10,3	0,33	0,49	49,2
3	1783466	1642174	7,9	0,11	0,19	71,9
4	2400250	2057562	14,2	24,41	22,42	8,1
5	1611332	1475119	8,4	0,53	0,74	37,8
6	1589842	1486274	6,5	0,43	0,64	50,5
7	1987334	1793611	9,7	2,62	3,76	43,3
8	1494390	1428562	4,4	0,25	0,39	53,6
9	1328078	1285951	3,1	0,45	0,65	43,2
10	2154754	1897500	11,9	4,16	5,558	33,3
11	1785134	1649588	7,5	2,10	2,93	39,5
12	1938244	1792908	7,4	2,25	3,59	59,6
13	1763644	1660743	5,8	1,94	2,87	48,0
14	1649168	1579296	4,2	1,58	2,35	48,1
15	1501880	1460420	2,7	1,54	2,19	41,7

В действительности не все приведенные мероприятия взаимно зависимы. Так, мероприятия 3 и 4 (табл. 1) направлены на снижение потерь в разных элементах и не требуют совместного рассмотрения. То же самое относится к мероприятиям 2 и 4. Поэтому двойные комбинации 7 и 12 можно исключить из расчета. Кроме того, можно исключить также тройную комбинацию 14, так как эффект от мероприятия 4 не зависит от того, будут ли введены мероприятия 2 и 3.

Расчет сроков окупаемости и приведенных затрат с учетом и без учета нагрева сведен в табл. 6 и 7, где введены следующие обозначения: ΔP_L — потери активной мощности в линии [кВт]; $\Delta P_{ТРАНС}$ — потери активной мощности в трансформаторе [кВт]; $\Sigma \Delta P$ — суммарные потери в сети [кВт]; $T_{ок}$ — сроки окупаемости мероприятий [год]; $\Sigma \Delta W$ — суммарные потери энергии в сети [кВт·ч]; Z — приведенные затраты [руб]. В табл. 6 и 7 мероприятия приведены в порядке возрастания капиталовложений.

Под нулевой комбинацией понимается исходный режим без введения каких-либо мероприятий. Стоимость электроэнергии принята $C_{э} = 3,2$ руб/кВт·ч, а норма отчислений на ремонт и обслуживание оборудования $a = 0,059$. Приведенные затраты и сроки окупаемости определяются по формулам:

$$T_{ок} = \frac{K}{I_{a.ИСХ} - I_{a.П.М} + C_{э} \cdot (\Delta W_{ИСХ} - \Delta W_{П.М})}, \text{ год};$$

$$Z = 0,14 \cdot K + I_a + C_{э} \cdot \Sigma \Delta W_{П.М}, \text{ руб.}$$

Сравнение результатов представлено в табл. 8.

Погрешности, возникающие в результате неучёта тепловых процессов при определении приведённых затрат и сроков окупаемости, определялись по следующим формулам:

$$\varepsilon_z = \left(\frac{(Z_t - Z)}{Z_t} \cdot 100\% \right);$$

$$\varepsilon_{T_{ок}} = \left(\frac{(T_{ок_t} - T_{ок})}{T_{ок_t}} \cdot 100\% \right);$$

где Z_t , $T_{ок_t}$ и Z , $T_{ок}$ — приведённые затраты и сроки окупаемости, рассчитанные с учётом и без учёта температуры элементов сети соответственно.

Из расчётов видно, что минимум приведенных затрат соответствует комбинации № 9: компенсация реактивной мощности на 10 и 0,4 кВ и замена провода (соответствующая строка в табл. 6–8 выделена жирным шрифтом). Эта комбинация в рассмотренном случае является оптимальной, хотя срок окупаемости для нее не минимален.

Табл. 8 показывает, что нагрев достаточно сильно влияет на результаты расчетов. Уточнение приведенных затрат достигает 14 %. Однако особенно сильно уточняются сроки окупаемости: во многих случаях на 40–60 %, а максимально по таблице — на 71 %.

Библиографический список

1. Xiaoming D., Chongqing K., Hua S., Ning Z. Analysis of power transfer limit considering thermal balance of overhead conductor // IET Gener. Transm. Distrib. 2015. Vol. 9, Iss. 14. P. 2007–2013.

2. Santos J. R. Assessment of conductor thermal models for grid studies // IET Gener. Transm. Distrib. 2007. Vol. 1, no. 1, January. P. 155–161.

3. Barbieri N., Herek O., Souza Jr O. H. Automated testing system for overhead line cables // Journal of Energy Engineering. 1999. Vol. 125. no. 2, August. P. 43–47.

4. Железко Ю. С. Потери электроэнергии, реактивная мощность, качество электроэнергии: рук. для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.

5. Горюнов В. Н., Бубенчиков А. А., Гиршин С. С., Петрова Е. В., Левченко А. А. Эффективность применения самонесущих изолированных проводов в современных электроэнергетических системах // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2009. № 1 (77). С. 106–108.

6. Тихомиров П. М. Расчёт трансформаторов: учеб. пособие для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатом-издат, 1986. 528 с.

7. Болгарский А. В. Термодинамика и теплопередача: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1975. 495 с.

8. Гиршин С. С. [и др.]. Влияние температуры обмоток на нагрузочные потери активной мощности в силовых трансформаторах подстанций // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2013. № 2 (120). С. 214–217.

9. Петрова Е. В., Гиршин С. С., Ляшков А. А., Бигун А. Я. Аналитическое решение уравнения теплового баланса провода воздушной линии в условиях вынужденной конвекции // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 218.

10. Петрова Е. В., Гиршин С. С., Горюнов В. Н., Бубнов А. В., Кузнецов Е. А. Алгоритмы прогнозирования потерь в проводах воздушных линий с учётом температуры // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 282.

11. Петрова Е. В., Бигун А. Я., Горюнов В. Н., Гиршин С. С., Бубенчиков А. А. Расчет погрешностей определения потерь электрической энергии в проводах повышенной пропускной способности из-за неучета атмосферных и режимных факторов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2013. № 2 (120). С. 191–197.

12. Петрова Е. В., Гиршин С. С., Горюнов В. Н., Христин Д. Е. Учёт температурной зависимости сопротивления неизолированного провода при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2013. № 1. С. 284–291.

13. Ширяев А. С., Калимуллин А. Т., Ткаченко В. А. Анализ эффективности комплексного ввода мероприятий по снижению потерь энергии на критерии приведённых затрат без учёта температуры элементов сети // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 12-3 (54). С. 218–221.

ГИРШИН Станислав Сергеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

ШИРЯЕВ Александр Сергеевич, аспирант, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

ЛЯШКОВ Алексей Ануфриевич, доктор технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Инженерная геометрия и САПР».

КАЛИМУЛЛИН Алик Талгатович, аспирант, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Адрес для переписки: alex2793@bk.ru

Статья поступила в редакцию 16.02.2017 г.

© С. С. Гиршин, А. С. Ширяев, А. А. Ляшков, А. Т. Калимуллин

ПРЯМОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ПОГРУЖНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ УСТАНОВОК ДЛЯ НЕФТЕДОБЫЧИ

Рассматривается измерение скорости вращения погружного асинхронного электродвигателя (ПЭД) путем размещения на его валу на стеклотекстолитовых шайбах СТЭФ1 с двух сторон k немагнитных промежуточных подшипников ротора $4k$ четырехполюсных магнитов с радиально-намагниченными разнополярными зонами, ориентированных строго в одном направлении. Измерительная информация формируется непосредственно статорной обмоткой ПЭД, передается на поверхность по силовому кабелю и снимается через трансформатор тока и полосовой фильтр с фазы кабельной линии. Приводятся результаты схмотехнического моделирования в программном комплексе EWB 5.12, подтверждающие достоверность получения измерительной информации.

Ключевые слова: высококоэрцитивные магниты, синхронное и синфазное вращение, ЭДС.

Введение. Надежное и энергоэффективное частотное управление установками электроцентробежных насосов (УЭЦН), реализующими основной способ добычи нефти в России, напрямую связано с разработкой эффективных методов определения скорости вращения погружных асинхронных электродвигателей [1, 2]. ПЭД асинхронные, трехфазные, короткозамкнутые осуществляют вращение вала электроцентробежного насоса на глубине спуска от 1-го до 3-х км и получают электропитание с поверхности через длинную кабельную линию и промышленный повышающий трансформатор от СУ, оснащенной преобразователями частоты [3, 4].

Информация о скорости вращения ПЭД необходима для определения электромагнитного момента, энергетических показателей, пусковых, рабочих и механических характеристик погружных электродвигателей [5, 6], а также для организации оптимальных и надежных режимов эксплуатации УЭЦН.

Теоретическая часть. Существуют бездатчиковые способы определения угловой скорости асинхронных электродвигателей, основанные на использовании модели электродвигателя, заданной в виде системы дифференциальных уравнений [7, 8], наблюдателей полного порядка и других методов [9, 10]. Бездатчиковые способы в настоящее время не обеспечивают необходимой точности из-за влияния скважинного электропитающего кабеля большой длины, режимных и температурных вариаций параметров ПЭД, находящегося на глубине спуска до трех километров в агрессивную среду пластовой жидкости с температурой 95...120 °С и давлением до 20 МПа.

В статье рассматривается возможность прямого определения скорости вращения ПЭД [11] благода-

ря размещению на немагнитных элементах ротора равномерно в осевом направлении набора высококоэрцитивных Sm – Co или Nd – Fe – В магнитов, ориентированных строго в определенном направлении для получения синхронного и синфазного воздействия поля всех вращающихся магнитов на проводники отдельных секций обмотки статора ПЭД. Такое техническое решение повышает в k (35–60) раз величину импульсов ЭДС, индуктируемых в обмотке статора ПЭД, и позволяет использовать ее в качестве сигнальной для передачи измерительной информации на поверхность в станцию управления УЭЦН непосредственно по силовому питающему кабелю.

Немагнитные промежуточные подшипники ротора, находящиеся в расточке немагнитного пакета статора ПЭДН32-117-1000 (рис. 1), снабжены по торцам шайбами СТЭФ1 толщиной 2 мм, которые создают пары трения с торцами регулировочных шайб.

При ремонте или профилактическом обследовании ПЭД размещают по окружности шайб СТЭФ1 диаметрально противоположно $4k$ четырехполюсных высококоэрцитивных радиально намагниченных постоянных магнита со встречным расположением полюсов. Постоянные магниты имеют большую намагничивающую силу (более $6 \cdot 10^4$ kA/m), достаточную для того, чтобы воздействовать через воздушный зазор на проводники протяженной статорной обмотки ПЭД.

В процессе сборки ротора ПЭД все пары магнитов ориентируются строго в одном направлении для получения синхронного и синфазного перемещения поля каждого магнита относительно проводников протяженной статорной обмотки ПЭД, расположенных в пазах его немагнитных пакетов.

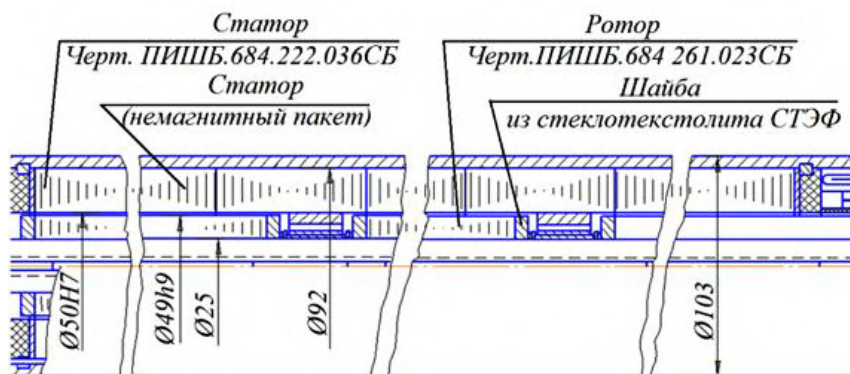


Рис. 1. Фрагмент сборочного чертежа ПЭДН32-117-1000

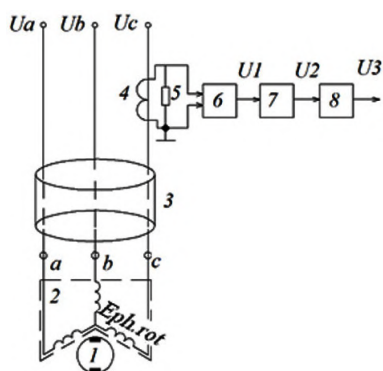


Рис. 2. Структурная схема прямого измерения скорости вращения ПЭД

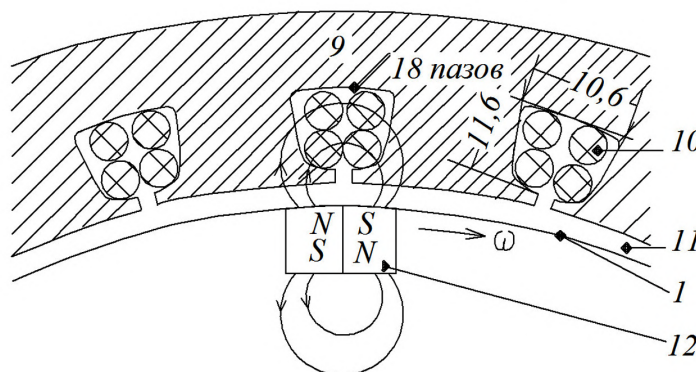


Рис. 3. Схема движения шайбы СТЭФ1 с постоянными магнитами относительно проводников протяжной обмотки статора ПЭД

На рис. 2 изображена структурная схема измерения скорости вращения ПЭД, содержащая стеклотекстолитовые диэлектрические шайбы 1, статорную обмотку 2 погружного электродвигателя, скважинную кабельную линию 3, трансформатор тока 4, нагрузочное сопротивление 5, полосовой фильтр 6, устройство сравнения напряжений 7 и делитель частоты 8.

При вращении ротора ПЭД магнитное поле постоянных магнитов 12 (рис. 3), пронизывающее воздушный зазор 11 (доли мм), индуцирует в проводниках протяжной обмотки 10 (например, проводниках фазы С), проходящих через пазы немагнитных пакетов статора 9 последовательность импульсов ЭДС E_{rot} различной полярности (рис. 4), которые меняют свою полярность через временной интервал $0,5T_2$, где T_2 — период вращения ротора ПЭД.

В фазе С статорной обмотки ПЭД, размещенной в $z/3$ пазах пакетов статора, наводятся импульсы ЭДС $E_{ph.rot}$ (рис. 4), меняющие полярность через интервал времени $0,5T_2$ и равные в соответствии с законом электромагнитной индукции

$$E_{ph.rot} = B \cdot d \cdot v \cdot 4k \cdot n, \quad (1)$$

где B — магнитная индукция, Тл; d — толщина СТЭФ1 шайбы, м; v — линейная скорость перемещения магнитов, м/сек (направление магнитной индукции B и скорости перемещения v взаимно перпендикулярны); n — число эффективных проводников статорной обмотки в пазу магнитопровода ПЭД.

В фазе С трехпроводного скважинного кабеля формируются за один оборот ПЭД z импульсов тока $I_{ph.rot}$ (рис. 4), повторяющихся с частотой вращения ротора ПЭД. У $z/3$ импульсов амплитуда примерно в 2 раза больше, чем у $2z/3$ импульсов тока, попадающих в фазу С за счет действия импульсов ЭДС, наведенных в статорных обмотках фаз А и В ПЭД.

Измерительный трансформатор тока 4 преобразует частотные импульсы тока $I_{ph.rot}$ и фазный ток, потребляемый ПЭД от источника U_c и превышающий на два-три порядка импульсный ток $I_{ph.rot}$ в пропорциональное напряжение.

Синусоидальное напряжение, пропорциональное фазному току ПЭД, отделяется от частотной импульсной составляющей напряжения с помощью полосового фильтра 6, который имеет граничные частоты полосы пропускания zf_{min} и zf_{max} и спад амплитудно-частотной характеристики за граничными частотами не менее 80 дБ/дек. Такой фильтр уверенно отделяет частотные импульсы напряжения

$$U_1 = I_{ph.rot} \cdot k_i \cdot k_f, \quad (2)$$

(k_i и k_f — передаточные коэффициенты трансформатора тока и фильтра) от низкочастотного синусоидального напряжения, регулируемого по частоте станцией управления УЭЦН в пределах от f_{min} до f_{max} (т.е. от 40 Гц до 60 Гц) и превосходящего на два-три порядка напряжение U_1 , а также от высокочастотных напряжений, обусловленных наличием частотного преобразователя в составе станции управления УЭЦН.

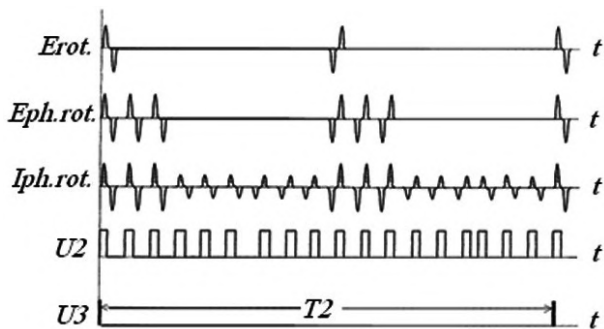


Рис. 4. Временные диаграммы напряжений и токов в элементах структурной схемы на рис. 2

Компаратор напряжений 7 преобразует импульсы напряжения U_1 в прямоугольные импульсы U_2 (рис. 4). Делитель частоты 8 формирует новую последовательность импульсов U_3 (рис. 4), частота повторения которых уменьшена в z раз и совпадает с частотой вращения ротора ПЭД.

Схематехническое моделирование. Схематехническое моделирование схемы измерения (рис. 2) выполнено с использованием программного пакета Electronics Workbench 5.12 и проведено для

УЭЦНМ5-50-1700, содержащей ПЭДН32-117-1000, центробежный насос 2ЭЦН5-50-1800, скважинный кабель КПБК3х16 и трансформатор ТМГН-100/1170-73ХЛ1. Для данной установки рекомендуется отпайка на стороне ВН трансформатора с линейным напряжением 1170В. Основные данные на ПЭДН32-117-1000 (ТУ-3381-026-21945400-97) приведены в табл. 1.

В качестве измерительного трансформатора тока 4 для УЭЦНМ5-50-1700 выбран шинный трансформатор ТНШ-0,66-УЗ(ТЗ) с первичным номинальным током 30А. Измерительное сопротивление 5 составляет 1 Ом. Фазы ПЭД обозначены на структурной схеме измерения (рис. 5) блоками «stat» и представлены на схематехнической модели многоконтурной схемой замещения (рис. 6). Параметры схемы замещения приведены в табл. 2. Трехфазный скважинный кабель типа КПБК представлен на схеме рис. 5 блоками «cab». Фазы скважинного кабеля моделируются П-образной схемой замещения. Параметры этой схемы рассчитаны для сечения 16 мм² и длины спуска 2000 м по (3), (4), (5)

$$R_x = \frac{l}{\lambda \cdot F} \cdot [1 + \alpha(t_{cab} - 20^\circ C)], \quad (3)$$

$$L_x = \frac{l}{\omega} \cdot \left[0,144 \cdot \lg\left(\frac{D_{av.}}{r_{eq.}}\right) + 0,016 \right], \quad (4)$$

Таблица 1

Параметры ПЭДН32-117-1000

Тип электродвигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальное линейное напряжение, В	Напряжение в фазе, В	Номинальный ток, А	КПД, %	Кoeffициент мощности	Номинальное скольжение, %	Число пазов статора, z	Число опорных подшипников ротора	Диаметр ротора, мм
ПЭДПЭД32-117	32	1000	578	26	85	0,86	5	18	7	57

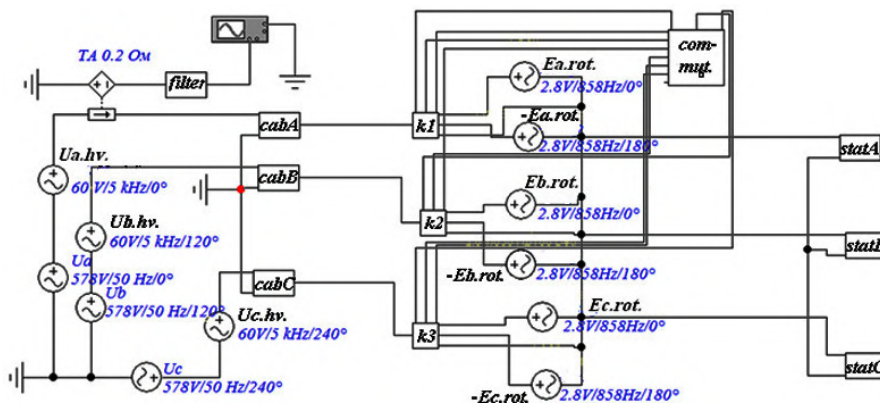


Рис. 5. Схематехническая модель структурной схемы измерения скорости вращения ПЭД

$$C_a = \frac{l}{\omega} \cdot \frac{7,58 \cdot 10^{-9}}{\lg \frac{D_{av.}}{r_{eq}}}, \quad (5)$$

где l — длина спуска кабеля, м; F — поперечное сечение жилы, мм²; λ — удельная проводимость меди для 20 °С, принимается равной 51,2 МСм/м; α — ТКС меди, составляющий для меди 0,004 град⁻¹; $t_{cab.}$ — температура жилы кабеля на глубине спуска, принятая равной 90 °С; $D_{av.}$ — среднегеометрическое расстояние между жилами кабельной линии; $r_{eq.}$ — приведенный (с учетом формы сечения и скин-эффекта) радиус жилы кабеля. Отношение $D_{av.} / r_{eq.}$ для сечения 16 мм² равно 2,6; $\omega = 314$ рад/с — угловая скорость вала ПЭД. Результаты расчета параметров $R_{cab.}$, $L_{cab.}$, $C_{cab.}$ представлены в табл. 2.

Преобразователь ток — напряжение ТА с передаточным сопротивлением 0,2 Ом моделирует измерительный трансформатор тока 4. Источники U_a , U_b , U_c частоты 50 Гц (рис. 5), соответствующие линейному напряжению 1170 В, представляют трехфазное напряжение, поступающее от скважинного трансформатора к погружному кабелю. Высшие гармонические составляющие с несущей частотой 5 кГц от преобразователя частоты УЭЦН с синусоидальной ШИМ моделируются источниками напряжения $U_{a,hv}$, $U_{b,hv}$, $U_{c,hv}$. Источники $E_{a,rot.}$, $E_{b,rot.}$, $E_{c,rot.}$ (рис. 5) моделируют ЭДС, наведенные в статорной обмотке ПЭД полем постоянных магнитов и определены, согласно (1), для $B = 1,6$ Тл, $l = 2$ мм, $n = 4$, $v = 8,9$ м/с. Синусоидальная форма напряжения источников $E_{a,rot.}$, $E_{b,rot.}$, $E_{c,rot.}$ принята с учетом возможностей программного пакета Electronics Workbench 5.12, частота напряжения $f_{rot.} = z \cdot f \cdot (1-s)$ равна 858 Гц, где f — частота трехфазных источников U_a , U_b , U_c . Блок «commut» управляет электронными ключами $k1$, $k2$, $k3$. Последние переключают источники ЭДС $E_{a,rot.}$, $E_{b,rot.}$, $E_{c,rot.}$ — $E_{a,rot.}$ — $E_{b,rot.}$ — $E_{c,rot.}$ с частотой $6 f_{rot.}$ в порядке, отражающем очередность прохождения магнитами проводников, относящихся к началам (a , b , c) и концам (x , y , z) фазных обмоток, в $z/3$ пазах магнитопровода статора. Фильтр (filter) выполнен в виде соединения четырех идентичных каскадов, содержащих низкочастотный RC-фильтр, высокочастотный RC-фильтр и согласующие операционные усилители.

Из временной диаграммы напряжения U_i (рис. 7), пропорционального, согласно (2), току $I_{ph.rot.}$ видно, что, благодаря фильтру 5, эффективно подавляются токи от напряжения частоты 50 Гц и токи от действия напряжения гармонической составляющей частоты 5 кГц. На выходе фильтра 5 формируется напряжение U_{ii} , эффективно воспроизводящее из-

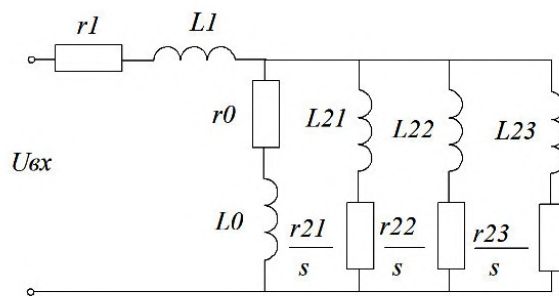


Рис. 6. Схема замещения ПЭДН32-117-1000

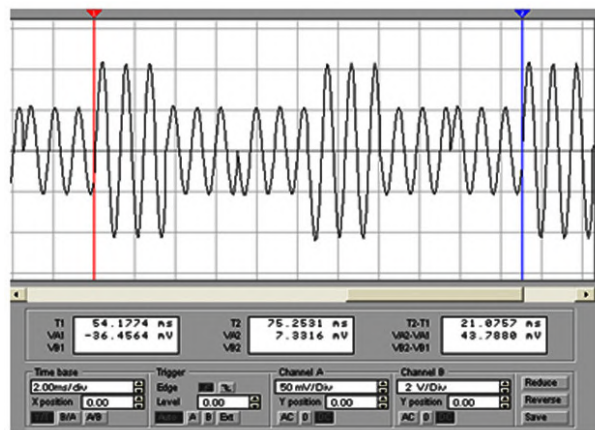


Рис. 7. Осциллограмма напряжения на выходе фильтра 6

мерительный сигнал — частотные импульсы тока $I_{ph.rot.}$ (рис. 4). Это напряжение преобразуется компаратором напряжений 6 и делителем частоты 7 в прямоугольные выходные импульсы U_3 (рис. 2), следующие с частотой вращения короткозамкнутого ротора ПЭД.

Выводы. Разработан метод прямого измерения скорости вращения ПЭД без использования индукционного датчика, роль которого выполняют элементы конструкции статора и ротора ПЭД, что упрощает передачу измерительной информации на поверхность и упрощает ее съем с помощью трансформатора тока, подключенного к фазе скваженного кабеля. Метод может найти применение в энергоэффективных электротехнических комплексах УЭЦН для векторного регулирования скорости вращения ПЭД.

Таблица 2

Эквивалентные параметры блоков stat и cab

Параметр	Rcab.	Lcab.	Ccab.	r1	L1	r0	L0
Значение	1,25 Ом	0,241 мН	0,116 мкФ	1,015 Ом	7,67 мН	2,632 Ом	181,2 мН
Параметр	r21	L21	r22	L22	r23	L23	s
Значение	1,331 Ом	9,038 мН	10,409 Ом	9,09 мН	6,025 Ом	40,91 мН	0,046 о.е.

Библиографический список

1. Кузнецов Е. М., Ковалев А. Ю., Аникин В. В. Электро-технологические установки для нефтедобычи: моногр. / Мин-обнауки России, ОмГТУ, НОУ ВПО «АИПЭ». Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. 160 с.
2. Kovalev A. Yu., Kuznetsov Ye. M., Anikin V. V. The parameter identification of submersible motors of electrical centrifugal pump units for oil production // Control and Communication (SIBCON), 2015: International Siberian Conference on Year. 2015. P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON, 2015. 7147111.
3. А. Ю. Ковалев, Кузнецов Е. М., Аникин В. В. Эффективность методов идентификации электромагнитных параметров погружных электродвигателей установок электроцентробежных насосов // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 1. С. 282–285.
4. Ковалев Ю. З., Ермак Р. В. Системное моделирование погружных асинхронных двигателей в составе установок электроцентробежных насосов // Промышленная энергетика. 2012. № 1. С. 31–34.
5. Каширских В. Г. Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей: моногр. Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2005. 139 с.
6. Кузнецов Е. М., Ковалев А. Ю., Аникин В. В. Экспериментальное исследование переходных процессов в системе управления — электродвигатель с короткозамкнутым ротором // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2012. № 3 (113). С. 213–217.
7. Karanayil B., Rahman M. F., Grantham G., Rahman M. A. On-line parameter identification using artificial neural networks for vector controlled induction motor drive // 3rd International Conference on Electrical & Computer Engineering ICECE 2004, 28–30 December 2004. Dhaka. Bangladesh. 2004. P. 23–26.
8. Pinto J. O. P., Bose B. K., Borges L. E., Kazmierkowski M. P. A neural network based space vector PWM controller for voltage-fed inverter induction motor drive // IEEE Transaction on Industry Applications. 2000. Vol. 36. Is. 6. P. 1628–1636. DOI: 10.1109/28.887215.
9. Bose B. K. Neural network applications in power electronics and motor drives — an introduction and perspective // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007. Vol. 54. Is. 1. P. 14–33. DOI 10.1109/TIE.2006.888683.
10. Jančovič M., Žalman M., Jovankovič J. Parameter identification of induction motors by using genetic algorithms // Virtual University VUr07: 8th International Conference, 13–14 December 2007. Bratislava, Slovak Republic: STU. 2007. P. 196–203. ISBN 978-80-89316-09-0 (in English).
11. Пат. 2463612 Российская Федерация, МПК G01P3/48. Способ определения скорости вращения погружных асинхронных электродвигателей / Ковалев А. Ю., Ковалева Н. А., Кузнецов Е. М. № 2011104945/28; заявитель и патентообладатель НОУ ВПО «Академический институт прикладной энергетики», г. Нижневартовск; заявл. 10. 02. 2011; опубл. 10. 10.12.

КУЗНЕЦОВ Евгений Михайлович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрическая техника».
ПАВЛОВ Дмитрий Олегович, аспирант кафедры «Электрическая техника».
Адрес для переписки: kiricuznetsov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23.01.2017 г.
© Е. М. Кузнецов, Д. О. Павлов

Книжная полка

Аминов, Р. З. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями / Р. З. Аминов, А. Н. Байрамов. — М. : Наука, 2017. — 254 с. — ISBN 978-5-02-039956-3.

Показано, что в условиях растущей доли атомных электростанций в структуре генерирующих мощностей энергосистем и неравномерных графиков электропотребления становится экономически оправданным производство водорода на базе внепиковой электроэнергии. Изложены вопросы совершенствования циклов влажно-паровых АЭС при их комбинировании с водородными технологиями. Приведены результаты исследований по повышению безопасности АЭС за счет создания резервов питания собственных нужд на основе водорода в аварийных ситуациях с полным обесточиванием. Рассмотрены вопросы безопасного обращения с водородом. Для научных работников, специалистов, аспирантов, студентов старших курсов теплоэнергетических специальностей.

Ушаков, В. Я. Электроэнергетические системы и сети: учеб. пособие / В. Я. Ушаков. — М. : Юрайт, 2016. — 448 с. — ISBN 978-5-9916-6520-9.

В пособии рассмотрены: краткая история становления и развития электроэнергетики и её современное состояние; проблемы обеспечения энергетики первичными ресурсами; производство, передача и накопление электроэнергии; экологические проблемы, обусловленные ростом производства и потребления энергии; геополитические и социальные угрозы, связанные с энергообеспечением. Акцент сделан на проблемах и способах их преодоления на всех этапах жизненного цикла энергоресурсов — от поиска, разведки и добычи сырья до потребления электрической и тепловой энергии. Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования. Для магистрантов, изучающих курс «Современные проблемы электроэнергетики», а также аспирантов, научных сотрудников и специалистов, занимающихся проблемами энергетики и смежных с ней областей.

А. Д. ЭРНСТ
Д. Ю. РУДИ
А. А. РУППЕЛЬ
А. И. АНТОНОВ
В. И. КЛЕУТИН
К. В. ХАЦЕВСКИЙ
Т. В. ГОНЕНКО
С. И. ПЕТРОВ

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

Омский институт
водного транспорта (филиал)
Сибирского государственного
университета водного транспорта,
г. Омск

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЕНЕРАТОРАХ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Современное развитие распределенных источников ЭЭ в России невозможно без развития средств, позволяющих повысить запас динамической устойчивости. Важным условием надежной работы собственных источников электроэнергии является устойчивость синхронных генераторов. В данной работе приведены особенности динамических переходных процессов в газотурбинных установках. Актуальность исследования связана с тем, что в настоящее время в России распределенные источники энергии имеют небольшую мощность. С этим связаны потери запаса динамической устойчивости при КЗ или значительных перегрузках.

Ключевые слова: переходные процессы, динамическая устойчивость, особенности устойчивости, распределенная энергетика, устойчивости генераторов.

В последние годы пристальное внимание учёных привлекают важные проблемы так называемой «распределённой генерации». Чаще её называют распределённая энергетика [1]. Быстрые темпы развития собственной электроэнергетической базы крупных промышленных предприятий вызывают значительное усложнение установившихся и переходных эксплуатационных режимов и существенно расширяют круг задач, решаемых при управлении ими. В условиях развития мощных ОЭС возникает ряд проблем, связанных с передачей электрической энергии и устойчивостью энергосистем. При появлении в системе больших возмущений (резких изменений режима), таких как короткие замыкания с отключением элементов электрической сети (трансформаторов, ЛЭП, источников реактивной мощности и др.), скачкообразные аварийные небалансы активной мощности с отключением генератора или блока генераторов с общим выключателем, крупной подстанции, вставки постоянного тока или крупного потребителя и др. необходимо рассматривать задачу динамической устойчивости.

В связи с этим одной из важных проблем при проектировании и эксплуатации системы электроснабжения являются устойчивость и надежность ее синхронной работы с энергосистемой. Важная часть данной проблемы — оценка влияния динамических процессов в энергосистеме на режим работы генераторов местной электростанции, а также электрооборудования системы электроснабжения терминала — трансформаторов, двигателей, выключателей и др. [2].

Сохранение динамической устойчивости комплексов распределенной энергетикой малой мощности при различных возмущениях является одной из существенных и актуальных проблем, имеющих важнейшее экономическое и производственное значение в любой отрасли современной промышленности.

В статье приведены способы повышения и улучшения динамической устойчивости генераторов и турбин малой мощности.

Динамическая устойчивость — это способность системы восстанавливать после большого возмуще-

ния исходное состояние или состояние, практически близкое к исходному [3–6].

О динамической устойчивости судят по характеру изменения параметров режима при конечных возмущениях. Рассматриваются не только конечные возмущения, но и вызванными вполне определёнными возмущающими факторами. Изменение режима при этом характеризуется нелинейными уравнениями, отражающими воздействие соответствующего возмущающего фактора.

Известны два принципиально различных подхода к решению задач анализа синхронной динамической устойчивости электроэнергетических систем [3, 5]. Первый, наиболее распространённый, состоит в численном интегрировании дифференциальных уравнений движения системы [3–6]. Об устойчивости или неустойчивости исследуемого динамического перехода судят на основе анализа характера изменения взаимных углов синхронных машин в переходном процессе. При этом имеется возможность рассматривать достаточно строгие математические модели электроэнергетических систем [7].

Однако метод численного интегрирования позволяет обнаружить устойчивость динамического перехода лишь в течение заданного интервала времени. Метод не даёт достаточных условий устойчивости процесса в целом и всегда ограничен по точности. Кроме того, расчёты для достаточно длительных интервалов времени применительно к сложным электроэнергетическим системам требуют больших затрат вычислительного времени, а также времени на анализ полученных результатов расчёта. Существенным недостатком метода численного интегрирования является также частый характер получаемых решений, в то время как в задачах проектирования электроэнергетических систем часто требуется получение границ области устойчивости в пространстве параметров режима.

Получение строгих критериев устойчивости, лишённых отмеченных недостатков, возможно при использовании качественных методов анализа. А. А. Горев, впервые обратив внимание на неудовлетворительность оценки устойчивости при численном интегрировании уравнений движения, предложил первые критерии динамической устойчивости, основанные на энергетических соотношениях для консервативной модели электроэнергетической системы [7]. Впоследствии эти подходы получили развитие на основе второго метода Ляпунова [7].

Исследование синхронной динамической устойчивости электроэнергетической системы с помощью метода функций Ляпунова сводится к анализу устойчивости установившегося движения системы в послеаварийном режиме по отношению к начальным возмущениям и позволяет судить об устойчивости динамического перехода без траектории возмущенного движения, т.е. без определения решений соответствующих дифференциальных уравнений.

Весьма перспективен метод функции Ляпунова для анализа динамической устойчивости энергосистем в реальном масштабе времени, т.к. он в наибольшей степени удовлетворяет требованиям, предъявляемым к проведению таких расчётов с точки зрения вычислительных затрат.

Однако необходимо отметить, что в настоящее время практическое использование метода функции Ляпунова для расчёта устойчивости электроэнергетических систем остаётся всё ещё ограниченным, по причине отсутствия общих методов построения

самой функции и использования её для моделей, достаточно точно отражающих свойства электроэнергетических систем, в силу чего результаты, получаемые на основе метода Ляпунова, зачастую далеки от действительных.

Малая генерация в основном представлена установками на органическом топливе. Вопрос переменной вращающего момента, а значит, регулирования частоты вращения, в нормальном эксплуатационном режиме отсутствует. Одна из проблем эксплуатации таких установок малой генерации заключается в недостаточной устойчивости используемых в них генераторов, связанная с их небольшой инерцией.

Вопросами динамической устойчивости генераторов газотурбинных установок малой мощности занимаются относительно недавно. Работ, посвящённых изучению и анализу данной проблемы, мало, так как, в целом, методы решения подобных задач аналогичны тем, что сформулированы для классических паросиловых установок. Основные подходы к расчёту переходных процессов и динамической устойчивости изложены в работах [2, 3, 5, 6].

Проблемы динамической устойчивости генераторов ГТУ и их особенностей рассмотрены в [8–10]. Основная особенность, негативно влияющая на устойчивость генераторов газотурбинных установок, — малое значение механической постоянной инерции T_j . Это характерно только для многовальных ГТУ без редуктора.

Другая особенность, снижающая динамическую устойчивость многовальных ГТУ без редуктора, — оснащение генераторов системами самовозбуждения.

На сегодняшний день именно газовая промышленность (после авиационной) является основным потребителем выпускаемых газотурбинных установок (ГТУ) [11]. Особенности эксплуатации ГТУ в той или иной отрасли предъявляют свои специфические требования к выбору и обоснованию схем ГТУ.

Острый недостаток в ГТУ, специально созданных для работы на газопроводах, привел к тому, что в настоящее время на компрессорных станциях используется большое число газотурбинных установок различных схем и конструкций: стационарных, транспортных, авиационных, судовых, разнообразных по назначению импортных установок, в том числе с когенерацией, тригенерацией — утилизирующих теплоту отходящих газов [12, 13].

Все эти установки вместе с центробежными нагнетателями получили наименование с газоперекачивающих агрегатов (ГПА) с газотурбинным приводом, который является определяющим видом привода на газопроводах как по числу установленных агрегатов, так и по их суммарной мощности. Более 80 % всей установленной мощности на газопроводах составляют газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом [14].

Как показывает практика отработки и эксплуатации ГТУ, наибольшее количество аварийных и нештатных ситуаций возникает в момент запуска и перехода турбины на новый режим работы. Запуск и смена режимов сопровождается колебаниями турбины и вибрациями и, из-за больших градиентов давлений, она, как правило, трудно прогнозируема, вследствие чего происходит разрушение турбины или нарушение нормального функционирования жизненно важных узлов и устройств

как ГТУ, так и всей компрессорной станции (КС) в целом [15].

Для оценки работоспособности газотурбинной установки требуется комплексное изучение влияния всех ее систем и подсистем на нестационарных режимах работы, что является сложной технической задачей, а успеха в этом вопросе можно достичь только при наличии достоверных математических моделей, позволяющих прогнозировать и идентифицировать динамические параметры ГТУ [16].

Проведенное исследование [17] показало, что современные системы регулирования скорости вращения газовых турбин в совокупности с относительно небольшими эквивалентными инерционными постоянными агрегатов оказывают значительное влияние на электромеханические переходные процессы, вызванные, в том числе, аварийными возмущениями, не связанными с небалансами мощности в энергосистеме.

Это обстоятельство определяет необходимость подробного учета современных газотурбинных установок при проведении расчетов электромеханических переходных процессов.

Библиографический список

1. Авраменко В. Н., Гуреева Т. М. Динамическая устойчивость газотурбинной электростанции комбинированного цикла на Алчевском металлургическом комбинате // Технічна електродинаміка. 2011. № 6. С. 48–54.
2. Гашимов А. М., Рахманов Н. Р., Ахмедова С.Т., Рахманов Р. Н. Переходные процессы в системе электроснабжения нефтяной нагрузки с собственной газотурбинной электростанцией // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2009. № 2. С. 10–16.
3. Мелешкин Г. А., Меркурьев Г. В. Устойчивость энергосистем. В 2-х кн.: моногр. СПб.: Центр подготовки кадров энергетики, 2006. Кн. 1. 369 с.
4. Руди Д. Ю., Попова М. В. Устойчивость электроэнергетических систем // Молодежь и системная модернизация страны: сб. науч. ст. Междунар. науч. конф. студентов и молодых ученых, 25–26 мая 2016 г. В 2 т. Курск: Университетская книга, 2016. Т. 2. С. 303–307.
5. Гуревич Ю. Е., Либова Л. Е., Окин А. А. Расчёты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 390 с.
6. Меркурьев Г. В., Ю. М. Шаргин. Устойчивость энергосистем. В 2 т. СПб.: Центр подготовки кадров энергетики, 2008. Т. 2. 376 с.
7. Шемпелев В. А. Приближённые методы качественного анализа устойчивости электроэнергетических систем: дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02. Екатеринбург, 1993. 159 с.
8. Борисов Ю. В., Гуревич Ю. Е., Пойдо А. И., Хвоцинская З. Г. О применении газотурбинных генераторов в энергосистемах России // Электричество. 1995. № 11. С. 2–8.
9. Гуревич Ю. Е., Каспаров Э. А., Лабунец И. А. О применении генераторов различных типов на парогазовых и газотурбинных электростанциях // Электричество. 1996. № 6. С. 2–7.
10. Джаларидзе Н. Р., Сыромятников С. Ю. Обеспечение устойчивости энергосистемы с ГТЭС небольшой мощности // Газотурбинные технологии. 2005. № 5. С. 4–5.
11. Дерюшев Д. В. Моделирование переходных процессов газотурбинной установки // Новый университет. Сер. Технические науки. 2013. № 8–9 (18-19). С. 98–109.
12. Белослудцев И. С. Применение когенерационных систем // Новый университет. Сер. Технические науки. 2012. № 4. С. 26–31.
13. Белослудцев И. С. Анализ существующих моделей когенерационных установок // Вестник Камского института гуманитарных и инженерных технологий. 2011. № 5 (18). С. 54–62.
14. Поршаков Б. П., Апостолов А. А., Никишин В. И. Газотурбинные установки. М.: Изд-во РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2003. 240 с.
15. Митюков Н. В. Имитационное моделирование переходных процессов в системе подачи ракетного двигателя: автореф. ... канд. техн. наук. Ижевск, 1997. 19 с.
16. Макаров С. С., Митюков Н. В. Моделирование поведения летательного аппарата на пусковом столе // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2001. № 1. С. 45–47.
17. Герасимов А. С., Смирнов А. Н. Моделирование газотурбинных установок при анализе электромеханических переходных процессов // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2013. № 2 (69). С. 6–13.

ЭРНСТ Александр Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск

РУДИ Дмитрий Юрьевич, магистрант гр. ЭЭМ-154 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ.

РУППЕЛЬ Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование» Омского института водного транспорта (ОИВТ) (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта (СГУВТ).

АНТОНОВ Александр Игоревич, ассистент кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ.

КЛЕУТИН Владислав Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ.

ХАЦЕВСКИЙ Константин Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ; профессор кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ.

ГОНЕНКО Татьяна Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ.

ПЕТРОВ Святослав Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ.

Адрес для переписки: dima_rudi@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.12.2016 г.

© А. Д. Эрнст, Д. Ю. Руди, А. А. Руппель, А. И. Антонов, В. И. Клеутин, К. В. Хацевский, Т. В. Гоненко, С. И. Петров

К ПРОБЛЕМЕ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ УРОВНЕЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ В СЕТЯХ 0,4 КВ

В статье представлены результаты измерений показателей качества электрической энергии в наиболее проблемных, с точки зрения качества электроэнергии, распределительных сетях 0,4 кВ. Результаты измерений, выполненные в сетях организаций различных сфер деятельности, приведены в виде временных диаграмм. Определено, что в сетях 0,4 кВ значения коэффициентов несимметрии токов по обратной и нулевой последовательностям могут принимать значение до 30 %. Данные измерений подтверждают наличие существования режимов несимметрии токов и напряжений.

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

Повышение эффективности транспорта и распределения электроэнергии довольно сложная задача, поскольку в настоящее время относительные потери электроэнергии в электрических сетях России составляют примерно 15 % [1]. Эта величина значительно выше, чем в других промышленно развитых странах мира. Так, например, в электрических сетях Японии и Германии потери электроэнергии находятся на уровне 5,0–5,2 %, США и Франции — 7,2–7,8 %, Канады — 9,8 % [2].

Высокий уровень потерь в электрических сетях России можно обозначить как индикатор низкого качества электроэнергии, который свидетельствует об отклонениях значений показателей качества электроэнергии от нормативных значений [3].

За период с 2006 по 2016 год испытательная лаборатория по качеству электрической энергии Омского государственного технического университета, аккредитованная на техническую компетентность и независимость, в рамках энергетических исследований, периодических испытаний качества электрической энергии и выполнения научно-исследовательских работ провела значительное число измерений показателей качества электрической энергии в различных электроснабжающих и энергопотребляющих организациях [4–7].

Как известно, наиболее проблемными, с точки зрения качества электроэнергии, являются сети 0,4 кВ, так как именно на них доводится более 50 % от общей величины потерь электроэнергии при её

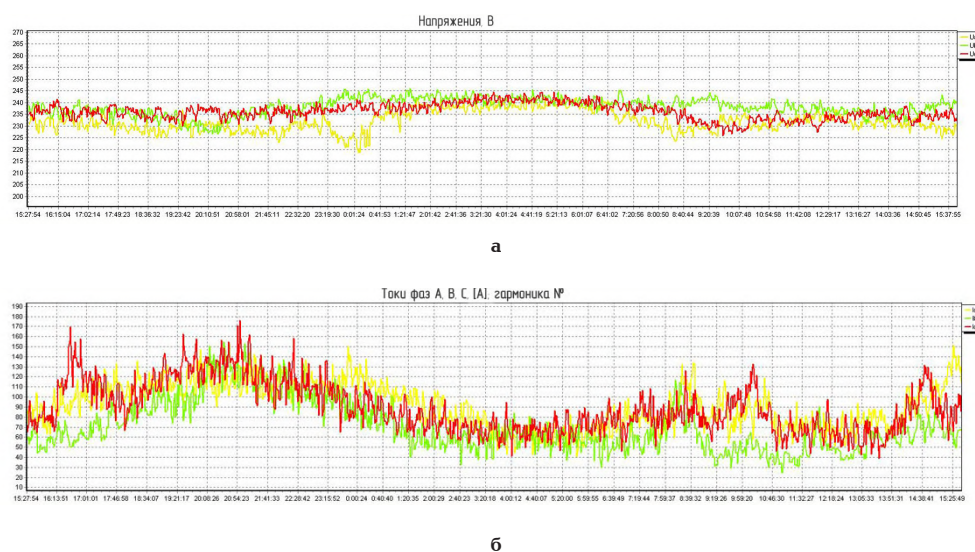
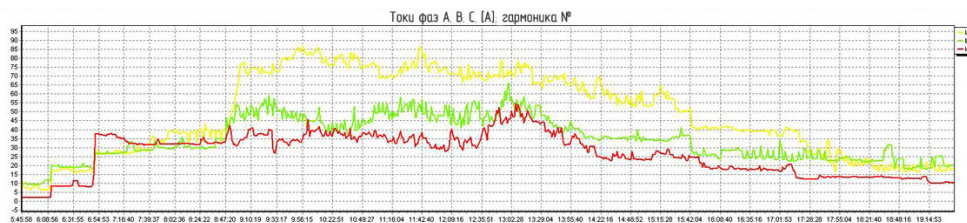


Рис. 1. Временная диаграмма несимметричных фазных напряжений (а) и токов (б) в сети 0,4 кВ промышленного предприятия



Рис. 2. Временная диаграмма несимметричных фазных токов ВРУ 0,4 кВ жилого дома

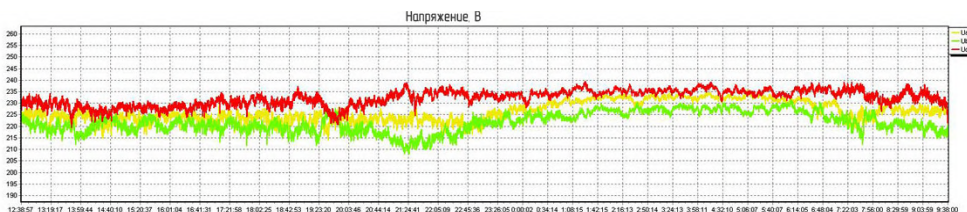


а



б

Рис. 3. Временная диаграмма токов (а) и коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности (б) фидера 0,4 кВ, питающего учреждение бюджетной сферы



а



б

Рис. 4. Временные диаграммы несимметричных фазных напряжений (а) и коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности (б)

передаче и распределении [8]. В том числе такая ситуация обусловлена тем, что большинство трансформаторов 6–10/0,4 кВ в Российской Федерации имеют сравнительно небольшую мощность (до 250 кВА) и схему соединения обмоток Y/Y_{H1} , для которой характерно высокое значение сопротивления нулевой последовательности [9].

В связи с этим, измерения показателей качества электрической энергии в основном проводились в центрах питания на шинах 0,4 кВ трансформаторных подстанций, на шинах 0,4 кВ вводно-распределительных устройств и на выводах приемников электрической энергии.

Одной из целей проводимых измерений было определение реальных данных о несимметрии нагрузок в сетях 0,4 кВ для их дальнейшего анализа. Изучение полученных в ходе измерений данных показало, что во многих обследуемых сетях 0,4 кВ объективно существуют режимы несимметрии токов и напряжений.

Наличие несимметричного подключения трехфазных и однофазных нагрузок, однофазных и двухфазных ответвлений от трехфазных линий 0,4 кВ и, как следствие, неравенство нагрузок по фазам в четырехпроводной сети приведет к протеканию токов обратной и нулевой последовательности

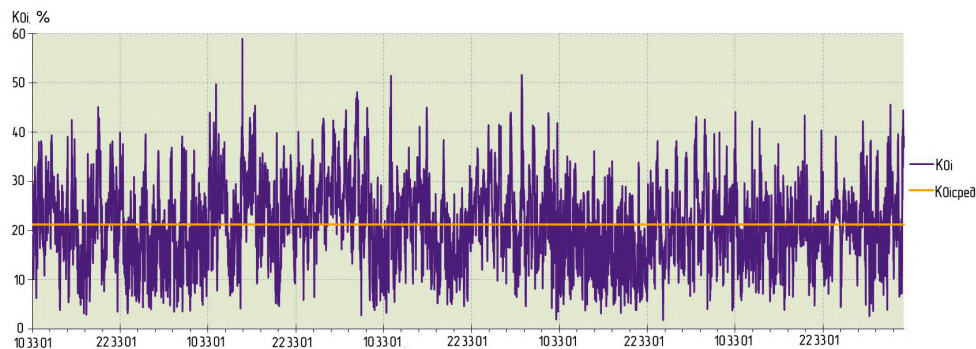


Рис. 5. Временная диаграмма коэффициента несимметрии тока по нулевой последовательности

в трансформаторах подстанций и подключенных к ним линиях электропередач. В этих элементах помимо основных потерь мощности от токов прямой последовательности возникают дополнительные потери мощности.

Исходя из анализа полученных данных и графиков установлено, что при наличии в сети амплитудно-фазовой несимметрии напряжений и токов величина коэффициентов несимметрии токов обратной и нулевой последовательности могут составлять соответственно до 30 % и 40 %.

Результаты измерений по своим основным параметрам получились аналогичными данным определенных в ходе исследований, проводимых в распределительных сетях 0,4 кВ другими лабораториями и учеными [10–12].

На рис. 1–4 приведены полученные в ходе экспериментальных измерений временные диаграммы показателей качества электрической энергии, а также значения несимметричных фазных напряжений и токов.

Подтвержден тот факт, что в сетях 0,4 кВ величина коэффициента несимметрии токов по обратной и нулевой последовательностям может достигать значений до 30 % (рис. 5), при которой потери мощности и электроэнергии могут возрастать в 1,5 раза [10].

Таким образом, в электрических сетях задачу уменьшения потерь мощности и электроэнергии, обусловленных воздействием несимметричных нагрузок, необходимо решать путем снижения величины несимметрии токов в этих сетях.

Библиографический список

1. Шведов Г. В., Сипачева О. В., Савченко О. В. Потери электроэнергии при ее транспорте по электрическим сетям: расчет, анализ, нормирование и снижение. М.: Издат. дом МЭИ, 2013. 424 с.
2. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики»: постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г., № 321 // Режим доступа: <https://rg.ru/2014/04/24/energetika-site-dok.html> (дата обращения: 25.02.2017).
3. Добрусин Л. Приоритеты управления качеством электроэнергии в электрических сетях России: взгляд с позиции национальных интересов и стратегии международного элек-

троэнергетического сотрудничества // Силовая электроника. 2007. № 12. С. 82–86.

4. Дед А. В., Паршукова А. В. Сравнение методов расчета коэффициентов учета несимметрии распределения нагрузок при оценке потерь мощности // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 9. С. 221–225.

5. Дед А. В., Еремин Е. Н. Экспериментальное исследование влияния несимметричной нагрузки на систему электроснабжения // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2009. № 1 (77). С. 133–138.

6. Дед А. В., Бирюков С. В., Паршукова А. В. Оценка дополнительных потерь мощности в электрических сетях 0,38 кВ на основе экспериментальных данных // Успехи современного естествознания. 2014. № 11–3. С. 64–67.

7. Долингер С. Ю., Лютаевич А. Г., Горюнов В. Н. [и др.]. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2013. № 2 (120). С. 178–183.

8. Коваленко П. В. Потери и качество электроэнергии в системах электроснабжения при несимметрии токов и напряжений // Новочеркасск: Оникс+, 2007. 227 с.

9. Иванов Д. Г., Кузьмичев А. И., Андреев В. В. Влияние схем соединения трансформаторов 6–10/0,4 кВ на качество электрической энергии. URL: <http://www.cap.ru/home/125/vliyanie.htm> (дата обращения: 25.02.2017).

10. Косоухов Ф. Д., Кулагин С. А., Филиппов А. О. Энергосбережение в сельских распределительных сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке // Энергосберегающие технологии. Проблемы их эффективного использования: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. 5–7 декабря 2007 г. Волгоград: ВГСХА, 2008. С. 125–130.

11. Хацевский К. В. [и др.] Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2012. № 2 (110). С. 212–214.

12. Гринкруг М. С., Митин И. А. Несимметричные режимы работы электрических сетей. М.: Lambert Academic Publishing, 2011. 124 с.

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

Адрес для переписки: ded_av@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.03.2017 г.

© А. В. Дед

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ МЕТОДОМ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

В статье представлены результаты решения задачи по нахождению зависимости потерь мощности в несимметричном режиме от заданных параметров нагрузки и коэффициентов, характеризующих несимметрию токов по обратной и нулевой последовательности. На основе опытных расчетов за искомую зависимость определена полиномиальная аппроксимация третьей степени. С помощью разработанного алгоритма по расчету потерь мощности при несимметричной нагрузке в распределительных сетях 0,4 кВ получены зависимости потерь мощности от коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательности при наличии амплитудной несимметрии токов.

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

Одной из задач, решаемой для повышения эффективности транспорта и распределения электроэнергии, является установление уровня роста потерь мощности при передаче ее в распределительных сетях с несимметричным характером нагрузки.

В связи с этим возникает необходимость охарактеризовать исследуемую схему сети каким-либо количественным показателем, который можно определить на основе объективных данных, а затем вывести зависимости потерь мощности от этого показателя.

Как указывалось ранее, несоблюдение требований по симметричному подключению потребителей электрической энергии, таких как перегрузка или недогрузка фаз из-за неравномерного распределения по фазам однофазных потребителей, ввод новых электроприемников без учета симметричного распределения по фазам, приводит к значительному отклонению качества электроэнергии по несимметрии напряжений и токов [1, 2].

В результате воздействия несимметрии токов в фазных проводах возникает ток в нулевом проводе, а вместе с ним напряжения смещения нейтральной точки системы фазных напряжений. При этом значения фазных напряжений на зажимах электроприемников отклоняются от нормативных значений и становятся несимметричными. Среди основных и главных последствий отклонений показателей качества электрической энергии, в том числе появления несимметрии токов можно также назвать появления добавочных потерь мощности [3–5]. Следовательно, необходимо решить задачу определения зависимости потерь мощности в несимметричном режиме от заданных параметров нагрузки

и коэффициентов, характеризующих несимметрию токов по обратной и нулевой последовательности.

Решением этой задачи может стать аналитическая функция, то есть функция, которая задана соответствующим уравнением, описывающая наилучшим образом зависимость уровня увеличения потерь от уровня несимметрии токов. Оптимальным способом для решения этой задачи является метод аппроксимации — нахождение приближенного описания корреляционной зависимости известных переменных подходящим уравнением функциональной зависимости, которое отражает основную тенденцию зависимости [6].

Таким образом, цель метода заключается в нахождении такого полинома, который, основываясь на известных параметрах, будет давать график с минимальным отклонением его линии от функции начального графика. Подобный полином называется аппроксимирующей функцией для исходной функции, заданной в качестве массива данных.

В отличие от интерполяционного многочлена, аппроксимирующая функция проходит не в точности по узловым точкам, а вблизи них. Метод наиболее известен для аппроксимации полиномиальной функции — это метод наименьших квадратов [6].

Согласно данному методу, в качестве меры отклонения значений полученной функции от экспериментальных значений определена сумма квадратов отклонений:

$$\Phi(a_0, \dots, a_k) = \sum_{i=1}^n (f(x_i, a_1, \dots, a_k) - y_i)^2 \Rightarrow \min. \quad (1)$$

Исходя из условий конкретно исследуемой задачи, происходит выбор типа аппроксимирования

функции. Как правило, чем ниже степень уравнения, применяемого для аппроксимации, тем более искомая зависимость функции будет определена приблизительно [6].

Исходя из опытных расчетов, за искомую зависимость выбрана полиномиальная аппроксимация третьей степени, определяемая с помощью программного продукта Microsoft Excel. Данный выбор обусловлен, в первую очередь, тем, что именно полином третьей степени лучше всех из выбранных функций аппроксимирует экспериментальные данные с максимальным коэффициентом достоверности $R^2 \approx 1$ [7].

В общем виде функцию полинома третьей степени можно записать в форме выражения:

$$f(x) = a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0, \quad (2)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 — константы, которые выбираются исходя из условия наименьшего отклонения значений полученной функции;

x — определенные экспериментальным или расчетным путем значения узловых точек аппроксимируемой функции.

Применительно к представленной в данной статье задаче искомое уравнение (2) может принимать следующий вид (3) или (4):

$$K_{ДПН} = f(K_{2i}) = a_3 K_{2i}^3 + a_2 K_{2i}^2 + a_1 K_{2i} + a_0, \quad (3)$$

$$K_{ДПН} = f(K_{0i}) = b_3 K_{0i}^3 + b_2 K_{0i}^2 + b_1 K_{0i} + b_0. \quad (4)$$

Коэффициенты a_i (b_i) находятся методом наименьших квадратов, который в случае решения (2) принимает вид системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} B_{00}a_0 + B_{01}a_1 + B_{02}a_2 + B_{03}a_3 = C_0; \\ B_{10}a_0 + B_{11}a_1 + B_{12}a_2 + B_{13}a_3 = C_1; \\ B_{20}a_0 + B_{21}a_1 + B_{22}a_2 + B_{23}a_3 = C_2; \\ B_{30}a_0 + B_{31}a_1 + B_{32}a_2 + B_{33}a_3 = C_3. \end{cases} \quad (5)$$

Значения коэффициентов B_{ij} определяются на основе следующих выражений:

$$\begin{cases} B_{00} = n; \\ B_{01} = B_{10} = \sum_{i=1}^n x_i; \\ B_{02} = B_{20} = B_{11} = \sum_{i=1}^n x_i^2; \\ B_{03} = B_{30} = B_{12} = B_{21} = \sum_{i=1}^n x_i^3; \\ B_{13} = B_{31} = B_{22} = \sum_{i=1}^n x_i^4; \\ B_{23} = B_{32} = \sum_{i=1}^n x_i^5; \\ B_{33} = \sum_{i=1}^n x_i^6; \end{cases} \quad (6)$$

где n — количество наборов экспериментальных данных; x_i — опытные (экспериментальные) значения.

Величины свободных коэффициентов C_i рассчитываются согласно нижеуказанным соотношениям:

$$\begin{cases} C_0 = \sum_{i=1}^n y_i; \\ C_1 = \sum_{i=1}^n x_i y_i; \\ C_2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i; \\ C_3 = \sum_{i=1}^n x_i^3 y_i, \end{cases} \quad (7)$$

где y_i — значения искомой функции, полученной на основе опытных (экспериментальных) значений.

В качестве величины y_i в расчетах принимают значения коэффициента дополнительных потерь мощности от несимметрии — $K_{ДПН}$ [8], а x_i — значения коэффициентов несимметрии токов обратной K_{2i} или нулевой K_{0i} последовательности, которые получены в результате эксперимента, в зависимости от необходимости нахождения функциональной зависимости $K_{ДПН} = f(K_{2i})$ или $K_{ДПН} = f(K_{0i})$.

С учетом (6) и (7) получим систему уравнений (5) в виде, позволяющем с помощью метода Крамера [9], способ решения систем алгебраических уравнений, в которых число уравнений равно числу неизвестных с ненулевым определителем матрицы коэффициентов системы, определить искомые для аппроксимирующей функции $K_{ДПН} = f(K_{2i})$ коэффициенты a_0, a_1, a_2, a_3 :

$$\begin{cases} a_0 n + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_3 \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n y_i; \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^3 + a_3 \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n x_i y_i; \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 + a_3 \sum_{i=1}^n x_i^5 = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i; \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i^3 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^4 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^5 + a_3 \sum_{i=1}^n x_i^6 = \sum_{i=1}^n x_i^3 y_i. \end{cases} \quad (8)$$

Аналогичным способом будут определяться коэффициенты b_0, b_1, b_2, b_3 для нахождения зависимости $K_{ДПН} = f(K_{0i})$.

По результатам каждой аппроксимации определяется коэффициент достоверности аппроксимации R^2 в соответствии с выражением:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}{(\sum y_i^2) - \frac{(\sum y_i)^2}{n}}, \quad (9)$$

где y_i — значения коэффициента $K_{ДПН}$, рассчитанного на основе экспериментальных значений; y_i — значения коэффициента $K_{ДПН}$, полученные в результате расчета по уравнению аппроксимированной функции.

Чем ближе значение коэффициента достоверности аппроксимации R^2 к единице, тем точнее функция аппроксимирует исследуемый объем данных.

На рис. 1–4 в качестве примера представлены графики полученных зависимостей результатов расчетов и аппроксимирования зависимостей $K_{ДПН} = f(K_{Ni})$ при наличии амплитудной несимметрии,

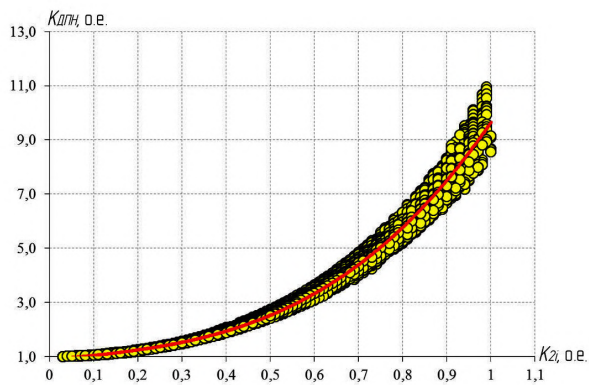


Рис. 1. Зависимость $K_{\Delta ПН} = f(K_{21})$ для $S_{ГР} = 100$ кВА, $K_3 = [0,6 \div 0,9]$, $\cos \varphi_{ср\text{е}\text{а}} = [0,7 \div 0,9]$ при $I_A \neq I_B \neq I_C$

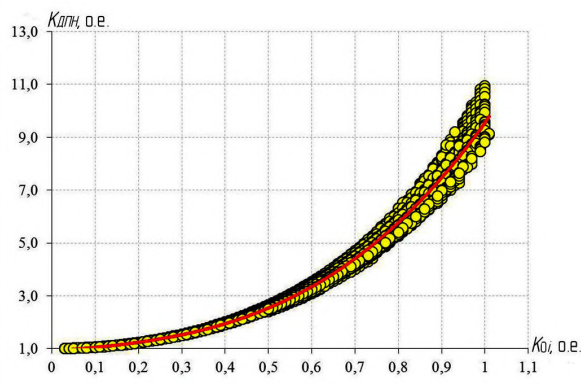


Рис. 2. Зависимость $K_{\Delta ПН} = f(K_{01})$ для $S_{ГР} = 100$ кВА, $K_3 = [0,6 \div 0,9]$, $\cos \varphi_{ср\text{е}\text{а}} = [0,7 \div 0,9]$ при $I_A \neq I_B \neq I_C$

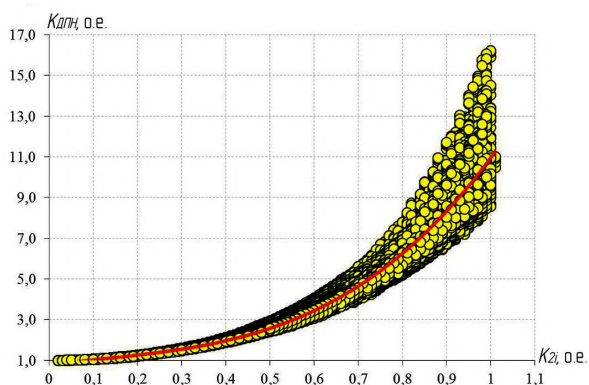


Рис. 3. Зависимость $K_{\Delta ПН} = f(K_{21})$ для $S_{ГР} = [100 \div 630]$ кВА, $K_3 = [0,6 \div 0,9]$, $\cos \varphi_{ср\text{е}\text{а}} = [0,7 \div 0,9]$ при $I_A \neq I_B \neq I_C$

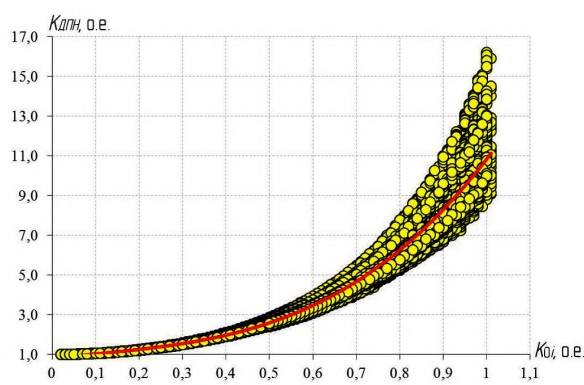


Рис. 4. Зависимость $K_{\Delta ПН} = f(K_{01})$ для $S_{ГР} = [100 \div 630]$ кВА, $K_3 = [0,6 \div 0,9]$, $\cos \varphi_{ср\text{е}\text{а}} = [0,7 \div 0,9]$ при $I_A \neq I_B \neq I_C$

Таблица 1

Функции зависимостей $K_{\Delta ПН} = f(K_{21})$ и $K_{\Delta ПН} = f(K_{01})$ при наличии амплитудной несимметрии $I_A \neq I_B \neq I_C$

$S_{ГР}$, кВА	$K_{\Delta ПН} = f(K_{21})$	$K_{\Delta ПН} = f(K_{01})$
100	$K_{\Delta ПН(100)} = f(K_{21}) = 7,62K_{21}^3 - 0,49K_{21}^2 + 1,63K_{21} + 0,88$	$K_{\Delta ПН(100)} = f(K_{01}) = 6,82K_{01}^3 + 0,53K_{01}^2 + 1,3K_{01} + 0,9$
160	$K_{\Delta ПН(160)} = f(K_{21}) = 11,80K_{21}^3 - 3,98K_{21}^2 + 2,68K_{21} + 0,79$	$K_{\Delta ПН(160)} = f(K_{01}) = 10,81K_{01}^3 - 2,69K_{01}^2 + 2,25K_{01} + 0,83$
250	$K_{\Delta ПН(250)} = f(K_{21}) = 15,73K_{21}^3 - 8,02K_{21}^2 + 4K_{21} + 0,68$	$K_{\Delta ПН(250)} = f(K_{01}) = 14,73K_{01}^3 - 6,88K_{01}^2 + 3,66K_{01} + 0,7$
400	$K_{\Delta ПН(400)} = f(K_{21}) = 10,28K_{21}^3 - 2,97K_{21}^2 + 2,41K_{21} + 0,81$	$K_{\Delta ПН(400)} = f(K_{01}) = 9,38K_{01}^3 - 1,86K_{01}^2 + 2,06K_{01} + 0,84$
630	$K_{\Delta ПН(630)} = f(K_{21}) = 10,45K_{21}^3 - 3,09K_{21}^2 + 2,44K_{21} + 0,81$	$K_{\Delta ПН(630)} = f(K_{01}) = 9,37K_{01}^3 - 1,7K_{01}^2 + 1,99K_{01} + 0,85$
$K_{\Delta ПН\text{С}}$	$f(K_{21}) = 11,57K_{21}^3 - 4,19K_{21}^2 + 2,8K_{21} + 0,78$	$f(K_{01}) = 10,64K_{01}^3 - 3,04K_{01}^2 + 2,44K_{01} + 0,81$

когда $I_A \neq I_B \neq I_C$, а углы сдвига фаз между токами и напряжениями равны между собой $\varphi_A \neq \varphi_B \neq \varphi_C$.

Для экспериментальных расчетов использовались каталожные характеристики трансформаторов с номинальными напряжениями 10/0,4 кВ и линейкой мощностей 100, 160, 250, 400 и 630 кВА.

Длина расчетной линии L , на основе данных о средних и максимальных протяженностях кабельных линий 0,4 кВ холдинга МРСК Российской Федерации, принималась равной 300 метров [10].

В соответствии с разработанным алгоритмом [8, 11] получали массив значений коэффициентов несимметрии токов по обратной K_{2i} и нулевой K_{0i} последовательности и соответствующие им значения коэффициентов дополнительных потерь мощности $K_{ДПН}$. Данный массив для каждого исследуемого случая аппроксимировался, с учетом максимальной достоверности определялась полиномиальная функция третьей степени и вычислялись искомые зависимости $K_{ДПН} = f(K_{2i})$ и $K_{ДПН} = f(K_{0i})$.

Итоговые уравнения функций увеличения потерь мощности в зависимости от уровня несимметрии нагрузки $K_{ДПН} = f(K_{2i})$ и $K_{ДПН} = f(K_{0i})$ при наличии амплитудной несимметрии для $S_{тр} = 100$ кВА определены путем аппроксимирования множества всех полученных значений $K_{ДПН}$ и соответствующим им значениям K_{2i} и K_{0i} и имеют вид:

$$K_{ДПН} = f(K_{2i}) = 7,62K_{2i}^3 - 0,49K_{2i}^2 + 1,63K_{2i} + 0,88, \quad (10)$$

$$K_{ДПН} = f(K_{0i}) = 6,82K_{0i}^3 + 0,53K_{0i}^2 + 1,3K_{0i} + 0,9. \quad (11)$$

Множества полученных значений $K_{ДПН}$ и аппроксимированные графики зависимостей $K_{ДПН} = f(K_{2i})$ и $K_{ДПН} = f(K_{0i})$ для $S_{тр} = 100$ кВА в соответствии с уравнениями (10) и (11) представлены на рис. 1 и рис. 2.

Результаты расчетов и аппроксимирования зависимостей $K_{ДПН} = f(K_{2i})$ при наличии амплитудной несимметрии, когда $I_A \neq I_B \neq I_C$ для всех исследуемых вариантов, для указанных выше условий, приведены в табл. 1, графики полученных зависимостей на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

Библиографический список

1. Дед А. В., Зайцев В. Ю., Сухов Е. С. Дополнительные потери мощности в электрических сетях при несимметричной нагрузке // Динамика систем, механизмов и машин. 2012. № 1. С. 123–126.
2. Петрова Е. В., Гиршин С. С., Горюнов В. Н., Христин Д. Е. Учет температурной зависимости сопротивления

неизолированного провода при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2013. № 1. С. 284–291.

3. Дед А. В., Паршукова А. В. Дополнительные потери мощности при несимметрии напряжения в электрических машинах // Роль технических наук в развитии общества: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Уфа: Аэтерна, 2014. С. 10–13.

4. Дед А. В., Паршукова А. В. Дополнительные потери активной мощности в силовых трансформаторах при несимметричных режимах // Современное состояние и перспективы развития: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Уфа: Аэтерна, 2014. С. 13–16.

5. Петрова Е. В., Бигун А. Я., Горюнов В. Н., Гиршин С. С., Бубенчиков А. А. Расчет погрешностей определения потерь электрической энергии в проводах повышенной пропускной способности из-за учета атмосферных и режимных факторов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2013. № 2 (120). С. 191–197.

6. Капустин, Е. И. Решение некоторых классов математических задач в программе Excel. URL: <http://old.exponenta.ru/educat/systemat/kapustin/011.asp> (дата обращения: 25.02.2017).

7. Калиткин Н. Н. Аппроксимация: численные методы / Под ред. Г. М. Лизнева. М.: Информационные системы в экономике, 2008. 400 с.

8. Дед А. В. Математическое моделирование расчета потерь мощности в трехфазной сети при несимметрии нагрузки // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2016. № 5 (149). С. 98–101.

9. Крянев, А. В., Лукин Г. В., Удунян Д. К. Метрический анализ и обработка данных. М.: Физматлит, 2012. 308 с.

10. Смоленик С. В., Халилов Ф. Х. Анализ технического состояния электрических сетей 0,38–110 кВ Российской Федерации // Тр. Кольского научного центра РАН. 2011. № 5. С. 24–29.

11. Дед А. В. Разработка алгоритма расчета потерь мощности в четырехпроводной трехфазной сети при несимметричной нагрузке // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2016. № 5 (149). С. 101–104.

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

Адрес для переписки: ded_av@mail.ru

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

Адрес для переписки: lenandr02@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 09.03.2017 г.

© А. В. Дед, Е. Г. Андреева

Книжная полка

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

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

ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Рассмотрены проблемы со складированием золошлаковых материалов (ЗШМ) в России на примере г. Омска. Произведен анализ и выявлены основные причины низкого уровня переработки ЗШМ. Определены приоритетные задачи, решение которых позволит существенно снизить экологическую нагрузку от крупных угольных энергоисточников за счет использования золошлаковых отходов в строительной индустрии региона.

Ключевые слова: отходы, зола, строительные материалы, использование, загрязнение, накопление.

Использование угля на тепловых электростанциях (ТЭС) создает серьезные проблемы по утилизации золошлаковых отходов (ЗШО). По статистическим данным в мире за последние 30 лет использование твердого топлива на ТЭС увеличилось вдвое. Применение углей в энергетике связано с получением 95 % летучей золы и 5 % шлака.

Ежегодно в России образуется более 25 млн т золошлаковых отходов, в Китае около 350 млн т, в США и Индии более 120 млн т [1]. Для складирования данных отходов приходится использовать значительные площади земли и затрачивать громадные средства на строительство золоотвалов. Данные сооружения являются опасными объектами и оказывают влияние на окружающую среду (пыление золы, испарение воды, подтопление территорий). Полученные золошлаковые отходы ТЭС становятся серьезной экологической и экономической проблемой.

Использование золошлаковых отходов в Европе началось в 70-е годы, и в разных странах данная работа ведется неравномерно: в Японии использование золы составляет 96,5 %, в Европе 90,0 %, в Китае 67,0 %, в Индии 53,0 %, в США 42,5 %. Для обеспечения использования ЗШО в Европейском сообществе разработан стандарт качества летучей золы по тонине помола, содержанию серы, влаги и горючих в уносе.

В России использование золы в промышленных масштабах имеет серьезные ограничения. В первую очередь необходимо отметить, что зола является отходом производства, поэтому ее использование в промышленности ограничено природоохранным законодательством. Необходимо внести изменение в СНиП «зола-унос» и определить данный продукт как золошлаковые материалы (ЗШМ) — промпродукт. Проблемой использования золошлаковых отходов в России занимаются слабо, так как основные угольные тепловые электростанции находятся в Сибири, где слабо развита строительная отрасль.

В настоящее время в Сибири годовой выход золы на ТЭС составляет более 10 млн т, в Кузбассе более 3 млн т, в Иркутске более 2,0 млн т, в Омске и Алтае более 1,5 млн т, в Новосибирске около 1,0 млн т [2]. На золоотвалах этих электростанций находится на хранении более 300 млн т золы, в том числе на золоотвалах омских ТЭС более 60 млн тонн. Данные хранилища составляют большую опасность для окружающей среды, регулярно поступают сообщения о размыве дамб золоотвалов и загрязнении прилегающей территории и промышленных объектов.

Зола является хорошим наполнителем для изготовления строительных материалов и заменителем природных материалов (песок и щебень). В США зола используется по следующим направлениям [2, с. 38]:

- изготовление бетона и изделий из бетона;
- добавки в цемент;
- сыпучее наполнение неудобий и насыпей;
- заполнение горных выработок;
- изготовление дорожного основания;
- рекултивация использованных котлованов и карьеров;
- изготовление гипсовых изделий;
- сельское хозяйство — раскисление почвы.

Объем используемых строительных природных материалов в России составляет 510 млн т/год, в том числе песка 180 млн т, щебня 230 млн т [1, с. 18]. Учитывая, что стройиндустрия в стране работает на старом оборудовании, то ожидать резкого увеличения прироста потребления золы не следует, так как использование ЗШМ потребует внедрения нового оборудования и новых технологий.

Основными потенциальными потребителями ЗШМ являются: цементная индустрия, строительная отрасль и дорожное строительство [3]. Проблемой широкого использования ЗШМ является «привязанность» потребителей золы к расположению ТЭС и золоотвалов. В России нет опыта создания логистических центров по складированию,

реализации и транспортировке золошлаковых материалов. Зола имеет низкую теплопроводность, поэтому имеет большие перспективы по ее применению в изготовлении строительных материалов для жилых домов.

Легучая зола на ТЭС удаляется сухим и гидравлическим способом. Сухая зола имеет вяжущие свойства и позволяет экономить цемент и известь при изготовлении стройматериалов. Зола, удаляемая после золоуловителей гидравлическим способом, при соприкосновении с водой теряет вяжущие свойства и ее используют как наполнитель вместо песка. ЗШМ обладают хорошим свойством — гигроскопичностью и, находясь в области отрицательных температур, не вспучивается при замерзании и обеспечивает защиту грунта от промерзания за счет низкой теплопроводности. Большую роль в использовании ЗШМ играют зерновой и химический состав золы и ее насыпная плотность [4].

В Омске вопросами использования ЗШМ занимаются с 1975 года с вводом в эксплуатацию установки отбора сухой золы от котлов первой очереди Омской ТЭЦ-4 мощностью 60 тыс. т в год. Основными потребителями золы были железобетонные и кирпичные заводы. Потребление золы в тот период было нестабильным и установка работала не на полную мощность. Впоследствии данная установка снижала объемы отбора золы из-за постепенного вывода из работы котлоагрегатов по их физическому износу и снижению мощности ТЭЦ из-за уменьшения потребления тепла потребителями нефтехимического комплекса.

В 1985 году началось проектирование и строительство завода золоаглопаритового гравия (500 тыс. т в год) на золе Омской ТЭЦ-5. В 1998 году при резком росте стоимости газа строительство завода было прекращено, так как гравий планировалось изготавливать путем обжига с расходом топлива в объеме 35 кг у.т./т и конкурировать на рынке данный гравий по себестоимости с природными материалами не мог.

В период 2000–2001 гг. фирмы «Русь» и ЗАО «Строительная компания — управление механизации № 7» использовали золу для ремонта и строительства дорог в смеси с известью и гравием с объемом потребления 5–7 тыс. т в год.

С 2005 г. работа по использованию ЗШМ активизировалась со строительством установки отбора сухой золы от котлов второй очереди омской ТЭЦ-4. Потребителями сухой золы стали:

— комбинат пористых материалов ООО «Вармит» с объемом золы 42 тыс. т/год, где в изделии объем золы составляет 60 %;

— первая очередь завода «Эффективного силикатного кирпича» с проектной мощностью 75 млн шт. в год и содержанием золы в изделии 85 %;

— в 2014 г. запущен в опытную эксплуатацию цементный терминал по подготовке цемента различных марок путем смешения цемента высокой прочности с золой в объеме до 30 %.

В настоящее время на цементном терминале используется зола с ТЭЦ-4, а в дальнейшем планируется строительство установки отбора сухой золы на ТЭЦ-5.

Для получения опыта использования ЗШМ совместно с учеными Автомобильно-дорожной академии разработаны стандарты использования золошлаковых материалов в дорожном строительстве и построен участок дороги по данной технологии, которая эксплуатируется в настоящее время

без замечаний. При строительстве окружной дороги вокруг Омска использовалась зола с золоотвала омской ТЭЦ-2. Данная технология получила согласование в управлении сертификации. Для дальнейшего расширения сферы использования золы проведены исследования по изготовлению тротуарной плитки и строительных смесей.

Опыт расширенного применения ЗШМ показал, что для использования золы в строительной индустрии региона необходимо решать следующие задачи:

- исследование качественного состава золы;
- разработка паспорта золы на ТЭС;
- определение гранулированного состава золы и отработка режима сжигания топлива для возможности последующего использования золы;
- разработка стандартов использования ЗШМ не как отхода, а как промпродукта;
- провести оценку объемов природных материалов, которые можно заменить золой;
- определить механизм запрета использования минеральных природных продуктов в строительстве, где возможно использование золы вблизи расположения ТЭС и золоотвала (данный способ был использован в Индии) [5];
- должны быть подписаны соглашения с потенциальными потребителями золы по перспективным направлениям использования ЗШМ;
- разработать региональную программу использования ЗШМ в регионе [6];
- определить ценовую политику для реализации ЗШМ с учетом конъюнктуры рынка;
- разработать и согласовать с региональным правительством программы льгот для предприятий, использующих золошлаковые материалы.

В целом по России необходимо подготовить:

- программу полного использования золошлаковых материалов;
- подготовить и утвердить регламентирующие документы (ГОСТы и СП) по промышленному использованию золошлаковых материалов для изготовления строительных материалов или при проведении строительных работ;
- включить в перспективную программу развития энергетики требование полного использования золошлаковых материалов при строительстве новых ТЭС [7];
- выполнить технико-экономическую оценку применения ЗШМ и при необходимости обозначить льготы для возможного использования их в регионе или на ближайших территориях.

Главное: в 2017 году — Году экологии в стране должна быть поставлена задача по подготовке документов на 100-процентное использование золошлаковых материалов.

Библиографический список

1. Кудрявый В. В., Котлер В. Р. Использование золошлаковых отходов на зарубежных ТЭС // Энергохозяйство за рубежом. 2012. № 5. С. 17–20.
2. Сиротюк В. В. Опыт и перспективы использования золошлаковых материалов в транспортном строительстве // Расширение региональной сырьевой базы вовлечением в оборот золошлаковых материалов ТЭЦ ОАО «ТГК-11»: материалы Региональной науч.-практ. конф. Омск: ТГК-11, 2007. С. 37–52.
3. Беспалов В. И., Беспалова С. У., Вагнер М. А. Природоохранные технологии на ТЭС. 2-е изд. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010. 240 с.

4. Цельковский Ю. К., Ерихемзон Л. Ю. Организация при угольных ТЭС производства безобжигового зольного песка — эффективное направление расширения использования золошлаковых отходов ТЭС России // Энергетик. М. 2013. № 8. С. 26–28.

5. В. И. Резуненко [и др.] Экологические аспекты устойчивого развития теплоэнергетики России. В 2 ч. Ч. 2. Снижение негативного влияния на окружающую природную среду систем золошлакоудаления на пылеугольных ТЭС / Газпром; общ. ред. Р. И. Вяхирев. М.: Ноосфера, 2001. 73 с.

6. Бирюков В. В. [и др.]. Российская экономика: проблемы формирования ресурсосберегающей модели развития и подходы к их решению: моногр. / под общ. ред. В. В. Бирюкова. Омск: Изд-во СибАДИ, 2005. 178 с.

7. Делицын Л. М., Власов А. С. Необходимость новых подходов к использованию золы угольных ТЭС // Теплоэнергетика. 2010. № 4. С. 49–55.

ГААК Виктор Климентьевич, кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика».

ЛЕБЕДЕВ Виталий Матвеевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Теплоэнергетика».

ШЕРСТОБИТОВ Михаил Сергеевич, старший преподаватель кафедры «Теплоэнергетика».

Адрес для переписки: miheyomgups@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.01.2017 г.

© В. К. Гаак, В. М. Лебедев, М. С. Шерстобитов

УДК 62-383.1

С. С. БУСАРОВ
В. К. ВАСИЛЬЕВ
И. С. БУСАРОВ
А. В. НЕДОВЕНЧАНЫЙ
Д. С. ТИТОВ
К. В. ЩЕРБАНЬ
А. Ю. ГРОМОВ

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

СТАТИЧЕСКИЕ ПРОДУВКИ КЛАПАНОВ ТИХОХОДНЫХ ДЛИННОХОДОВЫХ БЕССМАЗОЧНЫХ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТУПЕНЕЙ

В соответствии с известными методиками определения массового расхода при статических продувках на разработанном экспериментальном стенде определены величины условного зазора для клапанов, используемых при исследованиях тихоходных компрессорных ступеней. Полученные результаты позволили уточнить методику расчета рабочих процессов тихоходных длинноходовых поршневых ступеней и учесть реальные величины утечек.

Ключевые слова: длинноходовой поршневой компрессор, рабочие процессы, условный зазор, утечки газа.

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

Одной из проблем при работе поршневых компрессорных агрегатов, влияющих на рабочий процесс в целом и производительность в частности, является наличие утечек [1, 2, 3–5]. С физической точки зрения, природа утечек совершенно понятна: наличие перепада давления между рабочей камерой и окружающей средой.

В поршневых компрессорах основные утечки происходят через уплотнения цилиндропоршневой группы и клапаны нагнетания и всасывания.

По данным [3, 5] относительные утечки составляют 0,5–4 %.

Плотность клапанов в закрытом состоянии зависит, главным образом, от качества изготовления и может нарушаться при деформации пластины и седла. Неплотности клапанов приводят к потере производительности, нарушению температурного режима, которое может привести к недопустимому перегреву газа. Обычно, неплотности определяют путем замера времени, необходимого для фиксиро-

ванного изменения давления, обусловленного утечками. Неплотность принято выражать условным зазором $\delta_{усл}$ мкм. Условный зазор — это такой зазор по всему периметру прилегания пластины к седлу, расход газа через который равен расходу через неплотности действительного клапана. Допустимое значение $\delta_{усл}$ для различных типов клапанов составляет 0,25–1,0 мкм [2, 3].

Герметичность клапанов зависит от их конструктивных особенностей, совершенства технологии на предприятии-изготовителе и материалов пары «седло — пластина». В закрытых клапанах она может нарушаться вследствие деформаций седла и пластин, возникающих под действием статических и динамических перепадов давления на пластинах. Известно [3], что отсутствие герметичности закрытых всасывающих и нагнетательных клапанов приводит к снижению производительности ступени компрессора и к нарушению теплового режима компрессора, обусловленного нарастанием температур нагнетаемого газа. В ступенях с негерметичными всасывающими клапанами в процессах сжатия, нагнетания и расширения горячий газ будет перетекать из цилиндра в полость всасывания, увеличивая температуру газа, всасываемого в цилиндр в последующем рабочем цикле, что, в свою очередь, способствует росту температуры газа в цилиндре в начале и конце процесса сжатия, а соответственно, и температуры нагнетаемого газа. Такое явление должно продолжаться до момента выхода компрессора на новый установившийся тепловой режим и ухудшения энергетических характеристик. Аналогичное явление повышения температуры газа в цилиндре в начале (и конце) процесса сжатия будет иметь место и при негерметичных нагнетательных клапанах. В этом случае через зазоры в закрытых клапанах горячий газ проникает в цилиндр, способствуя росту температуры газа в конце всасывания — начале сжатия. Негерметичность клапанов обычно определяют путем измерения времени, необходимого для фиксированного изменения давления газа в емкости известного объема, когда это изменение давления обусловлено утечками газа через закрытый клапан. Неплотности клапана принято характери-

зовать условным зазором $\delta_{усл}$ в микрометрах; под $\delta_{усл}$ понимается такой зазор по всему периметру пластин клапанов, расход газа через который равен расходу газа через неплотности закрытого клапана. Для разных типов технически исправных клапанов значения $\delta_{усл} = 0,25... 1,0$ мкм.

При инженерных расчётах для определения ориентировочной величины относительных утечек, естественно, используют рекомендации [2]. Однако для агрегатов, у которых конструктивные и режимные параметры значительно отличаются от параметров быстроходных ступеней, такой подход не годится. В связи с этим авторами проведен сравнительный расчётно-теоретический анализ рабочих процессов без учёта влияния утечек на рабочий процесс тихоходной ступени и с их учётом с использованием разработанной ранее методики расчёта [6]. Анализ индикаторных диаграмм показывает сильное отличие рабочих процессов при учёте неплотностей рабочей камеры (см. рис. 1).

Расчётные индикаторные диаграммы с учётом утечек в рабочей камере не имеют ярко выраженных площадок нагнетания и всасывания, диаграммы имеют вытянутые «кашлевидные» формы, что обусловлено наличием неплотностей в рабочей камере.

В связи с этим для уточнения методики расчёта необходимо знать реальную величину условного зазора в клапанах, используемых при проведении экспериментальных исследований.

На экспериментальном стенде проводились испытания по продувке самодействующих клапанов (см. рис. 2) [3–5, 7]. Клапаны выполняются из различных материалов и применены два типа конструкции непосредственно клапана: грибового типа и плоские клапана. По использованию материалов в эксперименте использовались следующие сочетания:

- клапан металлический — металлическое седло (грибового типа и плоские клапана);
- клапан металлический — фторопластовое седло (клапана грибового);
- клапан латунный — металлическое седло (клапана грибового).
- клапан металлический конусный.

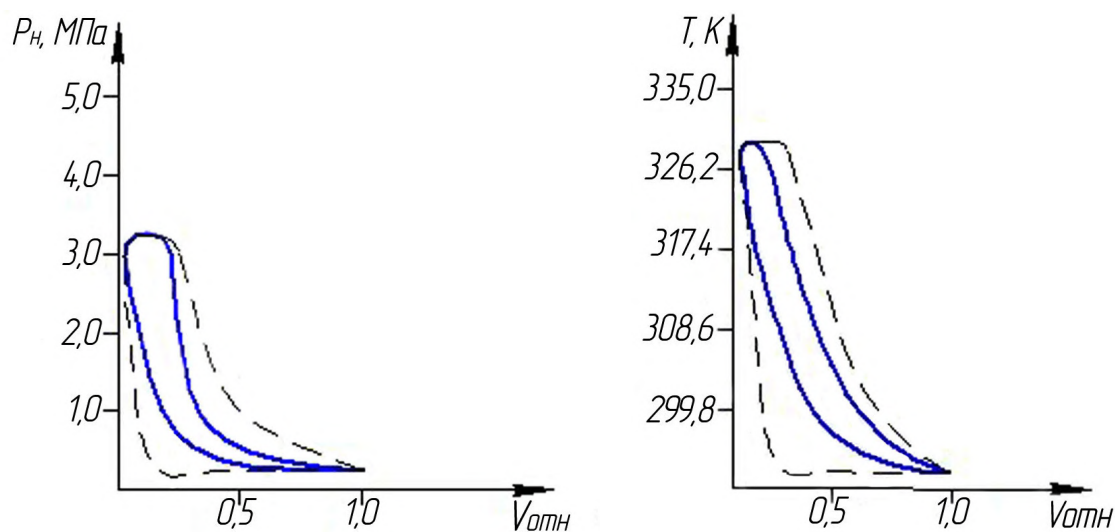


Рис. 1. Расчётные зависимости давления и температуры газа в рабочей камере за время цикла при интенсивном охлаждении и времени цикла $\tau = 1,5$ с, при давлении нагнетания $P_n = 3$ МПа
— с учётом утечек; - - - без утечек

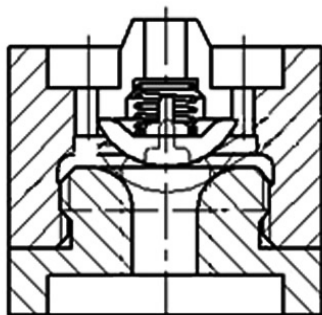


Рис. 2. Схема клапана

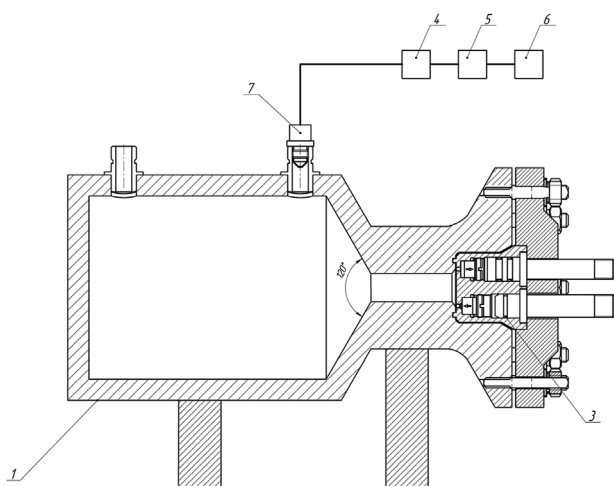


Рис. 3. Схема экспериментального стенда: 1 — стенд; 2 — испытываемый поршень; 3 — испытываемые клапаны; 4 — усилитель; 5 — цифровой осциллограф; 6 — персональный компьютер; 7 — датчик давления

Каждый клапан в закрытом состоянии обладает некоторым зазором ввиду неидеальности поверхностей седла и клапана. Из теории клапанов известно понятие эквивалентной площади [2, 3]:

$$\Phi = \alpha \cdot f, \quad (1)$$

где α — коэффициент расхода; f — площадь зазора, м².

Таким образом, зная периметр щели в клапане (P), по известным методикам определяется величина условного зазора:

$$\delta_{\text{зсл}} = \Phi / P = \alpha \cdot \delta_p, \quad (2)$$

где δ_p — реальный зазор в клапане, м.

Измерительная сема представлена на рис. 3.

Измерения проводились следующим образом:

— в известный по объёму сосуд накачивался воздух, фиксировали начальное и конечное давление и температуру газа, а также время падения давления;

— по полученным значениям определяли массовый расход воздуха по формуле [8]:

$$M = \frac{\left(\frac{P_1 \cdot V}{R \cdot T_1} - \frac{P_2 \cdot V}{R \cdot T_2} \right)}{\Delta \tau}, \quad (3)$$

где R — газовая постоянная, Дж/кг·К; P_1 — давление газа в начальный момент времени, Па; P_2 — давление газа в конечный момент времени, Па; T_1 —

температура газа в начальный момент времени, К; T_2 — температура газа в конечный момент времени, К; V — геометрический объём ёмкости, м³; $\Delta \tau$ — время падения давления, с;

— определяли площадь условного зазора по двум методикам:

— определяем условный зазор, используя уравнение расхода газа при адиабатном течении [3]:

$$M = \Phi' \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1}} \cdot P_0 \cdot \rho_0 \cdot \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right], \quad (4)$$

где Φ' — площадь сечения отверстия при данной методике, м²; k — коэффициент адиабаты; P_0 и ρ_0 — давление и плотность газа в сосуде, Па и кг/м³; P — давление атмосферного воздуха, Па;

— определяем условный зазор по известному способу для определения массового расхода реальной жидкости через клапан с применением поправочного коэффициента сжимаемости газа [3]:

$$M = \Phi'' \cdot \varepsilon_p \sqrt{\rho_1 \cdot (P_1 - P_2)}, \quad (5)$$

где Φ'' — площадь сечения отверстия при данной методике, м²; P_1 , P_2 — давления газа перед и после щелевого канала, Па; ρ_1 — плотность газа перед щелевым каналом, кг/м³; ε_p — коэффициент сжимаемости.

Необходимо заметить, что при использовании каждой из методик эквивалентные площади Φ' и Φ'' не равны друг другу из-за неравенства коэффициентов расхода при использовании той или иной методики.

Погрешность измерения мгновенной температуры при использовании бусинкового термистора [1, 8, 9].

$$\delta_T = \sqrt{\delta_M^2 + \delta_t^2 + \delta_V^2 + \delta_F^2}, \quad (3)$$

где δ_M — погрешность мультиметра, определяемая погрешностью прибора, 0,34 %; δ_t — погрешность термометра, определяемая погрешностью прибора, 0,1 %; δ_V — погрешность вольтметра, определяемая погрешностью прибора, 0,3 %; δ_F — погрешность расчёта по полученной интерполированной формуле, 1,5 %.

$$\delta_T = \sqrt{0,34^2 + 0,1^2 + 0,3^2 + 1,5^2} = 1,57\%.$$

Разница между экспериментальными и расчётными данными по температуре газа — не более 7,5 %.

Погрешность настройки времени цикла определяется точностью электронного осциллографа и составляет 0,05 %.

Определим приборную погрешность [10, 11] при тарировке датчика давления, определяемую по формуле [11]:

$$\delta_{\text{дд}} = \sqrt{\delta_{\text{д}}^2 + \delta_{\text{мн}}^2 + \delta_0^2}, \quad (4)$$

где $\delta_{\text{д}}$ — относительная погрешность датчика давления, %; $\delta_{\text{мн}}$ — относительная погрешность образцового манометра, %; δ_0 — относительная погрешность осциллографа, %.

Относительная погрешность датчика давления по паспорту $\delta_{\text{д}} = 1,4$ %. Относительная погрешность образцового манометра $\delta_{\text{мн}} = 1,0$ %. Отно-

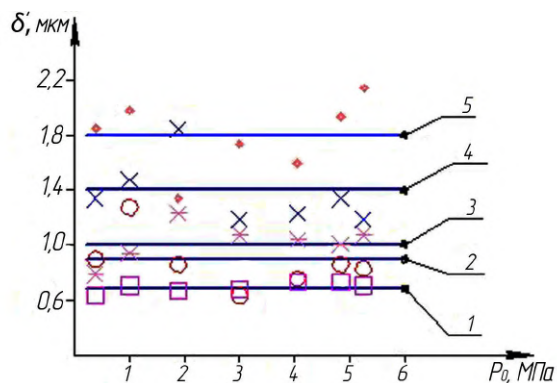


Рис. 4. Экспериментальные результаты продувки клапанов (по методике 1): 1 — клапан со фторопластовым седлом; 2 — плоский стальной клапан; 3 — металлический клапан; 4 — латунный клапан; 5 — конусный клапан

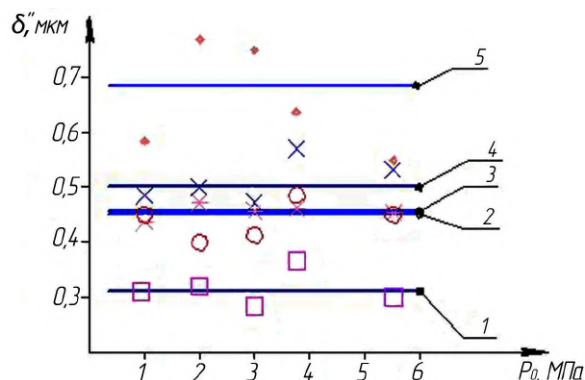


Рис. 5. Экспериментальные результаты продувки клапанов (по методике 2): 1 — клапан со фторопластовым седлом; 2 — плоский стальной клапан; 3 — металлический клапан; 4 — латунный клапан; 5 — конусный клапан

Таблица 1

Зазоры в испытуемых клапанах

Клапаны	Зазор при адиабатном истечении, мкм	Зазор (стандартная методика), мкм
Металлический клапан	1,02	0,45
Плоские клапаны	0,81	0,5
Латунные клапаны	1,41	0,68
Фторопластовые сёдла	0,69	0,31
Конусный металлический клапан	1,8	0,46

сительная погрешность для осциллографа определяется паспортом $\delta_0 = 0,05\%$. В данном случае приборная погрешность является общей погрешностью, поскольку методики измерения напряжения при выполнении эксперимента и при проведении тарировки совершенно одинаковы. Также не учитывалось влияние случайных факторов. Их можно будет исключить, если некоторые значения, полученные при экспериментальном измерении, будут выпадать из общей системы. Тогда общая погрешность датчика давления равна:

$$\delta_{дд} = \sqrt{1,4^2 + 1^2 + 0,05^2} = 1,72\%$$

Общая погрешность эксперимента определяется по формуле:

$$\delta_{\delta} = \sqrt{\delta_{дд}^2 + \delta_r^2 + \delta_{\tau}^2} = \sqrt{1,72^2 + 1,57^2 + 2^2} = 3,07\%$$

где δ_r — относительная погрешность секундомера, 2%.

Для определения условных зазоров в клапанах, применённых на тихоходной ступени, проведены статические продувки в соответствии с описанными ранее методиками. На рис. 4, 5 и в табл. 1 представлены результаты статических продувок применяемых клапанов.

Результаты эксперимента позволяют говорить о том, что испытуемые клапаны по полученным условным зазорам соответствуют нормальным, работоспособным клапанам [3]. Таким образом, для тихоходных ступеней клапаны, считающиеся работо-

способными для быстроходных поршневых компрессорных агрегатов, не удовлетворяют условиям по герметичности в закрытом состоянии, что показано на рис. 1.

Полученные экспериментальные данные позволили дополнить разработанную методику расчёта рабочих процессов [6, 12] реальными данными по зазорам в клапанах, то есть учесть наличие реальных утечек в ступени, что позволит более точно рассчитывать производительность компрессорной установки.

Библиографический список

- Захаренко С. Е. Экспериментальное исследование протечек газа через щели // Тр. Ленингр. политехн. ин-та. 1953. № 2. С. 161–170.
- Кондратьева Т. Ф., Исаков В. П. Клапаны поршневых компрессоров. Л.: Машиностроение, 1983. 158 с.
- Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 1. Теория и расчёт. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 2000. 456 с.
- Прилуцкий И. К. Совершенствование систем газораспределения компрессорных и расширительных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1997. 32 с.
- Фотин Б. С., Пирумов И. Б., Прилуцкий И. К. [и др.]. Поршневые компрессоры. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1987. 372 с.
- Yusha V. L., Dengin V. G., Busarov S. S., Nedovenchanyi A. V., Gromov A. Yu. The estimation of thermal conditions of highly-cooled long-stroke stages in reciprocating compressors / Edit.: A. V. Myshlyavtsev, V. A. Likhobolov, V. L. Yusha // Procedia

Engineering. Vol. 113: International Conference on Oil and Gas Engineering (OGE-2015), 25–30 April 2015. Omsk, 2015. P. 264–269. ISBN 978-1-5108-0988-8.

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

8. Зайдель А. Н. Погрешности измерения физических величин. Л.: Наука, 1985. 112 с.

9. Грановский В. С., Сирая Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.

10. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Л.: Наука, 1968. 96 с.

11. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. М.: Наука, 1970. 104 с.

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

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

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

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

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

ТИТОВ Даниил Сергеевич, аспирант кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

ЩЕРБАНЬ Кирилл Владимирович, аспирант кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

ГРОМОВ Антон Юрьевич, аспирант кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

Адрес для переписки: bssi1980@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22.03.2017 г.

© С. С. Бусаров, В. К. Васильев, И. С. Бусаров,

А. В. Недовенчаный, Д. С. Титов,

К. В. Щербань, А. Ю. Громов

Книжная полка

Быстрицкий, Г. Общая энергетика. Производство тепловой и электрической энергии : учеб. / Г. Быстрицкий, Г. Гасангаджиев, В. Кожиченков. – 2-е изд., стер. – М. : Кронус, 2016. – 408 с. – ISBN 978-5-406-04807-8.

Содержит сведения о невозобновляемых и возобновляемых энергетических ресурсах, их характеристики; основы теплотехники, положения технической термодинамики и основы теплообмена. Приведены схемы и технологические процессы тепловых электрических станций, газотурбинных установок, АЭС, гидравлических и ветровых электрических станций. Представлены принципы работы основного теплового оборудования ТЭС: паровые и водогрейные котлы, паровые турбины, оборудование систем теплоснабжения; нагнетательные машины. Рассмотрено основное электрооборудование энергосистемы: электрические генераторы — турбо- и гидрогенераторы, силовые трансформаторы, воздушные и кабельные линии электропередачи, их конструктивные элементы. Соответствует ФГОС ВО 3+. Для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов.

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.

Быстрицкий, Г. Общая энергетика / Г. Быстрицкий. – 3-е изд., стер. – М. : КноРус, 2016. – 296 с. – ISBN 978-5-406-02763-9.

Приведены сведения о невозобновляемых и возобновляемых энергетических ресурсах, их характеристики; рассмотрены основы теплотехники: положения технической термодинамики и основы теплообмена. Даны схемы и принципы работы тепловых электрических станций, газотурбинных установок, АЭС, гидравлических и ветровых электрических станций. Представлено основное тепловое оборудование ТЭС: паровые и водогрейные котлы, паровые турбины и нагнетательные машины. Соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту среднего профессионального образования третьего поколения.

Для студентов учреждений среднего профессионального обучения, может быть использовано студентами электротехнических специальностей вузов, а также работниками электростанций и промышленности.