

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ



МАТЕРИАЛЫ

III МЕЖДУНАРОДНОГО
МОЛОДЁЖНОГО ФОРУМА

**«ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ
ЭНЕРГОСИСТЕМЫ»**

ТОМ 2.

Томск – 2015

УДК 620.9(063)
ББК 31л0
И73

Интеллектуальные энергосистемы: труды III Международного молодёжного форума. В 3т. Томск 28 сентября -2 октября 2015г. Т.2.- Материалы III Международного форума «Интеллектуальные энергосистемы», 291 с.

Настоящий сборник содержит материалы III Международного молодежного форума «Интеллектуальные энергосистемы», проведенного 28 сентября - 2 октября 2015г. на базе Энергетического института Томского политехнического университета, при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований.

Материал сборника представлен без редактирования авторских электронных версий.

СОСТАВ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ СБОРНИКА ТРУДОВ ФОРУМА

1. Губин В.Е. к.т.н., доцент, заместитель директора по научной работе ЭНИН ТПУ, председатель
2. Кузнецов Г.В. д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой ТПТ ЭНИН ТПУ
3. Кладиев С.Н., к.т.н., доцент кафедры ЭПЭО ЭНИН ТПУ
4. Обухов С.Г., д.т.н., доцент кафедры ЭПП ЭНИН ТПУ
5. Заворин А.С., д.т.н., профессор, зав. кафедрой ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ
6. Гарганеев А.Г., д.т.н., профессор кафедры ЭКМ ЭНИН ТПУ
7. Стрижак П.А., д.ф.-м.н., зав. кафедрой АТП ЭНИН ТПУ
8. Кобенко Ю.В., д.фил.н., доцент кафедры ИЯ ЭНИН ТПУ
9. Литвак В.В., д.т.н., профессор кафедры АТЭС ЭНИН ТПУ
10. Вайнштейн Р.А., д.т.н., профессор кафедры ЭЭС ЭНИН ТПУ
11. Хрущев Ю.В., д.т.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН ТПУ
12. Ардашкин И.Б., д.ф.н., профессор ФИЛ ИСГТ ТПУ
13. Лукутин А.В., к.т.н., доцент, начальник учебно-методического отдела ЭНИН ТПУ

Верстка и дизайн оригинал макета: Зимина Н.А.

© Томский политехнический университет, 2015

**СЕКЦИЯ 4.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ И
АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

**ЧИСЛЕННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ
АТМОСФЕРЫ ПРОДУКТАМИ СГОРАНИЯ ТВЕРДЫХ
ТОПЛИВ**

Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС

В настоящее время одним из основных источников эмиссии в атмосферу продуктов сгорания твердых топлив являются объекты химического и энергетического комплексов [1]. Ежегодно объемы выбросов токсичных соединений, например SO_3 , в окружающую среду увеличиваются [2]. Взаимодействие (конденсация на поверхности микроскопических частиц) серного ангидрида с компонентами атмосферного воздуха может приводить к образованию кислотных осадков [1]. Результаты исследований [3] показывают, что кислотные образования наносят ощутимый вред не только при выпадении кислотных дождей в прямом смысле слова. Согласно проведенным ранее исследованиям [4] - с увеличением (или уменьшением) скорости движения воздушных масс может изменяться и массовая скорость конденсации SO_3 на поверхности капель. Опыт решения задач [5–6] иллюстрирует возможность численного исследования процессов трансформации и распространения в воздушном пространстве продуктов сгорания натуральных топлив тепловых электрических станций.

Целью настоящей работы является численный подход к исследованию процесса формирования и распространения седиментационных кислотных осадков в атмосфере, прилегающей к тепловой электрической станции, на поверхности ядер конденсации, с учетом основных значимых факторов: нестационарный тепломассоперенос; фазовые превращения; солнечная радиация; скорость перемещения воздушных масс; температура; динамика полета капли.

В работе использовался итерационный алгоритм, разработанный для решения нелинейных задач теплопроводности в условиях локального теплового воздействия [7] методом конечных разностей.

В соответствии с [8] влияние несферичности капли характеризовалось коэффициентом несферичности G , как отношение площади по-

верхности реальной капли к площади поверхности сферы аналогичного объема.

Уравнения теплопроводности капли и движения в рамках принятой физической модели исследуемого процесса имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 \cdot C_p \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} &= \lambda \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \\ \frac{dU_x}{dt} &= \frac{3 \cdot G \cdot C_D \cdot \rho_1 \cdot (U_x - U_0) \cdot (U_x - U_0)}{8 \cdot \pi \cdot \delta \cdot \rho_2} \\ \frac{dV_y}{dt} &= g + \frac{3 \cdot G \cdot C_D \cdot \rho_1 \cdot (V_y - V_0) \cdot (V_y - V_0)}{8 \cdot \pi \cdot \delta \cdot \rho_2} \end{aligned} \right\}$$

где $\rho_{1,2}$ – плотность, кг/м³; C_p – изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); T – температура, К; t – время, с; V_x, V_y – скорости капли в направлении осей x и y , соответственно, м/с; C_D – коэффициент сопротивления; g – ускорение свободного падения, м/с²; U_0, V_0 – компоненты скорости внешней среды, м/с.

Начальные и граничные условия имеют вид:

$$t=0: T=T_0, \quad 0 \leq r \leq \delta;$$

$$r=0: -\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} + Q \cdot (W_K^3 + W_K^4) - P = -\lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad T_1 = T_2; \quad r = \frac{\delta}{2}: \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0.$$

где T_1, T_2 – температура капли и газовой среды, соответственно, К; W_K^3, W_K^4 – массовые скорости конденсации, кг/(м²·с); Q – тепловой эффект реакции, Дж/кг; δ и r – характерные размеры капли, м; P – плотность потока солнечной энергии, Вт/м².

Проанализированы два термических периода, характерные для регионов с резко континентальным климатом (например, Сибирь). Значение плотности потока солнечной энергии принималось равным величине солнечной постоянной. Ниже на рис. 1 проиллюстрированы результаты численных исследований в виде зависимостей температур поверхности капли от расстояния (синие пунктирные линии соответствуют температурам воздуха).

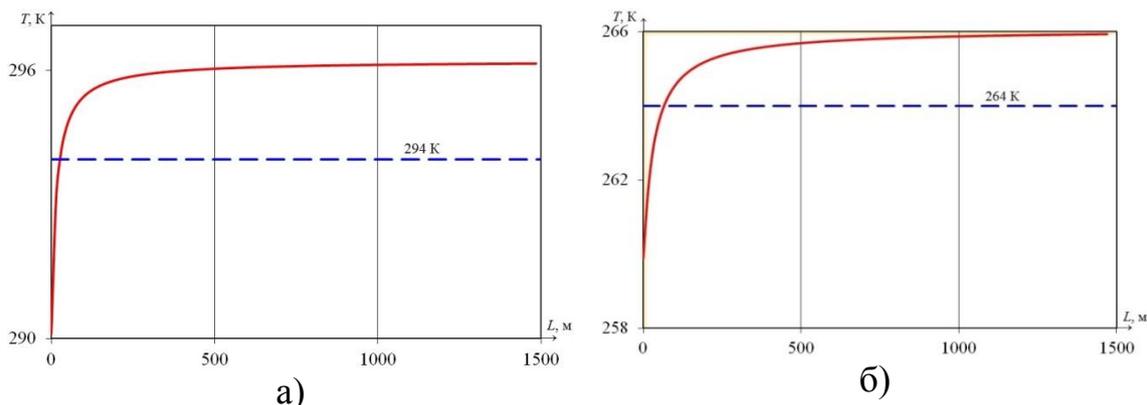


Рис.1. Температурные поля капли в момент времени 1800 с при скорости ветра 5 м/с: а) в летний период; б) в зимний период

Во-вторых, влияние скорости ветра на прогрев образующихся капель существенно. Отличие температуры поверхностей образующихся капель серной кислоты в воздушном пространстве, прилегающей к тепловой электрической станции, от окружающей среды составляет от 0,5...1,2 К. Численная оценка влияния скорости перемещения воздушных масс (рис. 1) не противоречит исследованиям [8, 9]. Ниже на рис. 2 представлены результаты математического моделирования.

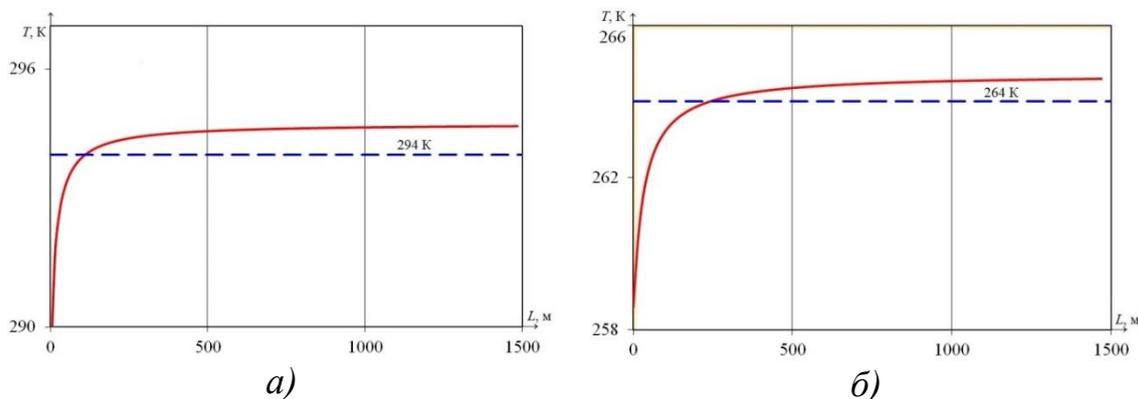


Рис.2. Температурные поля капли в момент времени 1800 с при скорости ветра 10 м/с: а) в летний период; б) в зимний период

В таблице 1 приведены для сопоставления результаты исследования [9] и настоящей работы. Сравнение численных значений математического моделирования процесса формирования кислотных образований на поверхности ядер конденсации выполнено при скорости ветра 5 м/с и температуре окружающей среды 294 К.

Табл. 2. Размеры капель серной кислоты при различных механизмах образования кислотных осадков

| t, с | [9] | Конденсация SO ₃ и H ₂ O с учетом Р |
|------|--|---|
| | $\delta_{ch} \cdot 10^3, \text{ м}$ | $\delta_{ch} \cdot 10^3, \text{ м}$ |
| 0 | $\delta_0 = 5,0 \cdot 10^6, \text{ м}$ | |
| 600 | 0,960 | 0,923 |
| 1800 | 1,616 | 1,553 |

где δ_0 – размер ядра конденсации в начальный момент времени, м; δ_{ch} – размер сформировавшейся частицы в момент времени t , с.

Оценка численных параметров кислотных осадков позволяет сделать вывод о том, что совместная конденсация паров серного ангидрида и водяного пара с учетом потока солнечной энергии заметно (до 4%) замедляет процесс формирования седиментационных осадков. Следует отметить, что через 600 с образуются атмосферные осадки с характерным размером до 1 мм.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 гг.» (уникальный код (ID): PNIER RFMEFI58114X0001). Мероприятие 1.4. ГК 14.581.21.0001.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Израэль, Ю.А. Кислотные дожди [Текст] / Ю.А. Израэль, И.М. Назаров, А.Я. Прессман [и др.] – Ленинград: Гидрометеопиздат, 1989. – 270 с.
2. Волков, Э.П. Газоотводящие трубы ТЭС и АЭС [Текст] / Э.П. Волков, Е.И. Гаврилов, Ф.П. Дужих – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.
3. Гвоздяков, Д.В. Влияние времени года на процесс образования седиментационных кислотных осадков в районе расположения тепловой электрической станции [Текст] / Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин // Бутлеровские сообщения. – 2013. – Т. 37. – №10. – С. 95–99.
4. Томас М.Д. Влияние загрязнения атмосферного воздуха на растения [Текст] / М.Д. Томас // В кн.: Загрязнения атмосферного воздуха – Женева, 1962, 252–306.
5. Gvozdyakov, D.V. Acid Droplet Formation and Movement in an Industrial Region Atmosphere [Text] / D.V. Gvozdyakov, V.E. Gubin, // Chemical and Petroleum Engineering. – 2015. – 1 August 2015, бр.

6. Gvozdyakov, D.V. The influence of the form of condensation nucleus on the formation and propagation of acid precipitation near operating TPS (Article number 01026) [Text] / D.V. Gvozdyakov, V.E. Gubin // EPG Web of Conference. – 2015. – V. 82.
7. Kuznetsov, G.V. New approach to the mathematical modeling of thermal regimes for electronic equipment [Text] / G.V. Kuznetsov, M.A. Sheremet // Russian Microelectronics. – 2008. – V. 37. – №2. – P. 131–138.
8. Терехов, В.И. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокapельных потоках: монография [Текст] / В.И. Терехов, М.А. Пахомов – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 284 с.
9. Гвоздяков, Д.В. Образование и движение капель кислоты в атмосфере промышленного района [Текст] / Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2015. – №3. – С. 38–41.

Научный руководитель: В.Е. Губин, к.т.н., доцент каф. АТЭС ЭНИИ ТПУ.

STUDY OF THE ELECTROPHYSICAL INTRA-STRATAL METHOD OF GASIFICATION AT DIFFERENT HEATING RATES OF COAL

A.V. Zenkov, K.B. Larionov, V.E. Gubin
National Research Tomsk Polytechnic University

Due to the constant rise in prices, the reduction of natural gas and the high cost of exploring new fields, there are many countries working on the improved technology of coal gasification. The product thus obtained can fully replace natural gas [1].

One of the most promising technologies to produce gas from coal is underground gasification. This type of gasification is to conduct physical and chemical processes in untouched coal beds. The result is syngas with sufficient thermal properties for energy and industrial purposes [2] and its use in the energy industry is environmentally friendlier compared to the direct combustion of solid and liquid fuels. Furthermore, its cost is significantly lower than the cost of natural gas [3].

This paper presents the study of the syngas produced by electrophysical intra-stratal method of gasification at different heating rates of “Krasnogorsk” deposit anthracite.

Installation, the main element of which is a chamber, presented in figure 1, was used for the experiment. The chamber is made as a cylinder with the volume of 0.06 m³ and the pressure up to 5 MPa. Conditions created inside the chamber are similar to the conditions of subterranean formation.

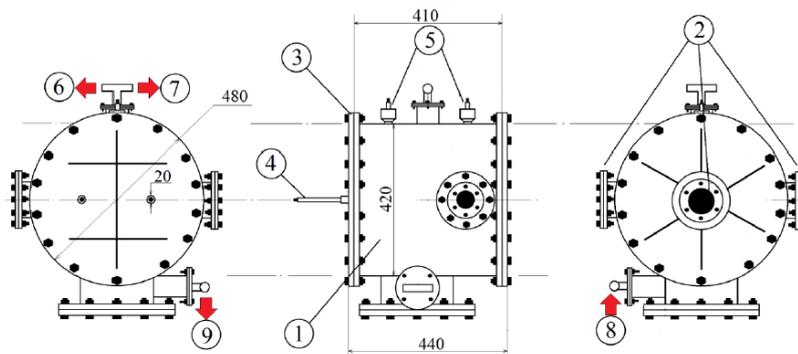


Fig.1. Experimental chamber (1 – chamber case, 2 – flanges, 3 – end caps, 4, 5 – electrical inputs, 6, 7, 8, 9 – tubes)

Prepared coal sample was placed in the experimental chamber. After that, it was sealed and filled with nitrogen N₂ with pressure of 0.3 MPa. Then, electrodes injected in the sample were put under voltage with gradual increase from 1 to 10 kV. Next, heating was continued by adjusting the current, and while maintaining a constant voltage.

During the experiment, samples the syngas were taken directly from the chamber using a polymer pneumatic hose connected to the filter regulator LFR-1/4-D-5M-MINI, which allows taking out gas sample, without affecting the pressure in the chamber. Then, the gas was fed to the chromatograph Agilent 7890A for the quantitative determination of the composition.

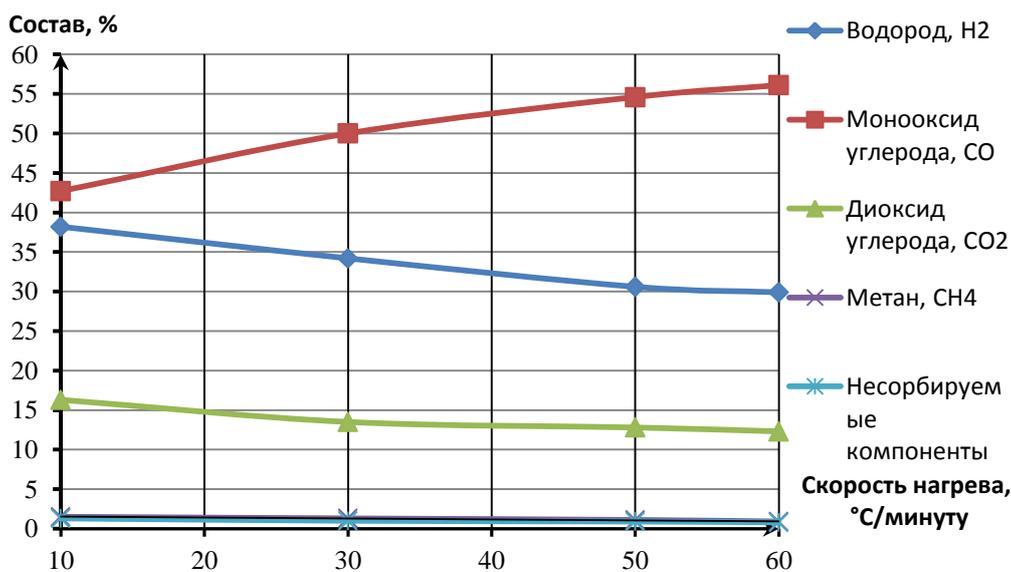


Fig. 2. Quantitative composition of the syngas from “Krasnogorsk” deposit anthracite

Four experiments with different heating rate (10, 30, 50, 60°C/min) were performed. The duration of the experiment was limited by the obtaining of maximum temperature of 800°C.

Figure 2 shows that increasing the heating rate leads to:

- decrease of carbon dioxide CO₂ output, which favorably affects the heat of combustion of the syngas;
- reduction of hydrogen H₂ and methane CH₄ outlet;
- increase of carbon monoxide concentration, which causes a higher rate of oxidation reaction of CH₄ and H₂ with moisture and oxygen O₂ released from the coal during the heating process;
- reduction of non-sorbing components content (water vapor content, impurities of nitrogen oxide, sulfur oxides, hydrogen sulfide and other ballast compounds).

Knowing the quantitative composition of the syngas the heat of combustion can be calculated as [4]:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot C_i, \quad (1)$$

Q_i – calorific value of the gas of i-th component, MJ/m³; C_i – quantity of i-th component.

The results of calorific value calculations of the received syngas are presented in figure 3.

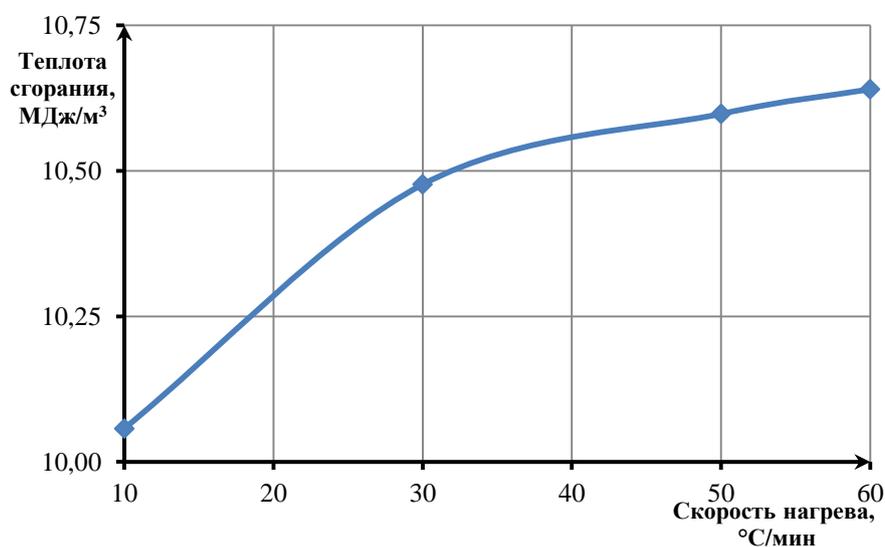


Fig. 3. Calorific value of syngas at different heating rates

From the results shown in figure 3 is clear, that the maximum calorific value is obtained at a heating rate of 60°C/min.

The results of experiments to determine the composition of synthesis gas by the electrophysical intra-stratal gasification method showed that with the increase of intensity of heating decreases concentration of carbon dioxide CO₂, hydrogen H₂ and methane CH₄. In addition, an increase in the

content of carbon monoxide CO is observed. Its value compensates the concentration of combustible components and increases the rate of calorific value of produced syngas.

Based on the calorific value of the received syngas, it can be concluded that the effectiveness of the proposed method of underground gasification of coal is much higher than the existing technology where the air blowing is applied [5].

The work was done at the expense of subsidies within the framework of the Program of improving the competitiveness of TPU.

REFERENCES:

1. Малолетнев А. С., Шпирт М. Я. Современное состояние технологий получения жидкого топлива из углей // Российский Химический Журнал, 2008. - С. – 44-52.
2. Лазаренко С.Н., Кравцов П.В. О перспективах развития технологии подземной газификации углей в Кузбассе // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2000. - №5. – С. – 38-41.
3. Кафтанов С.В. Общая химическая технология топлива. – Москва-Ленинград: Госхимиздат. – 1947. – 498 с.
4. Журавлев Н.В., Потокина Р.Р., Исмагилов З.Р., Сурин Е.В. Изучение физико-химических показателей горючих газов угольных пластов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013, №5. – С.48-53.
5. Зоря А.Ю., Крейнин Е.В., Лазаренко С.Н., Тризно С.К. Газ подземной газификации углей — альтернативный вид энергетического сырья // Пром. энергетика. — 2011, N 5. — С.57-59

Head of research: V.E. Gubin, Sc.D., associate professor, NRTPU.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ЖИДКОСТИ В КРИВОЛИНЕЙНЫХ КАНАЛАХ

А.А. Кондаков, А.С. Матвеев, С.А. Шевелев
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС

В турбинах АЭС большая часть ступней работает в области ниже кривой насыщения. Экономичность, а также их эрозионный износ этих ступней в значительной степени зависит от степени влажности

пара, поступающего на лопатки. Увеличение средней влажности пара на 1 % приводит к уменьшению внутреннего относительного КПД турбины примерно на 1 % [1]. Одним из наиболее эффективных способов является отвод влаги при помощи различных сепарационных устройств. В подавляющем большинстве турбин АЭС применяется сепарация пара после цилиндра высокого давления в сепараторах инерционного типа.

Целью настоящей работы является численное исследование движения и осаждения капель влаги в каналах сложной формы, характерных для трактов сепарационных устройств.

Основу математических моделей движения потока в канале составляют уравнения Навье-Стокса. В качестве метода решения выбран алгоритм SIMPLE Патанкара-Сполдинга [2].

Дискретизация исходных уравнений осуществлялась методом контрольного объема (КО). По причинам, указанным в [2], будем использовать прямоугольную шахматную сетку.

Рассмотрим задачу стационарного ламинарного течения вязкой несжимаемой жидкости в плоском прямолинейном канале.

В плоский канал длиной L и высотой H втекает жидкость плотностью ρ и динамической вязкостью μ .

Математическая модель рассматриваемой задачи имеет следующий вид.

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial x}; \\ \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial y}; \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Граничные условия для решения данной системы:

1. Условия на входе в канал: $x = 0, 0 < y < H : u = const, v = 0$.
2. Условия на стенках канала: $y = 0, y = H, 0 \leq x \leq L : u = v = 0$.
3. Условия на выходе из канала $x = L, 0 < y < H : \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = 0$.

В качестве примера представлены результаты для прямолинейного канала размером $1 \times 0,1$ м при числе Рейнольдса на входе в канал $Re_H = 150$, что соответствует скорости на входе в канал 1 м/с, используя при этом сетку размерностью 100×100 . Так как канал симметричен,

то графические результаты расчетов представлены для половины канала.

На рисунке 1 представлены профили скорости на различном удалении от входа в канал: 1; 2.. 100 см.

Верификация модели производилась сравнением полученных результатов с расчетными и экспериментальными [4] работами других авторов. Сравнение показало высокую достоверность результатов, полученных на модели.

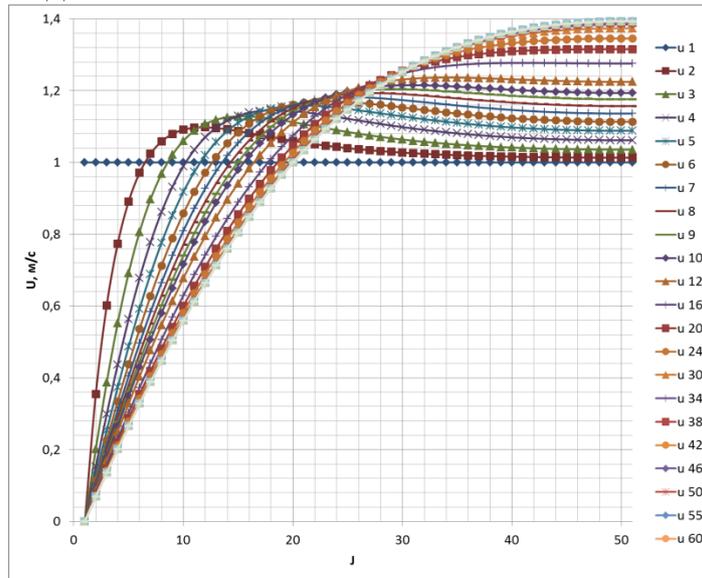


Рис. 1. Изменение профиля скорости по длине канала для различных сечений

Во многих случаях, связанных с математическим моделированием течения жидкости, встречаются области с нерегулярной геометрией (течение влажного пара в сепараторах АЭС). Для решения такого типа задач используют либо ортогональные системы координат (цилиндрические, сферические и др.), либо регулярную сетку с заблокированными областями в декартовой системе координат. В данной работе для решения задач с комплексной геометрией применяется сетка с заблокированными областями [2].

Для примера расчета рассмотрим двумерный канал переменного сечения, стенки которого подчиняются уравнениям (рисунок 2):

$$f_1(x) = 0,18x^2,$$

$$f_2(x) = 0,1x^2 + 0,15,$$

при $x = 0..1$ м.

Помещаем канал в сетку размерами $L \times H = 1 \times 0,3$ м и количеством ячеек $N_x \times N_y = 150 \times 100$. Входную скорость принимаем $u = 1$ м/с, т.е. число Рейнольдса на входе в канал равно $Re_H = 150$.

По мере удаления от входа в канал, профиль вектора скорости развивается, приобретая параболическую форму (рисунок 2). В то же время, с поворотом канала появляется вертикальная составляющая скорости и, соответственно, вектор скорости отклоняется от горизонтали.

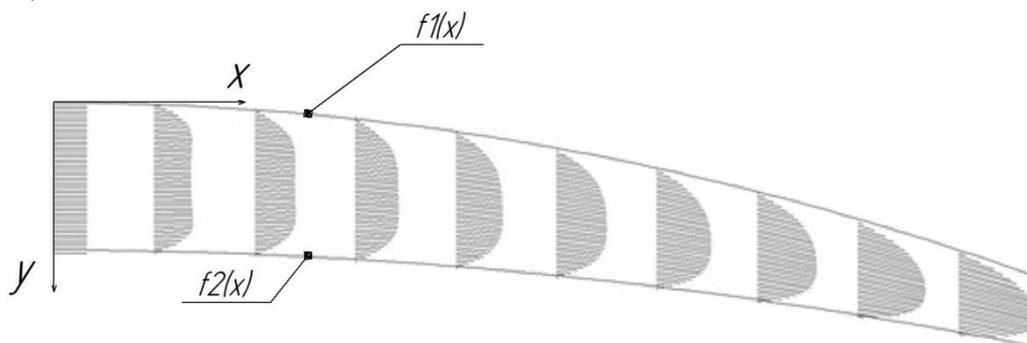


Рис. 2. Поле скорости в канале переменного сечения.

Определив поле скоростей при движении газа в канале, можно перейти к расчету движения частиц в потоке. В данной работе считаем, что при движении частица не деформируется и на нее действует только сила аэродинамического сопротивления [3]. Для расчета траектории задается начальное положение частицы и ее скорость.

Рассмотрим движение сферической частицы в потоке газа ($Re_H = 150$), который движется по каналу, стенки которого задаются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} f_1(x) &= 3,5x^2, \\ f_2(x) &= 5x^2 - 0,4x + 0,06, \end{aligned}$$

при $x = 0..0,13$ м.

Считаем, что частица на входе в канал ($x_0 = 0, y_0 = const$ – начальные координаты) неподвижна.

На рисунке 3 представлены расчетные траектории движения капель диаметрами 100 мкм и 10 мкм для двух различных начальных координат $y_0 = 22$ мм; 40 мм. Можно заметить, что частицы с меньшим диаметром (а значит и меньшей массой) беспрепятственно проходят канал, а частицы с большим диаметром соударяются с твердой границей канала. Разница траекторий движения определяется в основном массой частиц. Так, легкая частица быстрее разгоняется до скорости несущей среды и движется по линии тока, не соприкасаясь со стенками канала.

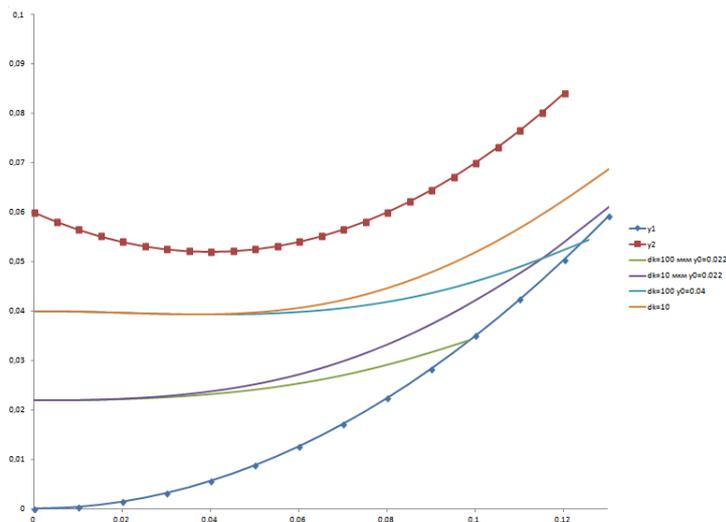


Рис. 3. Траектории движения частиц.

Работа выполнена за счет средств субсидии в рамках реализации Программы повышения конкурентоспособности ТПУ (Проект ВИУ_ЭНИН_98_2014)

ЛИТЕРАТУРА:

1. Маргулова, Т. Х. Атомные электрические станции: учебник— 5-е изд., перераб. и доп. — Москва: ИздАТ, 1994. — 296 с.
2. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: пер. с англ. / Москва: Энергоатомиздат, 1984. — 150 с.: ил.
3. Дейч, М. Е. Газодинамика двухфазных сред / М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Энергоиздат, 1981. — 471 с.: ил.
4. Виноградова А.И.,Зубков В.Г. Газодинамические процессы в теплоэнергетических установках на базе метода контрольного объема // Математическое моделирование. 2002. № 6. С. 3-24.

Научный руководитель: Л.А. Беляев, к.т.н., доцент каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГЕНЕРАТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПОДОГРЕВА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТУРБОУСТАНОВОК НА ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

К.Б. Ларионов, Д.В. Гвоздяков, А.Ю. Зенков, Б.Ф. Калугин
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС

Стремительный рост потребления энергии населением планеты, наблюдаемый последние десятилетия, сопровождается введением в эксплуатацию энергетических комплексов и разработкой новых месторождений углеводородного сырья [1]. На отдаленных территориях отсутствие централизованного энергоснабжения является основной причиной создания автономных источников энергии с высокоэффективным оборудованием. Известно [2], что основное требование к таким объектам - это производство энергии с коэффициентом полезного действия (КПД) 50% и более [3]. На сегодняшний день, данной энергетической эффективностью соответствуют только современные парогазовые установки с температурами на входе в газовую турбину 1673-1873 К [4]. Это позволяет сделать вывод о том, что актуальной задачей перед энергетиками является повышение начальных параметров, как для парогазовых, так и для паротурбинных установок.

Значительное увеличение КПД высокотемпературных турбоустановок, работа системы регенеративного подогрева питательной воды наиболее эффективна при низких начальных температурах пара.

Целью данной работы является проведение теоретических исследований, направленных на анализ повышения эффективности энергоблока с паротурбинной установкой Российского производства электрической мощностью 200 МВт для отдаленных территорий не включенных в единую электроэнергетическую систему.

Оценка повышения эффективности паротурбинной установки с начальной температурой пара и температуры в пароперегревателе 800°С выполнена на примере турбоустановки К-200-130. Исходные параметры представленной турбоустановки, имеют начальные температуры 838 К и давления 13 МПа и давление в конденсаторе 0,0033 МПа [5].

Первоначальные исследования показали, что увеличение параметров (температура) пара способствует повышению мощности энергоблока до 273 МВт. Результатом этого является увеличение абсолютного электрического КПД на 4,3%, который составил 48,5%. При

этом КПД станции по отпуску электроэнергии вырос на 3,8%, что привело к снижению удельного расхода условного топлива на 8,8%.

Известно [6], что повышение начальной температуры пара ведет к уменьшению количества отбираемого пара для нагрева питательной воды, следствием чего является снижение эффективности системы регенерации. Исходя из этого, было предложено включить в данную схему дополнительные поверхности нагрева, в виде воздухоподогревателей (рисунок 1).

Как видно из схемы (рисунок 1) перед каждым регенеративным подогревателем на линии отбора пара был установлен воздухоподогреватель, как отдельный теплообменный аппарат.

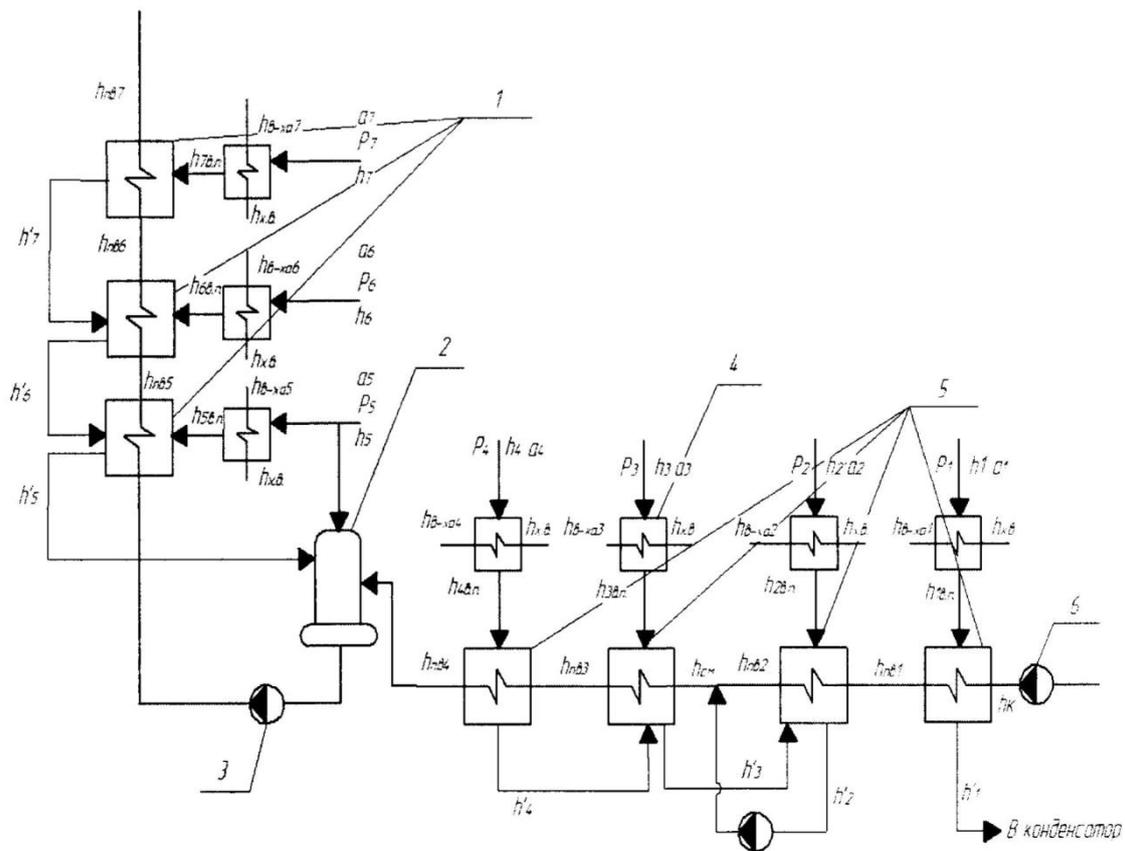


Рис. 1. Принципиальная схема регенеративного подогрева питательной воды с применением воздухоподогревателей: 1 - подогреватели высокого давления; 2 – деаэратор; 3 - питательный насос; 4 - воздухоподогреватель; 5 - подогреватели низкого давления; 6 - конденсационный насос.

После подогрева воздуха паром, его потоки смешиваются и поступают в паровой котел. Основной целью включения в регенеративную схему подогрева питательной воды дополнительных воздушных поверхностей нагрева, является снижение температуры отборного перегретого пара выше на 283...288 K от состояния насыщения и сни-

жения подводимого количества тепла Q_0 за счет повышения температуры воздуха подаваемого в паровой котел.

Расчета количества подводимой теплоты к турбоустановке Q_0 , полезной теплоты отданной паром воздуху $Q_{в-ха}$, электрической мощности $N_э$, абсолютного электрического КПД $\eta_э$, КПД станции по отпуску электроэнергии $\eta_{ст}^э$ и удельного расхода условного топлива $b_{ст}^э$ осуществлялся по известным формулам [7]:

$$Q_0 = D_0 \cdot (h_0 - h_7^{пв}) + (D_0 - D_7 - D_6) \cdot (h_{пп} - h_6), \text{ МДж.}$$

$$Q_{в-ха} = \sum D_i \cdot (h_i - h_i^{пв}), \text{ МДж.}$$

$$N_э = D_0 \cdot H_i \cdot (1 - \sum \alpha_i \cdot y_i) \cdot \eta_m \cdot \eta_g, \text{ МВт.}$$

$$\eta_э = \frac{N_э}{Q_0 - Q_{в-ха}}, \%$$

$$\eta_{ст}^э = \eta_э \cdot \eta_{тр} \cdot \eta_{ка} \cdot (1 - k_{сн}), \%$$

$$b_{ст}^э = \frac{123}{\eta_{ст}^э}, \text{ г.у.т./кВт}\cdot\text{ч.}$$

Где y_i – коэффициент недовыработки мощности; $\eta_{вп}$ и $\eta_{п}$ – КПД подогревателей воздуха и питательной воды, принятые 98%; $h_{в-ха}$ – энтальпии воздуха, согласно [7]; H_i – действительный теплоперепад турбоустановки; η_m , η_g – механический КПД и КПД генератора принятые 99%; $\eta_{тр}$ – потери тепла в трубопроводе, равные 1%; $\eta_{ка}$ – КПД источника пара равный 95%; $k_{сн}$ – удельный расход электроэнергии на собственные нужды, равный 0,05 [6].

Результаты проведенных теоретических исследований с целью оценки эффективности регенеративного подогрева питательной воды с применением воздухоподогревателей представлены в таблице 1.

Табл. 1. Показатели эффективности энергоблока

| Наименование параметра | Температура пара, К | |
|---|---------------------|-------|
| | 838 | 1073 |
| Мощность турбоустановки $N_э$, МВт | 192,5 | 264,2 |
| Количество подводимой теплоты Q_0 , МДж | 450,3 | 561,0 |
| Количество теплоты, отданное паром воздуху $Q_{в-ха}$, МДж | 17,6 | 38,4 |
| Абсолютный электрический КПД $\eta_э$ турбоустановки, % | 44,5 | 50,5 |
| КПД электростанции (нетто), % | 39,8 | 45,3 |
| Удельный расход условного топлива по отпуску электроэнергии, г.у.т./кВт·ч | 309,0 | 272,7 |

В результате включения дополнительных поверхностей нагрева воздуха перед регенеративными подогревателями наблюдается незначительное снижение электрической мощности $N_э$, что связано с увеличением расхода пара в отборах турбины на нужды нагрева воздуха. Не смотря на снижение мощности турбоустановки, для варианта расчета с начальной температурой пара 1073 K наблюдается прирост абсолютного электрического КПД и КПД по отпуску электроэнергии на 2%, что привело к снижению удельного расхода условного топлива на 4%. Данный эффект вызван внесением полезного количества тепла в паровой котел с нагреваемым воздухом, что снижает количество подведенной теплоты к турбоустановке и расхода топлива.

Работа выполнена за счет средств субсидии в рамках реализации Программы повышения конкурентоспособности ТПУ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Солнечно-дизельные системы электроснабжения северных поселков // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 1-7.
2. Galashov N. N., Tsibulskiy S.A. Power Technology and Engineering // Scientific Journal. — 2015. — Vol. 48, iss. 6. — [P. 459-463].
3. Саламов А.А. О крупных проектах пылеугольных тепловых электростанций с КПД более 50 % // Энергетика за рубежом. – 2009. – № 1.
4. Галашов Н.Н., Цибульский С.А. Анализ эффективности парогазовых установок тринарного типа // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325, № 4: Техника и технологии в энергетике. – С. 33-38.
5. Костюк А.Г., Фролов В.В., Булкин А.Е., Трухний А.Д. Турбины тепловых и атомных электростанций. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 488 с.
6. Стерман Л.С., Лавыгин Л.С., Тишин С.Г. Тепловые и атомные электрические станции: учебник для студентов. – 4 – е издание перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 464 с.
7. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства газов: Справочник. – 4 - е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 288 с.

Научный руководитель: Д.В. Гвоздяков, к.т.н., доцент каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ZULU 7.0

И.Л. Москалёв

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, АО «ТомскРТС»

Начиная с июня 2012 г. на предприятиях Томского филиала ОАО «ТГК-11» активно началась работа по внедрению геоинформационной системы (ГИС) Zulu 7.0. Электронная модель теплоснабжения г.Томска (рисунок 1) разрабатывалась и используется для достижения следующих целей:

1. Анализ возможности подключением перспективных нагрузок. На перспективные нагрузки проводится гидравлический расчет с учетом реконструкции и нового строительства тепловых сетей (ТС), которой позволяет определить техническую возможность подключения новых объектов.
2. Ежедневное обновление информации в межотопительный период по участкам ТС выведенных в ремонт и прошедших гидравлические испытания на прочность, представление отчетов о наличии ГВС у потребителей на различных штабах и совещаниях по подготовке города к зиме.
3. Расчет фактических тепловых потерь трубопроводов в ГИС Zulu.
4. Электронное моделирование аварийных ситуаций, как проверка готовности к отопительному периоду. Проведено в отопительных сезонах 2013-2014 гг. и 2014-2015 гг.
5. Подготовка режимных карт абонентам на отопительный сезон 2014-2015 гг. Контроль гидравлического и теплового режима в ТС и системах теплоснабжения, распределения теплоносителя между потребителями в соответствии с тепловой нагрузкой. Произошло сокращение расхода циркуляции сетевой воды на 6%.
6. Ежедневное обновление информации о состоянии приборов учета тепловой энергии абонентов (подключен / выведен из эксплуатации), как результат взаимодействия программного комплекса ГИС Zulu с базой данных автоматизированной геоинформационной системы «OMNI-US».

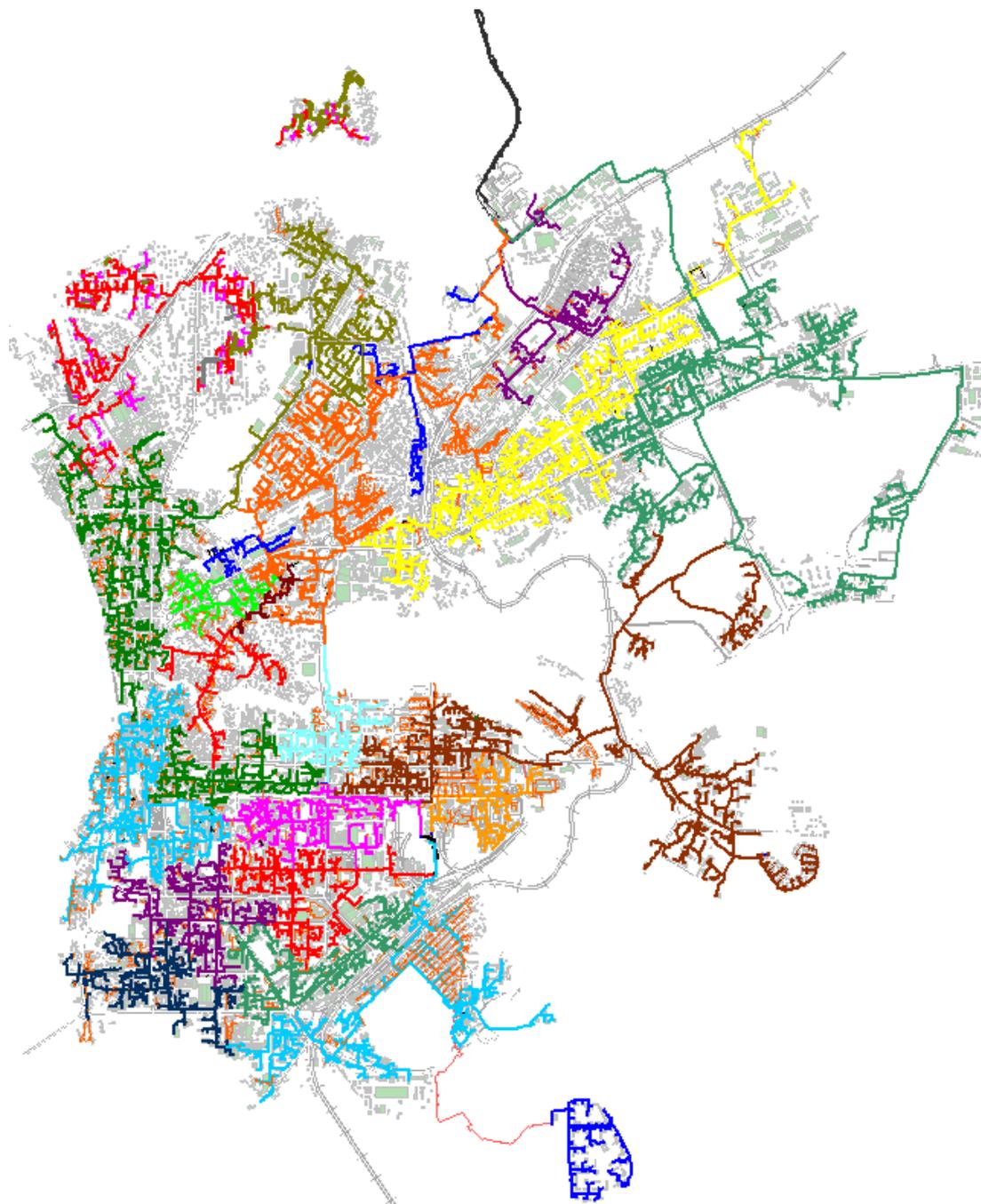


Рис. 1. Электронная модель схемы теплоснабжения города

За достаточно короткий промежуток времени (2 года) удалось внести подробное описание не только магистральных, но и распределительных (квартальных) ТС с типом присоединений теплопотребляющих установок потребителей.

В рамках единого информационного пространства различными подразделениями решаются следующие задачи при помощи ГИС Zulu:

- Управление гидравлических режимов и технической экспертизы (УГРиТЭ):

- Ежегодный (на отопительный и межотопительный период) расчет оптимальных гидравлических режимов работы системы теплоснабжения;
- Расчет фактических тепловых потерь от трубопроводов;
- Расчет режимов дросселирующих устройств, затем эти данные передаются в Управление тепловой инспекции для наладки индивидуальных тепловых пунктов потребителей;
- Моделирование аварийных ситуаций с целью разработки оптимальных решений в случае их возникновения;
- Выполнение аналитических работ на основе развитого аппарата получения информации по "универсальному запросу" (строится логическими операциями над элементами, их параметрами и диапазонами этих параметров), цветовых диаграмм (например, по удельным гидравлическим, тепловым потерям и т.п.);
- Расчет вариантов переключения в летний период для обеспечения горячим водоснабжением при проведении ремонтных работ;
- Определение мероприятий локального характера для обеспечения присоединения нового потребителя.
- Принятие решения о возможности и точке присоединения новых потребителей;
- По данным структурного подразделения «Теплоэнергосбыт» корректирует в БД тепловые нагрузки абонентов в случае их изменения.
- Управление тепловой инспекции:
 - Поддерживается актуальность БД электронных моделей – представляют в УГРиТЭ информацию об изменениях трассировки, способе прокладки, изменении диаметра и т.п.
- Оперативно-диспетчерская служба ТС:
 - Используется система как информационно-справочная (содержащую информацию о текущем состоянии сетей). [1]
- Отдел реализации тепловой энергии:
 - Используются расчетные параметры, определенные УГРиТЭ в точке поставки энергоресурсов (диапазон давлений и температуру в подающем трубопроводе, расход) для заключения договоров согласно требованиям [2];

Работа в ГИС Zulu 7.0 позволила проработать варианты реконструкций и нового строительства сетей с целью эффективного развития рынка сбыта тепловой энергии. Для достижения теплоснабжения в эффективном радиусе теплоснабжения и минимизации стоимости тепловой энергии выполнялись следующие задачи:

- снижения тепловых и гидравлических потерь;

- перераспределение нагрузок между источниками.

Применение электронной модели позволило значительно улучшить гидравлические режимы системы теплоснабжения. Проработка вариантов развития теплосетевого бизнеса путем увеличения подключенной нагрузки в эффективном радиусе теплоснабжения привели к принятию таких важных решений, как:

Переключение сетей от неэффективных локальных источников на централизованное теплоснабжение. Так определены мероприятия по переключению котельной ЗАО «Сибкабель» с нагрузкой 8,5 Гкал/ч (переключаются в 2015 г.), разработаны проекты по переключению в 2017 г. кот. Фабрики «Красная звезда», «Б. Подгорная» и «Севастопольская» с суммарной нагрузкой 2,2 Гкал/ч, основным проектом является переключение в 2019 г. самой крупной котельной в рассматриваемом регионе с суммарной нагрузкой 62 Гкал/ч;

Изменена концепция развития ТС с целью обеспечения гидравлических режимов при подключении перспективной нагрузки. Так ранее для подключения перспективной нагрузки выполнялся локальный расчет, на подключаемую нагрузку от магистральной камеры, и при необходимости производилась реконструкция квартальных трубопроводов с увеличением диаметра. Данный подход приводит к нарушению гидравлических режимов магистральных сетей. В настоящее время расчет выполняется от источника теплоснабжения и до границы земельного участка подключаемого объекта, а если это жилой дом, то до стен жилого дома. Прорабатываются все возможные оптимальные варианты подключения от различных магистральных камер. При этом учитывается перспектива на ближайшие 4 года и выданные существующие обязательства. Помимо реконструкции квартальных появляются мероприятия по реконструкции магистральных сетей, ПНС и в некоторых случаях источников, так при переключении котельной с нагрузкой 62 Гкал/ч потребуется увеличение напора до 90 м.вод.ст. на источнике.

По итогам ежегодных гидравлических расчетов системы централизованного теплоснабжения определяются «узкие» места, которые закладываются в дальнейшем в инвестиционные программы и в ближайшие годы реконструируются.

Разработаны мероприятия, позволяющие подключить к системе централизованного теплоснабжения перспективные нагрузки до 2030 г., эти мероприятия вошли в «Схему теплоснабжения города». [3, 4]

Практика использования ГИС Zulu показала, что в течение двух недель специалист осваивает фундаментальные основы, а дальше са-

мостоятельно в процессе работы осваивает расширенные возможности.

Таким образом, использование программного комплекса позволило выполнить оптимизацию технологических процессов во многих подразделениях теплоснабжающей организации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. В.Н. Мелькумов, С.Н. Кузнецов, К.А. Складов, А.А. Горских. Мониторинг надежности тепловых сетей // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. – 2010. – № 1 (17). – С. 52–58.
2. Постановление Правительства РФ от 8 августа 2012 г. № 808 «Об организации теплоснабжения в Российской Федерации и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации».
3. Требования к схемам теплоснабжения, порядку их разработки и утверждения (утверждены постановлением Правительства РФ от 22 февраля 2012 г. № 154). – М.: Собрание законодательства Российской Федерации, 2012 г. – № 10 – 21 с.
4. Методические рекомендации по разработке схем теплоснабжения (утверждены совместным приказом Минэнерго РФ и Минрегионразвития РФ от 29.12.2012 г. № 565/667). URL: http://www.rosteplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=1557 (дата обращения: 01.11.2014).

Научный руководитель: В.В. Литвак, д.т.н., профессор кафедры АТЭС ЭНИН ТПУ.

ТЭЦ С ЭНЕРГОБЛОКАМИ НА УЛЬТРА-СВЕРХ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ

Д.А. Поляков
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5БМ4А

В настоящее время в России и в других странах мира широко используются энергоблоки со сверхкритическими параметрами с начальным давлением $p_0 = 23,57$ МПа и температурой острого пара $t_0 = 540$ °С, с однократным промежуточным перегревом с параметрами $r_{пп} = 3,6$ МПа и $t_{пп} = 540$ °С. Эти параметры позволяют достигнуть

КПД энергоблока 41 %. С 1966 г. и до середины 70-х годов на Каширской ГРЭС действовал экспериментальный энергоблок СКР-100-300 с суперсверхкритическими параметрами $p_0 = 29,4$ МПа, $t_0 = 650$ °С. Эти исследования позволили установить возможность создания промышленного оборудования на суперсверхкритические параметры. Первая промышленная станция Эддистоун-1 на суперсверхкритические параметры: $p_0 = 35,9$ МПа, $t_0 = 648$ °С, с двукратным промежуточным перегревом $t_{пп} = 565/565$ °С, была построена в США в 1954 г. В настоящее время в мире насчитывается несколько десятков энергоблоков на суперсверхкритические параметры, построенных в основном в США, Германии, Дании, Японии, характеристики некоторых из них представлены в табл. 1.1. Анализ приведенных в табл. 1.1 характеристик станций с суперсверхкритическими параметрами пара показывает, что ввод первых экспериментальных энергоблоков с параметрами с $p_0 = 35$ МПа и $t_0 = 650$ °С, с двукратным промперегревом выявил сложность реализации таких проектов. На последующих этапах, особенно это просматривается на примере станций, построенных в 80-х годах прошлого века, видно, что начальное давление и температура поднимались незначительно, $p_0 = 25...28$ МПа, $t_0 = 560...580$ °С, а вот параметры промежуточного перегрева выросли до $t_{пп} = 580...600$ °С. Такое решение является оправданным, так как понижение параметров острого пара позволило применять менее дорогостоящие материалы при одновременном сохранении надежности и маневренности оборудования. Повышение температуры промежуточного перегрева является не столь критичным, так как металл в этом случае работает при значительно меньшем давлении. Вместе с тем опыт эксплуатации оборудования показал, что применение двукратного промежуточного перегрева при давлениях пара до 26 МПа является экономически неоправданным, так как прирост общего КПД около 1 % не компенсирует усложнение тепловой схемы энергоблока, конструкции турбины и котла. Поэтому, начиная с 80-х годов, в основном строились энергоблоки с одним промежуточным перегревом. Только переход на давление близкое к $p_0 = 30$ МПа снова сделал целесообразным использование второго промежуточного перегревателя пара. Одновременно с ростом параметров шло совершенствование тепловых схем, повышалась температура питательной воды, которая достигла $t_{п.в} = 300$ °С, внедрялись ПНД смешивающего типа, совершенствовались регенеративные ПВД и схемы их включения (схемы Виолена и Рикара—Некольного). В то же время существенного повышения экономичности удалось достигнуть за счет понижения давления в конденсаторе. Особо следует отметить тот факт, что понижение давления в конден-

саторе достигалось не только за счет увеличения площади конденсатора и совершенствования процессов теплообмена в нем, но и за счет поддержания глубокого вакуума в процессе эксплуатации, путем предотвращения отложений в трубной системе конденсаторов и уменьшения присосов воздуха. Такой результат обеспечивался путем внедрения непрерывной шариковой очистки и использования современных герметизирующих материалов. В результате удалось снизить температурные напоры в конденсаторах с $\Delta t = 6 \dots 8$ °С до $\Delta t = 3 \dots 4$ °С. Такое снижение температурного напора позволило понизить давление в конденсаторе приблизительно на 1 кПа, в результате чего мощность турбины выросла в среднем на 1...1,5 % для оборудования, предназначенного для работы с паром закритических параметров, и на 2,5...4 % для энергоблоков атомных станций. Эффект от повышения параметров пара приведен в десятках работ. Из табл. 1.1 видно, что достижение параметров пара $p_0 = 29$ МПа и $t = 580/580/600$ °С позволило получить КПД станции 47 %. Повышение при этом расчетного вакуума до $p_k = 2,35$ кПа увеличило КПД станции до 49 %. В связи с уменьшением запасов газа использование пара с суперсверхкритическими параметрами на угольных станциях представляется весьма перспективным. Вместе с тем следует отметить, что повышение параметров пара до еще более высоких значений не столь перспективно, как выход на $p_0 = 30$ МПа и $t_0 = 600$ °С. Повышение параметров пара до $p_0 = 40$ МПа и $t_0 = 700 \dots 750$ °С позволяет повысить КПД станции всего до 51...52 %. При этом стоимость материалов резко возрастает. Таким образом, повышение параметров пара для обычного паротурбинного оборудования близко к достижению своего экономического предела. Только появление материалов абсолютно нового типа, с высокими прочностными характеристиками позволит и далее повышать параметры. Существенная экономия топлива в настоящее время может быть достигнута:

- за счет комбинированной (совместной) выработки электрической и тепловой энергии;
- путем строительства ПГУ;
- за счет модернизации существующих установок[1].

Табл. 1.1 Основные характеристики действующих энергоблоков с суперсверхкритическими параметрами пара

| Страна, электростанция | Год ввода в эксплуатацию | Топливо | Температура свежего пара и пара промежуточных перегревов $t_0/t_{м1}/t_{м2}$, °С | Начальное давление, МПа | Температура питательной воды, °С | Электрическая мощность, МВт | Давление в конденсаторе, кПа | КПД энергоблока нетто, % |
|-------------------------------|--------------------------|---------------|---|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|
| США, Эдлистоун-1 | 1954 | Уголь | 648/565/565 | 35,9 | — | 325 | — | — |
| Россия, Каширская ГРЭС | 1966 | Уголь | 650/565 | 29,4 | — | 100 | — | — |
| Япония, Вакамацу | 1968 | Уголь | 593/593/593 | 31,0 | — | 50 | — | — |
| Дания, Струдstrup 3 и 4 | 1984—1985 | Уголь | 540/540 | 25,0 | 261 | 350 | 2,1 | 41...42 |
| Япония, Кавагое-1 | 1989 | Сжиженный газ | 566/566/566 | 30,5 | 310 | 700 | 4 | 41,9 |
| Дания, Фунен 7 | 1991 | Уголь | 540/540 | 25,0 | 280 | 350 | 2,7 | 43,5 |
| Германия, Шгаудингер 5 | 1992 | Уголь | 545/562 | 26,2 | 270 | 550 | 3,8 | 43 |
| Дания, Эсбьерг 3 | 1992 | Уголь | 562/560 | 25,0 | 275 | 350 | 2,3 | 45,3 |
| Германия, Любек | 1995 | Уголь | 580/560 | 27,5 | — | 400 | — | 45,7 |
| Дания, Скербек 1 и 2 (Конвой) | 1997 | Газ | 582/580/580 | 29,5 | 298 | 395 | 2,3 | 47 |
| Дания, Альборг | 1997 | Уголь | 580/580/600 | 28,5 | 300 | 400 | 2,35 | 49 |
| Япония, Матсура 2 | 1998 | Уголь | 593/593/593 | 25,6 | — | 1000 | — | 45 |
| Дания, Норджилланд (Конвой) | 1998 | Уголь | 582/580/580 | 29,5 | — | 385 | — | 49 |
| Германия, Гесслер | 1998 | Уголь | 580/600 | 27,5 | 301 | 740 | 3,6 | 45,4 |
| Германия, Бексбах 2 | — | Уголь | 575/595/— | 25,0 | 290 | 750 | — | 46,3 |
| Германия, Боксберг | 2000 | Лигнит | 545/581 | 26,6 | — | 907 | — | 42,7 |

Принципиальные схемы ТЭЦ на ультра-супер критических параметрах

На данный момент существует две концепции развития энергоблоков на ультра-супер критических параметрах (с одинарным и двойным перегревом пара). При проектировании этих энергоблоков предполагается, что в обоих случаях они имеют одинаковую номинальную электрическую мощность 900МВт, давление в конденсаторе, а так же КПД отдельных электрических установок и систем.

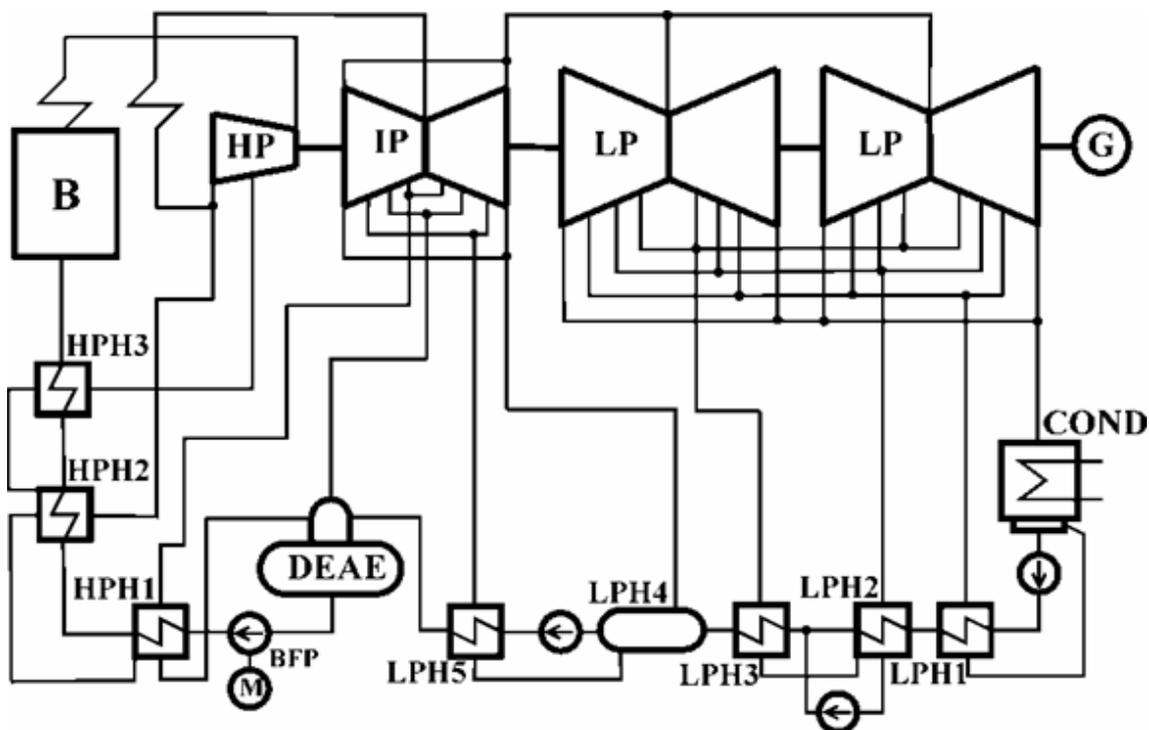


Рис. 1.1. Принципиальная упрощенная схема ТЭЦ на ультра-суперкритических параметрах с одинарным перегревом пара

Данная схема включает в себя: В – котел, HP – цилиндр высокого давления, IP – цилиндр среднего давления, 2 LP – 2 цилиндра низкого давления, G – генератор, COND – конденсатор, LPH(1-5) – подогреватели низкого давления, DEAE – деаэратор, BFP – насос питательной воды, HPH(1-3) – подогреватели высокого давления. Особенность данной схемы пятиступенчатая регенерация низкого давления с открытой подачей в водоподогреватель (LPH4) и трехступенчатая регенерация высокого давления.

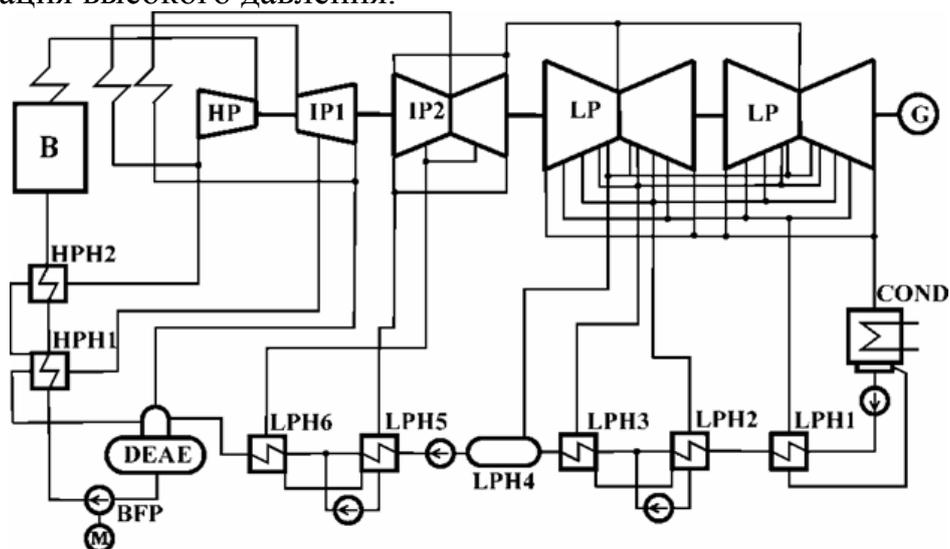


Рис. 1.2. Принципиальная упрощенная схема ТЭЦ на ультра-суперкритических параметрах с двойным перегревом пара

Данная схема включает в себя: В – котел, НР – цилиндр высокого давления, IP(1-2) – цилиндр среднего давления, 2 LP – 2 цилиндра низкого давления, G – генератор, COND – конденсатор, LPH(1-5) – подогреватели низкого давления, DEAE – деаэратор, BFP – насос питательной воды, НРН(1-3) – подогреватели высокого давления.

Особенность данной схемы, шесть стадий регенерация низкого давления с открытой подачей в водоподогреватель (LPH4) и двухступенчатая регенерация высокого давления. Использование двойного промперегрева пара усложняет структуру энергоблока, но позволяет существенно улучшить эффективность выработки электроэнергии. В циклах с двойным перегревом коэффициент сухости пара на выходе из турбины значительно меньше, что приводит к повышению эффективности цикла. Турбина состоит из двух отдельных цилиндров среднего давления, где второй цилиндр среднего давления выполнен как двупроточный цилиндр. Выход пара из первого цилиндра среднего давления направляется в котел для перегрева.

Последний подогреватель высокого давления питается из холодной нитки нагрева пара, следовательно первый перегрев пара определяет температуру и давление подачи воды.

Конфигурация энергоблоков 900 МВт со вспомогательной турбиной

Существенное повышение температуры пара, особенно подогрев пара (до 720 ° С), усугубляет проблему разности температур между острым паром и питательной водой в подогревателях высокого давления. Подогреватели питались острым паром из отборов турбины которые расположены сразу после пара перегревателя. Для того чтобы решить эту проблему, компания Elsam запатентовала термический цикл под названием “Master Cycle”. Основной идеей этого цикла является отбор острого пара на стадии промежуточного перегрева на так называемую дополнительную турбину, которая соединена с дополнительным электрогенератором. В результате чего снижается теплорепад в подогревателях высокого давления, между цилиндром высокого давления и конденсатором, за счет этого повышается эффективность всего цикла. С использованием вспомогательной турбины уменьшается поток и параметры пара проходящие через турбину, что в свою очередь приводит к удешевлению материалов используемых для строительства трубопроводов по сравнению с дорогостоящими сплавами на основе никеля.

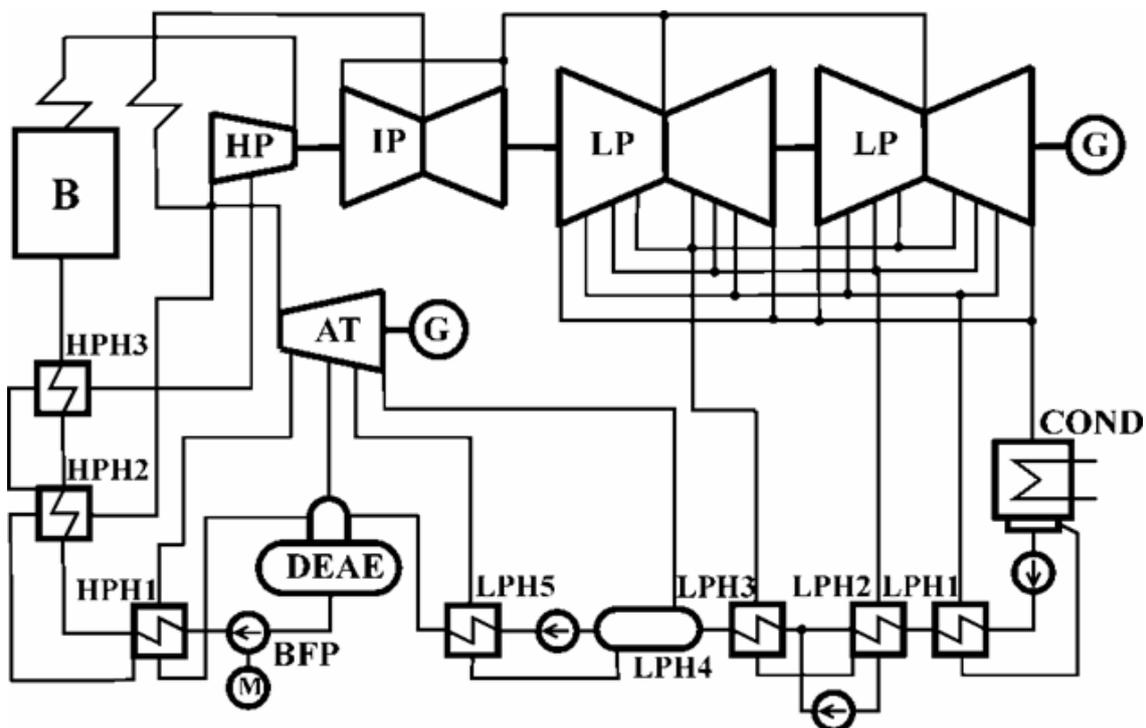


Рис. 1.3. Принципиальная схема блока 900 МВт с одинарным перегревом пара и вспомогательной турбиной

Данная схема включает в себя: В – котел, HP – цилиндр высокого давления, IP(1-2) – цилиндр среднего давления, 2 LP – 2 цилиндра низкого давления, G – генератор, COND – конденсатор, LPH(1-5) – подогреватели низкого давления, DEAE – деаэратор, BFP – насос питательной воды, HPH(1-3) – подогреватели высокого давления, AT – вспомогательная турбина.

Вывод:

Из представленной информации можно сказать, что разработка энергоблоков на ультра-сверх критических параметрах является перспективным направлением современной энергетики.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ильин Е.Т., ЗАО «Комплексные энергетические системы». - osi.ecopower.ru/ru/2010-10-18-11-03-16/item/download/859.html.
2. Open Access Journal Journal of Power Technologies 92 (4), 2012. P. – 266-273

Научный руководитель: А.С. Матвеев, к.т.н, доцент, зав. кафедрой АТЭС ЭНИН ТПУ.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ НАГРУЗКИ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В.А. Попов

Саяно – Шушенский филиал
Сибирского федерального университета

В современной гидроэнергетике актуальными являются задачи рационального использования водных ресурсов водохранилища. Наиболее распространенная задача - это задача оптимизации режимов нагрузки ГЭС.

При расчете оптимального режима ГЭС был использован метод неопределенных множителей Лагранжа [1].

В данном примере рассматривались три ГЭС: Пинежская, Верхнесвирская, Кривопорожская, с номинальными мощностями соответственно: $P_1 = 488$ МВт, $P_2 = 180$ МВт, $P_3 = 160$ МВт. Пинежская ГЭС является балансирующей.

Расходные характеристики для станций Пинежская, Верхнесвирской и Кривопорожской определим в соответствии с [2].

Построим расходные характеристики (рис.1-3):

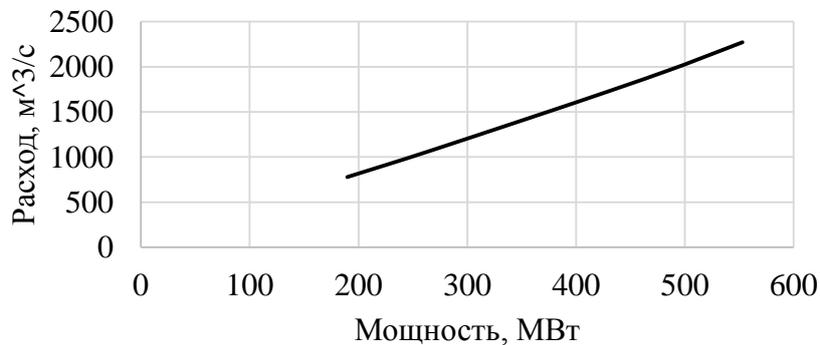


Рис. 1. Расходная характеристика Пинежской ГЭС

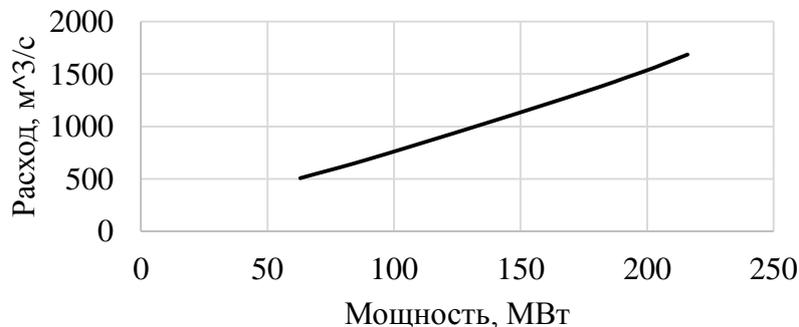


Рис. 2. Расходная характеристика Верхнесвирской ГЭС

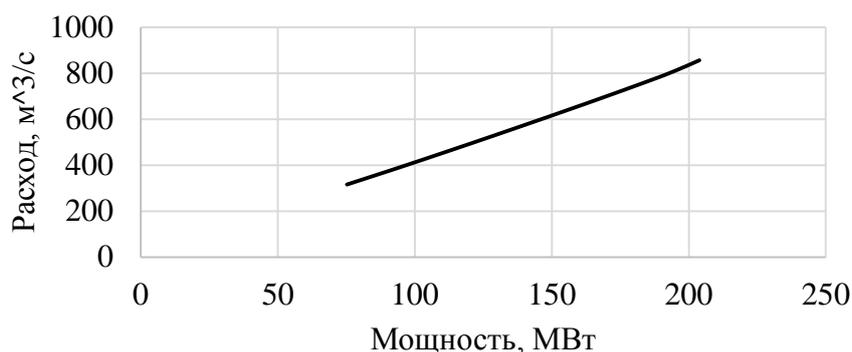


Рис. 3. Расходная характеристика Кривопорожской ГЭС

В результате аппроксимации расходных характеристик получаем уравнения второго порядка для Пинежской, Кривопорожской и Верхнесвирской ГЭС соответственно:

$$Q_1 = 0,001 \cdot P^2 + 3,308 \cdot P + 114,8; \quad (1)$$

$$Q_2 = 0,0077 \cdot P^2 + 5,488 \cdot P + 131,8; \quad (2)$$

$$Q_3 = 0,003 \cdot P^2 + 3,283 \cdot P + 52,3. \quad (3)$$

Величина нагрузки $P_H=450$ МВт.

На рисунке 4 представлена схема рассматриваемой сети.

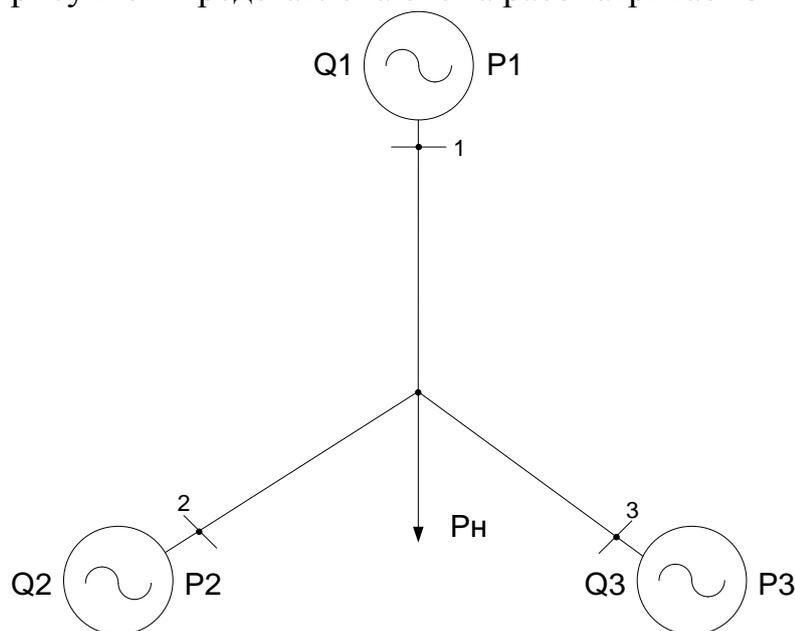


Рис. 4. Схема рассматриваемой сети

Условия оптимального режима получим из [1]. Потери в сети не учитываем $\Delta P_\Sigma = 0$:

$$P_1 + P_2 + P_3 - P_H = 0, \quad (4)$$

$$q_1 = -\lambda = const, \quad (5)$$

$$q_2 = -\lambda = const, \quad (6)$$

$$q_3 = -\lambda = const, \quad (7)$$

где P_1, P_2, P_3 – генерируемые мощности Пинежской, Кривопорожской и Верхнесвирской ГЭС соответственно; q_1, q_2, q_3 – удельный расход для Пинежской, Кривопорожской и Верхнесвирской ГЭС соответственно; λ — множитель Лагранжа [1].

Уравнение оптимального режима запишется:

$$0,001 \cdot P^2 + 3,308 \cdot P + 114,8 = 0,003 \cdot P^2 + 3,283 \cdot P + 52,3 = 0,0077 \cdot P^2 + 5,488 \cdot P + 131,8. \quad (8)$$

Решаем совместно уравнения (4) и (8). Для решения полученной системы уравнений используется метод Ньютона [3]. Решаемая система примет вид:

$$\begin{cases} 0,001 \cdot P_1^2 + 3,308 \cdot P_1 + 114,8 - 0,0077 \cdot (P_H - P_1 - P_2)^2 + \\ \quad + 5,488 \cdot (P_H - P_1 - P_2) + 131,8 = 0; \\ 0,003 \cdot P_1^2 + 3,283 \cdot P_1 + 52,3 - 0,0077 \cdot (P_H - P_1 - P_2)^2 + \\ \quad + 5,488 \cdot (P_H - P_1 - P_2) + 131,8 = 0; \\ P_{Г1} + P_{Г2} + P_{Г3} - P_H = 0. \end{cases}$$

Из решения данной системы уравнений найдем $P_1 = 176,5$ МВт; $P_2 = 177,5$ МВт; $P_3 = 96$ МВт.

Расход для рассматриваемых станций составит:

$$\begin{aligned} Q_1 &= 0,001 \cdot P^2 + 3,308 \cdot P + 114,8 = \\ &= 0,001 \cdot 176,5^2 + 3,308 \cdot 176,5 + 114,8 = 729,7 \text{ м}^3/\text{с}; \\ Q_2 &= 0,003 \cdot P^2 + 3,283 \cdot P + 52,3 = \\ &= 0,003 \cdot 177,5^2 + 3,283 \cdot 177,5 + 52,3 = 729,7 \text{ м}^3/\text{с}; \\ Q_3 &= 0,0077 \cdot P^2 + 5,488 \cdot P + 131,8 = \\ &= 0,0077 \cdot 96^2 + 5,488 \cdot 96 + 131,8 = 729,7 \text{ м}^3/\text{с}. \end{aligned}$$

Проведем расчет потери мощности в сети до и после оптимизации.

Суммарные потери до и после оптимизации соответственно составят:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = 10,72 \text{ МВт}. \quad (9)$$

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = 9,86 \text{ МВт}. \quad (10)$$

Снижение потерь в сети в результате оптимизационных мероприятий составит:

$$\Delta P_{\text{до}} - \Delta P_{\text{после}} = 10,72 - 9,86 = 0,86 \text{ МВт}. \quad (11)$$

Прогнозируемую себестоимость электроэнергии за 1 МВт. ч. определим по Единым сценарным условиям ОАО «РусГидро» [4].

Произведем расчет прогнозируемой экономии средств с 2015 на последующие 10 лет (рис. 5).

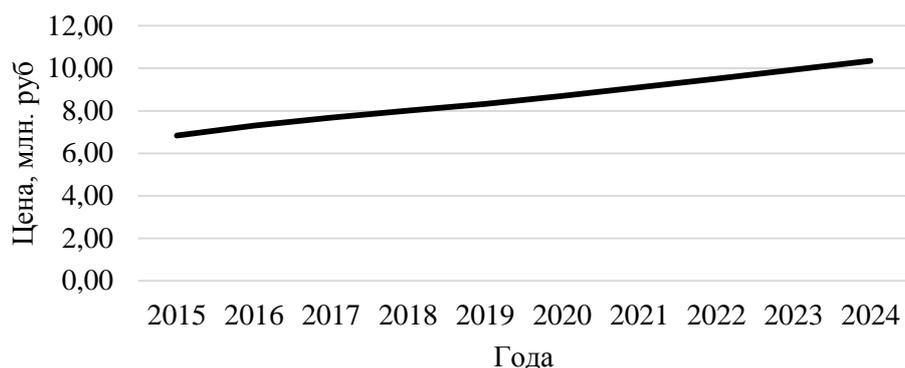


Рис. 5. Прогнозируемый экономический эффект от оптимизации с 2015 по 2024 гг.

Вывод.

Прогнозируемая экономия денежных средств изменяется от 6,83 млн. руб. до 10,35 млн. руб. ежегодно. Расчет был произведен для двух существующих и одной проектируемой ГЭС. Данный метод применим для любого количества ГЭС и сети любой конфигурации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях // В.А. Венников, Ю.Н. Астахов, В.В. Ежков и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983.– 683 с.
2. Филипова, Т.А. Оптимизация энергетических режимов гидроагрегатов гидроэлектростанций. – М.: Энергия, 1975. – 364 с.
3. Вержбицкий В.М. Численные методы. (линейная алгебра и нелинейные уравнения).– М.: Высшая школа, 2000.– 266с.
4. Единые сценарные условия ОАО «РусГидро» на 2012 - 2037 гг.: приказ ОАО «РусГидро» от 30.01.12 г. №62. – М., 2015. – 22 с.
5. Бердышев В. И., Летун В. М., Волкова Т. В., Глуз И. С. Математическое моделирование: оптимизация режимов работы тепловых электростанций // Вестник Уральского отделения РАН. – 2013. – N1. – С. 25-33.

Научный руководитель: Л.В. Толстихина, к.т.н. доцент кафедры ГГЭЭС СШФ СФУ.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВ НА ПРИМЕРЕ ТОМСКОЙ ГРЭС-2

И.В. Сорокин, А.Г. Коротких
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5БМ51

В настоящее время электрическая станция – Томская ГРЭС-2 – обеспечивает электрической и тепловой энергией центральную и южную части г. Томска. Установленная электрическая мощность станции составляет 331 МВт, тепловая – 948 МВт.

На Томской ГРЭС-2 осуществляется раздельное сжигание твердого (каменный уголь марки Д Кузнецкого месторождения) и газообразного топлива (природный газ Нижневартовского месторождения) в топках паровых котлов. Мазут на электростанции используется в качестве растопочного топлива. Содержание элементов, фотография и дисперсная характеристика используемого на станции пылеугольного топлива и содержание газов в составе природного газа представлены в табл. 1–2 [1] и на рис. 1–2.

Табл. 1. Элементный состав каменного угля марки Д

| Наименование элементов | Обозначение | Величина |
|------------------------|-------------|----------|
| Зола | $A^p, \%$ | 15,9 |
| Влага | $W^p, \%$ | 11,5 |
| Сера | $S^p, \%$ | 0,4 |
| Углерод | $C^p, \%$ | 56,4 |
| Кислород | $O^p, \%$ | 9,9 |
| Азот | $N^p, \%$ | 1,9 |
| Водород | $H^p, \%$ | 4,0 |

Табл. 2. Состав природного газа Нижневартовского месторождения

| Наименование газов | Обозначение | величина |
|--------------------|-----------------|----------|
| Метан | $CH_4, \%$ | 96,09 |
| Этан | $C_2H_6, \%$ | 0,22 |
| Пропан | $C_3H_8, \%$ | 1,4 |
| Бутан | $C_4H_{10}, \%$ | 0,02 |
| Пентан | $C_5H_{12}, \%$ | 0,7 |
| Азот | $N_2, \%$ | 0,77 |
| Углекислый | $CO_2, \%$ | 0,8 |

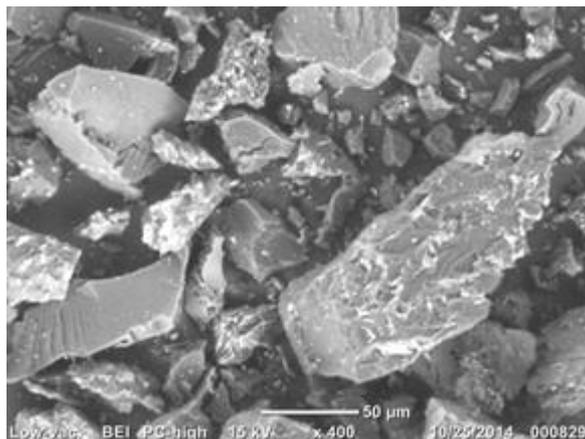


Рис. 1. Микрофотография электронного растрового микроскопа JCM-6000 порошка каменного угля

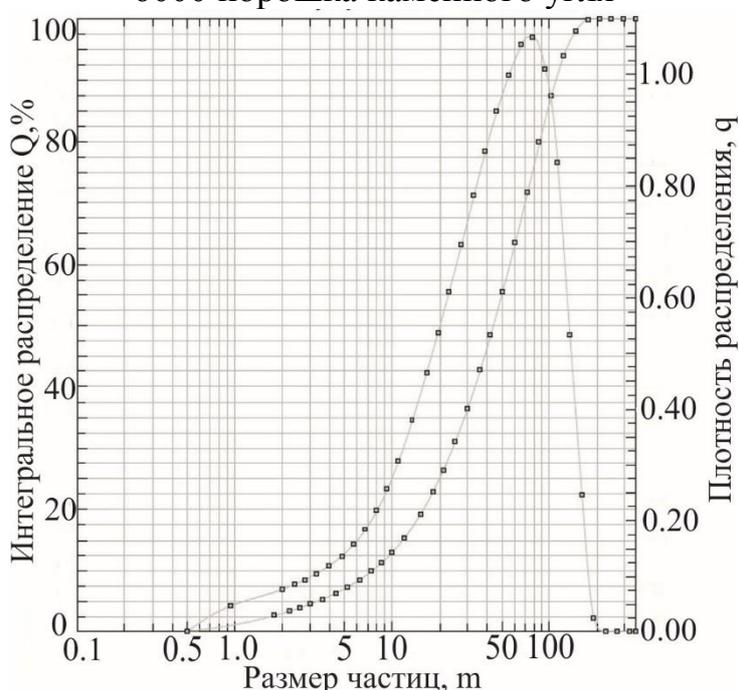


Рис. 2. Интегральное распределение и плотность распределения частиц порошка каменного угля (лазерный анализатор HELOS/BR)

Удельная и насыпная плотности используемого твердого топлива, измеренная пикнометрическим методом по 3–4 параллельным опытам, составляет 1927 ± 15 и 340 ± 6 кг/м³, соответственно.

Для оценки эффективности использования топлив определены значения нижней рабочей теплоты сгорания и удельного расхода топлива на производство единицы тепла.

Нижшая теплота сгорания твердого топлива определяется формулой Менделеева [2]:

$$Q_H^P \text{ угля} = 4,187 \cdot [81C^P + 246H^P - 26(O^P - S^P) - 6(W^P + 9H^P)], \quad (1)$$

где С, Н, О, S, W – массовые доли компонентов топлива: углерода, водорода, кислорода, серы и влаги.

Объемная теплота сгорания газообразного топлива определяются суммой теплоты сгорания входящих в его состав различных газов с учетом их процентного содержания [2]:

$$Q_H^{p\text{газ}} = 0,04187 \cdot [Q_{CH_4} \cdot CH_4 + Q_{C_2H_6} \cdot C_2H_6 + \sum Q_{C_mH_n} \cdot C_mH_n], (2)$$

где CH_4 , C_2H_6 и т. д. – содержание горючих газов в топливе, об. %; Q_{CH_4} , $Q_{C_2H_6}$ и т. д. – объемная теплота сгорания соответствующих газов.

Таким образом, низшая теплотворная способность каменного угля марки Д Кузнецкого месторождения составляет $Q_H^{p\text{уголь}} = 21020 \text{ кДж/кг}$, а величина теплотворной способности природного газа Нижневартовского месторождения – $Q_H^{p\text{газ}} = 36883 \text{ кДж/м}^3$, или с учетом плотности природного газа – 49153 кДж/кг .

Удельный расход каменного угля и природного газа на производство 1 ГДж тепла равен:

для каменного угля:

$$B_{\text{уголь}} = \frac{1}{Q_H^{p\text{уголь}}} = \frac{1}{21,02 \cdot 10^{-3}} = 47,57 \text{ кг/ГДж};$$

для природного газа:

$$B_{\text{газ}} = \frac{1}{Q_H^{p\text{газ}}} = \frac{1}{49,15 \cdot 10^{-3}} = 20,35 \text{ кг/ГДж}.$$

Таким образом, использование природного газа на электростанции приводит к экономии удельного расхода топлива. Расход твердого топлива на производство 1 ГДж тепла в 2,3 раза больше, чем при использовании природного газа на станции.

При стоимости природного газа 2744 рубля за 1000 м^3 и каменного угля 1950 рублей за 1000 кг (на 2015 год) себестоимость единицы тепла, получаемой при сжигании топлива, составляет:

при сжигании каменного угля:

$$S_{\text{уголь}} = B_{\text{уголь}} \cdot C_{\text{уголь}} = \frac{47,57 \cdot 1950}{10^3} = 92,76 \text{ руб./ГДж};$$

при сжигании природного газа:

$$S_{\text{газ}} = B_{\text{газ}} \cdot C_{\text{газ}} = \frac{20,35 \cdot 2744}{10^3} = 55,84 \text{ руб./ГДж}.$$

Себестоимость производства 1 ГДж тепла при сжигании природного газа в 1,7 раза меньше, чем себестоимость 1 ГДж тепла при сжигании каменного угля.

Кроме того, использование твердого топлива на Томской ГРЭС-2 связано с дополнительными затратами на его приготовление для сжигания, а именно затратами на транспортировку, разгрузку, дробление топлива, работу системы пылеприготовления, а также транспортировку готовой пыли по сравнению с природным газом. Кроме того, дополнительные затраты связаны с очисткой дымовых газов от вредных веществ и сажи, а также транспортировкой золы и шлака до места сброса.

Для увеличения эффективности использования твердого топлива на Томской ГРЭС-2 предлагается использование газогенераторной установки [3], которая позволяет получать газообразные продукты неполного горения (в основном водород и окись углерода) для последующего синтеза с целью получения углеводородов (метан, пропан, бутан и т. д.), которые затем можно сжигать в топках парового котла. Образующийся в результате газификации диоксид углерода рекомендуется использовать повторно в газогенераторной установке в качестве окислителя углерода [4], а также в газотурбинной установке в качестве рабочего тела для дополнительной выработки электроэнергии, что позволит в целом увеличить эффективность работы тепловой электростанции и уменьшить количество вредных выбросов в окружающую среду.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тепловой расчет котлов: (Нормативный метод). – СПб.: Изд. НПО ЦКТО, 1998. – 256 с.
2. Резников М.И., Липов Ю.М. Котельные установки электростанций: Учебник для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 288 с.
3. Siefert N.S., Chang B.Y., Litster S. Exergy and economic analysis of a CaO-looping gasifier for IGFC–CCS and IGCC–CCS // Applied Energy. – 2014. – Vol. 128. – P. 230–245.
4. Korotkikh A.G., Slyusarskiy K.V. Kinetic study of coals gasification into carbon dioxide atmosphere // MATEC Web of Conferences – EDP Sciences. – 2015. – Vol. 23. – P. 01020-1–6.

Научный руководитель: А.Г. Коротких, д.ф.-м.н., доцент каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

СЕБЕСТОИМОСТЬ ПРОДУКЦИИ В СИСТЕМЕ СОВМЕСТНОЙ ВЫРАБОТКИ ТЕПЛА, ХОЛОДА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЭЦ

О.Ю. Ромашова, А.А. Туболев
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС

Комбинированное производство электрической, тепловой и холодильной энергии (тригенерация) представляет собой на сегодняшний день одно из наиболее современных технологических решений в плане и повышения энергетической эффективности, и решения экологических проблем [1].

В системе совместной выработки теплоты и электроэнергии возможно применение холодильных машин двух типов: компрессионные агрегаты, потребляющие электроэнергию, и абсорбционные агрегаты, использующие теплоту горячей воды, пара либо каких-либо других теплоносителей.

В системе тригенерации возникает задача совместного определения тарифов на холод, тепловую и электрическую энергию, а также нахождения целесообразной области применения холодильных машин разных типов.

Пояснение особенностей определения себестоимостей и формирования тарифов на ТЭЦ, отпускающую два вида энергии - тепловую и электрическую, изложено в [2, 3]. В основе предлагаемого авторами подхода лежит методический прием, заключающийся в том, что затраты на производство электроэнергии и теплоты можно распределить между двумя видами продукции любым способом, но поскольку сумма затрат от этого не меняется, то результаты от всех возможных вариантов разделения ложатся на одну прямую (Рисунок 1, прямая ST) – «треугольник Гинтера».

В данной работе представлена методика разнесения затрат на производство трех видов продукции в системе тригенерации, разработанная на основе треугольника Гинтера. Она позволяет рассчитать себестоимость холодильной продукции, вырабатываемой в машинах компрессионного и абсорбционного типов в зависимости от коэффициента распределения затрат между теплотой и электроэнергией на ТЭЦ, а также определить экономически обоснованную область применения этих типов холодильных машин.

В качестве примера выполнен расчет себестоимости отпуска от ТЭЦ с турбоустановкой Т-118/125-130-8 трех видов продукции (элек-

троэнергии, теплоты на горячее водоснабжение (ГВС) и холода в системы кондиционирования) в летний период при работе турбины по тепловому графику на основе реальных энергетических характеристик [4]. Климатический район – город Омск, для которого расчетная температура на отопление $t_{н.о.} = -37^{\circ}\text{C}$ [5]; расчетная температура на кондиционирование $t_{н.к.} = +35^{\circ}\text{C}$ [5]. Номинальная нагрузка отборов Т-118/125-130 $Q_{отб}^{ном} = 219$ МВт. Нагрузка на ГВС $Q_{ГВС} = 0,2 \cdot Q_{ТЭЦ} = 0,2 \cdot 365 = 73$ МВт. Принята равной 20% от максимальной тепловой нагрузки ТЭЦ:

$$Q_{ТЭЦ} = \frac{Q_{отб}^{ном}}{\alpha_{ТЭЦ}} = \frac{219}{0,6} = 365 \text{ МВт} \quad (1)$$

рассчитанной с учетом коэффициента теплофикации $\alpha_{ТЭЦ} = 0,6$ [6]. Цена условного топлива $C_{у.т.} = 3200 \frac{\text{руб}}{\text{т}}$.

Максимальная холодильная нагрузка Q_x^{max} оценивалась для района присоединенных тепловых потребителей в соответствии с соотношением:

$$\frac{Q_{ТЭЦ}}{Q_x^{max}} \approx \frac{(t_{пом} - t_{н.о.})}{(t_{н.к.} - t_{пом})} \quad (2)$$

где $t_{пом} = 18^{\circ}\text{C}$ - средняя температура внутри помещений.

Число часов использования максимальной нагрузки холодильных машин $\tau_{хол}^{max}$ определено как:

$$\tau_{хол}^{max} = K \cdot \tau = 0,5 \cdot 2160 = 1080 \text{ ч}, \quad (3)$$

где K - коэффициент использования максимальной нагрузки для выработки холода (принят равным 0,5 на основании рекомендаций изложенных в [6]); τ – общее число часов за три летних месяца.

Рассматриваются холодильные машины:

1. одноступенчатая абсорбционная бромисто-литиевая холодильная машина с холодопроизводительностью $Q_0 = 1000$ кВт (АБХМ-1000). Холодильный коэффициент ε_A зависит от температуры прямой сети $t_{пс}$ и определяется по каталогу АБХМ компании Broad [7];
2. парокompрессионная холодильная машина. Холодильный коэффициент ПКХМ принят по данным электронного ресурса компании Термогаз и равен $\varepsilon_K = 3$ [8].

Для варианта с АБХМ максимальный отпуск теплоты из отборов турбины Q_T^x для получения холода определен $Q_T^x = Q_x^{max} / \varepsilon_A$, где ε_A – холодильный коэффициент АБХМ. Дополнительная электрическая мощность ТЭЦ для работы ПКХМ оценивалась в соответствии с холодильным коэффициентом компрессионной машины ε_K .

В качестве исходного варианта рассматривается отпуск от ТЭЦ электрической энергии и теплоты на ГВС. В новом режиме совмест-

ного отпуска от ТЭЦ теплоты на ГВС и кондиционирование учитывались ограничения по максимальному расходу воды через сетевую установку (для Т – 118/125 – 130 – 8: $G_{\text{св}}^{\text{max}} = 1250 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ [4]). Принято, что условия работы потребителей ГВС в новом режиме не изменились по сравнению с исходным вариантом.

В исходном варианте сумма эксплуатационных издержек складывается из издержек на производство электроэнергии и теплоты:

$$И = И_{\text{э}} + И_{\text{т}} \quad (4)$$

В системе тригенерации, помимо тепла и электроэнергии, в качестве реализуемой продукции также выступает холод, и на ТЭЦ присутствуют эксплуатационные издержки на его производство $И_{\text{т}}^{\text{х}}$:

$$И' = И'_{\text{э}} + И'_{\text{т}} + И_{\text{т}}^{\text{х}} \quad (5)$$

При расчете исходного варианта по физическому методу разнесения затрат были получены значения себестоимостей тепла и электроэнергии (точка R на прямой ST, рисунок 1). При произвольном разнесении затрат на производство продукции была получена точка P. Таким образом, прямая PR, отрезок TO и SO образуют треугольник Гинтера.

Для системы совместного отпуска тепловой, электрической, и холодильной энергии по результатам расчета получен треугольник NOM (Рисунок 1). Точка «С» соответствует физическому методу разнесения затрат между электрической энергией и теплотой, отпускаемой из отборов турбины внешним потребителям. Луч OE отображает зависимость себестоимости холода, вырабатываемого на АБХМ, от метода разнесения затрат на электроэнергию и тепло в системе. На рисунке 1 также представлен случай (линия OG), когда электроэнергия на ПКХМ поступает по себестоимости из системы когенерации (линия ST), что позволяет сопоставить этот вариант с вариантом производства холода на АБХМ (абсорбер работает в системе тригенерации) по технико-экономическим показателям.

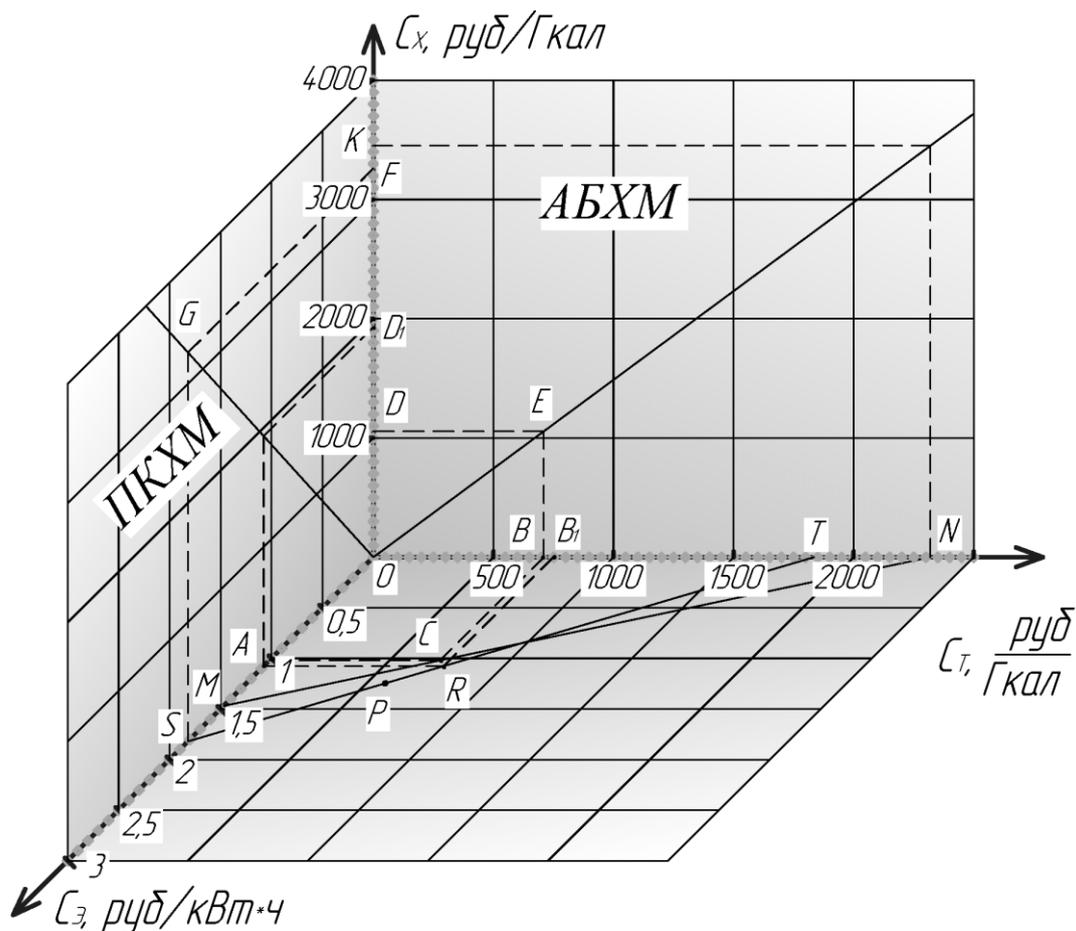


Рис. 1. Зависимость себестоимости холода от себестоимости тепла и электроэнергии в системе тригенерации

Выводы:

1. В работе представлена методика графоаналитического определения себестоимостей продукции в системах когенерации и тригенерации для анализа конкурентоспособности ПКХМ и АБХМ, использующих тепловую и электрическую энергию от ТЭЦ.
2. Экономически обоснованные области применения ПКХМ и АБХМ зависят от метода разнесения затрат на ТЭЦ между электрической и тепловой энергией.
3. При распределении затрат между тепловой и электрической энергией по физическому методу тригенерация снижает себестоимости продукции.

Работа выполнена в рамках ВИУ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Богданов А. Б. Климат России и теплофикация / Котельнизация России – беда национального масштаба, ч – 7., 2012.

2. Аракелян Э.К., Кожевников Н.Н. Тарифы на электроэнергию и тепло от ТЭЦ // Теплоэнергетика. – 2006. - № 11. – С. 60-63.
3. Малафеев В.А., Смирнов И.А. Формирование тарифов на ТЭЦ в рыночных условиях // Теплоэнергетика. – 2003. - № 4. – С. 55-59.
4. В.Н. Рузанков (ВТИ), Б.В. Михайлов (ОРГРЭС). Типовая энергетическая характеристика турбоагрегата Т-118/125-130.
5. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: Учебник для вузов. – М. Издательство МЭИ, 2001. – 472 с.
6. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции: Учебник для вузов/ Под ред. В.Я. Гиршфельда. – 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328с.
7. Арефьев Д.Н. Каталог BROAD. – М.: Олимп-бизнес, 2005.- 82 с.
8. Электронный ресурс: каталог продукции фирмы «Термогаз», режим доступа <http://www.termogazgroup.ru/>

Научный руководитель: О.Ю. Ромашова, к.т.н., доцент каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

АНАЛИЗ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПАРА В ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКЕ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГТУ

А.А. Уваров

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5БМ51

Парогазовые установки (ПГУ) утилизационного типа на основе современных ГТУ являются наиболее совершенными энергетическими установками на газообразном топливе. При этом базовой и главной частью ПГУ является ГТУ; ведется множество разработок по повышению их КПД. Большая роль в достижении высокой экономичности принадлежит также паровой части ПГУ. При существующем широком многообразии схем ПГУ крупнейшие производители при выборе их конфигурации отдают предпочтение сложной трехконтурной схеме с промежуточным перегревом пара [1]. Имеет смысл рассмотреть влияние начальных параметров пара на экономичность парогазовой установки на базе более простой и экономичной схемы.

Целью исследования является нахождение оптимальных значений начальных параметров пара путем вариантных расчетов; при этом критерием выбора решения является максимальное значение электри-

ческого КПД ПГУ. Приоритетом при выборе тепловой схемы послужили простота и более высокая надежность установки.

Необходимым условием выбора оптимальных параметров пара является допустимая влажность в конце процесса расширения пара $y_k \leq 11\%$, что ниже, чем в традиционных паротурбинных установках по причине того, что при нерасчетных режимах возможно понижение температуры газов за ГТУ и пара на входе в турбину [2]. Такое ограничение влажности при отсутствии промперегрева определяет диапазон значений начального давления пара.

Исследуемая парогазовая установка – двухконтурная, без пром-перегрева, утилизационного типа на базе высокотемпературной ГТУ Mitsubishi M701J с начальной температурой 1600 °С, имеющая на номинальном режиме КПД 41 % [3].

Принятые условия и допущения:

- расчет производится при номинальных условиях, которые приняты по ISO 2314 для ГТУ;
- паровая турбина имеет два цилиндра: ЦВД и ЦНД; принята схема с вводом пара низкого давления непосредственно через корпус ЦВД в камеру смешения;
- давление для контура низкого давления (НД) принимается равным $p_0^{НД} = 0,6$ МПа, обеспечивая высокие экономические показатели ПГУ [4];
- давление в конденсаторе принимается равным $p_k = 5$ кПа. Данное значение обуславливается сокращением низкпотенциальной части ПТ и уменьшением расхода охлаждающей воды.

Оптимизируемыми параметрами являются начальные значения давления пара $p_0^{ВД}$ и температуры пара $t_0^{ВД}$.

Табл. 1. Исходные данные ГТУ для расчета [3]

| Параметр | Величина |
|-----------------------------|--------------------------------|
| Электрическая мощность | $N_{\text{э}}^{ГТУ} = 470$ МВт |
| Расход воздуха в компрессор | $G_B = 861$ кг/с |
| Температура газов на выходе | $\theta_d = 638$ °С |
| Электрический КПД ГТУ | $\eta_{\text{э}}^{ГТУ} = 41\%$ |

Тепловой расчет схемы ПГУ ведется балансовым методом [4].

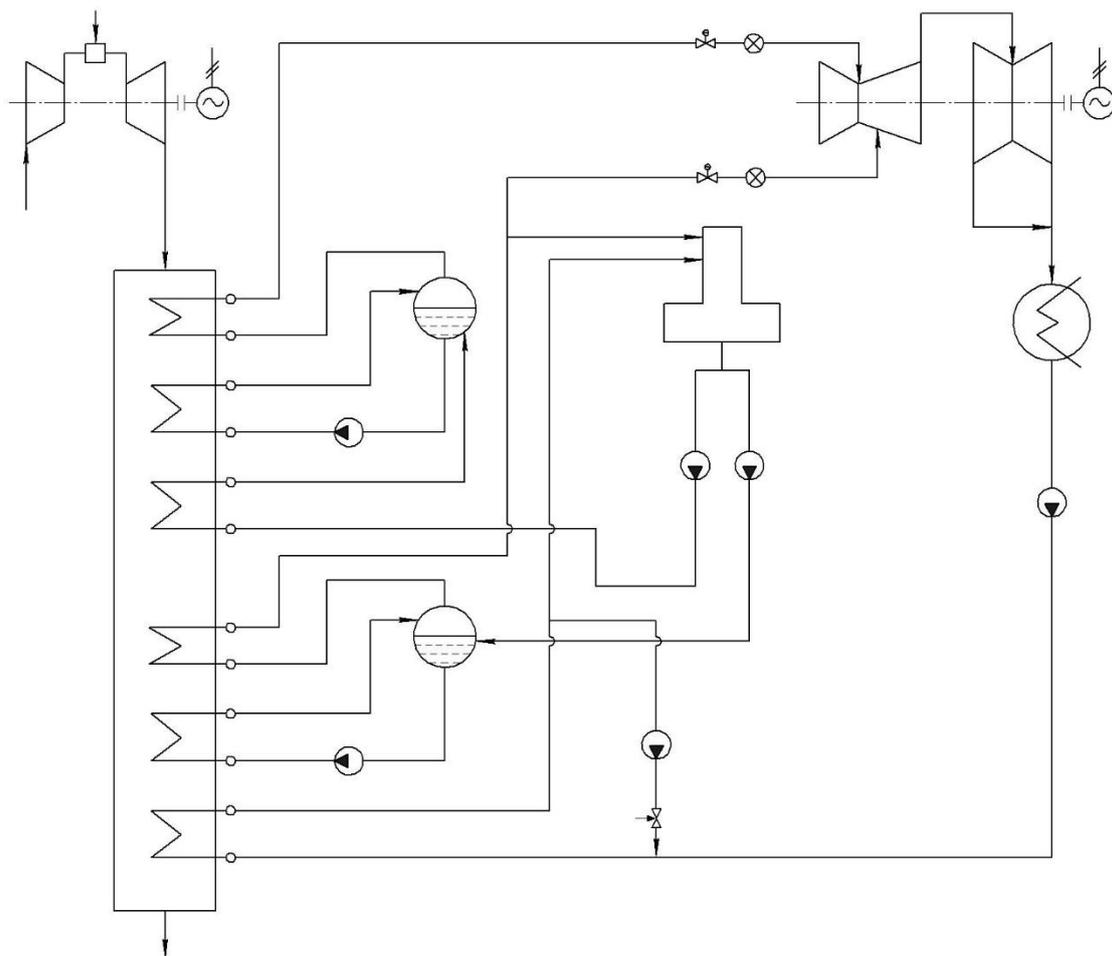


Рис. 1. Тепловая схема двухконтурной ПГУ

Результаты вариантных расчетов при изменении начального давления пара представлены на рис. 2.

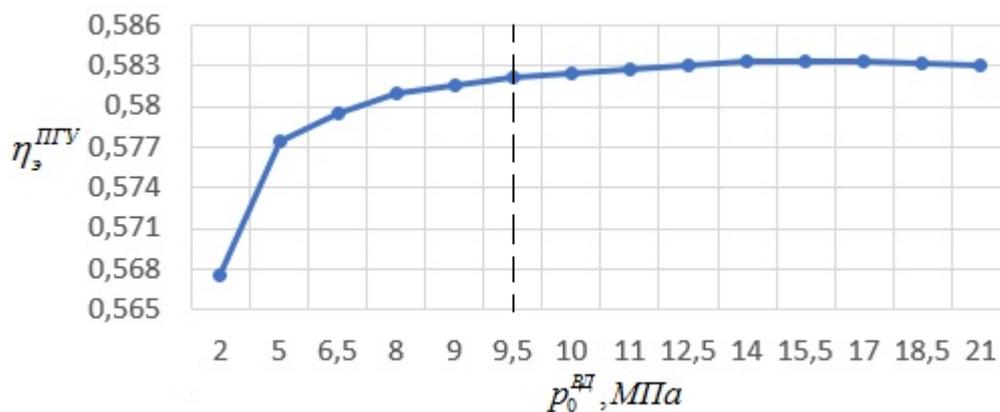


Рис. 2. График изменения $\eta_з^{ПГУ}$ от начального давления $p_0^{ВД}$

Вертикальная штриховая линия на рис. 2 обозначает границу по критерию предельного допустимого значения u_k .

График зависимости КПД ПГУ от начального давления пара имеет параболический характер, с зоной оптимума за границей допу-

стимых значений давления, в интервале от 14 до 18 МПа. Значительный рост абсолютного электрического КПД ПГУ происходит с ростом значений давления от 2 до 8 МПа. При дальнейшем росте начального давления до 17 МПа прирост КПД ПГУ незначительный, несмотря на рост КПД КУ. Это связано с характером изменения теплоперепада турбины, а также с увеличением конечной влажности.

При установлении влияния начальной температуры пара на эффективность ПГУ расчеты проводились на начальное давление пара $p_0^{ВД} = 9,5 \text{ МПа}$, соответствующее допусковой влажности. Изменение температуры пара возможно путем изменения температурного напора на выходе пара из пароперегревателя контура высокого давления.

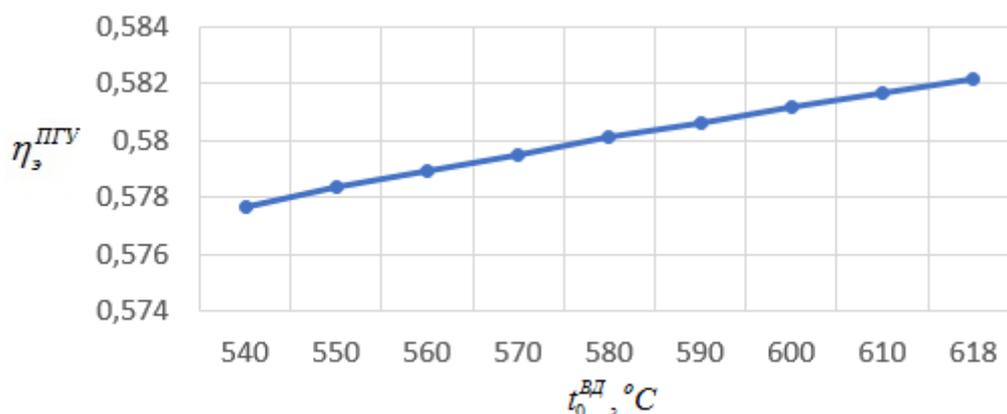


Рис. 3. График изменения $\eta_3^{ПГУ}$ от начальной температуры $t_0^{ВД}$

Анализируя полученные результаты, можно говорить, что с увеличением начальной температуры наблюдается заметный рост эффективности ПГУ, что видно из рис. 3. Объясняется этот факт значительным повышением КПД ПТУ, так как увеличивается средняя температура подвода теплоты, а также снижается конечная влажность.

Выводы

1. В условиях допустимой влажности в конце процесса расширения, максимум тепловой экономичности рассматриваемой парогазовой установки достигает значения 58,2 % при начальном давлении пара 9,5 МПа. Это значение несколько ниже достигнутой в настоящее время в мире максимальной величины КПД ПГУ, что обусловлено отсутствием промежуточного перегрева пара и применением двухконтурной схемы, вместо трехконтурной.
2. Повышение начальной температуры пара при постоянном давлении в любом случае ведет к повышению КПД ПГУ, за счет уменьшения влажности в цикле ПТУ и повышения его экономичности. Однако, использование максимально-возможной

температуры пара приводит к увеличению стоимости оборудования и трубопроводов за счет применения новых жаропрочных сталей, что требует обязательного технико-экономического обоснования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ольховский Г.Г., Трушечкин В.П. Перспективы повышения ГТУ и ПГУ // Электрические станции. – 2013. - № 1.- С. 2-7.
2. Култышев А.Ю., Степанов М.Ю., Поляева Е.Н. Некоторые вопросы выбора параметров пара и схемных решений в целях оптимизации параметров паротурбинного оборудования и проектно-конструкторских разработок // Теплоэнергетика. – 2014. - № 12.- С. 16.
3. M701J series [Электронный ресурс] // Mitsubishi Hitachi Power Systems. URL: <https://www.mhps.com/>
4. Трухний А.Д. Парогазовые установки электростанций: учебное пособие для вузов / А.Д. Трухний. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 648 с.

Научный руководитель: А.М. Антонова, к.т.н., доцент кафедры АТЭС ЭНИН ТПУ.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЭЦ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ НА ОПТОВОМ РЫНКЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

А.С. Максимов, А.В. Чалбышев
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
Сибирского отделения Российской академии наук

Существенную долю тепловых электрических станций в России составляют теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), которые функционируют в условиях Оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ).

В действующих в настоящее время условиях функционирования рынка электроэнергии в РФ необходимо решать следующие задачи оптимизации режимов работы ТЭЦ: определить состав работающего оборудования (за двое суток до начала расчетных суток); определить для принятого состава оборудования (за сутки до начала расчетных суток) три ступени мощности и две цены электроэнергии для работы на рынке на сутки вперед (РСВ); определить на балансирующем рынке (БР) на протяжении расчетных суток оптимальный прирост мощно-

сти по отношению к базовому режиму РСВ, который обеспечит максимальную дополнительную прибыль при заданных тепловых нагрузках и заданном составе работающего оборудования.

В настоящей работе представлена методика оптимизации режимов работы и выбора состава основного работающего оборудования ТЭЦ с учетом подробных характеристик оборудования и современных требований функционирования ТЭЦ на ОРЭМ (в составе электроэнергетической системы).

Подход к формированию ценовой заявки при планировании режимов работы ТЭЦ на РСВ. Особенностью планирования режимов работы ТЭЦ при участии на РСВ является подача ценовой заявки ежедневно за один день до наступления периода выработки электроэнергии. Ценовая заявка состоит из трех ступеней, в каждой из которых указывается величина мощности ТЭЦ, а в двух – минимальная цена, по которой электростанция готова будет выработать заявленное количество электроэнергии.

Для подачи максимально эффективной ценовой заявки на РСВ предлагается решать последовательно следующие задачи: минимизация электрической мощности ТЭЦ; максимизация электрической мощности ТЭЦ в теплофикационном режиме; максимизация электрической мощности ТЭЦ (в конденсационном режиме).

После определения мощностей соответствующей ступени решается задача по минимизации расхода топлива при заданных значениях электрической мощности и тепловой нагрузки. Ценовые заявки для второй и третьей ступеней мощности определяются из выражений:

$$C_{st\ i}^{ee} = \frac{B_{st\ i} \times C^T \times a^{ee}(N_{st\ i}, Q) \times (1 + a_{pr}^{nor})}{N_{st\ i}}, i = 2, 3$$

где i – номер ступени ценовой заявки; $C_{st\ i}^{ee}$ – цена электроэнергии; $B_{st\ i}$ – расход топлива ТЭЦ; C^T – цена топлива; $N_{st\ i}$ – электрическая мощность ТЭЦ; a^{ee} – доля расхода топлива на выработку электроэнергии (определяется методом, который используется при определении тарифа на тепло); a_{pr}^{nor} – минимальная норма прибыли, при которой ТЭЦ согласна отпускать электроэнергию.

Оценка ожидаемого экономического эффекта от функционирования ТЭЦ на РСВ определяется как математическое ожидание при-

были на основе вероятности реализации различных значений цены электроэнергии на РСВ [1].

Содержательная постановка задачи выбора оптимального состава включенного оборудования может быть сформулирована следующим образом. Задан расчетный период времени (как правило, несколько суток). Период делится на временные интервалы. Обычно длина таких интервалов 8, 12 или 24 часа. Для каждого временного интервала заданы тепловые нагрузки внешних потребителей ТЭЦ. Принято, что в течение одного интервала не меняются: тепловая нагрузка потребителей, состав работающего оборудования и распределение тепловых и электрических нагрузок между этим оборудованием. Изменение указанных характеристик происходит на границах между интервалами времени. На интервале времени, предшествующем расчетному периоду (нулевой интервал), задан состав работающих агрегатов. Для неработающих агрегатов задается время простоя с момента последнего останова до начала расчетного периода. Требуется найти такие составы работающего оборудования ТЭЦ для каждого временного интервала, которые с учетом ожидаемой прибыли при нормальной эксплуатации за вычетом пусковых затрат обеспечат максимальную суммарную ожидаемую прибыль ТЭЦ на РСВ за расчетный период. Необходимым условием применения излагаемого далее метода оптимизации является требование, чтобы любой агрегат, выключенный из работы в начальный момент некоторого интервала расчетного периода мог быть включен в работу в начальный момент любого последующего интервала расчетного периода. Данное условие выполняется для котлов и турбин ТЭЦ.

На каждом временном интервале может возникнуть необходимость рассмотрения десятков и даже сотен вариантов состава работающего основного оборудования. Если для всех этих вариантов решать нелинейные задачи оптимизации для выбора трех ступеней мощности на РСВ, необходимые для расчета математического ожидания прибыли, то это потребует неприемлемо большого расхода вычислительных ресурсов. Эффективный способ преодоления данных трудностей основан на линеаризации целевой функции и ограничений-неравенств исходных нелинейных задач в некоторых точках и решении линеаризованных задач. Более подробно алгоритм выбора оптимального состава включенного генерирующего оборудования ТЭЦ представлен в [2].

Использование предлагаемых методических разработок представлено на примере крупной промышленно-отопительной ТЭЦ. Установленные мощности станции: электрическая – 655 МВт и тепло-

вая – 1147 Гкал/ч. На электростанции установлено 8 энергетических паровых котлоагрегатов и 5 турбоагрегатов, которые условно можно разделить на 3 группы, работающие на общие коллектора острого пара. Первая группа, состоящая из 4 котлоагрегатов марки БКЗ-420-140, снабжает паром два производственно-отопительных турбоагрегата ПТ-60-130/13, один теплофикационный турбоагрегат марки Т-175/210-130 и РОУ. Вторая и третья группы являются дубль блоками. Вторая группа состоит из двух паровых энергетических котлоагрегатов БКЗ-500-140, снабжающих паром турбоагрегат Т-175/210-130. Третья группа включает два котлоагрегата БКЗ-500-140 и БКЗ-820-140, острый пар от которых поступает на турбину Т-185/220-130.

В результате решения задач на основе представленной методики выбора состава генерирующего оборудования на тринадцатой итерации получен искомый состав оборудования (Таблица 1).

Табл. 1. Результаты выбора состава работающего оборудования

| Временной интервал | Турбоагрегаты | | | | | Котлоагрегаты | | | | | | | | Матем. ожидание прибыли, тыс.руб |
|--------------------|---------------|---|---|---|---|---------------|---|---|---|---|---|---|---|----------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 1 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | 842 |
| 2 | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | 1516 |
| 3 | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | 1917 |

Пример формирования ценовой заявки для РСВ. С помощью предлагаемого в настоящей работе подхода к решению задач оптимального распределения нагрузок между агрегатами ТЭЦ при его работе на РСВ были проведены оптимизационные расчеты с целью определения трех ступеней электрической мощности. Расчеты проводились при тепловой нагрузке теплосети – 797 Гкал/час, нагрузке в паре 1,3 МПа – 28 т/ч и минимальной норме прибыли ТЭЦ (при которой она готова производить электроэнергию) – 20 %. Результаты представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Основные результаты расчетов 3-х ступеней электрической мощности для подачи ценовой заявки на РСВ

| Параметр | I ступень | II ступень | III ступень |
|----------------------------------|-----------|------------|-------------|
| Электрическая мощность ТЭЦ (МВт) | 384 | 495 | 641 |
| Расход топлива, т у.т./ч | 204,6 | 221,3 | 280,5 |
| Ценовая заявка, руб/МВтч | 0 | 501,0 | 734,7 |

Методика решения и примеры расчетов задачи максимизации дополнительной прибыли ТЭЦ при работе на балансирующем рынке электроэнергии представлены в работе [3].

Выводы. В результате разработана оригинальная методика комплексной оптимизации работы ТЭЦ на ОРЭМ, включающая: выбор состава работающего оборудования; оптимизацию режимов работы и формирование ценовых заявок для РСВ; определение эффективного режима работы на БР. Результаты, полученные в работе, могут использоваться как на практике, так и в дальнейших исследованиях при расчетах режимов работы энергетических систем, в состав которых входят ТЭЦ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Клер А.М., Максимов А.С., Степанова Е.Л., Чалбышев А.В. Задачи внутренней оптимизации режимов функционирования ТЭЦ при работе на Рынке на сутки вперед // Энергетик.- 2015.- N 8.- С. 20-23.
2. Клер А.М., Максимов А.С., Чалбышев А.В., Степанова Е.Л. Выбор оптимальных составов включенного оборудования и режима работы ТЭЦ на Рынке на сутки вперед // Известия Российской академии наук. Энергетика.- 2015.- N 4.- С. 11-14.
3. Клер А.М., Максимов А.С., Чалбышев А.В. Оптимизация режимов работы ТЭЦ для максимизации прибыли в условиях Балансирующего рынка электроэнергии // Известия Российской академии наук. Энергетика.- 2014.- N 2.- С. 71-80.

Научный руководитель: А.М. Клер, д-р техн. наук, заведующий отделом теплосиловых систем, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

ДИСПЕРСНОСТЬ ЧАСТИЦ ЖИДКОСТИ ПРИ СХОДЕ ПЛЕНКИ С КРОМОК СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК ТУРБИННЫХ СТУПЕНЕЙ

А.А. Матвеева, Л.А. Беляев, А.С. Зайцев, С.А. Шевелев
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС

Экономичность турбинных ступеней работающих в области влажного пара, а также их эрозионный износ, в значительной степени зависит от дисперсности частиц жидкости. Основным источником образования крупнодисперсной влаги является дробление пленок в кромочном следе лопаток.

В настоящее время в научной литературе приведены данные по дисперсности влаги в кромочном следе в зависимости от формы выходной кромки и режимных параметров течения [9]. Однако точность полученных результатов недостаточна в связи с тем, что измерения проводились с помощью зонда отпечатков. Как известно, зонд отпечатков улавливает частицы, обладающие большой инерцией, другие же частицы, следующие за линиями тока несущей среды, не попадают в приемное окно. Также как любой зонд, зонд отпечатков нарушает естественную газодинамическую структуру потока.

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение процесса дробления пленки жидкости в кромочном следе и определение дисперсности образовавшихся частиц в широком диапазоне режимных параметров. Так как акцент в работе сделан на процесс разрушения пленки, то в качестве несущей среды взят воздух, что исключает влияние других факторов на дисперсность частиц жидкости. Кроме того, воздух является оптически прозрачной средой, что позволяет визуализировать процесс дробления с помощью видеосъемки скоростной видеокамерой.

Экспериментальная установка, на которой проводились исследования, представлена на рисунке 1. В плоскости симметрии дозвукового сопла помещалась исследуемая модель с толщиной кромки Δ . Пленка на лопатке формировалась подачей жидкости через отверстие на ее поверхности. Изменение геометрических параметров модели осуществлялось изменением формы и размера пластин, а вариация режимов обтекания – изменением отношения давления ($\varepsilon = P_{вых} / P_{вх}$) на сопло и, как следствие, изменением скорости потока. Исследования проводились для лопаток с толщиной кромки $\Delta = 1, 2, 3$ мм, плоской и скругленной формы; ε варьировалось в диапазоне 0,5..0,9.

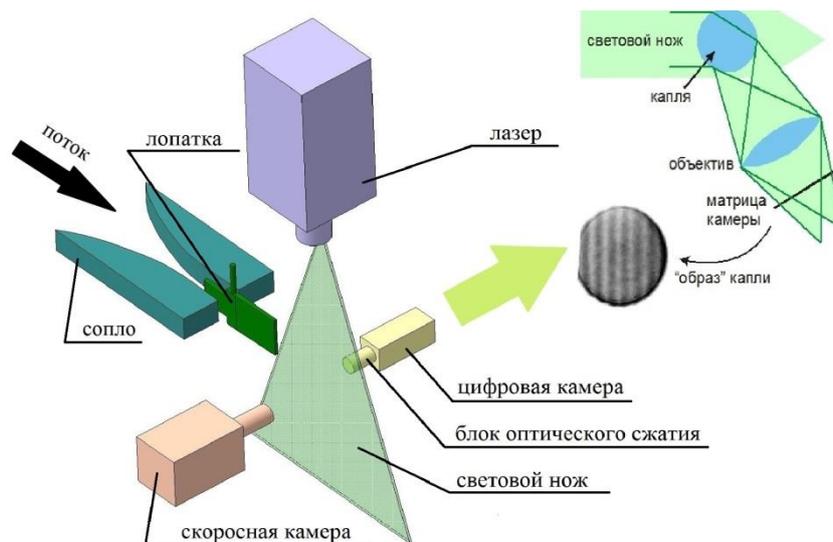


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Определение размеров капель производилось оптическим методом «Interferometric Particle Imaging» (IPI), основные положения которого изложены в [1, 3-5]. При проведении экспериментов, для минимизации погрешности, были соблюдены рекомендации [2] для измерений диаметров капель. Итоговая погрешность определения размеров мелкодисперсных капель не превысила 2,5 %.

Процесс дробления пленки жидкости в кромочном следе фиксировался при помощи скоростной видеокамеры Photron FASTCAM SA1.1 под увеличением в проходящем свете с частотой съемки 72000 кадров в секунду. Пример кинограммы для скругленной кромки приведен на рисунках рисунке 2.



Рис. 2. Кинограмма процесса схода пленки с лопатки со скругленной кромкой. Интервал между кадрами $1,068 \cdot 10^{-4}$ с.

На поверхности лопатки образовывалась пленка жидкости, толщина которой составила 300..400 мкм независимо от толщины и формы кромки. Влага натекала на кромку лопатки, где происходило накопление некоторого «критического» ее количества. Далее происходило вытягивание язычка жидкости в область аэродинамической тени лопатки. При этом следует отметить, что аккумуляция и срыв язычка происходили на кромке у плоскости, противоположной той, по которой двигалась пленка. При попадании язычка в область высокой скорости основного потока происходило практически мгновенное разрушение части язычка, попавшей в несущий поток. Зависимость

расстояния, на котором происходит разрушение от \mathcal{E} представлена на рисунке 3. Часть язычка, не попавшая в поток, снова стягивалась к лопатке, и цикл начинался заново. Иногда происходил отрыв от язычка относительно крупного бесформенного сгустка непосредственно в области аэродинамической тени. Этот сгусток дрейфовал с незначительной скоростью и разрушался при попадании в основной поток. Частота цикла в эксперименте оставалась практически неизменной как при изменении размеров и формы кромки, так и при изменении режимных параметров и составила 200..240 Гц.

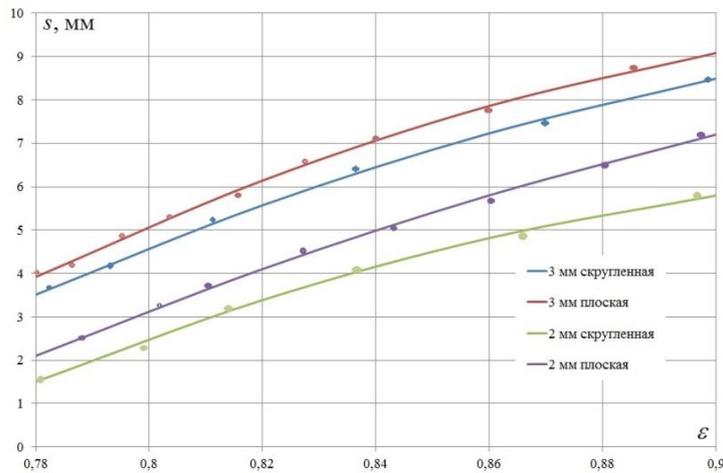


Рис. 3. Расстояние разрушения пленки.

Сравнение дисперсности частиц в кромочном следе с результатами работы [8] представлено на рисунке 3. Выявленное значительное отличие объясняется большей чувствительностью к частицам малого размера метода, используемого в настоящей работе. Влияния формы кромки на дисперсность в настоящей работе не выявлено.

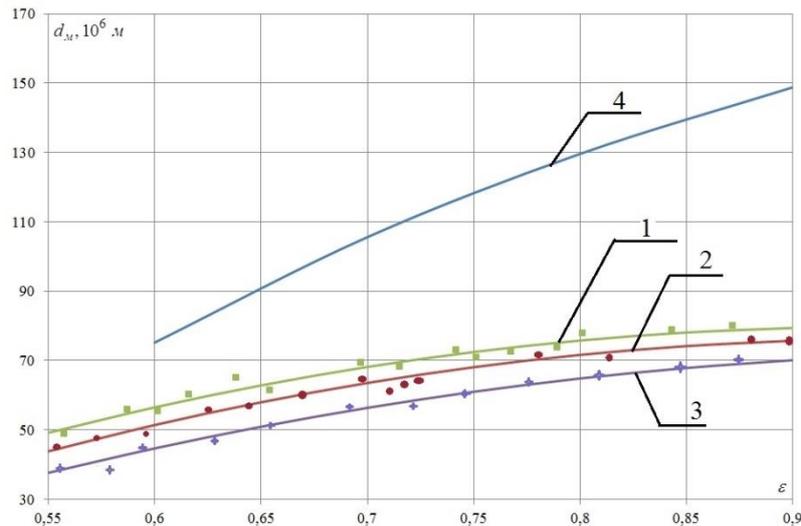


Рис. 4. Влияние толщины скругленной кромки на массовый спектр капель влаги в кромочном следе. 1 – $\Delta=1$ мм; 2 – $\Delta=2$ мм; 3 – $\Delta=3$ мм; 4 – данные [10], $\Delta=3$ мм.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М. Интерферометрический метод измерения диаметров капель // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 1. С. 1–13.
2. Dehaeck S., Beeck J. P. A. J. van Designing a maximum precision interferometric particle imaging set-up // Experiments in Fluids, 42 (2007). 767-781.
3. Glantschnig W.J., Chen S. Light scattering from water droplets in the geometrical optics approximation // Applied Optics. 1981. Vol. 20. P. 2499–2509.
4. Kawaguchi T., Akasaka Y., Maeda M. Size measurements of droplets and bubbles by advanced interferometric laser imaging technique // Measurement Science and Technology. 2002. Vol. 13. P. 308-316.
5. Konig G., Anders K., Frohn A. A new light-scattering technique to measure the diameter of periodically generated moving droplets // J. of Aerosol Science. 1986. Vol. 17, No. 2. P. 157-167.
6. Willert C. (1996) The fully digital evaluation of photographic PIV recordings. Appl. Sci. Res., Vol. 56, pp. 79-102.
7. «Интерферометрический метод измерения диаметров частиц (ИПИ). Руководство пользователя»: Институт теплофизики ми С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск. – 2013.
8. Хизанашвили, М. Д. Исследование структуры потока влажного пара в сопловых решетках и внутриканальная сепарация: дис-

сертация кандидата технических наук / М. Д. Хизанашвили, Моск. энерг. ин-т (МЭИ) . – 1973 . – 227 с.

Научный руководитель: Л.А. Беляев, к.т.н., доцент каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЯМОТОЧНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ

И.С. Дергачёв, И.Г. Ткаченко
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5012

Целью данной исследовательской работе является изучение методики расчета прямоточных парогенераторов, в данном случае парогенератора БН-600.

Задачи, поставленные нами в данном исследовании:

- Изучить методику расчета прямоточных парогенераторов
- Рассмотреть особенности выбранного парогенератора, дополнить методику и показать результаты расчета.
- Произвести расчет данного парогенератора с другим теплоносителем и получить мощность и паропроизводительность равную значению из курсового проекта.
- Сравнить полученные данные, с данными уже посчитанными ранее.
- Сделать вывод по полученным данным и по методике расчета.

Методика, использованная нами в курсовом проекте, была взята из [2, стр. 363]. Эта методика рассматривает прямоточный парогенератор с натриевым теплоносителем.

В курсовом проекте задаются исходные данные. Исходя из этих данных, определяем, что нам искать в первую очередь: паропроизводительность, расход ТН, или тепловую мощность парогенератора. Для этого составляем уравнение баланса и находим неизвестную величину. Далее ищем тепловую мощность экономайзера, испарителя, перегревателя и промежуточного перегревателя. Строим T-Q диаграмму.

Дальше переходим к определению числа трубок и модулей парогенератора. Для этого необходимо знать толщину стенок трубки и физические характеристики материала трубок. Определив число модулей, находим расход ТН и паропроизводительность на один модуль.

В зависимости от модуля разбиваем его на характерные участки, и ведем расчет поверхности нагрева парогенератора и длины труб.

Для этого необходимо рассчитать коэффициенты теплопередачи. Они считаются по характерным величинам ТН и РТ на данном участке. Расчет ведется итерационно. Обычно, что бы погрешность составляла, меньше 2%, хватает трех итераций.

Рассчитав все участки, суммируем длину труб, она не должна превысить длинны труб, которые изготавливают на заводе (17м.).

Натриевый быстрый реактор обладает модульным прямоточным парогенератором. Теплоносителем является натрий, что уже оказывает влияние на методику расчета. Необходимо знать физические характеристики теплоносителя при различных температурах..

Так как в данном ПГ существует промежуточный перегрев пара, то мы рассчитываем испаритель, экономайзер и промежуточный перегреватель и делим его на несколько участков:

- участок конвективного теплообмена не кипящей жидкости (АБ);
- участок поверхностного кипения (БВ);
- участок развитого кипения (ВГ);
- участок ухудшенного теплообмена (ГД).
- участок ухудшенного теплообмена (МС).

Для расчета коэффициента теплоотдачи, необходимо было воспользоваться формулами из [1], так как полученные характеристики ТН и РТ не входят в область допустимых значений формулы из [2].

Табл. 1. результаты расчета

| Величина | Обозначение | Na | Pb-Bi |
|---|----------------------|--------|----------|
| Тепловая мощность, МВт | Q_{II}^M | 360 | 360 |
| Число модулей | m'_{II} | 8 | 10 |
| Расход рабочего тела через модуль, кг/с | D_{2M} | 17,58 | 14,06 |
| Расход теплоносителя, кг/с | G_{1M} | 203,5 | 1450 |
| Диаметр и толщина стенки трубы теплопередающей поверхности, мм | $d_n \cdot \delta_p$ | 14 × 1 | 22 × 1,5 |
| Число труб в модуле | n'_m | 547 | 271 |
| Шаг между трубами, мм | s_{II} | 21 | 33 |
| Внутренний диаметр кожуха, м | $d_{вн.кожуха}$ | 0,567 | 0,627 |
| Площадь проходного сечения трубок, м ² | $f_{вн}$ | 0,0618 | 0,0768 |
| Площадь проходного сечения межтрубного пространства, м ² | $F_{МП}$ | 0,1799 | 17,96 |
| Гидравлический диаметр, мм | d_z | 20,75 | 32,61 |

| | | | |
|--|------------------|---------------------------|---------------------------|
| Термическое сопротивление стенки трубки теплопередающей поверхности, °С/Вт. | R_{cm} | $2,7 \cdot 10^{-5}$ | $4,1 \cdot 10^{-5}$ |
| Термическое сопротивление окислов, °С/Вт. | $2 \cdot R_{ок}$ | $2 \cdot 6 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 6 \cdot 10^{-5}$ |
| Термическое сопротивление отложений, °С/Вт. | $R_{отл}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ |
| Участок АБ | | | |
| Средняя скорость теплоносителя, м/с | w_{1AB} | 1,31 | 0,791 |
| Коэффициент теплоотдачи от натрия к стенке трубки теплопередающей поверхности, Вт/м ² ·°С | α_1^{AB} | $2,39 \cdot 10^5$ | $3,2 \cdot 10^5$ |
| Средняя скорость рабочего тела, м/с | w_{2AB} | 0,406 | 0,259 |
| Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде, $\frac{Вт}{м^2 \cdot °С}$ | α_2^{AB} | $3,35 \cdot 10^3$ | $2,1 \cdot 10^3$ |
| Коэффициент теплопередачи, $\frac{Вт}{м^2 \cdot °С}$ | k_{AB} | $1,54 \cdot 10^3$ | $1,15 \cdot 10^3$ |
| Средний температурный напор, °С | Δt^{AB} | 61,69 | 63,61 |
| Расчётная площадь теплопередающей поверхности, м ² | F_{AB} | 107,55 | 108,99 |
| Участок БВ | | | |
| Средняя скорость теплоносителя, м/с | w_{1BB} | 1,315 | 0,792 |
| Коэффициент теплоотдачи от натрия к стенке трубки теплопередающей поверхности, $\frac{Вт}{м^2 \cdot °С}$ | α_1^{BB} | $2,73 \cdot 10^5$ | $3,32 \cdot 10^5$ |
| Средняя скорость рабочего тела, м/с | w_{2BB} | 0,477 | 0,304 |
| Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде, $\frac{Вт}{м^2 \cdot °С}$ | α_2^{BB} | $1,67 \cdot 10^5$ | $1,52 \cdot 10^5$ |
| Коэффициент теплопередачи, $\frac{Вт}{м^2 \cdot °С}$ | k_{BB} | $2,8 \cdot 10^3$ | $2,51 \cdot 10^3$ |
| Средний температурный напор, °С | Δt^{BB} | 28,62 | 29,61 |
| Расчётная площадь теплопередающей поверхности, м ² | F_{BB} | 5,85 | 7,94 |
| Участок ВГ | | | |
| Средняя скорость теплоносителя, м/с | w_{1BG} | 1,323 | 0,794 |
| Коэффициент теплоотдачи от натрия к стенке трубки теплопередающей поверхности, $\frac{Вт}{м^2 \cdot °С}$ | α_1^{BG} | $2,35 \cdot 10^5$ | $2,4 \cdot 10^5$ |

| | | | |
|---|-------------------------|--------------------|--------------------|
| Средняя скорость рабочего тела, м/с | w_{2BG} | 0,78 | 0,65 |
| Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$ | α_2^{BG} | $1,84 \cdot 10^5$ | $1,63 \cdot 10^5$ |
| Коэффициент теплопередачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$ | k_{BG} | $3,1 \cdot 10^3$ | $2,76 \cdot 10^3$ |
| Средний температурный напор, °C | Δt^{BG} | 45 | 48,9 |
| Расчётная площадь теплопередающей поверхности, м ² | F_{BG} | 79,13 | 81,27 |
| Участок ГД | | | |
| Средняя скорость теплоносителя, м/с | $w_{1ГД}$ | 1,336 | 0,797 |
| Коэффициент теплоотдачи от натрия к стенке трубки теплопередающей поверхности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$ | $\alpha_1^{ГД}$ | $2,29 \cdot 10^5$ | $0,364 \cdot 10^5$ |
| Средняя скорость рабочего тела, м/с | $w_{2ГД}$ | 1,86 | 8,69 |
| Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$ | $\alpha_2^{ГД}$ | $3,1 \cdot 10^3$ | $3,7 \cdot 10^3$ |
| Коэффициент теплопередачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$ | $k_{ГД}$ | $1,484 \cdot 10^3$ | $11,35 \cdot 10^3$ |
| Средний температурный напор, °C | $\Delta t^{ГД}$ | 80,1 | 85,8 |
| Расчётная площадь теплопередающей поверхности, м ² | $F_{ГД}$ | 45,13 | 17,62 |
| Модуль испарителя | | | |
| Расчётная площадь теплопередающей поверхности модуля испарителя, м ² | $F_{И}$ | 237,7 | 215,9 |
| Площадь теплопередающей поверхности модуля испарителя с 10 %-ым запасом, м ² | $F_{\text{испаритель}}$ | 261,5 | 237,5 |
| Общая длина труб теплопередающей поверхности, м | $L_{\text{испаритель}}$ | 51636,8 | 30352 |
| Длина трубки теплопередающей поверхности в одном модуле, м | $L_{И}$ | 11,8 | 14 |

Как видно из таблицы, при подсчете парогенератора со свинцово-висмутовым теплоносителем, многие характеристики сильно меняются. Это связано с физическими свойствами данного теплоносителя.

Используя свинцово-висмутовый теплоноситель мы увеличиваем теплообменную поверхность парогенератора, а следовательно, необходимо переделывать конструкцию модуля. Из этого делаем вывод, что физически невозможно заменить теплоноситель в парогене-

раторе, без внесения конструктивных изменений в его модули, так как это вызовет тепловой кризис.

Использование свинцово-висмутового теплоносителя экономически не выгодно, в связи с плохими теплофизическими свойствами по сравнению с натриевым теплоносителем.

Вывод:

В данной работе была рассмотрена методика теплового расчета вертикального прямоточного парогенератора БН-600. Были приведены особенности данного парогенератора и результаты расчета с двумя разными теплоносителями. Был сделан вывод о необходимом конструкторском решении для замены теплоносителя.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кириллов П.Л. и др. Справочник по теплогидравлическим расчётам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.: ил.
2. Рассохин Н.Г. Парогенераторные установки атомных электростанций: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 384 с.: ил.
3. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1980. – 424с.

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, ст. преподаватель каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

**ПОРОГОВЫЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В
МУЛЬТИПЛИЦИРУЮЩИХ СИСТЕМАХ С ТОРИЕМ**

В.В. Кнышев

Томский политехнический университет
ФТИ, ФЭУ, группа 0АМ52

Для надежной оценки эффективности уран-ториевого ЯТЦ, имеет первостепенное значение точность оценок сечений взаимодействия нейтронов с ядрами топливных композиций. В настоящее время имеется множество разноплановых экспериментальных и расчетных ядерных данных, довольно полно они представлены в следующих библиотеках оцененных ядерных данных – ENDF (США), JEFF (Европа), JENDL (Япония), TENDL (РФ), РОСФОНД (РФ). Одним из

наиболее ценных источников информации является международная библиотека ENDSF, в которой данные не только рекомендованные, но и экспериментальные.

Несмотря на это во всех существующих базах ядерных данных, в том числе и оцененных, практически, отсутствует информация о пороговых нейтронных реакциях на ядрах ^{232}Th , а имеющиеся значения выходов и сечений отличаются на порядки. Что касается сечений радиационного захвата, то текущее положение вещей наглядно демонстрируют исследования, проведенные в Японии (Киотский университет, 2004 г.) [1]. В работе проведено сравнение значений сечений радиационного захвата на ядрах ^{232}Th , полученные результаты говорят о том, что существует значительное расхождение (до ~40%) между библиотеками.

Очевидно, что множественность источников информации, их неполнота и рассогласование окажет влияние на результаты критических расчетов решеток и систем с торием.

Расчетные оценки для мультиплицирующих торийсодержащих систем $\{(m\%U, n\%Th)O_2, (m\%Pu, n\%Th)O_2\}$ действующих на тепловых нейтронах показали, что формализм, описывающий процессы взаимодействия нейтронов с ядрами, включая поглощение и рассеяние, не всегда обеспечивает удовлетворительное согласие с экспериментом [2].

Таким образом, существует необходимость в корректировке и подготовке ядерных данных, используемых в расчетах параметров резонансного поглощения в решетках и системах содержащих торий.

Аналитическая модель нейтронно-физических процессов в мультиплицирующих торийсодержащих системах

Механизм взаимодействия нейтрона в области разрешенных и неразрешенных резонансов, эффекты резонансного поглощения и рассеяния, относятся к классу волновых процессов и могут рассматриваться как произведение эффективного «размера» нейтрона $\pi(\lambda_n/2\pi)^2$ на проницаемость фазовой поверхности $p = 4k_1k_2/(k_1 + k_2)^2$, сформированного внутриядерным потенциалом $V_c(r)$ тяжелых ядер:

$$\sigma_c = \pi \left(\frac{\lambda_n}{2\pi} \right)^2 \cdot p, \quad (1)$$

где проницаемость p может быть найдена из уравнения Шредингера:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) \right] \psi(r, t) = E_n \psi(r, t). \quad (2)$$

На этапе расчетной оценки использована модель Ферми-газа, в рамках которой, с учетом неупругих взаимодействий, потенциал $V_c(r)$ должен быть представлен в виде:

$$V_c(r) = V_r(r) + iV_m(r), \quad (3)$$

где действительная часть выражения (3) отвечает за упругие каналы ядерных взаимодействий, мнимая часть за неупругие взаимодействия.

Одним из таких потенциалов, отвечающий требованию уравнения (3), является потенциал Ферми:

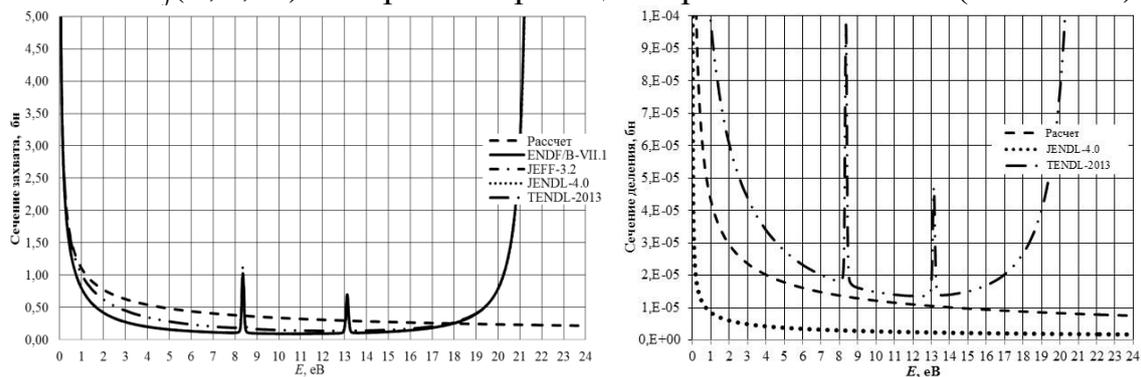
$$V_c(r) = \frac{2\pi\hbar^2}{\mu} \cdot b \cdot \delta(r) = U \cdot \delta(r), \quad (4)$$

где $\delta(r)$ – Дельта-функция Дирака; b – длина рассеяния, параметр $b = x + iy$, в общем случае, является комплексной величиной, определяемый экспериментальным или расчетным способом.

Найденные значения сечений в интервале энергий от 10^{-3} до 24 эВ, сравнивались с данными приведенными в библиотеках оцененных ядерных данных (ENDF/B, JEFF-3.2, JENDL-4.0, TENDL-2013), результаты таких сравнений приведены на рис. 1.

В сравнительном анализе использована российская библиотека нейтронных данных TENDL [3]. Вообще, структура резонансной области поглощения ядер ^{232}Th достаточно детально исследована в работах [4,5] и работах других исследователей [1].

Таким образом, выбранная нами модель ядра и форма потенциала в интервале энергий от 10^{-3} до 18 эВ с удовлетворительной для практики точностью позволяет производить расчет микроскопических сечений $\sigma_f(E, r, \Omega)$ нейтронных реакций в решетках с ^{232}Th (см. Рис. 1).



Зависимость σ_γ ядра ^{232}Th в области энергий нейтрона от 10^{-3} до 24 эВ

Зависимость сечения σ_f ядра ^{232}Th в области энергий нейтрона от 10^{-3} до 24 эВ

Рис. 1. Результаты сравнений расчетных значений сечений ^{232}Th с оцененными ядерными данными (JENDL-4.0, TENDL-2013)

Дальнейшие ядерно-физические исследования проведены с использованием файлов библиотек оцененных данных (ENDF/V и JENDL-4.0) и аналитически найденных значений сечений, кода программы MCU5 и расчетных методик и техник [6], для расчета k_{eff} . При подготовке ядерных констант использована технология, разработанная в ИБРАЭ РАН [6].

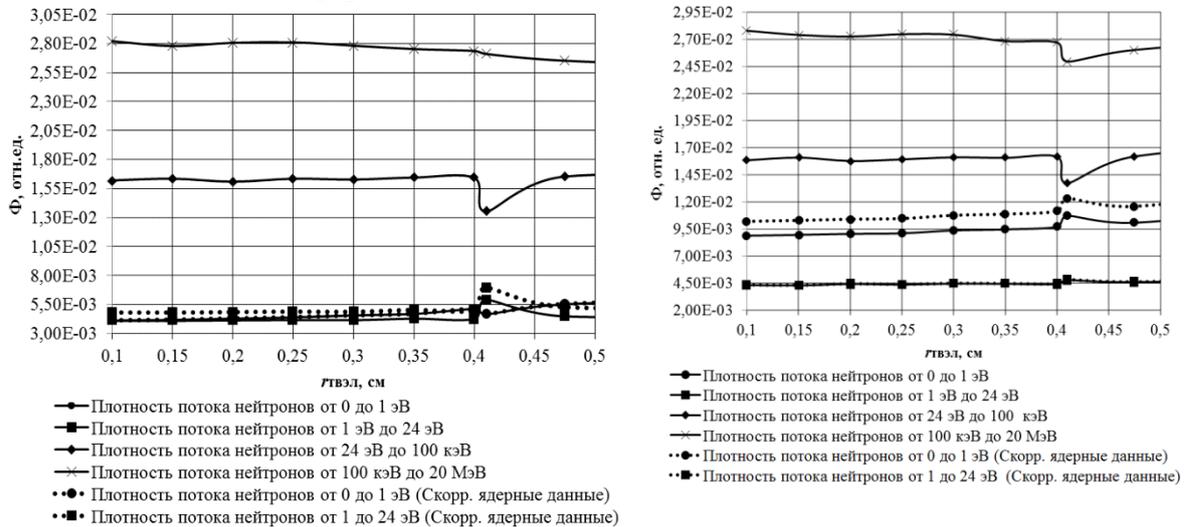


Рис. 2. Пространственно-энергетическое распределение плотности потока нейтронов в ТВЭЛ полячейки УГР

Такой подход позволил не только провести корректировку ядерных констант в области энергий от 10^{-3} до 18 эВ, но и учесть тонкую структуру резонансной области поглощения нейтронов ядрами ²³²Th. Результаты расчетных исследований для мультиплицирующих решеток с торием приведены в графическом виде на рис. 2.

Заклучение

В работе приведены результаты исследований и численных экспериментов, направленных на определение ядерно-физических и радиационных характеристик мультиплицирующих торийсодержащих систем. Показана необходимость в корректировки ядерных констант, используемых в расчетах на критичность систем с торием.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Shiroya S., Kudo K. Criticality Analysis of Highly Enriched Uranium/Thorium Fueled Thermal Spectrum Cores of Kyoto University Critical Assembly // PHYSOR 2004 -The Physics of Fuel Cycles and

- Advanced Nuclear Systems: Global Developments. - Illinois: American Nuclear Society, 2004.
2. Shamanin I.V. The Use of (Th,U,Pu)O₂ Fuel in a Water Water Energy Reactor: Physics and Fuel Cycle Simulation by means of the V.S.O.P. (97) Computer Code // Forschungszentrum Julich. FZJ – ISR – IB – 1/1999. – 40 p.
 3. Абрамович С.Н. База данных для численного моделирования накопления осколков в топливе энергетических реакторов// Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 1996. – №3. – с.40–61.
 4. Шаманин И. В. Следствия, вызванные отличиями структур резонансной области поглощения ядер ²³⁸U и ²³²Th // Альтернативная энергетика и экология. – 2006. – № 11 (43). – С. 47–53.
 5. Shamanin I. Advantages of Thorium Nuclear Fuel for Thermal-Neutron Reactors // Advanced Materials Research. - 2015 - Vol. 1084. - p. 275-279.
 6. Подготовка полных библиотек ядерных данных в поточечном представлении на основе файлов оцененных данных ENDF/B-VII.0, JEFF-3.1.1, JENDL-4.0. Препринт / Ин-т проблем безопасного развития атом. энергетики РАН, № ИБРАЕ-2011-08. Д.А. Блохин, Е.Ф. Митенкова, А.И. Блохин – М.: ИБРАЭ РАН, 2011. – 58 с.

Научный руководитель: С.В. Беденко, к.ф.-м.н., доцент каф. ФЭУ ФТИ ТПУ.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТУРБОУСТАНОВОК АЭС РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ

А.С. Королев
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5031

Растущий спрос на энергию и все более широкая осведомленность об экологических выгодах чистой ядерной энергии создают основу для "ренессанса" ядерной энергетики, которая может способствовать решению проблем, связанных с энергетической безопасностью, экономическим развитием и улучшением качества окружающей среды[1].

Основной целью и задачей, стоящей перед проектировщиками электростанций, является достижение максимальной эффективности,

улучшение гибкости в эксплуатации и увеличение надежности станции [2].

Одним из важнейших агрегатов электростанции является турбина, предназначенная для преобразования энергии пара в механическую энергию вращения ротора.

Сейчас наблюдается расширение спроса рынка на более мощные реакторы, чем те, которые строились в период централизованного планирования экономики. В ближайшие годы единичная мощность водо-водяных реакторов российского производства должна вырасти минимум до 1500 МВт[3]. В связи с этим возникает вопрос о возможных проектных решениях в области компоновки электростанции турбоагрегатами. Будут ли проектироваться новые, более мощные турбины или же энергоблоки будут комплектоваться тремя турбинами, суммарной производительностью 1500 МВт?

К распространенным в России мощным паровым турбоустановкам для атомных электростанций относятся [2]:

Табл. 1. Тип турбоустановки и ее конструкционный состав

| | |
|------------------|--------------------|
| К-220-44/3000 | ЦВД + 2 ЦНД |
| К-500-60/1500 | ЦВСД + ЦНД |
| К-1000-60/1500-1 | ЦВД + ЦСД + 3 ЦНД |
| К-1000-60/1500-2 | ЦВД+3 ЦНД |
| К-1000-60/3000 | 2 ЦНД + ЦВД+ 2 ЦНД |

После распада СССР некоторые единственные в своем роде предприятия, остались за пределами России, среди них и украинский завод «Турбоатом», расположенный в Харькове [3]. Только на этом заводе среди всех предприятий экс-советского энергомашиностроительного комплекса выпускаются тихоходные паровые турбины для АЭС.

Турбоустановки на частоту вращения 1500 об/мин отличаются повышенной экономичностью и надёжностью[4], и по условиям многих потенциальных зарубежных контрактов российского атомпрома, обязательным условием является комплектование энергоблоков именно тихоходными турбинами[3].

Для реализации программы ввода новых энергетических мощностей атомных электростанций ОАО «Турбоатом» предлагает использовать накопленный объединением опыт проектирования, изготовления и эксплуатации турбин мощностью 500 и 1000 МВт на частоту вращения ротора 1500 об/мин. В настоящее время из этой серии, изготовленных ОАО «Турбоатом» в количестве 22 турбоагрегатов, в эксплуатации на АЭС находятся 17 турбин с единичной мощностью

1000 МВт (8 турбин в Украине, 7 турбин в России и 2 турбины в Болгарии).

Уровень напряжений во многих элементах тихоходных турбин, в том числе в профильной и хвостовой частях рабочих лопаток и дисков последних ступеней, ниже соответствующего уровня быстроходных турбин более чем в 1,5 раза. Кроме того, для деталей и узлов тихоходных турбин, используются только освоенные стали – не требующие применения титановых сплавов для рабочих лопаток последних ступеней. В турбинах данного класса внедрены рациональные методы борьбы с эрозионно-коррозионными процессами – одной из главных проблем обеспечения работоспособности и долговечности влажнопаровых турбин. Решены задачи эффективного удаления влаги из прочной части ЦВД и последних ступеней ЦНД. Важнейшим элементом турбин мощностью на частоту вращения 1500 об/мин производство ОАО «Турбоатом» является последняя ступень ЦНД с длиной рабочей лопатки 1450 мм с площадью выхлопа 18,9 м². Ступень надежно и экономично работает в широком диапазоне нагрузок.

При расчетном давлении в конденсаторе 5,9 кПа турбина К-500-60/1500 мощностью 500 МВт выполнена с одним двухпоточным ЦНД, а турбины мощностью 1000 МВт, рассчитанные на давление в конденсаторе 4 кПа, – имеют три ЦНД (рис. 1).

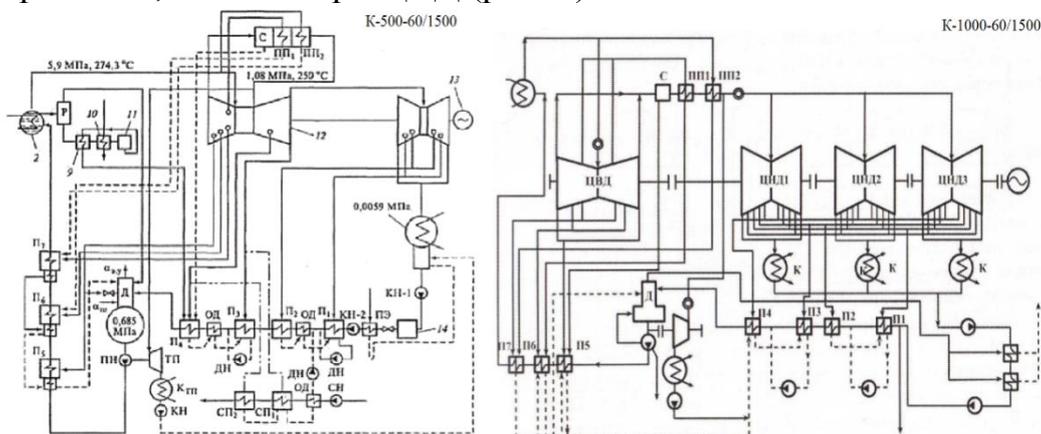


Рис. 1. Схемы турбоустановок К-500-60/1500 и К-1000-60/1500

Для удобства достоинства турбин относительно друг друга представим в виде таблицы (табл. 2).

Табл. 2. Достоинства турбоустановок

| К-500-60/1500 | К-1000-60/1500 |
|---|---|
| 1. Возможность работы станции на пониженной мощности; 2. Меньше число цилиндров с лопатками сильно подверженными эрозии; 3. Меньшие осевые габариты; 4. Более простая транспортировка; 5. Выше давление в конденсаторе. | 1. Меньше “вспомогательного” оборудования (сепараторы, подогреватели, пароперегреватели и т.д.); 2. Меньше площадка для установки; 3. Проще осуществлять пуск и останов; 4. Меньше вероятность выхода из строя; 5. Требуется меньше обслуживающего персонала. |

Заключение

Несмотря на ряд преимуществ турбоустановок К-500-60/1500, предпочтение отдается установкам с большей единичной мощности. Сейчас на базе имеющихся конструкторско-технологических решений с использованием производственного и эксплуатационного опытов в создании турбин большой мощности, ОАО «Турбоатом» предлагает для строительства новых АЭС паровые турбины нового поколения мощностью 1100, 1200 МВт, в которых реализованы современные конструктивные и технические решения, обеспечивающие высокие показатели надёжности, экономичности и ремонтпригодности, а также есть возможность отпуска пара на теплофикационные нужды до 1000 МВт от каждой турбины. При сохранении существующих конструкций корпусов и роторов ЦВД и ЦНД, модернизируются проточные части ступеней ЦВД и ступеней ЦНД.

В модернизируемых и вновь создаваемых турбоагрегатах будут внедрены:

- высокоэкономичные профили направляющих лопаток с овальной входной и относительно тонкой выходной кромками;
- усовершенствованные рабочие лопатки с цельнофрезерованными покрывными бандажами, имеющими многодроссельные осерадиальные уплотнения;
- оптимальные закрытые и открытые межвенцовые зазоры;
- улучшенные формы меридиональных очертаний межступенчатых и межвенцовых зазоров;
- усовершенствованные диафрагменные и концевые уплотнения.

Из-за сложных отношений между Россией и Украиной рассматриваются пути сотрудничества с одним из ведущих производителем

из дальнего зарубежья [3]. Скорее всего в ближайшее время будут спроектированы установки единичной мощностью 1500 МВт, без участия завода «Турбоатом».

ЛИТЕРАТУРА:

1. Муратов О.Э., Тихонов М.Н. "Ядерный ренессанс": новые возможности и проблемы // Экология промышленного производства. 2007, №3, С. 59-67.
2. Цветков А.М., Кросланд Р., Рич Г. Перспективы модернизации паровых турбин на Российских АЭС // Общие вопросы электроэнергетики. 2011, №1, С. 5-12.
3. Посысаев Ю.Ю. Развитие международной кооперации в энергетическом машиностроении России // Российский внешнеэкономический вестник. 2014, №3, С. 38-55.
4. Богомоллова Т.В., Мельников О.В. Сравнение последних ступеней тихоходных и быстроходных турбин большой мощности для АЭС // Вестник МЭИ. 2013, №2, С. 5-10.

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, ст. преподаватель каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

КОРПУС ПЕРЕРАБОТКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ КОЛЬСКОЙ АТОМНОЙ СТАНЦИИ

Е.А. Парилов
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5012

Кольская АЭС имеет двухконтурную схему с водо-водяным реактором корпусного типа ВВЭР-440 тепловой мощностью 1375 МВт, в эксплуатации находятся четыре энергоблока.

Каждый энергоблок состоит из реактора и двух турбогенераторов. На энергоблоках № 1(1973г.) и № 2 (1974г.) установлены реакторы типа ВВЭР-440 (проект В-230), а на энергоблоках № 3(1981г.) и № 4(1984г.) - реакторы типа ВВЭР-440 (проект В-213) [1].

За годы работы Кольской АЭС в ее хранилище накопилось большое количество кубового остатка жидких радиоактивных отходов (ЖРО).

Концепция системы обращения с ЖРО, разработана в середине 60-х гг. - упаривание и хранение кубового остатка, хранение смол и шлама в емкостях ХЖО с суммарным проектным объемом 8576 м³.

В процессе строительства АЭС Комплексы переработки ЖРО не были предусмотрены, следовательно, переработка и захоронение предполагалась при снятии АЭС с эксплуатации.

Исчерпание свободных объемов могло привести к невозможности продолжения эксплуатации блоков Кольской АЭС, а накопленные радиоактивные отходы представляли потенциальную опасность облучения людей и загрязнения окружающей среды в случае нарушения плотности ёмкостей.

В таблице 1 приведены сведения для каждого блока КАЭС и АЭС в целом по заполнению баков хранения жидких радиационных отходов на 1997г.

Общая концепция модернизации системы обращения с радиоактивными отходами на Кольской АЭС заключается в том, что радиоактивные отходы должны перерабатываться, храниться и транспортироваться на окончательное захоронение таким образом, чтобы на протяжении всего срока их потенциальной опасности они не оказывали вредного воздействия на человека и окружающую среду, при наибольшем сокращении их объёмов.

В 1997 году на Кольской АЭС приступили к строительству Комплекса переработки ЖРО и в декабре 2006 года начата промышленная эксплуатация первой очереди Комплекса.

Табл. 1. Сведения о заполнении баков хранения жидких радиационных отходов

| Блоки АЭС | Вид отходов | Проектный объем емкостей ХЖО, м ³ | Занятый объем, м ³ | Степень заполнения, % |
|-----------|-------------------------|--|-------------------------------|-----------------------|
| 1-2 | кубовый остаток | 2826 | 2484 | 87,9 |
| | шламы | 350 | 307 | 87,7 |
| | высокоактивные сорбенты | 350 | 290 | 82,9 |
| | низкоактивные сорбенты | 640 | 182 | 28,4 |
| всего | | 4166 | 3263 | 78,3 |
| 3-4 | кубовый остаток | 3210 | 2988 | 93,1 |
| | шламы | 400 | 312 | 78,0 |
| | высокоактивные сорбенты | 400 | 279 | 69,8 |

| Блоки АЭС | Вид отходов | Проектный объем емкостей ХЖО, м ³ | Занятый объем, м ³ | Степень заполнения, % |
|--------------|------------------------|--|-------------------------------|-----------------------|
| | низкоактивные сорбенты | 400 | 236 | 59,0 |
| всего | | 4410 | 3815 | 86,5 |
| Итого по АЭС | | 8576 | 7078 | 82,5 |

Переработка ЖРО направлена на освобождение емкостей, занятых ЖРО и очистку основной массы отходов от радионуклидов, концентрирование радионуклидов в минимальном объеме и перевод их в твердую фазу, обеспечивающую безопасное хранение в течение 300-500 лет.

Все ранее существовавшие технологии переработки ЖРО, приводили к увеличению объема отходов в 5-10 раз. Технология, примененная на Кольской АЭС, позволяет, наоборот, уменьшить объем ЖРО в 50 раз, что и позволяет в дальнейшем строить по соседству КАЭС -2.

Первый комплекс переработки жидких радиоактивных отходов представляет собой здание пристройку к объектам действующей станции с необходимой инфраструктурой и тремя ключевыми установками: А1 – установка растворения и изъятия солей; А5 – установка очистки от радионуклидов (озонирование, ультрафильтрация и ионо-селективная очистка); А2 - установка концентрирования (глубокое упаривание). Для наглядности на рисунке 1 представлена принципиальная схема переработки ЖРО.



Рис. 1. Принципиальная схема переработки ЖРО на КАЭС

На рисунке 2 представлен график, который показывает динамику накопления ЖРО на Кольской атомной станции.

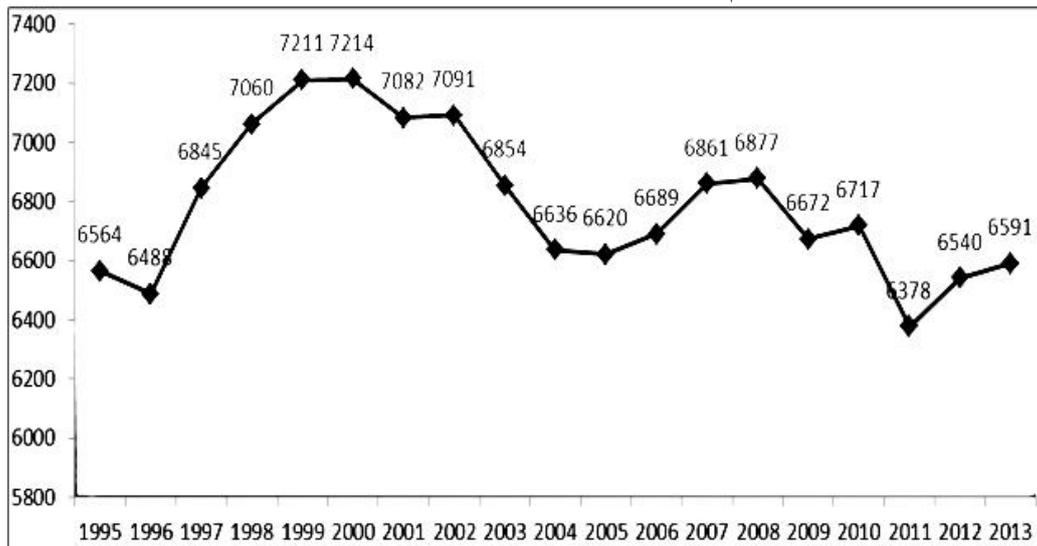


Рис. 2. Динамика накопления ЖРО на Кольской АЭС

Вывод: введение корпуса переработки жидких радиационных отходов на Кольской станции помогло решить одну из самых важных

проблем атомной промышленности – хранение и переработка ядерных отходов. КП ЖРО заметно сократил количество баков с радиоактивными отходами, что позволило продлевать срок службы блоков реактора, не увеличивая хранилище для ЖРО. Если будет планироваться строительство новой станции КАЭС-2, то вложения, которые идут на строительство хранилищ и складов для ЖРО, заметно сократятся.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Учебный материал № 45-12/УТП [Текст]. – УТП Кольская АЭС, 2013. – 67 с.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ТЕПЛООБМЕННОМ ОБОРУДОВАНИИ

В.А. Кель¹, К.И. Савина¹, С.В. Лавриненко²
^{1,2}Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, ¹группа 5012

С целью проведения прочностных расчетов теплообменного оборудования проведено компьютерное моделирование теплогидравлических процессов и получено распределение температурных полей на примере дегазатора. Исследования выполнены с использованием расчетного блока FLOW SIMULATION пакет Solid Works. Определен характер распределения коэффициента теплоотдачи, плотности теплового потока и температуры по элементам конструкции дегазатора. Установлено, что коэффициенты теплоотдачи на внешней поверхности распределяются неравномерно (изменяются в диапазоне от 2 до 5 Вт/(м²К)) и что при этом максимальная температура отдельных элементов не превышает 348 К.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, дегазатор, теплообменное оборудование, теплогидравлические процессы, Solid Works.

Как известно [3], разработка теплообменных аппаратов для передвижных электростанций и модульных блоков, является актуальной задачей современной теплоэнергетики, ЖКХ и многих смежных с ними отраслей промышленности. Проектам энергоэффективного оборудования уделяется особое внимание в регионах с автономной системой электроснабжения. Следует отметить, что в России государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» предложен проект по

созданию мобильных плавучих атомных электростанций малой мощности [2-5].

Опыт эксплуатации блочно-модульных объектов производящих тепловую и электрическую энергию, позволяет сделать вывод о том, что технико-экономические показатели зависят от условий эксплуатации.

Результаты исследований показали, что с целью определения эффективности работы теплообменного оборудования необходимо проводить моделирование, с учетом конкретных условий работы энергетического блока.

Принимая во внимание вышеизложенное, проведен численный анализ эффективности работы дегазатора, с использованием расчетного блока FLOW SIMULATION пакета Solid Works. Данный блок позволяет выполнять 3-х мерные конечно-элементные стационарные и нестационарные расчеты для реальной геометрии с учетом нелинейных свойств как твердых, так и текучих сред. Принятая расчетная модель учитывает механизмы, как внутренней теплопередачи, так и теплопередачу от корпуса дегазатора в окружающую среду.

В программном комплексе FLOW SIMULATION предусмотрены возможности моделирования конвективных потоков жидкости в замкнутых и незамкнутых областях с различными текучими средами и давлениями.

Комплекс задач, связанных с вопросами гидродинамики и теплообмена, в SolidWorks Flow Simulation решается с помощью системы дифференциальных уравнений движения, неразрывности, энергии, теплопроводности стенок канала [1].

Основными этапами разработки компьютерной модели в SolidWorks Flow Simulation являются [3]: а) создание 3D модели; б) построение сетки расчетной области; в) наложение граничных условий; г) расчет и визуализация полученных полей температур, давления и т.д.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

В качестве исходных данных использовалась 3-D модель конструкции дегазатора. На первом этапе выделяется область дегазатора с прилегающим пространством в помещении, накладываются граничные условия, а также задается направление гравитации для расчета термогравитационной конвекции окружающего воздуха (рис. 1).

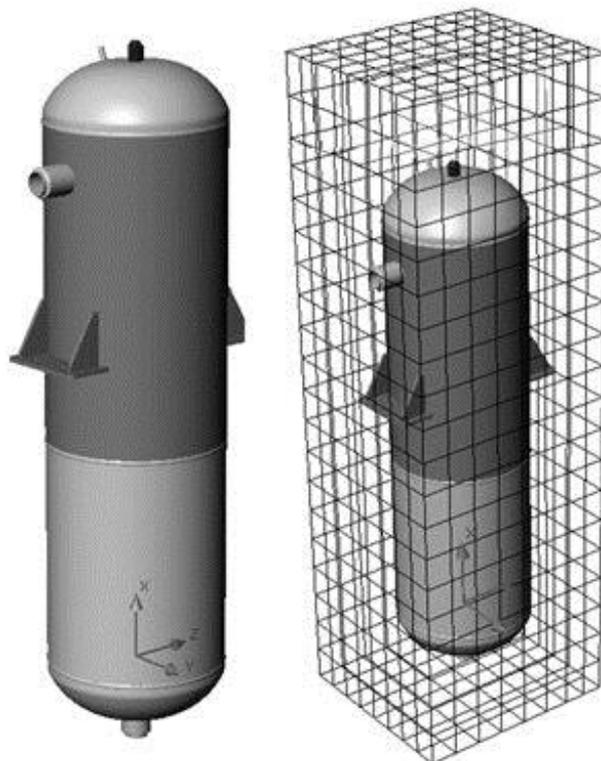


Рис. 1. Трехмерная модель конструкции дегазатора и базовая сетка модели

Расчетная сетка строится исходя из вычислительных ресурсов с использованием ее локального уточнения в пристеночных слоях, узких каналах и тонких стенках.

Элементам конструкции дегазатора и текучим средам при моделировании присваиваются свойства соответствующих материалов.

Теплопроводность материала корпуса дегазатора из нержавеющей стали в расчетной модели задавалась таблично (табл. 1).

Табл. 1. Теплопроводность теплообменной поверхности дегазатора

| | | | | |
|---|-----|------|------|------|
| Температура, К | 293 | 593 | 903 | 1103 |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/(м ² К) | 15 | 19,8 | 26,5 | 27,8 |

На участке внутренней поверхности дегазатора, непосредственно контактирующую с циркулирующей водой с температурой 348 К, коэффициент теплоотдачи принимали равным 800 Вт/(м²К), а на участках, контактирующих с газовой средой – 10 Вт/(м²К). На уровне решеток происходит смешанный контакт с водогазовой средой, поэтому принятый коэффициент теплоотдачи на этих поверхностях принят равным 200 Вт/(м²К).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Исследования циркулирующих потоков воздуха в окружении, позволили получить распределение наружного коэффициента тепло-

отдачи, плотности теплового потока и температуры по элементам конструкции (рис.2).

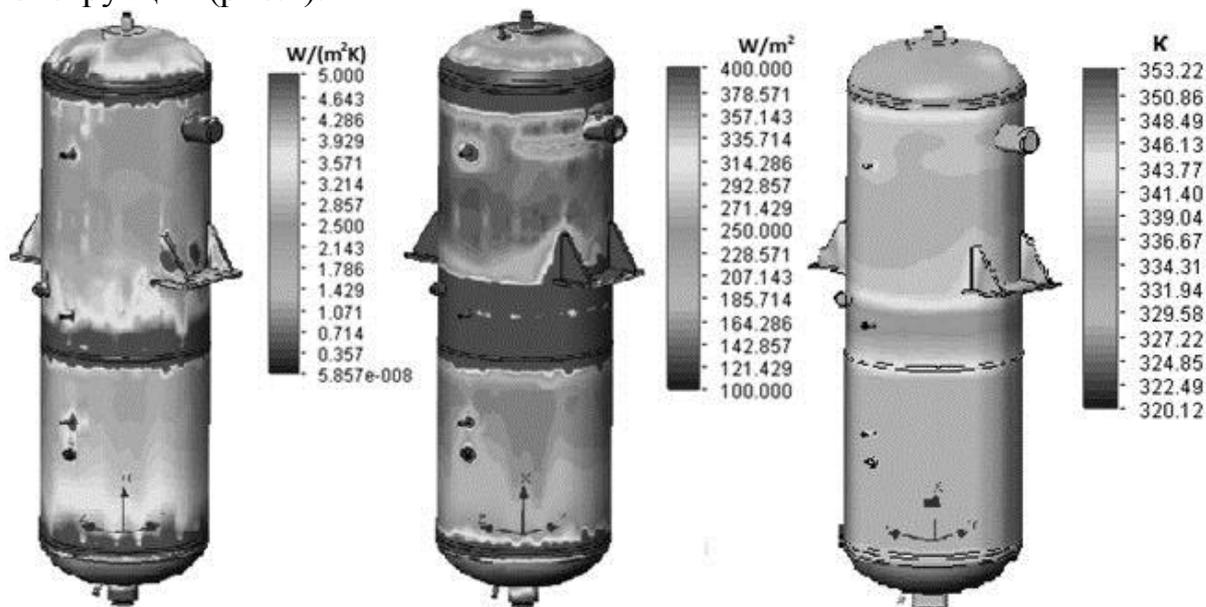


Рис. 2. Расчетное распределение коэффициента теплоотдачи ($Вт/м^2К$), плотности теплового потока ($Вт/м^2$) и температуры ($К$) по поверхности элементов конструкции.

В результате трехмерного теплогидравлического расчета корпуса дегазатора с использованием расчетного блока FLOW SIMULATION пакета SolidWorks установлено, что коэффициенты теплоотдачи по внешней поверхности распределяются неравномерно, и изменяются в диапазоне от 2 до 5 $Вт/(м^2К)$, плотность теплового потока варьируется в пределах от 100 до 400 $Вт/м^2$, а максимальная температура нижней опорной плиты не превышает 348 К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общие принципы, заложенные в код и его гибкая структура, позволяют моделировать процессы теплопередачи в установках разной конфигурации и масштаба. Предложенный подход позволяет проводить быстрый и достаточно точный анализ эффективности работы теплообменного оборудования при различных условиях работы, в том числе и для мобильных энергетических блоков малой и средней мощности.

Использование пакета SolidWorks допускает моделирование теплогидравлических процессов в различных элементах, таких как насосы, гидроаккумуляторы, клапаны различной конструкции и т.п., что позволяет с высокой точностью проводить прочностные расчеты.

ЛИТЕРАТУРА:

1. А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. БХВ-Петербург, Санкт-Петербург, 2008, 1040 с.
2. Хвостова М.С. Перспективы создания плавучих атомных электростанций: экологическая и радиационная безопасность // Безопасность в техносфере. 2012. № 2. С. 41-45.
3. Багоутдинова А.Г., Золотонос Я.Д., Шемелова О.В. Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в каналах сложной конфигурации с помощью программного модуля SOLIDWORKS FLOW SIMULATION // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 14. С. 199-201.
4. Замуков В.В., Бабуркин А.Е., Дорощенко А.В., Бельченков С.В. Плавучая атомная электростанция малой мощности // Судостроение. 2007. № 2. С. 9-12.
5. Замуков В.В., Бабуркин А.Е., Дорощенко А.В., Степанов В.С. Сравнительный анализ стоимости создания плавучей атомной электростанции с водо-водяной реакторной установкой с жидкометаллической реакторной установкой // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. 2009. № 24. С. 50-55.

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, ст. преподаватель каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

ПРОЕКТ «ПРОРЫВ»

Д.Э. Вдовин¹, С.В. Лавриненко²
^{1,2}Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, ¹группа 5012

Проект «Прорыв» – это беспрецедентный в мировой практике проект, которым действительно можно гордиться. Если заверения российских специалистов верны, то «Прорыв» способен решить ряд важнейших мировых проблем: от хранения ядерных отходов до грядущего энергетического кризиса.

Росатом планирует реализовать проект "Прорыв" на СХК, в городе Северск.

Росатом поручил СХК создать комплекс экспериментальных установок для изготовления экспериментального топлива, в виде таб-

леток смешанного нитридного топлива, экспериментальных тепловыделяющих элемент (ТВЭЛ) и тепловыделяющих сборок (ТВС). Экспериментальный ТВЭЛ СХК изготовил в марте 2013 года. Планируется, что на экспериментальном топливе, будет работать атомная энергетика в 2020-2025 годах. Пилотное производство нитридного топлива должно быть создано в 2017 году.

Реализация проекта строительства будет осуществлена на площадке СХК, опытно-демонстрационного энергокомплекса в составе реакторной установки "БРЕСТ-300" (быстрый реактор естественной безопасности мощностью 300 МВт) с пристанционным ядерным топливным циклом и комплекса по производству плотного топлива для реакторов на быстрых нейтронах.

Реактор типа "БРЕСТ" предназначен для повторного использования отработанного топлива водоводяных реакторов. Уникальностью данного реактора является, осуществление безотходной выработки ядерной энергии. Но также российский реактор нового поколения обладает и беспрецедентным уровнем безопасности. Аварии даже критического уровня диверсионного происхождения с разрушением здания реактора, крышки его корпуса не могут привести к радиоактивному выбросу, требующему эвакуации населения и появления на долгие годы отчужденных участков территории, вроде печально известной Припяти.

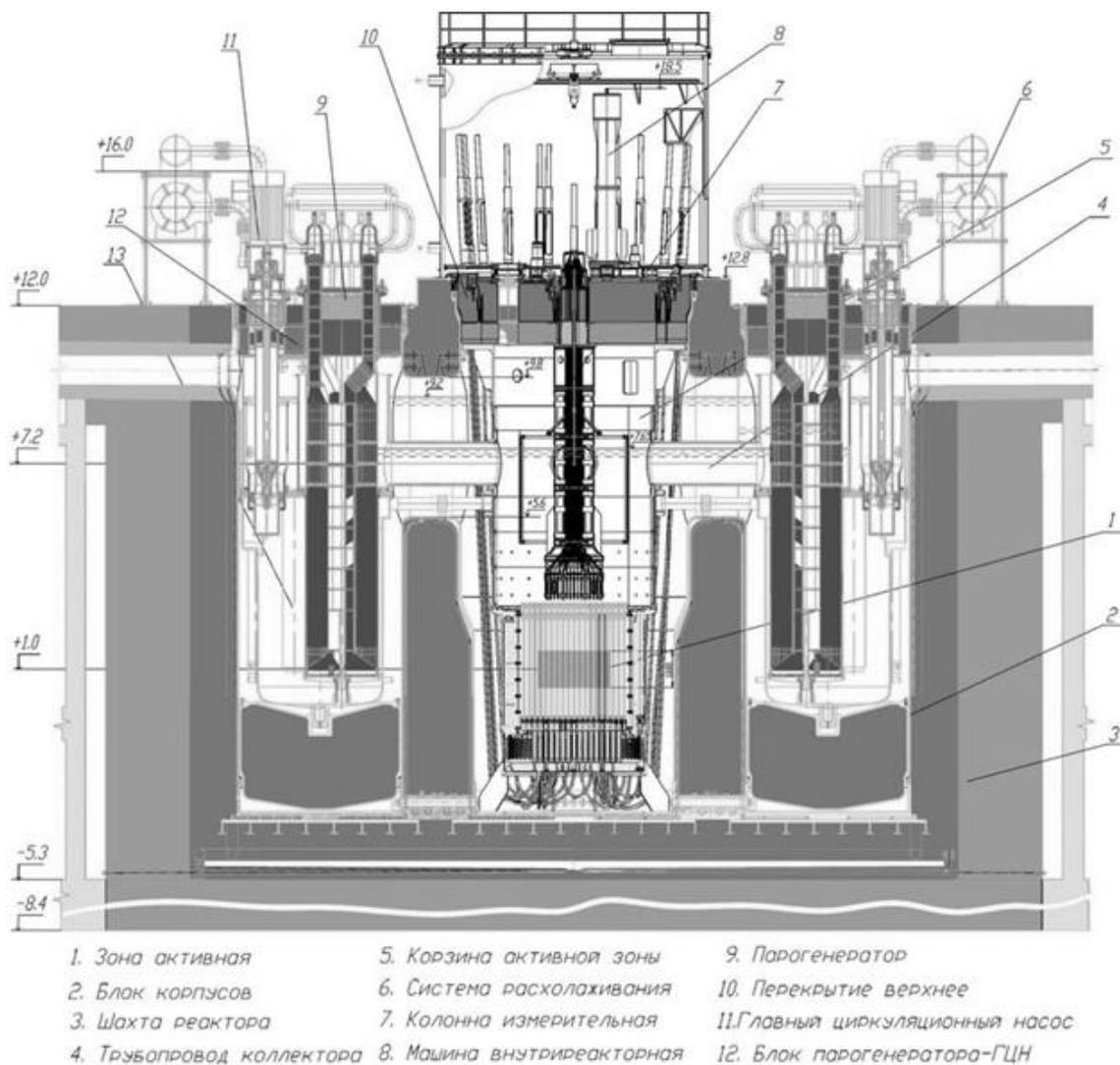


Рис. 1. БРЕСТ-300

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, ст. преподаватель каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАРОГЕНЕРАТОРА АЭС С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

В.О. Дмитриев
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5012

Необходимость высокого удельного теплосъёма в активной зоне реактора на быстрых нейтронах требует применения жидкометаллических теплоносителей. Жидкие металлы обладают теплопроводностью, много большей, чем у воды, следовательно, интенсивность теп-

лообмена для всех жидких металлов намного выше. Однако теплоёмкость жидких металлов невысока, что приводит к увеличению расхода теплоносителя. В тоже время высокая интенсивность теплообмена позволяет получать значительную разность температур теплоносителя в реакторе. Ещё одним важным преимуществом применения жидких металлов является то, что существенно возрастает начальная температура пара – возрастает термодинамический КПД цикла.

Один из жидкометаллических теплоносителей, который может применяться в современной атомной энергетике, является жидкий калий, обладающий высокой теплопроводностью, вязкостью и плотностью, сравнимой с водой, однако не самой высокой теплоемкостью по сравнению с другими металлами.

Свойства калия во многом схожи со свойствами натрия. Калий обладает высокой химической активностью по отношению в воде и воздуху. Этот факт вынуждает применять трёхконтурную схему: для передачи тепла от реактора рабочему телу имеется два теплообменных аппарата. Промежуточный теплообменник отделяет контур теплоносителя с высокой радиоактивностью от теплоносителя без радиоактивности – поверхность теплообмена омывается однофазными средами (жидкий К).

Парогенератор РУ БОР-60 предназначен для выработки перегретого пара низкого давления в составе исследовательской реакторной установки БОР-60

Парогенератор РУ БОР-60 – прямоточный парогенератор в состав которого входят два модуля: испаритель, первичный пароперегреватель, представляющие собой кожухотрубные теплообменники с трубным пучком в виде ширмы.

Движение теплоносителя и рабочего тела происходит по противоточной схеме. Калий движется в межтрубном пространстве, преимущественно поперечно омывая пучок труб, расположенных по квадратной компоновке.

Результаты

В результате выполнения курсового проектирования был спроектирован парогенератор для ядерной установки БОР-60 на заданные параметры, проведен тепловой расчет двух модулей парогенератора, конструкторский расчет основных элементов парогенератора, определено конструктивное выполнение элементов конструкции парогенератора.

Выбрана конструкция парогенератора. Определена паропроизводительность.

Отдельно определен межпромысловый период поверхности теплообмена, рассчитана стоимость изделия, рассчитаны гидравлические сопротивления по тракту теплоносителя и рабочего тела, рассчитана толщина теплоизоляционного материала.

В курсовом проекте выполнение конструктивных элементов базируется на имеющихся технических решениях подобных изделий, а некоторые конструктивные элементы приняты из ориентирования на прототип - парогенератор ЯУ БОР-60.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кириллов П.Л. и др. Справочник по теплогидравлическим расчётам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.: ил.
2. Рассохин Н.Г. Парогенераторные установки атомных электростанций: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 384 с.: ил.
3. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1980. – 424с.

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, ст. преподаватель каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

ПЕРСПЕКТИВНОЕ ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО

А.А. Фролов

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5012

В настоящее время атомная энергетика развивается быстрыми темпами. Ведутся поиски альтернативы урановому топливу. В перспективе альтернативой может стать такой элемент как америций. Ядерный изотоп америций-242m обладает высоким сечением деления тепловыми нейтронами (6390,2 барн), большим количеством выделяемых нейтронов на одно деление (3,6) и относительно большим периодом полураспада (141,2 год), что делает его подходящим топливом для сверхкомпактных ядерных реакторов (критическая масса — 3,78 кг, меньше только у некоторых изотопов калифорния). Предполагается, например, использовать его для ядерных реакторов на межпланетных космических кораблях. Однако получение этого изотопа в грам-

мовых количествах пока только обсуждается (предполагается получать его из ^{241}Am , который содержится в ОЯТ в количестве порядка килограмма на тонну).

Или, например, кюрий. Важной областью применения кюрия является производство нейтронных источников высокой мощности для «поджигания» (запуска) специальных атомных реакторов. В последние годы очень важное место не только в умах инженеров, но и в производстве занимает другой, более тяжелый изотоп кюрия — кюрий-244 (период полураспада 18,1 года) и он также альфа-излучатель (энерговыведение около 2,83 Вт/грамм). Однако кюрий-244 также обладает достаточно большой вероятностью испускания спонтанных нейтронов ($1,4 \cdot 10^{-6}$ нейтронов/Бк), внося существенный вклад в нейтронный радиационный фон от отработавшего ядерного топлива некоторых реакторов. Кюрий-245 (период полураспада 8500 лет) очень перспективен для создания компактных атомных реакторов с сверхвысоким энерговыведением, и изыскиваются способы рентабельного производства этого изотопа.

В таблице 1 приведены нейтронные параметры некоторых трансурановых элементов.

Табл. 1. Нейтронные данные некоторых трансурановых элементов

| Элемент | A | $T_{1/2}$ | $\sigma_f, б$ | $\sigma_\gamma, б$ | $\sigma_s, б$ | ν |
|--------------------|------|----------------------------|-----------------------|--------------------|---------------|-----------|
| Уран ^{92}U | 235 | $7,038 \cdot 10^8$ лет [1] | 584,88 [2] | 98,66 [2] | 15,12 [2] | |
| | 236 | $2,342 \cdot 10^7$ лет [1] | 0,047 [2] | 5,13 [2] | 13,7 [1] | 2,4251[1] |
| | 237 | 6,75 сут [1] | <0,35 [1] | 443 [1] | | 2,338 [1] |
| | 238 | $7,038 \cdot 10^8$ лет [2] | $4 \cdot 10^{-6}$ [1] | 2,683 [2] | 9,38 [1] | |
| | 239 | 23,5 мин [1] | 14 [1] | 22 [2] | | 1,98 [1] |
| | 240 | 14,1 ч [1] | | | | |
| Плутоний ^{94}Pu | 236 | 2,858 лет [2] | 170 [1] | 33 [1] | | 2,21 [1] |
| | 237 | 45,2 сут [2] | 2455 [1] | | | |
| | 238 | 87,74 лет [2] | 17,9 [1] | 540 [1] | 25 [1] | 2,90 [1] |
| | 239 | $2,411 \cdot 10^4$ лет [2] | 750 [2] | 271,5 [2] | 7,3 [1] | 2,8768[1] |
| | 240 | 6564 лет [2] | 0,064 [2] | 287,6 [2] | 1,64 [1] | 2,17 [1] |
| | 241 | $2,411 \cdot 10^4$ лет [2] | 1012,2 [2] | 363 [2] | 9,1 [1] | 2,9369[1] |
| Америций ^{95}Am | 242m | 141,2 года [1] | 6390,2 [2] | 1229,2[2] | | 3,260 [1] |
| | 242g | 16,02 ч [1] | 2100 [1] | | | |
| | 243 | 7370 лет [2] | 0,0813 [2] | 76,71[2] | | |
| | 244 | 10,1 ч [2] | 2300 [2] | 600 [2] | | |
| | 244m | 26 мин [1] | 1600 [1] | | | |
| | 244g | 10,1 ч [1] | 2300 [1] | | | |
| Кюрий ^{96}Cm | 241 | 32,8 сут [2] | 549,82 [2] | 43,99 [2] | | |
| | 242 | 162,8 дня [2] | 3,02 [2] | 16,87 [2] | | 2,538 [1] |
| | 243 | 29,1 лет [2] | 613,319 [2] | 130,523[2] | | 3,430 [1] |
| | 244 | 18,1 лет [2] | 1,03 [2] | 15,25 [2] | 11,6 [1] | 2,696 [1] |
| | 245 | 8500 лет [2] | 2142,40 [2] | 359,2 [2] | | 3,717 [1] |

ЛИТЕРАТУРА:

1. Галанин А.Д. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 536 с.
2. Энциклопедия нейтронных данных, Росфонд (Российская библиотека файлов оцененных нейтронных данных), Обнинск 2006 г.

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, ст. преподаватель каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ГРАФИТОВОЙ КЛАДКИ РЕАКТОРА РБМК-1000

М.П. Виноградов
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5011

Цель работы

Расчетные исследования характеристик стационарного температурного состояния графитового замедлителя реактора РБМК в зависимости от концентрации элементов в газовой смеси.

Общие сведения

Важную роль в реакторах типа РБМК играет его графитовая кладка. Графит выполняет функции замедлителя нейтронов. Сама кладка служит несущей конструкцией для элементов активной зоны реактора.

Основным фактором, влияющим на работоспособность кладки, а значит и на безопасность эксплуатации реактора, является температура графита, определяющая величину и характер радиационной деформации элементов кладки. В практике принято, что на всех режимах работы реактора РБМК максимальная температура графита не должна превышать 800-850°С.

Вместе с тем существует прямая связь между средней температурой графита и реактивностью, так как реакторы типа РБМК обладают существенным положительным эффектом реактивности по температуре замедлителя.

В реакторе РБМК доля генерируемого в графите тепла составляет 5...6% общей тепловой мощности. В существующих конструкциях

водографитовых реакторов отвод этого тепла осуществляется к теплоносителю, охлаждающему тепловыделяющие элементы.

Для интенсификации теплоотвода от графита в зазорах между трубами ТК и графитовыми блоками прокачивается продувочный газ 2 штатного состава 90 % гелия + 10 % азота (по объему).

Термическое сопротивление зазора труба ТК- графитовый блок зависит и от состава продувочной смеси, так как гелий при одинаковой температуре имеет теплопроводность примерно в 6 раз больше, чем азот.

Таким образом основными факторами, определяющими, температуру графитового замедлителя реактора РБМК являются: мощность реактора, неравномерность распределения энерговыделения по объему активной зоны, теплопроводность графита и состав продувочной смеси.

Математическая модель

Характеристика математической модели:

1. Стационарная задача;
2. Уравнения энергии;
3. Модель турбулентности k-epsilon.

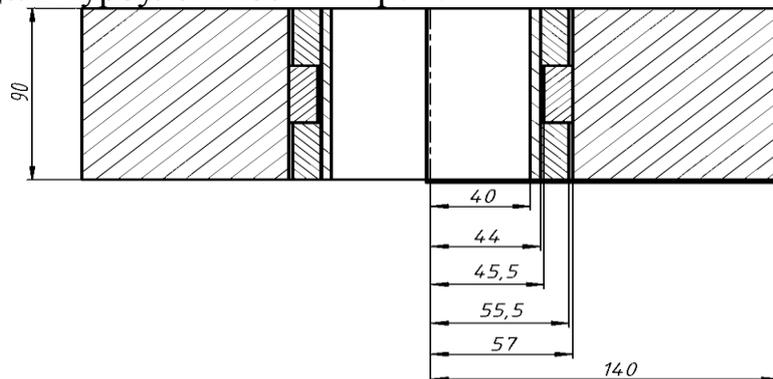


Рис. 5. Схематический разрез топливного канала с блоком графитовой кладки.

Граничные условия

$$v_0 = 1 \frac{м}{с}; \quad t_0 = 265^\circ C; \quad p_0 = 7 МПа; \quad q_v = 3 \frac{МВт}{м^3}.$$

Допущение: в графитовых кольцах нет тепловыделения.

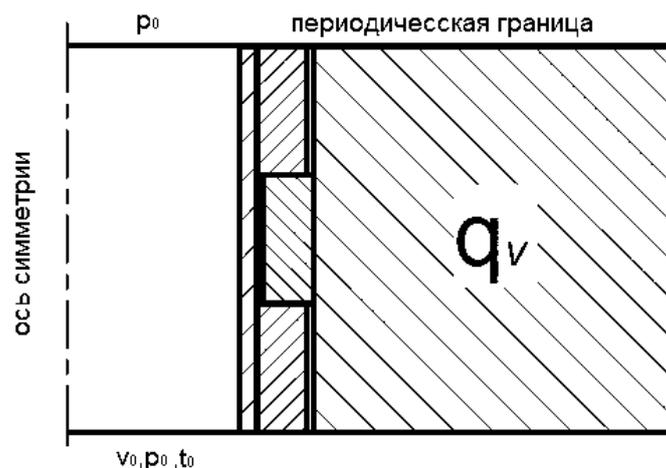


Рис. 6. Граничные условия

Табл. 1. Теплофизические свойства материалов

| Графит (блок, кольца) $\rho_c = 1700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ | |
|---|---|
| | |
| Сплав E125 (оболочка ТК) | Вода (теплоноситель) |
| $\rho = 6500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; c_p = 300 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \lambda = 20 \frac{\text{Вт} \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{К}};$ $\mu = 0,001 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}};$ | $\rho = 998,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; c_p = 4182 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \lambda = 0,6 \frac{\text{Вт} \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{К}};$ $\mu = 0,001 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}};$ |
| Гелий | Азот |
| $\rho = 0,1625 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; c_p = 5193 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \lambda = 0,24138 \frac{\text{Вт} \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{К}};$ $\mu = 1,99 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}};$ | $\rho = 1,251 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; c_p = 1040,67 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \lambda = 0,0449 \frac{\text{Вт} \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{К}};$ $\mu = 1,663 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}};$ |

Расчет теплофизических свойств газовой смеси

Массовые доли компонентов:

$$M(N_2) = 14 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}};$$

$$M(He) = 2 \frac{\kappa \mathcal{E}}{\text{кмоль}}$$

Массовый состав смеси:

$$g(N_2) = \frac{M(N_2) \cdot x(N_2)}{M(N_2) \cdot x(N_2) + M(He) \cdot x(He)};$$

$$g(He) = \frac{M(He) \cdot x(He)}{M(N_2) \cdot x(N_2) + M(He) \cdot x(He)}.$$

Плотность смеси:

$$\rho^{см} = \rho^{N_2} \cdot g(N_2) + \rho^{He} \cdot g(He).$$

Средняя молекулярная масса смеси:

$$M^{см} = \frac{1}{\frac{g(N_2)}{M(N_2)} + \frac{g(He)}{M(He)}}.$$

Массовая теплоемкость смеси:

$$c_p^{см} = \frac{c_p^{N_2} \cdot x(N_2) \cdot M(N_2) + c_p^{He} \cdot x(He) \cdot M(He)}{M^{см}}.$$

Коэффициент теплопроводности смеси:

$$\lambda^{см} = \lambda^{N_2} \cdot x(N_2) + \lambda^{He} \cdot x(He).$$

Результаты

Рассмотрим профиль температур по пяти сечениям.

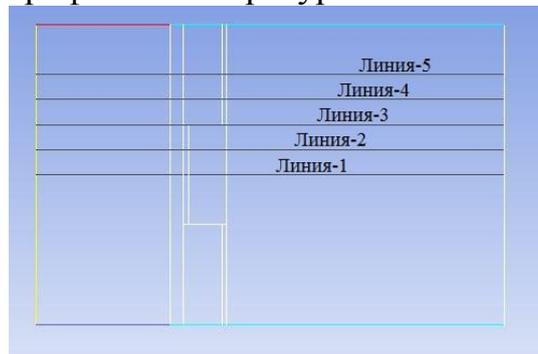


Рис. 7. Сечения рассматриваемой модели

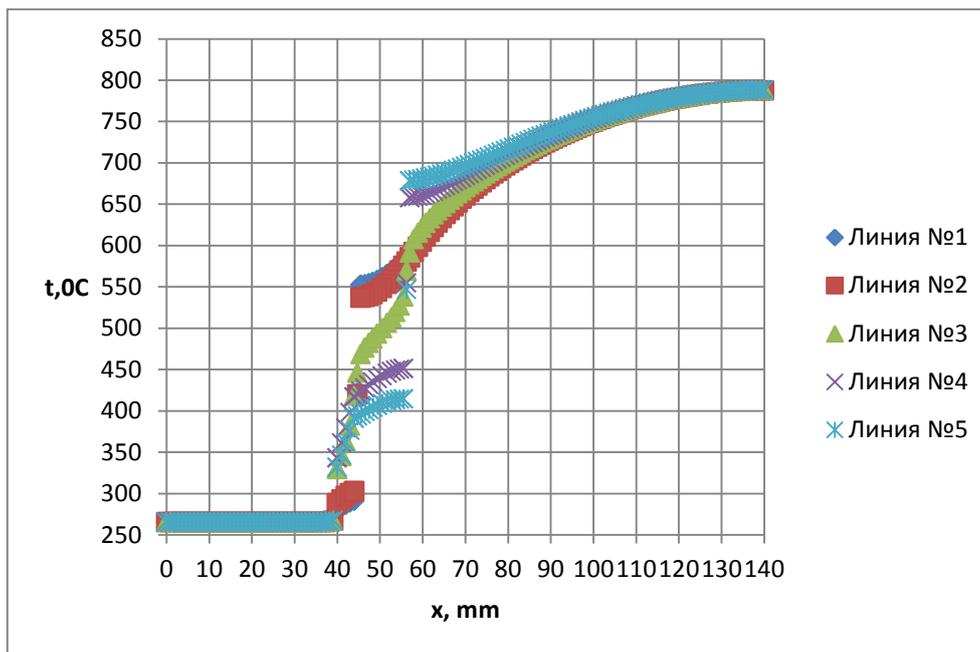


Рис. 8. Распределение температур по сечениям, $xN_2=0\%$

Табл. 2. Зависимость средней температуры оболочки ТК в разных сечениях от концентрации азота

| xN, % | | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 70 | 90 | 100 |
|----------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T _{об} , °C | Линия №1 | 285,9 | 285,5 | 285,1 | 284,7 | 284,4 | 283,6 | 282,8 | 281,9 | 280,2 | 278,4 | 277,4 |
| | Линия №2 | 296,2 | 295,9 | 295,6 | 295,3 | 295,0 | 294,5 | 293,8 | 293,2 | 291,9 | 290,6 | 289,8 |
| | Линия №3 | 367,4 | 367,6 | 367,8 | 368,0 | 368,1 | 368,5 | 369,0 | 369,4 | 370,3 | 371,2 | 371,7 |
| | Линия №4 | 379,5 | 379,8 | 380,0 | 380,2 | 380,5 | 381,0 | 381,5 | 382,0 | 383,1 | 384,2 | 384,8 |
| | Линия №5 | 361,3 | 361,4 | 361,5 | 361,6 | 361,7 | 361,9 | 362,1 | 362,3 | 362,7 | 363,2 | 363,4 |

Табл. 3. Зависимость средней температуры газового зазора в разных сечениях от концентрации азота

| xN, % | | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 70 | 90 | 100 |
|----------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T _{гз} , °C | Линия №1 | 421,6 | 422,0 | 422,4 | 422,7 | 423,1 | 423,9 | 424,7 | 425,6 | 427,3 | 429,2 | 430,2 |
| | Линия №2 | 419,7 | 420,1 | 420,4 | 420,8 | 421,2 | 422,0 | 422,8 | 423,6 | 425,3 | 427,2 | 428,1 |
| | Линия №4 | 554,4 | 555,4 | 556,5 | 557,6 | 558,7 | 560,9 | 563,2 | 565,6 | 570,6 | 575,9 | 578,7 |
| | Линия №5 | 546,5 | 547,5 | 548,5 | 549,5 | 550,6 | 552,7 | 554,9 | 557,2 | 562,0 | 567,2 | 569,9 |

Табл. 4. Зависимость средней температуры графитового кольца в разных сечениях от концентрации азота

| xN, % | | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 70 | 90 | 100 |
|---------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T _к , °C | Линия №1 | 567,6 | 568,8 | 570,0 | 571,3 | 572,6 | 575,2 | 577,9 | 580,6 | 586,4 | 592,6 | 595,9 |
| | Линия №2 | 556,4 | 557,6 | 558,7 | 559,9 | 561,1 | 563,5 | 566,0 | 568,6 | 574,0 | 579,7 | 582,8 |
| | Линия №3 | 502,0 | 502,8 | 503,6 | 504,4 | 505,2 | 506,8 | 508,5 | 510,3 | 513,9 | 517,8 | 519,9 |
| | Линия №4 | 436,9 | 437,2 | 437,6 | 437,9 | 438,3 | 439,0 | 439,7 | 440,5 | 442,1 | 443,8 | 444,7 |
| | Линия №5 | 404,9 | 405,0 | 405,1 | 405,2 | 405,3 | 405,5 | 405,7 | 405,9 | 406,4 | 406,8 | 407,1 |

Табл. 5. Зависимость средней температуры графитового блока в разных сечениях от концентрации азота

| xN, % | | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 70 | 90 | 100 |
|---------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T _б , °C | Линия №1 | 727,4 | 729,1 | 730,8 | 732,5 | 734,3 | 737,9 | 741,6 | 745,4 | 753,5 | 762,1 | 766,6 |
| | Линия №2 | 728,2 | 729,9 | 731,6 | 733,3 | 735,1 | 738,7 | 742,4 | 746,3 | 754,4 | 763,0 | 767,6 |
| | Линия №3 | 732,0 | 733,7 | 735,5 | 737,2 | 739,0 | 742,7 | 746,5 | 750,4 | 758,6 | 767,4 | 772,1 |
| | Линия №4 | 739,1 | 740,9 | 742,7 | 744,5 | 746,4 | 750,2 | 754,1 | 758,1 | 766,6 | 775,7 | 780,5 |
| | Линия №5 | 744,0 | 745,8 | 747,7 | 749,5 | 751,4 | 755,3 | 759,3 | 763,5 | 772,2 | 781,5 | 786,4 |

Вывод

Рассмотрено температурное поле графитовой кладки, при различных концентрациях компонентов продувочной смеси.

Установлена линейная зависимость увеличения средней температуры графитовой кладки, при увеличении концентрации азота в продувочной смеси.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Батурин О.В., Батурин Н.В., Матвеев В.Н. Расчет течений жидкости и газа с помощью универсального программного комплекса Fluent - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. - 151с.: ил.
2. Афанасьев В.Н., Недайвозов А.В. Методические указания к выполнению учебных заданий по курсу “Термодинамика”: Электронное учебное издание. - М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. 26 с.

Научный руководитель: А.В. Воробьев, к.т.н., доцент каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

ЭВОЛЮЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС

Г.А. Китаев

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5022

Парогенераторы (ПГ) АЭС с ВВЭР, это теплообменные аппараты, передающие тепло от первого контура во второй контур и вырабатывающие пар, который приводит в действие турбогенераторы АЭС.

Конструктивно парогенераторы представляют корпусные сосуды с несколькими тысячами труб. Теплоноситель первого контура проходит внутри теплообменных труб и нагревает воду до образования пара.

ПГ является барьером между первым радиоактивным контуром и водо-паровой средой, имеющей контакт с окружающим пространством, в связи с чем этот барьер должен быть надёжным.

Для того чтобы тонкостенные теплообменные трубы (ТОТ) парогенератора исполняли функции этого эффективного барьера, они не должны иметь больших или сквозных дефектов.

Выбор материала ТОТ, соответствующего требованиям надежности и экономичности, – один из основных критериев для обеспечения их надежной работы.

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

Развитие ПГ для российских и зарубежных реакторов происходит принципиально разными путями. В проектах наших конкурентов применяются вертикальные ПГ, где используются горизонтальные трубные доски и вертикальные U-образные трубки.

На первых порах и в СССР, и в США использовались похожие материалы для производства ПГ - нержавеющие стали. Однако, столкнувшись с трудностями при применении нержавеющей стали SS304, американские специалисты приняли решение о переходе на сплав 600МА. Они считали, что высоконикелевый сплав окажется коррозионностойким. Однако, начиная с 1980 года, на АЭС Соединённых Штатов и других стран, построенных по американским проектам, пошла череда замен ПГ.[3]

За рубежом был проведен огромный объём НИОКР, который на несколько порядков превышает сделанное в России. Так на данный момент для изготовления труб парогенераторов конкуренты применяют легированные стальные сплавы 690ТТ, 800, 800Н и 800НТ.

Однако количество глушений трубок на зарубежных АЭС остается на порядок выше, что отчасти вызвано жесткими условиями работы в вертикальных ПГ.

ВЛИЯНИЕ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Важнейшим фактором, влияющим на работоспособность трубчатки, является водно-химический режим.

За более чем 20 летний срок эксплуатации нормируемое содержание хлоридов в продувочной воде парогенераторов снизилось с 500 до 100 мкг/кг, натрия - с 1000 до 300 мкг/кг, а показатель рН повысился с 7,8-8,8 до 8,5-9,2. Содержание сульфатов в продувочной воде также нормируется с 1997 г.

Наличие во втором контуре медьсодержащих материалов (конденсаторы турбин, подогреватели низкого давления, бойлеры) не позволяет также повысить рН питательной воды выше 9,2 для минимизации выноса продуктов коррозии железа из конденсатно-питательного тракта. На большинстве АЭС с PWR величина рН питательной воды составляет 9,4-9,8, фактическое содержание железа – менее 5 мкг/кг.

На зарубежных АЭС с PWR трубные системы конденсаторов выполнены из титановых сплавов и протечки фактически отсутствуют, т.е. не превышают 0,05 л/ч. Это позволяет нормировать и поддер-

живать величину содержания хлоридов, сульфатов и натрия в продувочной воде не более 20 мкг/кг. [2]

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ

Характерной особенностью парогенераторов АЭС с ВВЭР является – горизонтальный цилиндрический корпус, горизонтальные змеевики ТОТ, заделанных в вертикальные коллекторы теплоносителя, а также использование верхней части объема корпуса

для гравитационной сепарации.

Особенностью также является применение, в качестве теплообменной поверхности, труб размером 16x1,5 мм (16x1,4 мм для ПГВ-1000МКП с 1990г.) из нержавеющей стали аустенитного класса -08X18Н10Т.

Одним из кардинальных путей увеличения ресурса парогенераторов является применение для теплообменных труб материалов, обладающих значительно большей стойкостью против хлоридного коррозионного растрескивания в эксплуатационных условиях по сравнению с применяемой в настоящее время сталью.

Принятая в качестве перспективного материала сталь 03X21Н32М3Б-ВИ (ЧС-33, ЭП 864) в связи с повышенным содержанием никеля ($\geq 32\%$) обладает существенно большим иммунитетом против коррозионного растрескивания. Низкая концентрация углерода позволяет обеспечить стали стойкость против МКК при содержании ниобия 0,9-1,2% в широком диапазоне температур провоцирующего нагрева, а легирование молибденом – повышенную стойкость против питтинговой коррозии в условиях подшламовой коррозии.

Зарубежными аналогами стали ЧС-33 являются стали типа 1.4558 марок DMV 800 (L, H) и 2.4858 марки DMV 825.

Проведенные в центральном научно-исследовательском институте конструкционных материалов (ЦНИИКМ) «Прометей» испытания в кипящем 42%-ном растворе $MgCl_2$ при температуре 154°C показывают возможность значительного повышения стойкости против коррозионного растрескивания теплообменных труб парогенераторов в случае использования для их изготовления стали ЧС-33. Разрушение образцов из этой стали проходило при значительно больших нагрузках по сравнению со сталью 08X18Н10Т и в течение более длительного периода нагружения в указанных условиях, а при напряжениях до 350 МПа образцы большей частью не разрушались.

В ЦНИИТМАШе также экспериментально подтверждена большая стойкость ЧС-33 против задержанного деформационного коррозионного растрескивания и хлоридного коррозионного растрескивания по сравнению со сталью 08X18Н10Т.[4]

На данный момент ЧС-33 рассматривается как возможный материал ТОТ для перспективного ПГВ-1600. Преимущества данного материала дают возможность практически полностью избежать глушения ТОТ, уменьшить их толщину до 1,2 мм и, как следствие, увеличить коэффициент теплопередачи.[1]

Так как ПГВ-1600 на настоящее время находится в разработке, то некоторые необходимые для расчёта характеристики неизвестны, однако, используя методику, представленную в [3], можно рассчитать изменение коэффициента теплопередачи находящегося в эксплуатации ПГВ-1000 при применении в качестве материала ТОТ стали ЧС-33.

С достаточной степенью точности (погрешность расчета менее 4%) коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + R_{cm} + \frac{1}{\alpha_2}\right)} \quad (1)$$

где $R_{cm} = \frac{\delta_{cm}}{\lambda_m}$ - термическое сопротивление стенки трубы ($m^2 \cdot K / kVt$);

α_1 - коэффициент теплоотдачи со стороны теплоносителя, рассчитывается по эмпирическим зависимостям для случая течения однофазной среды в трубах ($kVt / m^2 \cdot K$);

α_2 - коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к рабочему телу ($m^2 \cdot K / kVt$).

Результаты расчета представлены в таблице 1.

Табл. 1. Коэффициент теплопередачи

| Материал ТОТ | Коэффициент теплопередачи, К ($kVt / m^2 \cdot K$) |
|-----------------------------------|--|
| 08X18H10T ($\delta_{cm}=1,5$ мм) | 6,2 |
| ЧС-33 ($\delta_{cm}=1,2$ мм) | 7,05 |

Коэффициент теплопередачи связан с площадью теплопередающей поверхностью и тепловой мощностью уравнением теплопередачи:

$$Q = KS\Delta t_{cp} \quad (2)$$

где S – площадь теплопередающей поверхности (m^2);

Δt_{cp} – температурный напор ($^{\circ}C$);

K – коэффициент теплопередачи;

Q – тепловая мощность (kVt).

Используя уравнение теплопередачи, можно сделать вывод, что замена материала ТОТ на сталь ЧС-33 дает возможность увеличить тепловую мощность ПГ или при той же мощности уменьшить количество ТОТ на 11%, что приведет к снижению веса ПГ.

Однако, в связи с высокой стоимостью, сталь ЧС-33 пока не находит широкого промышленного применения. В то же время, из ее аналогов за рубежом изготавливают оборудование, работающее с водой высоких параметров, а также различного рода подогреватели, теплообменники, конденсаторы пара.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ПГ вливается полторы тысячи тонн воды в час, а выливается в двести раз меньше. Всё остальное выходит в виде пара. В этих условиях ПГ превращается в настоящую коррозионную машину, где все загрязнения упариваются и концентрируются. При этом возникает отдельная проблема их вывода. Поэтому серьезной проблемой при выборе материала ТОТ является его коррозионная устойчивость при достаточной экономичности.[3]

Для изучения процессов, идущих в ПГ, применяют целый набор научных дисциплин. Это тепломассообмен, гидродинамика, механические дисциплины, сопломат, металловедение, химия (включая электрохимию), математическая статистика и многие другие. Основой для их расчётов являются материалы, правильный выбор которых является необходимым для обеспечения надежной экономичной работы парогенератора и, как следствие, АЭС в целом.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Трунов Н.Б., Лукасевич Б.И., Сотсков В.В., Харченко С.А. прошлое и будущее горизонтальных парогенераторов // <http://gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar7/documents/f55>
2. Давиденко С.Е., Трунов Н.Б. Работоспособность теплообменных труб и управление ресурсом парогенераторов АЭС с ВВЭР // <http://gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar7/documents/f46.pdf>
3. Рассохин Н.Г. Парогенераторные установки атомных электростанций: Учебник для вузов. Энергоатомздат, 1987.
4. Зубченко А.С., Харина И.Л. Коррозионное растрескивание аустенитных хромоникелевых сталей // Вопросы атомной науки и техники, Научно-технический сборник, Выпуск 23 Реакторные установки с ВВЭР // gidropress.podolsk.ru/files/vant/vant23.pdf

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, ст. преподаватель, каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕАТОРЫ: ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНЫХ ЗОН

М.А. Кабанова
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5011

Современная атомная энергетика идет по эволюционному пути: вплоть до 2020 г. планируется по проектам АЭС -2006,-10..-20 внедрение и эксплуатация реакторов типа ВВЭР-1000. Далее наступает век инновационный с реакторами бридерами (БН-1200) и корпусными легководными реакторами программы Супер-ВВЭР, основные физические свойства которых представлены в таблице 1.

Табл. 1. Физические характеристики перспективных реакторов [1]

| | ВВЭР-S | В-670 СКДИ | ПВЭР-650 | ПДСК-600 | ВВЭР-СКД | ВК-М | БН-1200 |
|--------------------------|----------|------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Мощность тепл./эл., МВт | 1820/600 | 1635/670 | 1750/650 | 1470/620 | 3830/1700 | 3000/1035 | 2900/1200 |
| КПД брутто, % | 34 | 41 | 37 | 42,5 | 44 | 34 | 42 |
| контуры | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 |
| $T_{\text{вход/вых}}$ °С | 287/329 | 375/395 | 349/368 | 388/500 | 290/540 | 289/292 | 550/410 |
| Выгорание МВт·сут | 56 | 40 | 67 | 57 | 40 | 26 | 138 |
| КВ | 0,94 | 0,89 | 1,01 | 1,0 | 0,94 | 0,97 | 1,2 |

Рассмотрено 6 перспективных проектов одноконтурных и двухконтурных РУ с возможностью их использования в замкнутом топливном цикле (ЗТЦ): ВВЭР-S – реактор с использованием спектрального регулирования для наработки плутония и охлаждаемый водой докритических параметров; В-670 СКДИ – двухконтурный реактор интегрального типа со сверхкритическим давлением теплоносителя в 1-м контуре, ПВЭР-650 – корпусный реактор, охлаждаемый пароводяной смесью, ПДСК-600 – паровой бридер в закритической области давления реактора с быстрым спектром нейтронов; ВВЭР-СКД – одноконтурный реактор с быстро-резонансным спектром нейтронов с двухзаходной активной зоной со сверхкритическим давлением в пря-

моточном одноконтурном исполнении; ВК-М – одноконтурный кипящий реактор с быстрым спектром нейтронов.

ВВЭР-СКД - единственный, соответствующий всем критериям водоохлаждаемых реакторов 4-го поколения Он экономически эффективен, имеет высокий КПД, низкую металлоемкость, использует МОХ-топливо: в загрузке со своим ОЯТ нужно около 160 кг плутония в год.

Проблему накопленных отходов позволит решить совмещение двух технологий: БН и ВВЭР-СКД. Для замыкания ядерного топливного цикла разрабатывается БН-1200 на оксидном и нитридном топливе с уменьшенным подогревом теплоносителя и оболочек. Планируется поэтапно увеличивать максимальное выгорание уран-плутониевого топлива до 20%, что снизит затраты на производство ТВС (топливная сборка) и уменьшение диаметра ТВЭЛа (тепловыделяющий элемент) до 9,3 мм, поэтому энергетика заинтересована в развитие новых конструкций твэлов. Например для ВВЭР-1000 рассматривается в дальнейшем возможность использования таблеток 7.8 мм без отверстия с соответствующим изменением толщины оболочек 9.10x0.57мм. (Рис.2)

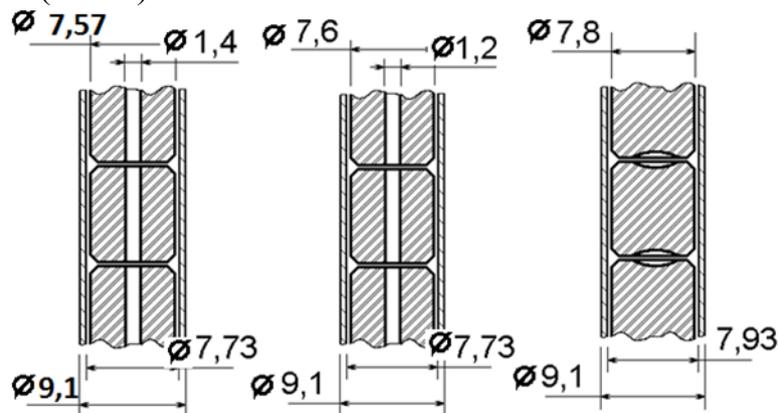


Рис.1. Совершенствование конструкции ТВЭЛа ВВЭР-100

В данной работе был рассчитан основной тип реактора и изучено влияние на него изменений формы и состава топлива.

Цилиндрический реактор конечных размеров. Топливо – U^{235} с плотностью $\rho=19,04$ г/см³, молярной массой $M_U=235$ г/моль. Число Авогадро $N_A=6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. Для данного реактора величина потока максимальна в группе энергий $E_n=0,4-0,8$ Мэв. Поэтому для одногруппового приближения, выбираем константы 6 группы [2].

Волновое уравнение и граничные условия имеют вид:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\Phi(r,z)}{dr} \right) + \frac{d^2\Phi(r,z)}{dz^2} + B_0^2 \Phi(r,z) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Phi(r, z) = \Phi(r, -z), \text{ точка } z = 0, \text{ находится на середине высоты,} \\ 2D\nabla\Phi(r, z) + \Phi(r, z)|_S = 0, \\ |\Phi(r, z)|_{r=0} < \infty. \end{cases} \quad (2)$$

Решаем графически и получаем значение критических размеров $r=8,2$ см, $z=13,2$ см- радиус и высота цилиндра.

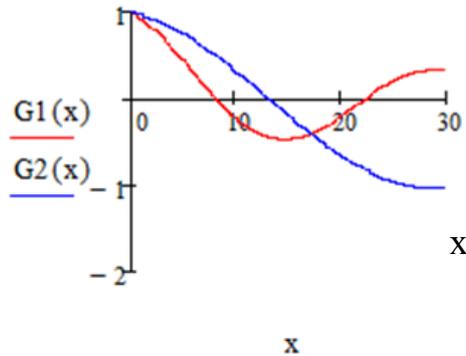


Рис. 2. Графическое решение волнового уравнения реактора

Зная плотность урана ρ , можно вычислить критическую массу. Изменяя B – геометрический параметр, определили, что оптимальной критической массой обладают образцы с размерами $r=z=9,2$ см. При таком соотношении размеров площадь внешней поверхности минимальна при максимальном объеме. Следовательно, вероятность избежать утечек больше.

Предположим, что концентрация урана в топливе будет меняться от 95% до 0,711%, и найдем критические параметры. При этом будут изменяться сечения смеси в зависимости: $\sigma_{i=c_{i5}} \cdot \sigma_{i5} + c_{i8} \cdot \sigma_{i8}$ и ядерная плотность смеси $\gamma_i = \frac{\rho N_A}{c_{i5} \cdot M_{235} + c_{i8} \cdot M_{238}}$.

Для топлива с обогащением урана меньше 7,5% нельзя получить критических параметров для цилиндра.

Если исследовать влияние размера отверстия бесконечного цилиндрического реактора на его радиус и поток, то уравнение (1) останется прежним, изменятся только граничные условия:

1. $2D\nabla\Phi(r) + \Phi(r) = 0, \quad (3)$
2. $\nabla\Phi(r)|_{r=a} = 0_{r=a}$

Где a – размер отверстия. А второе граничное условие описывает ток нейтронов через вакуум, находящийся внутри отверстия. Чтобы проанализировать изменение размеров реактора в зависимости от изменения размеров отверстия, изменяем значения радиуса отверстия, результаты см. на рис.3.

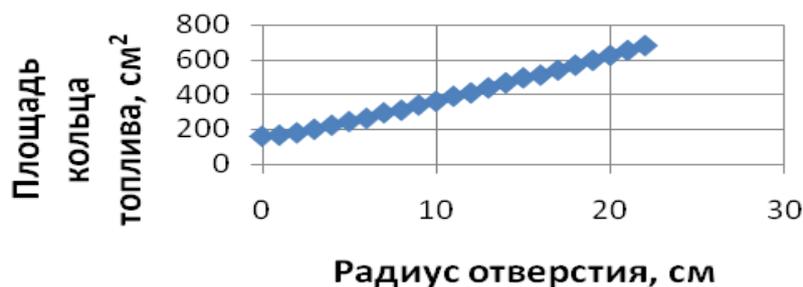


Рис. 3. Зависимость площади кольца топлива ($S=\pi(R^2 - a^2)$) от радиуса отверстия a

Проанализировав результаты: для бесконечно длинного цилиндра, с увеличением радиуса отверстия, увеличивается площадь кольца, следовательно, уменьшается путь проходимый нейтроном в топливе и увеличивается путь проходимый нейтроном через отверстие, что способствует возникновению утечек. Если, применить это к конечному цилиндру, то получим рост критической массы.

Удалось вычислить оптимальную критическую массу для конечного цилиндра. Она равна 88 кг. При этом методом подбора было определено, что это значение получается при равенстве двух критических размеров – диаметра и высоты. Это объясняется тем что, площадь внешней поверхности, а значит и вероятность утечки, в этом случае, минимальна.

При условии равенства диаметра и высоты цилиндра, изменяли обогащение урана по 235 изотопу, и получили вывод: при концентрации урана 235 ниже 7,5 %, не набирается критическая масса цилиндра. Это происходит в результате уменьшения вероятности деления из-за уменьшения обогащения.

Полученные результаты не обладают высокой точностью, а лишь помогают проанализировать выбор разных типов твэлов и дальнейшую перспективу их разработки и внедрения.

ЛИТЕРАТУРА:

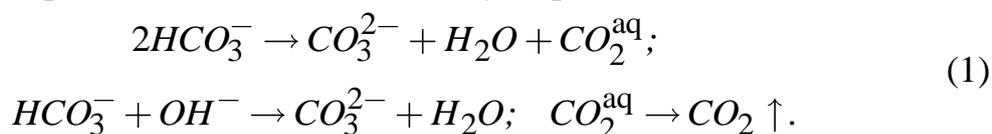
1. Баранаев Ю.Д., Глебов А.П., Кириллов П.Л., Клушин А.В. Реактор, охлаждаемый водой сверхкритического давления, ВВЭР-СКД – основной претендент в «Супер-ВВЭР». Препринт ФЭИ-3188, Обнинск, 2010 г.
2. Абагян, Н.О. и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов / Л.П. Базазянц, И.И. Бондаренко и др. М.: АТОМИЗДАТ, 1964. – 139с.

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, ст. преподаватель каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ГИДРОКАРБОНАТОВ В ДЕАЭРАТОРНЫХ БАКАХ С ПАРОВЫМ БАРБОТАЖОМ

С.Д. Горшенин, Г.В. Ледуховский
Ивановский государственный энергетический
университет им. В.И. Ленина

Рассматриваются процессы термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах атмосферного давления с паровым барботажем в баке, включающие химические превращения, молекулярную диффузию и дисперсное выделение диоксида углерода:



Свободный диоксид углерода – продукт термического разложения гидрокарбонатов, – первое время присутствует в воде в растворенной форме (индекс «aq»); его дисперсное выделение в виде газовых пузырей начинается после пересыщения раствора.

Итоговый процесс можно моделировать кинетическим уравнением реакции вида

$$dC / d\tau = -KC^n \quad (2)$$

где C – массовая концентрация гидрокарбонатов в воде, K – константа скорости реакции; τ – время; n – порядок реакции, равный 1 или 2.

Ранее нами [1] выполнено обобщение опубликованных экспериментальных данных, а также проведены дополнительные экспериментальные исследования. Целью работы являлось создание эмпирического обеспечения модели (2), то есть определение экспериментальных значений константы скорости реакции K . Выяснилось, что комплекс значений K характеризуется существенным (более 50 %) разбросом значений относительно среднего. Учитывая, что температура в водяном объеме бака мало отличается от температуры насыщения, значения K должны определяться только порядком химической реакции. Однако скорость стадий диффузионного отвода и дисперсного выделения газа зависимы от гидродинамической обстановки в системе. Таким образом, была выдвинута гипотеза, что наблюдаемый разброс значений K обусловлен влиянием гидродинамических условий реализации процесса. Эта гипотеза для деаэраторов без парового барботажа в баке доказана статистическими методами с применением

прикладного программного комплекса FlowVision, предназначенного для численного моделирования течений жидкости. Ниже приведен предложенный метод обработки результатов испытаний деаэраторов, позволяющий вычислять значения константы скорости реакции термического разложения гидрокарбонатов в уравнении (2) с учетом характеристик гидродинамической обстановки в деаэраторном баке:

1. С помощью средств САД-комплексов трехмерного проектирования создается геометрическая модель бака для проведения численных экспериментов в программном комплексе FlowVision.
2. Для условий каждого опыта натурных испытаний в программном комплексе FlowVision выполняется расчет гидродинамических характеристик потока воды в деаэраторном баке (в частности, определяется распределение скоростей воды в баке). Подробная характеристика модели и условий расчета изложена в [1].
3. После получения решения входной поток воды деаэраторного бака в компьютерной модели условно разбивается на m линий тока (в ходе специальных расчетных исследований выбрано значение $m = 1000$ [1]). Для каждой из линий тока определяется время τ_i , затрачиваемое соответствующим элементарным объемом воды на прохождение деаэраторного бака.

Значение константы скорости K в уравнении (2) определяется исходя из того, что это значение должно быть одинаковым для всех линий тока (поскольку температура воды в баке близка к температуре насыщения). В этом случае справедливы следующие соотношения:

$$C_i^{n=1} = C_0 e^{-K_{n=1}\tau_i}; C_i^{n=2} = 1 / C_0 + K_{n=2}\tau_i^{-1}; C = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m C_i, \quad (3)$$

где C_i – концентрация гидрокарбонатов в i -м объеме воды на выходе бака, мкг-экв/дм³; индексы $n = 1$ и $n = 2$ указывают на первый или второй порядок реакции соответственно; C_0 – концентрация гидрокарбонатов в воде на входе в бак, мкг-экв/дм³; K – константа скорости реакции, 1/с ($n = 1$) или кг/(мкг-экв·с) ($n = 2$); τ_i – время пребывания в баке i -го объема воды, с; C – расчетное значение концентрации гидрокарбонатов в воде в выходном сечении бака, мкг-экв/дм³.

Значение K для условий каждого опыта определяется подбором по условию совпадения расчетного и экспериментальных значений C .

Полученные таким образом уточненные значения K для условий каждого опыта на деаэраторах без парового барботажа в баке сопо-

ставлены со значениями K , полученными из уравнений, аналогичных (3), при замене τ_i временем полного вытеснения (определяемым как отношение объема воды в баке к объемному расходу воды через бак). Использование предложенного метода уточнения кинетических характеристик процесса термического разложения гидрокарбонатов позволило достичь следующих результатов [1]: уменьшить погрешность экспериментального определения констант скорости реакции в среднем с 50,0 до 20,1 %, т. е. до минимально возможного значения, обусловленного метрологическими характеристиками нормативных методов измерения щелочности воды; выявить и статистически доказать смену порядка реакции рассматриваемого процесса при общей щелочности деаэрируемой воды около 2,3 мг-экв/кг; создать методику прогнозирования показателей эффективности декарбонизации воды в деаэраторах без барботажа, точность которой в 3,7 раза больше, чем точность существующих моделей.

В настоящей работе рассматриваются результаты решения аналогичной задачи для деаэраторов с паровым барботажем в баке.

Расчеты по приведенному выше алгоритму для условий различных опытов с барботажем показали, что отклонение уточненных значений константы скорости реакции K от значений до уточнения существенно зависит от удельного расхода пара на барботажи d_{δ} и варьируется от 20–30 % при малых значениях d_{δ} до 3–5 % при больших значениях d_{δ} . В ходе анализа причин появления такой связи выявлено, что она обусловлена влиянием d_{δ} на интенсивность перемешивания воды в деаэраторном баке. Для примера на рис. 1 приведены статистические функции плотности распределения времени пребывания элементарных объемов воды в деаэраторном баке при разных значениях d_{δ} и неизменных значениях прочих режимных параметров деаэратора.

В табл. 1 приведены сводные данные по параметрам полученных распределений. Анализ результатов показывает, что при увеличении удельного расхода пара на барботажи распределение приближается к симметричному, в результате уменьшается отклонение медианы распределения от математического ожидания, что и обуславливает уменьшение разницы между уточненными и не уточненными значениями константы скорости реакции K . При этом следует отметить, что при значениях $d_{\delta} = 15$ кг/т д.в. (на рис. 1 не показано) распределение близко к симметричному, а увеличение d_{δ} до 25 кг/т д.в. не приводит к существенному изменению параметров распределения.

Таким образом, проведенные расчетные исследования позволили установить, что уточнение экспериментальных значений константы скорости реакции K по рассматриваемой методике имеет смысл при

значениях d_{δ} менее 15 кг/т д.в. С учетом этого выполнена повторная обработка имеющихся экспериментальных данных. Для уточненных данных при $n = 1$ разброс значений K относительно среднего составил 22,7%, а при $n = 2$ – 16,6%. Указанные величины отклонений соответствуют погрешности косвенного определения константы скорости реакции по результатам измерения параметров теплоносителей (около 20%).

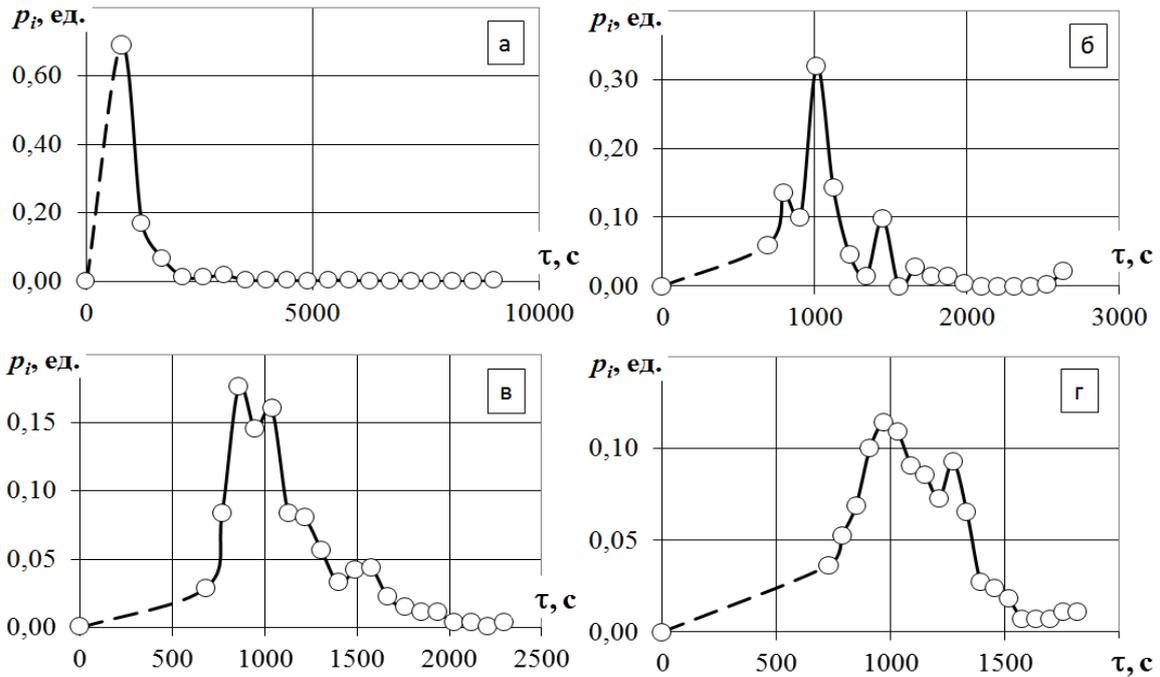


Рис. 1. Статистические функции плотности распределения времени пребывания элементарных объемов воды в деаэрационном баке при значениях удельного расхода пара на барботаж, кг/т д.в.: а – $d_{\delta} = 0$; б – $d_{\delta} = 3$; в – $d_{\delta} = 7,5$; г – $d_{\delta} = 25$

Табл. 1

| Параметр | Значение при d_{δ} , кг/т д.в. | | | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|------|------|-------|-------|
| | 0 | 3 | 7,5 | 15 | 25 |
| Медиана Me , с | 858 | 1007 | 1034 | 1054 | 1082 |
| Матожидание Mo , с | 1105 | 1105 | 1105 | 1105 | 1105 |
| Коэффициент асимметрии, ед. | 1,37 | 1,14 | 0,88 | -0,04 | -0,12 |

ЛИТЕРАТУРА:

1. Г.В. Ледуховский, С.Д. Горшенин, А.А. Коротков. Уточнение механизма процесса и константного обеспечения модели термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах без парового барботажа в баке // Вестник ИГЭУ. – 2013. № 3. С. 9–15.

Научный руководитель: Г.В. Ледуховский, канд. техн. наук, доцент кафедры тепловых электрических станций Ивановского государственного энергетического университета

РАЗРАБОТКА ЭМПИРИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОДЕЛИ ДЕАЭРАЦИИ ВОДЫ В ЦЕНТРОБЕЖНО-ВИХРЕВЫХ ДЕАЭРАТОРАХ

А.Н. Росляков, А.А. Разинков, Г.В. Ледуховский
Ивановский государственный энергетический
университет им. В.И. Ленина

Рассматривается процесс деаэрации воды в деаэраторах центробежно-вихревого типа (ДЦВ), работающих под вакуумом в режиме перегретой воды (без подачи греющего пара) [1]. Известен метод определения межфазной поверхности в перегретой жидкости в центробежно-вихревых деаэраторах, а также созданная на его основе математическая модель деаэрации воды. В основу математической модели деаэрации положено раздельное определение площади межфазной поверхности и коэффициентов переноса. Площадь поверхности раздела фаз рассчитывается на основе комбинаторного подхода [1]. Модель деаэрации воды базируется на известных уравнениях массообменных (диффузионных) процессов. Модель включает только один параметр идентификации – коэффициент массопередачи по растворенному кислороду. Для обеспечения возможности практического использования модели необходима разработка эмпирического обеспечения, позволяющего рассчитывать коэффициент массопереноса при десорбции растворенного кислорода в различных режимах работы.

В рамках работы сформулированы и решены следующие задачи:

1. проведены экспериментальные исследования процесса деаэрации воды в деаэраторе центробежно-вихревого типа;
2. для условий каждого опыта выполнена идентификация математической модели деаэрации воды;

3. на основе экспериментальных данных и результатов идентификации модели составлено критериальное уравнение, обеспечивающее расчет значений коэффициента массопереноса по растворенному кислороду в заданном режиме работы деаэрата.

Экспериментальные исследования реализованы в условиях промышленной эксплуатации центробежно-вихревого деаэрата в котельной производственного объединения «Иртыш» (г. Омск). Объектом исследований являлся деаэрат ДЦВ-200 номинальной производительностью 200 т/ч в составе двухступенчатой установки (ДЦВ – первая ступень, капельное деаэрационное устройство в деаэратном баке – вторая ступень). Разрежение в трубопроводе отсоса выпара создается водоструйным эжектором; охладитель выпара смешивающий.

Испытания проведены методом активного эксперимента. В каждом из 19 опытов, реализованных при различных значениях гидравлической нагрузки деаэрата, температуры воды перед ним, давлении в трубопроводе отсоса выпара и массовой концентрации растворенного кислорода перед деаэратом, выполнено от пяти до семи замеров контролируемых параметров. В объем теплотехнического контроля включены измерения расхода воды в деаэрат, температуры и давления воды до и после деаэрата, давления в паровом пространстве деаэрата и в трубопроводе отсоса выпара, а также атмосферное давление. Используются преимущественно образцовые и лабораторные средства измерения. Массовая концентрация растворенного кислорода в потоках воды до и после деаэрата измерялась амперметрическим методом с помощью переносного кислородомера МАРК-302Т. Полученные результаты замеров контролируемых параметров подвергнуты первичной обработке, включающей идентификацию и отсев выбегов, учет известных систематических погрешностей, а также расчет окончательных результатов измерения контролируемых параметров.

При использовании полученных таким образом экспериментальных данных для условий каждого опыта выполнена идентификация математической модели деаэрации воды, в ходе которой площадь межфазной поверхности рассчитана предложенным ранее методом [1], а значения параметра идентификации модели – коэффициента массопереноса по растворенному кислороду – определялись по условию минимального рассогласования результатов расчета и результатов измерения массовой концентрации растворенного кислорода в воде после деаэрата.

Далее рассмотрим этапы разработки критериального уравнения, обеспечивающего расчет значений коэффициента массопереноса по растворенному кислороду в различных режимах работы деаэрата.

С.С. Кутателадзе теоретически получено [2] обобщенное критериальное уравнение, характеризующее деаэрацию воды в условиях работы барботажного устройства (или в общем случае – для системы «жидкость, близкая к состоянию насыщения – пар»):

$$\frac{C_2 - C^*}{C_1 - C^*} = f \left(Fr_{\bar{o}}; \frac{\rho_n}{\rho_{жс}}; \frac{G_{жс}}{G_n}; \frac{\sigma}{g\rho_{жс}h_0^2}; \frac{p}{g\rho_{жс}h_0} \right) \quad (1)$$

где C_2 и C_1 , мг/дм³ – массовые концентрации растворенного кислорода соответственно на выходе и входе устройства; C^* , мг/дм³ – массовая равновесная концентрация растворенного кислорода; $Fr_{\bar{o}}$ – критерий Фруда для барботажного устройства; ρ_n и $\rho_{жс}$, кг/м³ – плотности соответственно пара и воды; $G_{жс}$ и G_n , кг/с – массовые расходы соответственно воды и пара на входе в барботажное устройство; g , м/с² – ускорение свободного падения; σ , Н/м – коэффициент поверхностного натяжения воды; p , Па – абсолютное давление пара на входе; h_0 , м – гидростатический уровень воды в барботажном устройстве.

Для рассматриваемых в нашем случае условий центробежно-вихревой деаэрации воды необходимо сделать несколько замечаний:

1. Согласно поставленной цели, требуется определять не отношение разностей концентраций газа в воде и паре, используемое в выражении (1), а непосредственно коэффициент массопередачи по растворенному кислороду. В этом случае будем использовать критерий Шервуда как безразмерную характеристику интенсивности процесса газообмена:

$$Sh = \frac{k_m d}{D_{жс} \rho_{жс}} \quad (2)$$

где k_m , кг/(м²с) – средний по поверхности контакта фаз коэффициент массопередачи по растворенному кислороду; d , м – определяющий размер, в качестве которого выбран диаметр корпуса центробежно-вихревой зоны деаэратора; $D_{жс}$, м²/с – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в воде.

2. Критерий Фруда для барботажного устройства является мерой соотношения скорости пара и потенциальной скорости воды в отверстиях барботажного листа. Для центробежного течения критерий Фруда может быть рассчитан как [2]

$$Fr = \frac{\omega^2 d}{2g} \quad (3)$$

где ω , 1/с – угловая скорость вращения жидкости.

3. Отношение расходов теплоносителей $G_{жс} / G_n$ для деаэратора, работающего в режиме перегретой воды, однозначно определяется критерием Кутателадзе, рассчитываемым по выражению [2]

$$K = \frac{r}{c\Delta T} \quad (4)$$

где r – удельная теплота парообразования; c – удельная теплоемкость воды; ΔT – перегрев воды относительно температуры насыщения при давлении в деаэраторе.

4. В соответствии с выводами, сделанными С.С. Кутателадзе [2],

влияние факторов $\frac{\sigma}{g\rho_{жс}h_0^2}$ и $\frac{p}{g\rho_{жс}h_0}$ становится заметным

только при существенных изменениях давления, например, при переходе от деаэраторов атмосферного типа к деаэраторам повышенного давления. В соответствии с этими выводами исключим рассматриваемые факторы из уравнения регрессии.

Таким образом, будем искать расчетное критериальное уравнение в следующем виде:

$$Sh = f\left(Fr; \frac{\rho_n}{\rho_{жс}}; K\right) \quad (5)$$

Корреляционный анализ с использованием аппарата для множественной линейной регрессии (после логарифмирования уравнения (5)) показал, что каждый из факторов включенных в уравнение, значим. Коэффициенты регрессии определены методом наименьших квадратов при использовании имеющегося массива экспериментальных данных. Итоговое уравнение регрессии получено в виде

$$Sh = 6,832 \cdot 10^{-4} Fr^{-0,111} \left(\frac{\rho_n}{\rho_{жс}}\right)^{-0,819} K^{-0,781} \quad (6)$$

Множественное корреляционное отношение для уравнения регрессии (6) составляет $R = 0,995$. Статистическая значимость уравнения, а также каждого из коэффициентов регрессии доказана с использованием критериев Фишера и Стьюдента.

Полученное критериальное уравнение (7) обеспечивает расчет коэффициента массопередачи по растворенному кислороду в центробежно-вихревом деаэраторе. Погрешность расчетного определения коэффициента массопереноса составляет 5,6 %. Уравнение справедливо при изменении критерия Фруда от 3,5 до 25,5; критерия Кутателадзе от 165 до 2075; отношения плотности сухого насыщенного пара при давлении в деаэраторе к плотности воды при том же давлении и средней температуре воды в деаэраторе от $2,7 \cdot 10^4$ до $5,1 \cdot 10^4$.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Комбинаторный подход к моделированию формирования межфазной поверхности в перегретой жидкости в центробежно-вихревых деаэраторах / А.Н. Росляков, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский, Е.В. Барочкин // Вестник ИГЭУ. – 2015. № 5.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 784 с.

Научный руководитель: Г.В. Ледуховский, канд. техн. наук, доцент кафедры тепловых электрических станций Ивановского государственного энергетического университета.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Д.Ю. Багаутдинов, О.В. Филимонова
Самарский государственный технический университет

Плазменное напыление является одним из наиболее интересных и эффективных способов нанесения защитных и упрочняющих покрытий на поверхность деталей. Оно представляет собой процесс, при котором наносимый материал в виде порошка или проволоки вводится в струю плазмы и нагревается в процессе движения с потоком газа до температур, превышающих температуру его плавления, и разгоняется в процессе нагрева до скоростей порядка нескольких сотен м/с. Плазменное напыление является одним из наиболее распространенных способов нанесения коррозионно-стойких и износостойких покрытий для работы в условиях эрозионного, фрикционного или абразивного износа.

В настоящее время в процессе генерации электроэнергии персоналу электрической станции приходится работать в условиях прогрессирующего старения основного энергетического оборудования, что является одной из главных причин снижения показателей надежности и энергоэффективности турбогенераторов.

Отказы при эксплуатации и преждевременный выход оборудования из строя во многом связаны с интенсивным износом конструкционных материалов различного оборудования (роторы, турбины, парогенераторы, теплообменники, запорная и регулирующая арматура,

насосы и др.), от которого в итоге зависит эффективность и долговечность эксплуатации энергетических объектов.

Анализ опыта эксплуатации оборудования Самарской ТЭЦ позволяет сделать вывод, что практически все виды износа, характерные для энергетического оборудования, наиболее ярко проявляются в роторах турбогенераторов. Применительно к элементам ротора можно выделить следующие наиболее существенные виды износа: абразивная эрозия, кавитационная эрозия, различные виды коррозии, включая коррозионное растрескивание под напряжением и эрозионно-коррозионный износ [1].

К настоящему времени разработано достаточно много различных способов повышения износостойкости элементов ротора турбогенератора. Однако большая часть из них не учитывает системный характер износа данных элементов в результате взаимного влияния различных повреждающих факторов, что приводит к интенсификации процессов разрушения конструкционных материалов и увеличивает вероятность отказов оборудования.

В настоящее время к технологиям плазменного напыления предъявляются следующие требования применительно к условиям эксплуатации оборудования электрических станций:

- способ формирования покрытий не должен приводить к изменению структуры и механических свойств основного защищаемого металла, образованию в нем концентраторов напряжений, уменьшению усталостной прочности;
- покрытия должны обладать универсальными защитными свойствами, т.е. одновременно с высокой эрозионной стойкостью обеспечивать и повышение коррозионной стойкости;
- покрытия должны длительно сохранять свои свойства, не растрескиваться и не отслаиваться под действием напряжений эксплуатационного уровня, в том числе и при повышенной коррозионной активности рабочей среды;
- шероховатость поверхности после формирования покрытий не должна приводить к ухудшению газодинамических и трибологических характеристик.

В ходе проведенных исследований и испытаний в условиях Самарской ТЭЦ было установлено, что наиболее эффективными установками плазменного напыления являются те устройства, где применяется принцип электродугового розжига плазмы.

Предлагаемая установка плазменного напыления для проведения текущего ремонта и повышения энергоэффективности ротора турбогенератора основана на применении дугового плазмотрона с каналом пе-

ременного сечения. При наличии уступа в канале плазмотрона создаются особые условия для локализации области шунтирования дуги непосредственно за зоной рециркуляции газа. Это позволяет фиксировать длину дуги и реализовать режимы работы плазмотрона на восходящей вольт-амперной характеристике.

Преимущества применения данной установки заключаются в следующем: она позволяет поддерживать стабильные условия напыления и значительно снизить содержание оксидов серы, азота и т.д. в обрабатываемой поверхности. Кроме того, высокая энергия частиц на выходе плазмотрона обеспечивает абсолютно иные физические условия взаимодействия осаждаемых веществ с защищаемой поверхностью.

Также дуговые плазмотроны с каналом переменного сечения имеют определенные особенности при генерации турбулентности и формировании пленки напыления потоком плазмы [2]. Это, в свою очередь, дает практически неограниченный выбор металлов и сплавов для формирования покрытий, а также возможность формирования многослойных, многокомпонентных и нанокompозитных покрытий, обеспечивающих высокие показатели эрозионной и коррозионной стойкости в сочетании с высокой пластичностью и низким коэффициентом трения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Рыженков В.А., Федоров В.А. и др. Повышение коррозионной стойкости лопаток высокотемпературных ступеней турбин //Надежность и безопасность энергетики. 2009. №2 (5). С. 34-39.
2. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. - Т. 17. - Новосибирск: Наука, СП РАН, 1999. - 712 с.

Научный руководитель: В.Н. Цапенко, к.т.н., СамГТУ.

ЭКОНОМИЧНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ НАДСТРОЙКИ НА ЭНЕРГОБЛОКАХ ТЭС

Я.А. Заугольникова, О.Ю. Ромашова, Е.А. Скребатун
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС

В настоящее время в России наметился рост промышленного производства, что в свою очередь обусловило увеличение потребления электроэнергии. Однако в связи с тем, что электрогенерирующее оборудование в большей мере изношено, возникает дефицит мощности. Основными направлениями развития теплоэнергетики являются реконструкция и техническое перевооружение тепловых электростанций, а также строительство новых электростанций, использующих новые эффективные технологии производства электроэнергии. В краткосрочной перспективе это может быть осуществлено за счет строительства высокоэффективных электростанций на базе ПГУ и ГТУ, прежде всего на действующих станциях.

Применение ПГУ позволяет достигнуть КПД электростанции 50-60%. Кроме этого позволяет сэкономить до 10% топлива, около 20% капиталовложений.

В данной работе рассмотрены способы повышения эффективности работы оборудования с использованием различных схем ГТ-надстройки на базе конденсационного блока К-300-240 [1]. За расчетный режим паротурбинной установки принят ее номинальный режим работы [2], параметры газовой турбины определялись по методике [3], расчет схемы парового блока на переменный режим осуществлялся с использованием формулы Стодолы- Флюгеля и других общепринятых зависимостей.

Одной из возможных схем реконструкции станции является ГТ-надстройка с вытеснением регенерации паровой турбины газодынными подогревателями высокого и низкого давления (ГВПВД и ГВПНД, рисунок 1). В качестве прототипа газовой турбины использовался агрегат ГТД-110 с температурой выхлопных газов $t_{\text{ВЫХ}} = 517 \text{ }^\circ\text{C}$ [2]. Для выбора наиболее экономичного варианта проведены вариантыные расчёты тепловой схемы ПГУ при изменении температуры газов на выходе из ГВПВД $t_{\text{Г}}^{\text{ПВД}}$ и расхода основного конденсата $G_{\text{ОК}_\text{Г}}$ на ГВПНД. Расчеты выполнялись при фиксированных значениях следующих параметров: расход пара в конденсатор равен номинальному значению $172,62 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$; температура уходящих газов $t_{\text{УХ}_\text{Г}} = 120^\circ\text{C}$; температура питательной воды на входе в котел $t_{\text{ПВ}} = 266^\circ\text{C}$.

Результаты расчётов представлены на рисунке 2.

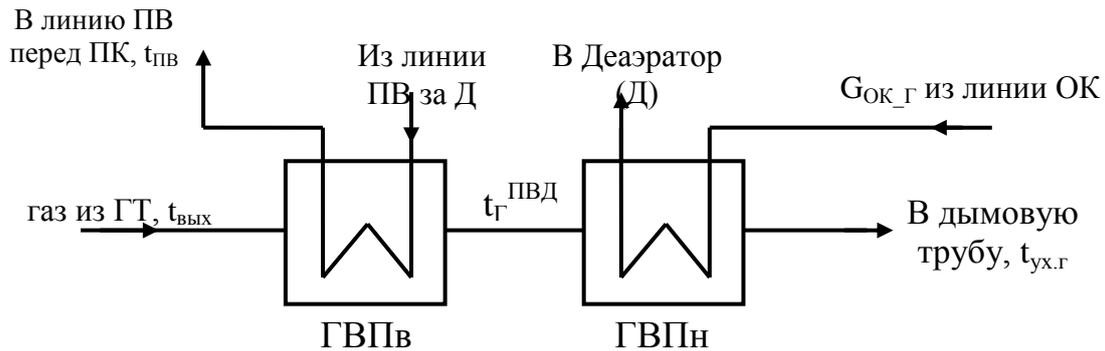


Рис. 1. Схема включения ПГУ с вытеснением регенерации

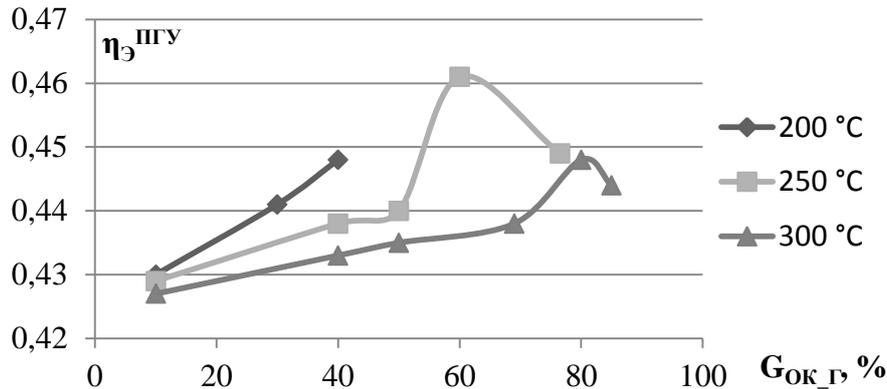


Рис. 2. Графики зависимости КПД по выработке электроэнергии ПГУ от температуры газов на выходе из ГВП ВД $t_{Г}^{ПВД}$ и доли расхода основного конденсата $G_{ОК_Г}$ через ГВП НД.

Как видно из графических зависимостей на рисунке 2, переменные значения температуры газов на выходе из ГВП ВД $t_{Г}^{ПВД}$ и доли расхода основного конденсата через ГВП НД $G_{ОК_Г}$ существенно влияют на экономичность работы ПГУ. Максимум КПД $\eta_{э}^{ПГУ}$ определяется оптимальными значениями этих двух параметров. Наибольшая тепловая экономичность достигается при $t_{Г}^{ПВД} \approx 250$ °C и $G_{ОК_Г} \approx (60-65)$ % от общего расхода основного конденсата блока К-300-240. Кроме того, с ростом температуры $t_{Г}^{ПВД}$ увеличивается возможный диапазон подачи основного конденсата $G_{ОК_Г}$ в котел-утилизатор; при наименьшей температуре $t_{Г}^{ПВД} = 200$ °C значение расхода $G_{ОК_Г}$ ограничено и составляет 40% от общего.

Расчетные исследования показывают, что прирост электрической мощности ТЭС для лучшего варианта составляет почти 45 МВт, из них доля газотурбинной части равна 65 МВт, мощность паротурбинного блока – 280 МВт. Увеличение электрического КПД $\delta\eta$ для схемы ПГУ с вытеснением регенерации по сравнению с КПД паротурбинного блока К-300-240 достигает $\delta\eta = 20$ %.

Учитывая, что потенциал уходящих газов высок, появляется возможность осуществлять промежуточный перегрев (ПП) пара в КУ, вытесняя его из парового котла (схема ПГУ с вытеснением промперегрева).

Для такого способа ГТ-надстройки выбор газотурбинной части должен обеспечить перегрев пара, отработавшего в цилиндре высокого давления турбины К-300-240, до заданной температуры промперегрева $t_{ПП}$, поэтому к рассмотрению были приняты две газовые турбины Siemens V64-3A с температурой выходящих газов $t_{ВЫХ} = 585 \text{ }^\circ\text{C}$ [3].

На рисунке 3 приведена схема включения котла-утилизатора в схему ПГУ с вытеснением промперегрева.

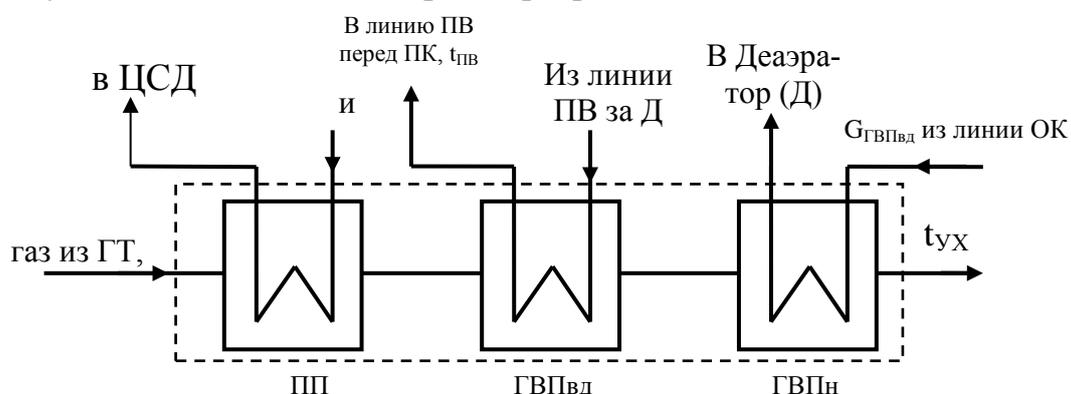


Рис. 3. Схема включения КУ в ПГУ с вытеснением промперегрева

Расчёт данной схемы был произведён для номинального расхода пара в конденсатор $172,62 \text{ кг/с}$. Исследования показывают, что использование теплоты отработавших в ГТУ газов для промежуточного перегрева пара позволяет увеличить КПД ТЭС до $48,5 \%$, что почти на 25% выше КПД исходной схемы. При этом суммарная электрическая мощность станции возрастает до 419 МВт , из них мощность газотурбинной части составляет $139,5 \text{ МВт}$, а паротурбинной установки - $279,5 \text{ МВт}$.

Сравнение показателей работы схем ПГУ с вытеснением регенерации и промперегрева по сравнению с исходным вариантом представлено на рис. 4,5 (где 1 – исходная схема К-300-240; 2 – схема ПГУ с вытеснением регенерации; 3 – схема ПГУ с вытеснением промперегрева).

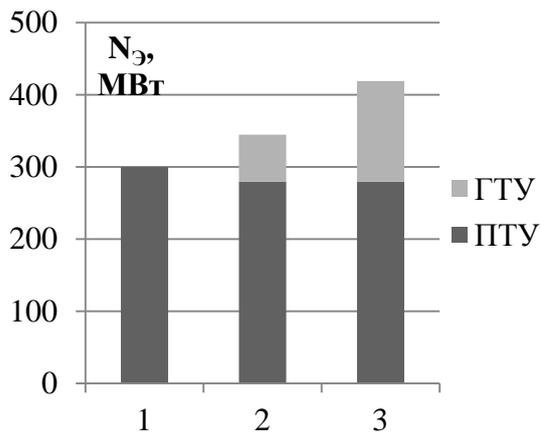


Рис. 4. Прирост мощности ТЭС за счет ГТ-надстройки

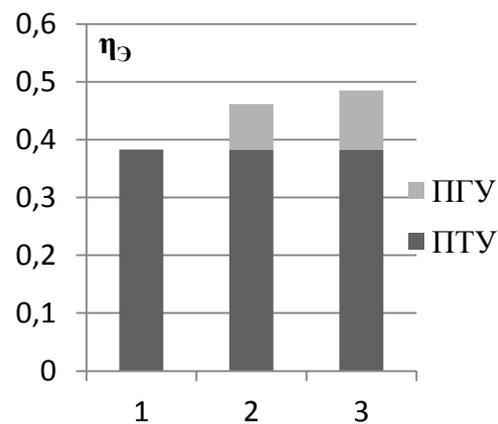


Рис. 5. Прирост КПД ТЭС за счет ГТ-надстройки

Выводы:

1. Рассмотрены два варианта газотурбинной надстройки для повышения экономичности паротурбинного энергоблока К-300-240 – с вытеснением регенеративного подогрева питательной воды и вытеснением промежуточного перегрева пара.
2. ГТ-надстройка увеличивает мощность ТЭС на (20-40) % и КПД по выработке электрической энергии на (15-25) %.
3. Схема ПГУ с вытеснением промперегрева имеет наибольший КПД ($\Delta\eta_{э} > 25\%$) по сравнению со схемой с вытеснением регенерации ($\Delta\eta_{э} \approx 15 - 20\%$).
4. Экономичность схемы с вытеснением регенерации определяется значениями температуры газов на выходе из газо-водяного подогревателя высокого давления $t_{Г}^{ПВД}$ и доли расхода основного конденсата через газо-водяной подогреватель низкого давления $G_{ОК_Г}$. Максимум КПД по выработке электроэнергии достигается при оптимальных значениях $t_{Г}^{ПВД}$ и $G_{ОК_Г}$.

Работа выполнена в рамках ВИУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Березинец П.А. Газотурбинная надстройка блока 300 МВт Костромской ГРЭС//Электр.станции. – 1999. - №7 С.64-72
2. Паровая турбина К-300-240 ХТГЗ/ Под общей редакцией Ю.Ф.Косяка – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.
3. Цанев С.В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. Учебник для вузов. – М.: Издательство МЭИ, 2002.– 584с

Научный руководитель: О.Ю. Ромашова, к.т.н., доцент каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ БЕЛОРУССКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Е.П. Чиж, В.И. Лешок

Белорусский национальный технический университет

Белорусская энергетическая система (энергосистема) является совокупностью объектов электроэнергетики, связанных единым процессом производства электрической энергии, ее передачи и распределения в условиях централизованного оперативно-диспетчерского управления.

Ключевую роль в успешном развитии энергетики Республики Беларусь, включая удовлетворение растущего спроса на тепловую и электрическую энергию, повышение надежности энергоснабжения и улучшение состояния окружающей среды, играют инновационные технологии.

Сегодня белорусская энергетика включает в себя 22 крупные электростанции, 25 районных котельных, почти 7 тысяч км системообразующих и около 250 км распределительных линий электропередач высокого напряжения и более 2 тыс. км тепловых сетей. Теплоэлектроцентрали и районные котельные вырабатывают порядка 60 % тепловой энергии.

Экономическая эффективность энергосистем оценивается по количеству топлива расходуемого на отпущенный кВт*ч электроэнергии и Гкал тепловой энергии.

Существующая структура и соотношение конденсационных и тепловых мощностей на электростанциях республики позволяет эффективно использовать топливо, в результате чего в Белорусской энергосистеме удельные расходы условного топлива на отпуск электрической и тепловой энергии – одни из самых низких в странах СНГ.

Согласно данным Электроэнергетического совета СНГ в 2014 году удельные расходы топлива на отпущенный кВт*ч составили в Республике Беларусь - 254,6 г у.т./кВт*ч, в Российской Федерации - 319,6-336,0 г у.т./кВт*ч, в Республике Казахстан - 346,5 г у.т./кВт*ч; отпуск тепловой энергии соответственно составил 167,8 кг/Гкал, 200,0 кг/Гкал, 182,1-182,5 кг/Гкал

В последнее время в стране под воздействием ряда макроэкономических факторов на критическом уровне находится индикатор энергетической безопасности в виде значительной доли доминирующего энергоресурса (природного газа) в потреблении топлива на объектах энергосистемы.

В настоящее время износ энергетических установок на белорусских электростанциях составляет порядка 40 %, значительная часть основного оборудования уже отработала положенный срок эксплуатации.

Повышение эффективности и надежности функционирования Белорусской энергетической системы может быть достигнуто путем внедрения высокоэффективного оборудования на электрических и тепловых станциях, а также применения современных передовых технологий, позволяющих вывести из эксплуатации менее экономичное и устаревшее оборудование.

В Республике Беларусь проблема повышения эффективности стоит особенно остро, так как нет собственных топливных ресурсов.

Объемы модернизации и развития источников теплоснабжения всех субъектов хозяйствования определяются на стадии разработки конкретных схем теплоснабжения населенных пунктов, утверждаемых Министерством энергетики или органами местной исполнительной власти в установленном законодательством порядке.

Мощность тепловых электростанций после 2015 года будет обеспечиваться за счет ввода газотурбинных надстроек, вывода из эксплуатации устаревшего оборудования и частичного замещения выходящих мощностей новыми.

Главной причиной потерь тепловой энергии является низкий коэффициент полезного действия (КПД) тепловых электростанций. На электростанциях типа ТЭЦ в отопительный сезон и при полной нагрузке энергоблоков КПД составляет примерно 80 %, в неотапливаемый сезон и при неполной нагрузке энергоблоков порядка 50 %.

В настоящее время практикуется внедрение на электростанциях парогазовых установок, что позволяет увеличить КПД тепловой электростанции до 75–80 % при условии использования отработанного пара паровой турбины для теплоснабжения. Также очень часто в таких установках помимо паровой турбины устанавливаются еще и газовую.

Активно ведется преобразование котельных в мини-ТЭЦ, за счет установки газотурбинных, газопоршневых двигателей и котлоутилизаторов. Некоторые предприятия начали строить и вводить в эксплуатацию собственные газотурбинные ТЭС (ГТЭС) с котлоутилизатором, что позволяет им обеспечить себя электроэнергией и теплом. На ряде крупных ТЭС Республики Беларусь Лукомльской ГРЭС, Гомельской ТЭЦ-2 и других, а также на Могилевской газораспределительной станции введены турбодетандерные установки.

Для уменьшения потерь тепла в теплосетях стали применять предизолированные трубы (ПИ-трубы) производимые в Республике Беларусь. К настоящему времени уже заменено 10 % старых тепловых сетей ГПО «Белэнерго». Активно проводится замена труб и в коммунальных теплосетях.

В ходе реализации Государственной программы развития Белорусской энергетической системы на период до 2016 года в первом полугодии 2015 года реконструированы старые и введены в строй ряд новых объектов.

На данный момент также продолжается реализация инвестиционных проектов: строительство Полоцкой и Витебской ГЭС; реконструкция Могилевской ТЭЦ-1 с внедрением ГТУ-25 МВт; реконструкция Гомельской ТЭЦ-1 с внедрением ПГУ – 35 МВт; реконструкция ПТ-60 на Гродненской ТЭЦ-2; реконструкция на Минской ТЭЦ-3 второй очереди с заменой паровых котлов и паровых турбин ст. №6 и №8 и т.д.

Особенностью формирования структуры генерирующих мощностей до 2016 года является необходимость планирования и создания технологических условий для функционирования энергосистемы после ввода АЭС.

Развитие атомной энергетики и вовлечение в энергобаланс ядерного топлива позволит заместить значительную часть импортируемых органических видов топлива (в объеме порядка 5 млн т у. т. к 2020 году), приведет к снижению себестоимости производимой электроэнергии, а также к уменьшению выбросов парниковых газов в атмосферу на 7–10 млн т.

В тоже время, актуальным становится вопрос интеграции АЭС в Объединенную энергосистему (ОЭС) Беларуси. Поскольку энергоблоки АЭС, как правило, не допускают ежесуточной разгрузки, необходимо разработать мероприятия по решению проблемы с прохождением ночных минимумов нагрузок отопительного периода. Для того чтобы интегрировать АЭС в ОЭС Беларуси, в настоящее время рассматривается комплекс мер, реализация которых позволит обеспечить баланс электрических мощностей в ночные часы отопительного периода: строительство электрокотлов, пиковых ГТУ, проведение гибкой тарифной политики и ряд других. При вводе в эксплуатацию АЭС для регулирования нагрузок в ОЭС Беларуси потребуется применение многоцелевых мероприятий в сочетании с одноцелевыми (КЭС–ТЭЦ–электрокотельные; пиковые ГТУ–ТЭЦ–электрокотельные; пиковые ГТУ–электрокотельные; КЭС–электрокотельные). Эффективность та-

ких сочетаний оценена в разработках ведущих институтов республики.

Кроме того, для обеспечения оптимальных режимов работы ОЭС Беларуси при вводе АЭС будут рассмотрены и оценены все возможные варианты экспорта электроэнергии в соседние энергосистемы, особенно в ночные часы отопительного периода.

Таким образом, ввод в структуру генерации ОЭС Беларуси атомной электростанции является значительным событием, которое должно сопровождаться адекватными изменениями в структуре действующей генерации в части режимных и экономических аспектов, а также созданием специализированных ночных производств, что позволит увеличить потребление электроэнергии в ночные часы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Становление энергетики Беларуси. Путь длиною в жизнь.// Энергетическая стратегия. - 2011. – N 2(20). – С. 20-29.
2. Куличенков В.П. Пути снижения потерь тепловой энергии и сокращения потребления топлива.// Энергетика и ТЭК. – 2010. – N4(85).
3. Интернет-источник: <http://www.minenergo.gov.by/>

Научный руководитель: В.А. Чиж, к.т.н., доцент, Белорусский национальный технический университет.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ ТОЛЬЯТТИНСКОЙ ТЭЦ

А.А. Шевцова

Самарский государственный технический университет

Тольяттинская ТЭЦ (ТоТЭЦ) является одним из основных источников отпуска тепловой энергии с горячей водой городу для отопления и горячего водоснабжения жилых районов и предприятий.

Сотрудниками СамГТУ совместно со специалистами ПТО ТЭЦ были проведены исследования магистральной (внутристанционной) тепловой сети и сети собственных нужд ТоТЭЦ.

Цель исследования заключалась в том, чтобы с помощью компьютерной модели оптимизировать режимы их работы.

На первом этапе была поставлена задача по оценке потенциальных возможностей работы магистральной (внутристанционной) теп-

ловой сети ТoТЭЦ. Необходимость такой оценки связана с перспективным увеличением ее тепловой нагрузки на 120 и 320 Гкал/ч в ближайшем будущем [1].

На втором этапе исследования было необходимо оценить состояние тепловой сети собственных нужд ТoТЭЦ [2]. Так как расход сетевой воды на собственные нужды отличается от нормативного расхода в несколько раз.

Тепловая нагрузка ТoТЭЦ, вместе с пиковыми водогрейными котлами (ПВК), исходя из температурного графика 150/70 °С составляет 872 Гкал/ч, при этом нагрузка, приходящаяся на бойлерные установки, равна 654 Гкал/ч при нагревании воды в бойлерных установках на $\Delta t=60$ °С. Расход сетевой воды при расчете по базовому варианту равен 10900 т/ч, из них 900 т/ч – на собственные нужды.

Тепловые сети города Тольятти от ТoТЭЦ работают по закрытой схеме. Для покрытия теплофикационной нагрузки на ТoТЭЦ установлено 6 бойлерных установок, включающих 5 бойлеров ПСВ-500, 2 - ПСГ-1300, 5 - ПСГ-2300 и 6 ПВК типа ПТВМ-100. Для осуществления циркуляции сетевой воды в турбинном цехе ТoТЭЦ установлены 8 сетевых насосов 1-го подъема и 12 сетевых насосов 2-го подъема производительностью 1000 т/ч (4 шт.) и 2500 т/ч (16 шт.).

Особенностью магистральной (внутристанционной) тепловой сети ТoТЭЦ является нерациональное расположение и запутанность обвязки трубопроводов в районе ПВК, зауженность диаметров ряда трубопроводов и др., что обусловлено постепенным вводом мощностей станции.

Система теплоснабжения собственных нужд ТoТЭЦ строилась без разработки специального проекта. Первоначально теплоносителем в системе являлся отработавший в турбинах пар. Позже, по мере увеличения количества потребителей и одновременного сокращения мощности работающих котлов использовать в качестве теплоносителя пар стало не экономично, так как доля его расхода на собственные нужды значительно возросла и система была переведена на водяное теплоснабжение.

К тепловым сетям собственных нужд присоединено около 70 потребителей. Система теплоснабжения закрытого типа, тупиковая. Сетевая вода требуется в основном для отопления зданий и в меньшей степени для систем вентиляции и горячего водоснабжения.

В настоящее время система теплоснабжения разделена на несколько самостоятельных контуров, которые работают независимо один от другого. Каждый из контуров присоединен к магистральным (внутристанционным) тепловым сетям ТЭЦ. Таким образом, расход

тепла на собственные нужды является составной частью тепла, вырабатываемого станцией в теплофикационном цикле.

Системы горячего водоснабжения всех производственных помещений и зданий подсоединены по закрытой схеме через скоростные водоводяные теплообменники (бойлера), которые установлены в тепловых пунктах этих зданий, всего установлено 29 теплообменников.

Отопительные приборы, установленные в главном корпусе и в других производственных помещениях, представляют собой в основном регистры, выполненные из гладких труб разных диаметров (от 40 до 200 мм), а также из отдельных секций трубных пучков подогревателей высокого давления турбин. Регистры в ряде случаев соединены между собой параллельно, что обуславливает пониженные гидравлические сопротивления системы отопления и избыточный расход воды при отсутствии контроля ее расхода. Некоторые из отапливаемых помещений оборудованы элеваторными узлами.

Поскольку проекта на тепловую сеть собственных нужд не существует, было проведено ее обследование. На основании полученных данных уточнена принципиальная схема тепловой сети собственных нужд, составлена схема трассировки ее трубопроводов, а также номенклатура потребителей и их расположение на территории станции, длины и диаметры подводящих трубопроводов. Местные системы отопления большинства объектов выполнены без проекта, гидравлические и теплотехнические характеристики их неизвестны. Элеваторными узлами оборудована лишь часть отапливаемых зданий.

Поэтому были проведены экспериментальные замеры основных режимных параметров работы тепловой сети собственных нужд (давления, расхода и температуры теплоносителя).

Для исследования гидравлических и тепловых режимов работы тепловых сетей ТoТЭЦ была построена ее компьютерная модель, включающая графическую схему соединения и базу данных, в которой хранится полная информация об элементах сети. Модель позволяет воспроизводить различные варианты работы тепловых сетей, как по составу задействованного оборудования, так и при различных исходных данных режимного характера. Задача гидравлического расчета тепловых сетей ТoТЭЦ заключалась в определении расходов и давлений по всем участкам и узловым точкам схемы и затрат электроэнергии на перекачку жидкости.

Расчетная информация позволяет выполнять детальный анализ состояния системы и оценивать влияние любого параметра на это состояние. Полученное в результате гидравлического расчета потоко-распределение является основой тепловых расчетов и определения

температуры воды в любой точке системы, в том числе и с учетом потерь в окружающую среду. Компьютерная модель может быть адаптирована для расчета и других распределительных трубопроводных систем практически любой сложности.

Для идентификации компьютерной модели были использованы результаты натурных измерений параметров работы тепловых сетей ТoТЭЦ (расходов, давлений и температур воды в различных точках). За основу был взят зимний режим работы тепловых сетей, по которому имеется наибольшая информация в части давлений и расходов сетевой воды на различных участках схемы. В процессе идентификации модели в соответствии с данными прямых измерений корректировались гидравлические характеристики некоторых элементов тепловых сетей, что позволило реальным режимом с максимально возможным приближением воспроизвести на компьютерной модели.

Погрешность моделирования определялась путем сопоставления опытных данных с результатами расчетов на компьютерной модели и составляет 2÷5 %, и в основном определяется точностью задания исходных данных, которые были получены в реальных условиях работы тепловых сетей.

Выводы

1. Разработана компьютерная модель внутростанционных тепловых сетей Тольяттинской ТЭЦ, включающая графическую схему соединения элементов сети и базу данных, в которой хранится полная информация об элементах сети.
2. Модель позволяет воспроизводить различные варианты работы тепловых сетей, как по составу задействованного оборудования, так и при различных исходных данных режимного характера и может быть адаптирована для расчета и других распределительных трубопроводах систем практически любой сложности. На основе экспериментальных данных по ряду режимов работы произведена идентификация компьютерной модели тепловых сетей ТoТЭЦ и уточнены гидравлические характеристики ее основного оборудования – сетевых подогревателей, пиковых котлов, сетевых насосов 1-го и 2-го подъема.
3. На компьютерной модели выполнены исследования режимов работы магистральной (внутростанционной) тепловой сети ТoТЭЦ при увеличении ее тепловой мощности на 120 и 320 Гкал/ч. Выполнен анализ результатов численных расчетов режимов работы тепловой сети на ПЭВМ и разработаны варианты реконструкции существующей схемы тепловой сети. Предложено несколько режимов работы тепловой сети с увеличенными

тепловыми нагрузками различных по составу работающего оборудования (насосов и сетевых подогревателей), при которых обеспечиваются заданные параметры на тепловыводах ТЭЦ и удовлетворяются нормативные требования.

4. С целью упорядочения учета потребления тепла на собственные нужды предлагается вариант реконструкции схемы тепловой сети собственных нужд ТоТЭЦ.
5. По результатам проведенных исследований проанализированы основные показатели работы тепловой сети собственных нужд ТоТЭЦ – общие затраты тепла и сетевой воды, а так же гидравлический и температурный режимы ее работы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. А. А. Кудинов, В. В. Авинов, С. К. Зиганшина. Исследование режимов работы внутростанционной тепловой сети Тольяттинской ТЭЦ // Электрические станции. - 2006. - №4. - С. 27-32.
2. А.А. Кудинов, В.В. Авинов. Исследование режимов работы теплосети Тольяттинской ТЭЦ // XIV Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии». Томск, 2008. Т. 3. С. 318-320.

Научный руководитель: В.В. Авинов, ассистент СамГТУ.

РЕГУЛИРОВОЧНЫЙ ДИАПАЗОН НАГРУЗОК ЭНЕРГОБЛОКА ПГУ-220Т

В.Б. Смышляев

Всероссийский теплотехнический институт

Введение

Под регулировочным диапазоном нагрузок энергоблоков ТЭС понимается диапазон нагрузок при работе с включенными в сеть генераторами, определяемый как разность между максимальной и минимальной тепловой нагрузками котлоагрегата, достигаемыми при разгрузке или нагружении энергоблока без изменения состава оборудования.

Согласно правилам технической эксплуатации (ПТЭ) нижний предел регулировочного диапазона нагрузок энергоблока устанавливается таким образом, чтобы обеспечивалось автоматическое регули-

рование блока и его работа в пределах регулировочного диапазона без вмешательства персонала.

При проведении тестирования готовности ПГУ к выполнению системных требований следует принимать во внимание ограничения основными из которых являются:

- существенная зависимость номинальной мощности газовых турбин от температуры наружного воздуха;
- зависимость экологических показателей блока от мощности газовых турбин;
- наличие в схеме газовых турбин антиобледенительных устройств, включающихся в работу в диапазоне температур наружного воздуха ($-5 \div +5$) °С, снижающих мощность газовых турбин;
- зависимость мощности паровой турбины от работы пароснабжения собственных нужд блока;
- зависимость от нагрузки КПД блока, в целом и отдельного основного оборудования;
- возможность эксплуатации блока при различном составе работающего оборудования.

Для паровой турбины Т-56/73-7,8/0,04 энергоблока ПГУ-220Т ТЭЦ-12 филиала ПАО «Мосэнерго» уставка предупредительной сигнализации срабатывает при снижении этой температуры до 450 °С, а защита от понижения этой температуры – ниже 440 °С. При температуре выше 490 °С время работы паровой турбины не ограничивается.

Так как температура пара ВД при минимальных нагрузках ГТУ на $\sim(25-30)$ °С ниже температуры газов перед котлом-утилизатором, эта температура не должна быть ниже $515 \div 520$ °С.

Близкая по значению расчетная средняя скорректированная температура газов за турбиной:

$$t_{\text{коррект}} = t_{2Т}^{\text{ИЗМ}} - Kt_{1К}^{\text{ИЗМ}} \quad (1)$$

является ограничением, при котором производится автоматический переход с режима горения предварительно подготовленной смеси на диффузионное горение в камерах сгорания ГТЭ–160 со значительным повышением концентрации окислов азота в уходящих из ГТУ газах (с 25 до 160 млн⁻¹, рис. 1).

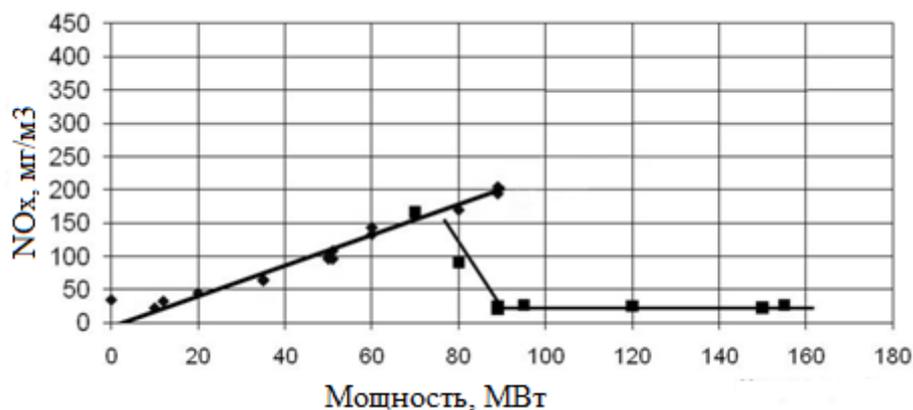


Рис. 1. Содержание окислов азота в уходящих газах от мощности ГТЭ-160

Такой уровень температур соответствует нагрузке ГТУ около 50 % номинальной мощности при нормальных условиях, а суммарная нагрузка блока вблизи нижней границы регулировочного диапазона при допустимом снижении температуры пара контура ВД составит около 60 % мощности ПГУ-220Т с полным составом оборудования в конденсационном режиме.

Нижняя граница регулировочного диапазона нагрузок

При проведении испытаний паровая турбина Т-56/73-7,8/0,04 энергоблока ПГУ-220Т работала в режиме скользящего давления пара контура высокого давления, для чего ее регулирующие клапаны были зафиксированы в положении 60 % их полного открытия. Разгрузка блока производилась снижением мощности ГТУ блока без воздействия на регулирующие клапаны паровой турбины.

Разгрузка ПГУ было остановлено при снижении мощности блока ниже 54 % МВт в связи с опасностью принудительного перехода КС ГТУ в режим диффузионного горения.

При отрицательных температурах наружного воздуха (≈ -30 °С) нижняя граница регулировочного диапазона нагрузок энергоблока ПГУ-220Т составляет около 140 МВт (рис. 2.)

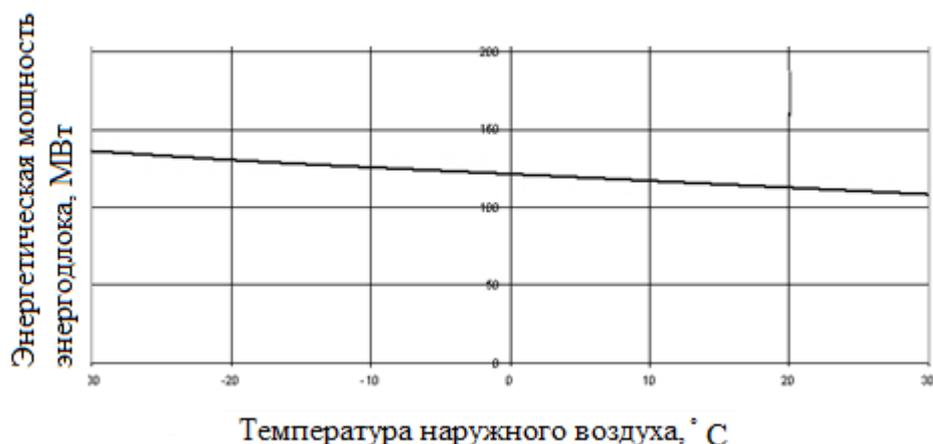


Рис. 2. Зависимость величины технологического минимума нагрузки блока ПГУ-220Т от температуры наружного воздуха

Для достижения технического минимума нагрузки ПГУ дальнейшее снижение нагрузки производилось отключением от паровой турбины контура низкого давления с отводом пара НД через БРОУ НД в конденсатор. В этом случае мощность ПГУ-220Т составила 50 % (рис. 3).

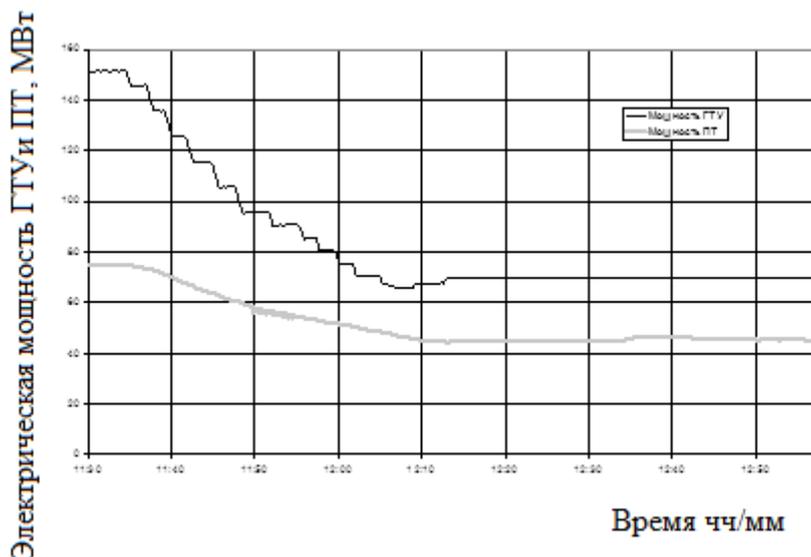


Рис. 3. Изменение параметров оборудования энергоблока ПГУ-220Т при разгрузке с отключением контура НД

Для ПГУ-220Т с ГТУ типа ГТЭ-160 при наружной температуре $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура газов достигает $497\text{ }^{\circ}\text{C}$ уже при нагрузке ГТУ 75 МВт, при этом технологический минимум составляет около 54 % МВт.

При температуре наружного воздуха $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и нагрузке около 65 МВт с сохранением режима горения с предварительным смешиванием, скорректированная температура газов составляет $503\text{ }^{\circ}\text{C}$ рис. 4. На

рис. 5 указана зависимость минимальной мощности ГТУ от температуры наружного воздуха при скорректированной температуре газов $495 \div 500$ °С.

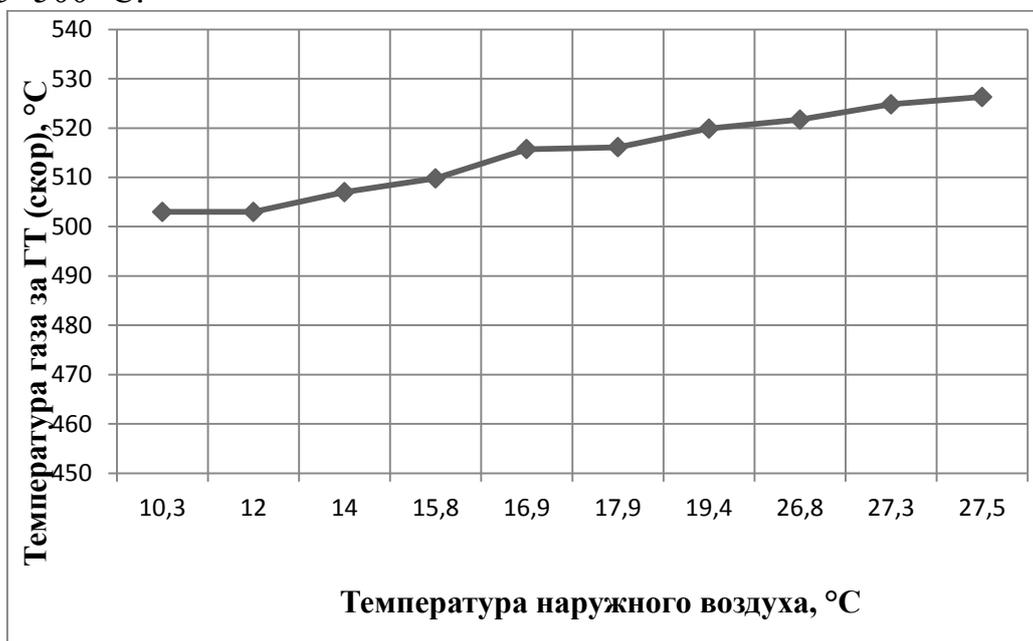


Рис. 4. Изменение скорректированной температуры газов при изменении температуры наружного воздуха энергоблока ПГУ-220Т

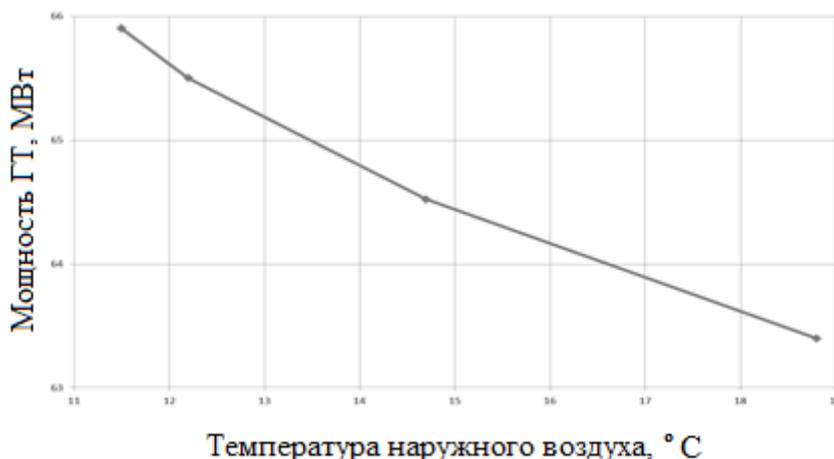


Рис. 5. Изменение мощности ГТУ при изменении температуры наружного воздуха энергоблока ПГУ-220Т

Для достижения и надежного поддержания 50%-ного технологического минимума нагрузки энергоблока 50 % во всем диапазоне температур наружного воздуха, ГТУ можно разгружать до мощности, при которой ВНА не полностью закрыт (положение ВНА около 5 %), а паровая турбина разгружается глубже, до достижения общей мощности блока 50 % номинальной. Для этого следует прикрывать регулировочный клапан ВД паровой турбины.

Верхняя граница регулировочного диапазона нагрузок

Максимальная нагрузка N_{\max} прямо пропорциональна барометрическому давлению и существенно зависит от температуры наружного воздуха $t_{\text{нар}}$ (рис. 6).

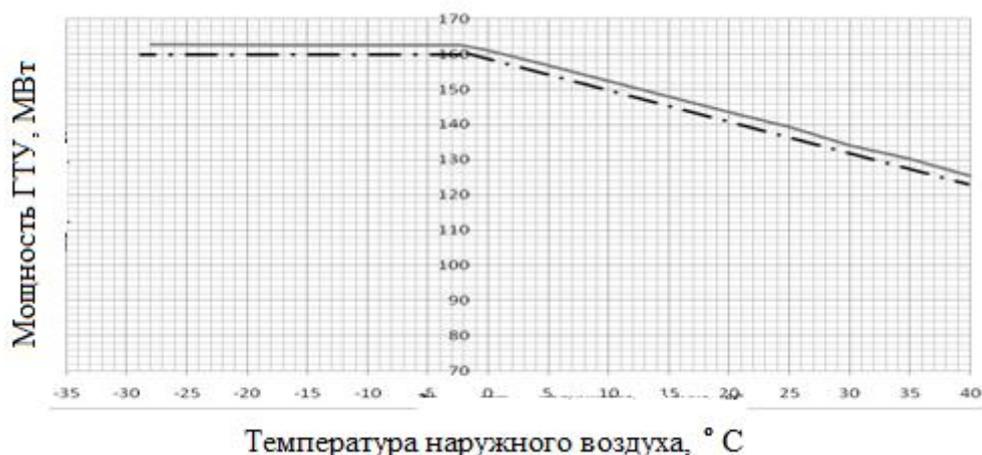


Рис. 6. Зависимость мощности ГТЭ-160 от температуры наружного воздуха: 1 – без учета влияния барометрического давления; 2 – с учетом барометрического давления

В интервале температур наружного воздуха ($-5 \div +5$) °C включается система антиобледенения, перепускающая часть воздуха из компрессора на вход в КВОУ. Это приводит к некоторой потере мощности ГТУ и блока в целом.

Выводы

1. Нижний предел регулировочного диапазона нагрузок (суммарная нагрузка всех генераторов) энергоблока ПГУ-220Т, которая может быть надежно обеспечена при всех температурах наружного воздуха, в летний и зимний периоды при полном составе работающего оборудования составляет 112 МВт.
2. С этой нагрузкой можно устойчиво эксплуатировать блок ПГУ-220Т неограниченное время при сохранении высокой экономичности и надежности и выполнении экологических нормативов.
3. Максимальная нагрузка блока ПГУ при наружной температуре ниже 0 °C составляет 240 МВт. При повышении наружной температуры она снижается до ~200 МВт.

Научный руководитель: Ю.А. Радин, д.т.н. ВТИ.

ПАРОВЫЕ ТУРБИНЫ ДЛЯ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК, ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.Л. Домрачев

Всероссийский теплотехнический институт

Развитие паровых технологий для крупных ТЭС на органическом топливе и атомных электростанций продолжается. На новейших ТЭС с ультра-сверхвысокими параметрами свежего пара, перспективными системами подогрева питательной воды (например, бездеаэрационные тепловые схемы), современными материалами котлов и турбин, и другими усовершенствованиями, достигаются КПД энергоблоков до 45–47 %.

В то же время, получили широкое распространение бинарные парогазовые установки с к.п.д. 53–55 % и до 60 % с паровыми турбинами на пониженные по сравнению с паровыми блоками параметры пара.

Основные проблемы создания и эксплуатации паровых турбин для парогазовых установок связаны с обеспечением:

- высокой экономичности в пределах всего регулировочного диапазона нагрузок в соответствии с требованиями к маневренности ПГУ;
- наименьшего времени пусков из различных тепловых состояний;
- сокращения продолжительностями монтажа и запуска в эксплуатацию;
- участия паровых турбин в регулировании частоты и мощности в составе энергоблока;
- использования унифицированных конструкций цилиндров и современных проточных частей.

Примерные параметры пара для ПГУ различных типов представлены в таблице 1.

Табл. 1. Примерные параметры пара для ПГУ различных типов

| ПГУ | Пар высокого давления | | Пар среднего давления (промежуточный перегрев) | | Пар низкого давления | |
|-----------------|-----------------------|-----------------|--|-----------------|----------------------|-----------------|
| | Давление, МПа | Температура, °С | Давление, МПа | Температура, °С | Давление, МПа | Температура, °С |
| Одного давления | 5–8 | 490–540 | – | – | – | – |
| Двух давлений | 5–8 | 490–540 | – | – | 0,5–0,7 | 200–230 |
| Трех давлений | 11–14 | 500–540 | 2–3,5 | 500–540 | 0,4–0,6 | 200–230 |

Отсутствие системы регенеративного подогрева воды в цикле, связанное с необходимостью утилизации тепла отработавших в ГТУ газов в последних по ходу газов поверхностях котлов-утилизаторов и наличие нескольких контуров пара в этих котлах приводит к увеличенному расходу пара в цилиндры низкого давления паровых турбин ПГУ. В связи с этим, в части низкого давления паровой турбины применяют рабочие лопатки последней ступени длиной 1000–1066 мм.

КПД парогазовой установки изменяется на 0,3–0,35 % при изменении КПД паровой турбины на 1 %.

Для достижения высоких значений КПД ПГУ необходимы и высокие экономические показатели паровых турбин. Они достигаются за счет:

- совершенствования проточной части паровой турбины путем пространственного проектирования лопаток, в том числе за счет применения саблевидных лопаток и ступеней с навалом в проточной части, что позволяет получить внутренние относительные КПД цилиндров высокого и среднего давления на уровне 90–91 %, и цилиндров низкого давления более 86 %;
- применения реактивного облопачивания в части высокого давления;
- применения дроссельного парораспределения с комбинированными стопорно-регулирующими клапанами;
- применения многоконтурного паротурбинного цикла с промежуточным перегревом пара среднего давления, что позволяет снизить удельный расход тепла на 3,0 % и повысить мощность паровой турбины;
- использования осевого или бокового расположения конденсатора в паровых турбинах с одним выхлопом мощностью до 110–120 МВт, позволяющего снизить абсолютное давление в конденсаторе ПТ, увеличить располагаемый теплоперепад ЦНД и общую экономичность паровой турбины.

В ПГУ применяются паровые турбины активного и реактивного типов. У каждого из них есть свои преимущества. Больше, пожалуй, особенно в современных паровых турбинах зарубежных производителей, распространено реактивное облопачивание.

В паровых турбинах для парогазовых установок должна использоваться в основном дроссельное парораспределение во всех контурах подвода пара к турбине с независимым отдельным управлением регулирующими клапанами высокого, среднего и низкого давлений. Это позволяет радикально снизить потери от дросселирования в регули-

рующих клапанах и эксплуатировать турбины в пределах регулировочного диапазона нагрузок при скользящем давлении.

Одним из ограничений регулировочного диапазона нагрузок ПГУ снизу является минимально допустимая температура пара высокого давления перед турбиной (например, для турбины Т-150-7,7 – эта температура составляет 420 °С). Это создает возможность эффективного использования паровой турбины при сниженных нагрузках. Использование скользящего давления пара во всех контурах позволяет минимизировать изменение КПД паровой турбины практически во всем регулировочном диапазоне нагрузок ПГУ.

Целесообразно рассмотреть вопрос о применении водокольцевых вакуумных насосов и водоструйных эжекторов, использовать в полной мере эффект самоуплотнения паровых турбин, применять встроенные деаэрационные установки в схемах котлов-утилизаторов, а котлы-утилизаторы – с прямоточными контурами высокого давления.

Продолжительности пусков паровых турбин ПГУ значительно большие, нежели ГТУ и общее время пусков ПГУ в целом существенно зависит от продолжительности пуска и нагружения паровой турбины, которое определяется главным образом ее исходным тепловым состоянием (таблица 2).

Для сравнения время пуска и нагружения ГТУ составляет около 20–30 мин из любого теплового состояния.

Табл. 2. Продолжительности пусков бинарных парогазовых установок из различных тепловых состояний

| Тип пуска | Продолжительность | |
|-------------------------------|----------------------------|---------------------|
| | (по зарубежным источникам) | (отечественные ПГУ) |
| Пуск из холодного состояния | 150 мин | 150–180 мин |
| Пуск из неостывшего состояния | 120 мин | 100–120 мин |
| Пуск из горячего состояния | 30–55 мин | 60 мин |

Как показывают результаты испытаний, проведенных на блоках ПГУ-450Т СЗ ТЭЦ и на Сочинской ТЭС, снижение давления пара в контуре и дополнительное открытие регулирующих клапанов низкого давления приводит к некоторому увеличению паропроизводительности КУ в контуре низкого давления (в диапазоне от 0,6 МПа до 0,4 МПа абсолютных) и увеличению мощности паровой турбины на 0,6–0,7 % от номинальной мощности.

Дальнейшее развитие паровых турбин для ПГУ может быть связано с отработкой унифицированных цилиндров высокого, среднего и низкого давлений с учетом количества контуров пара в котле-утилизаторе. В сочетании с осевым выхлопом применение унифицированных цилиндров низкого давления позволит использовать паровые турбины в, частности, для одновальных схем.

Участие ПГУ в системном регулировании частоты и мощности при их работе в пределах регулировочного диапазона нагрузок со скользящим давлением пара в контурах высокого и низкого давления потребует активного подключения паровой турбины в процесс поддержания частоты сети.

Выводы

Для повышения экономичности паровых турбин, работающих в парогазовых установках, целесообразно применение всех известных современных методов совершенствования проточной части высокого, среднего и низкого давления: трехмерного проектирования лопаток реактивного облопачивания в частях высокого давления, современных уплотнений в проточной части, позволяющих уменьшить зазоры и соответственно, протечки помимо лопаток, применения саблевидных лопаток и ступеней с навалом в проточной части. Эти мероприятия позволяют повысить КПД проточной части высокого и среднего давления до 90–94 %, а части низкого давления до 86 %.

В связи с применением для наиболее экономичных ПГУ котлов-утилизаторов трех давлений с промежуточным перегревом пара следует рассматривать возможность унификации паровых турбин для ПГУ с паровыми турбинами для традиционных энергоблоков ТЭС без ограничений их характеристик маневренности.

В перспективе целесообразно рассматривать применение осевых выхлопов для паровых турбин ПГУ.

Паровые турбины должны обеспечивать работу ПГУ на скользящем давлении пара всех контуров в пределах регулировочного диапазона нагрузок с наибольшей экономичностью. Для этого следует применять дроссельное парораспределение с комбинированными стопорно-регулирующими клапанами высокого, среднего и низкого давления и независимым управлением этими клапанами.

Научный руководитель: Ю.А. Радин, д.т.н. ВТИ.

СЕКЦИЯ 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТА И ПОДГОТОВКИ НЕФТИ

А.М. Сагдатуллин, Т.А. Нафиков, И.Н. Сафин, К.Н. Шакирова
Альметьевский государственный нефтяной институт

Аннотация. В работе рассматривается вопрос управления насосной станцией как части системы транспорта и подготовки нефти, основные проблемы процессов подготовки и транспортировки скважинной продукции на основе классических методов управления. Выявлено, что при транспорте нефтепродуктов по цепочке «пласт – скважина – системы сбора и подготовки – магистральный трубопровод» непрерывно изменяются физико-химические параметры нефти и режимы работы всей системы, что ведет к снижению качества управления электроприводом системы транспорта и подготовки нефти. Для моделирования представлена замкнутая система управления асинхронным электроприводом на основе нечеткого регулятора.

Актуальность. Качество электрической энергии, а, следовательно, потери и эффективность режимов работы оборудования, характеризуются показателями, непосредственно определяющимися соответствием частоты и напряжения нормированным показателям качества электрической сети. Как правило, при проектировании и подборе мощности систем считается, что эксплуатация электроприемников, с точки зрения технической и экономической целесообразности, будет производиться в большинстве случаев в номинальных режимах работы. Однако, система транспорта и подготовки нефти представляет собой комплекс распределенных объектов – насосных станций с установленными на них мощными насосами, от алгоритмов и управления которыми, зависит поддержание уровня напряжения и частоты сети, а значит качество электроэнергии и эффективность всей системы. По характеру работы насосных агрегатов данный тип нагрузки можно отнести к резкопеременным (нелинейным) нагрузкам, что выражается в необходимости многократного запуска высоковольтных электроприводов, мощностью 315 кВт. Следовательно, грамотная автоматизация работы насосной станции системы транспорта и подготовки нефти и газа имеет первостепенное значение как для снижения капитальных затрат, повышения качества электрической энергии и эксплуатацион-

ных расходов, так и для сокращения сроков обустройства насосного оборудования на месторождениях.

Причиной резкопеременной (нелинейной) нагрузки насосных станций является влияние различных параметров транспортируемой продукции (давление, температура, удельный объём, компонентный состав фаз) и режимов работы скважин, выражающееся в прерывности потока нефтяной эмульсии и изменении его состава в процессе транспорта. Так, при движении углеводородов по всей цепочке "пласт – скважина – системы сбора и подготовки – магистральный трубопровод" непрерывно изменяется давление и температура, что ведет к изменению фазовых состояний систем, компонентного состава фаз, и как следствие, наблюдаемых физико-химических свойств нефти, газа, воды как многокомпонентной многофазной системы [1]. В данных условиях основные принципы и закономерности управления процессами подготовки и транспортировки скважинной продукции на основе классических пропорционально – интегрально -дифференциальных (ПИД) регуляторов становятся малоэффективными, вследствие того, что для управления данной нелинейной системой требуются новые методы и подходы к управлению объектами.

Моделирование системы, состоящей из следующих элементов: понижающего и повышающего трансформаторов; низковольтной и высоковольтной коммутационной аппаратуры; дросселя; синусоидального фильтра; высоковольтного асинхронного электродвигателя (ВАД); насосов (основного и резервного) производится по исходным дифференциальным уравнениям звеньев входящих в x -у модель ВАД в системе координат, вращающаяся синхронно с ротором ($\omega^m = \omega$) и ориентированной по оси фазы a обмотки.

$$\left. \begin{aligned} U_{Sx} &= r_{\vartheta} (T_{\vartheta} p + 1) \cdot i_{Sx} - \omega_k l_{\vartheta} i_{Sy} - \omega k_r \Psi_{ry} - \alpha_r k_r \Psi_{rx}; \\ U_{Sy} &= r_{\vartheta} (T_{\vartheta} p + 1) \cdot i_{Sy} + \omega_k l_{\vartheta} i_{Sx} + \omega k_r \Psi_{rx} - \alpha_r k_r \Psi_{ry}; \\ r_r k_r i_{Sx} &= \alpha_r (T_r p + 1) \Psi_{rx} - (\omega_k - \omega) \Psi_{ry}; \\ r_r k_r i_{Sy} &= \alpha_r (T_r p + 1) \Psi_{ry} + (\omega_k - \omega) \Psi_{rx}. \\ m &= k_r (\Psi_{rx} i_{Sy} - \Psi_{ry} i_{Sx}) \\ m - m_C &= T_j p \omega, \\ m - (M_0 + b \omega^2) &= T_j p \omega \end{aligned} \right\} (1)$$

где $U_{Sx}, U_{Sy}, i_{Sx}, i_{Sy}, \Psi_{rx}, \Psi_{ry}$ – напряжения, токи и потокосцепления статора и ротора, r_{ϑ} – эквивалентное активное сопротивление фазы двигателя, T_{ϑ} – электромагнитная постоянная времени главной цепи двигателя, $k_r = L_m / L_r$ – коэффициент связи ротора, l_{ϑ} – эквивалентная

индуктивность рассеяния фазы двигателя, $\alpha_r = r_r / l_r$, $T_j = J\Omega_{s,\sigma} / pM_\sigma$, $\Omega_\sigma = \Omega_{s,ном} = 314 \text{эл.рад/с}$, $M_\sigma = M_{ном}$ – базисная угловая частота и номинальный момент АД, $M_c = M_0 + b\omega^2$ – момент сопротивления на валу ВАД, M_0 – начальный момент сопротивления насоса при закрытой задвижке на выходе насоса. При регулировании можно считать, что производительность насоса пропорциональна угловой скорости механизма, а момент сопротивления на валу изменяется по параболической зависимости [2].

Моделирование системы производилось на основе лабораторного стенда научно-образовательного центра, включающего насосный агрегат, трубопроводы и запорно-регулирующую арматуру, емкости, имитирующие резервуарные парки временного содержания (рисунок 1) [2].



Рис. 1. Лабораторный стенд

По результатам математического моделирования (без системы управления и преобразователя) процессов пуска установлено, что по сравнению с номинальным ударный и пусковой токи увеличиваются соответственно в 8 и 6,5 раза. Пусковой и критический моменты также увеличиваются в 2,2 и 2,5 раза в сравнении с номинальным моментом АД. Моделирование также производилось в составе частотного преобразователя и системы управления модели Stardom FCJ японской фирмы Yocogawa Electric (рисунок 2) под управлением разработанного нечеткого регулятора.



Рис. 2. Схема управления насосными агрегатами в составе управляющего комплекса Stardom FCJ «Yocogawa Electric»

Таким образом можно сделать выводы, что разработанная система управления насосными агрегатами на основе нечеткого регулятора в составе экспериментального стенда и управляющего комплекса Stardom FCJ «Yocogawa Electric» обеспечивает непрерывную работу насосов без необходимости частых пусков, тем самым повышая эффективность и качество электроэнергии локальной системы электропитания, а именно насосной станции в системе транспорта и подготовки нефти.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сваровская Н. А. Подготовка, транспорт и хранение скважинной продукции: Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2004. – С. 72-88.
2. Сагдатуллин А.М. Особенности обустройства и автоматизации нефтяного месторождения для решения задач энергосбережения // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. 2014. Том XII. Часть 1. С. 143-148.

Научный руководитель: А.А. Емекеев, к.х.н., доцент, директор научно-образовательного центра АГНИ.

РЕКУПЕРАТИВНЫЕ УСТАНОВКИ В СИСТЕМАХ ВОЗДУХООБМЕНА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

С.В. Прохоров

Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПЭО, группа 5Г2А

На современных предприятиях, в офисах, в цехах для комфортной работы необходимо обеспечить помещения достаточным воздухообменом. Вентиляция, полностью заменяющая объемы воздуха в помещении без каких-либо средств поддержания тепла, является крайне неэкономичной, т.к. не сохраняет энергию и вновь прибывший воздух приходится приводить (охлаждать или нагревать) к необходимой температуре. Решением данной задачи являются рекуперативные установки, внедренные в системы воздухообмена.

Рекуперация тепла – это процесс возврата тепла, процесс его получения назад. Т.е. поступающий воздух нагревается теплом удаляемого воздуха (Рис.1.).

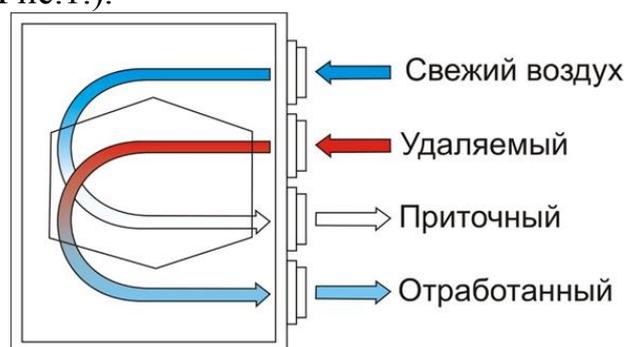


Рис. 1. Процесс рекуперации воздуха

Стоит отметить, работа вентиляционной системы с рекуперативным узлом позволяет сэкономить огромное количество энергии, до 80 – 95 %, что несомненно является обоснованием для внедрения таких систем.

В последнее время вентиляционная индустрия активно развивается и в связи с этим были разработаны следующие виды рекуперативных агрегатов:

- пластинчатые рекуператоры;
- роторные рекуператоры;
- камерные рекуператоры;
- тепловые трубы;
- рекуператоры с промежуточным теплоносителем.

Ниже будет произведен более подробный обзор данных установок.

Пластинчатые рекуператоры.

Пластинчатые рекуператоры – самый распространенный вид рекуператоров, применяемых в системах приточно-вытяжной вентиляции. Принцип его действия заключается в пересечении воздушных потоков приточного и вытяжного воздуха. Эти потоки пересекаются, но не перемешиваются в специальном пластинчатом теплообменнике (Рис.2.). Материалом для пластин могут служить алюминий, пластик, нержавеющая сталь, бумага.

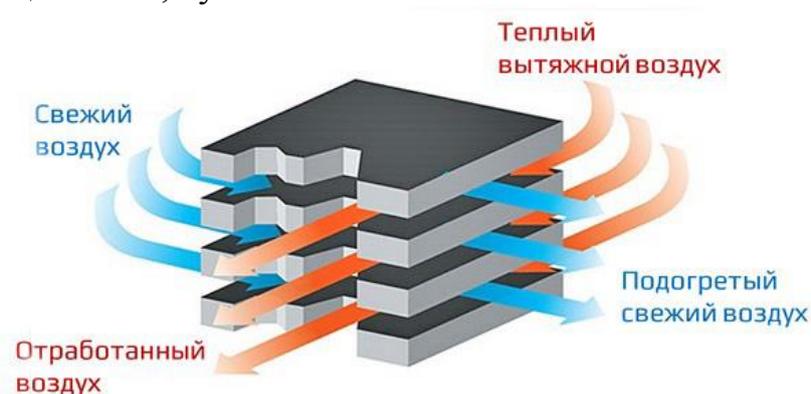


Рис. 2. Пластинчатый рекуператор

Достоинства пластинчатого рекуператора:

- пластинчатые теплообменники обладают эффективностью 40-92%;
- пластинчатый теплообменник в данном виде рекуператоров – устроен просто и не имеет подвижных или трущихся частей, что подразумевает собой нечастое техническое обслуживание;
- в данном рекуператоре отсутствуют какие-либо потребители электроэнергии, что снижает стоимость расходов на работу данного устройства.

Недостатки пластинчатого рекуператора:

- необходимостью пересечения потоков приточного и вытяжного воздуха диктуется необходимость пересечения воздуховодов в рекуператоре, что не всегда удобно и реализуемо;
- в зимний период пластинчатый теплообменник может обмерзнуть и для решения этой проблемы необходимо либо периодически отключать приточный вентилятор, либо использовать байпасный клапан;
- данные рекуператоры способны только к теплообмену, влагообмен в данном виде рекуператоров – редкость.

Роторные рекуператоры.

Роторные рекуператоры – второй по распространенности вид рекуператоров, применяемых в системах приточно-вытяжной венти-

ляции. Принцип его действия заключается в прохождении воздушных потоков приточного и вытяжного воздуха через специальный вращающийся роторный теплообменник (Рис.3.).

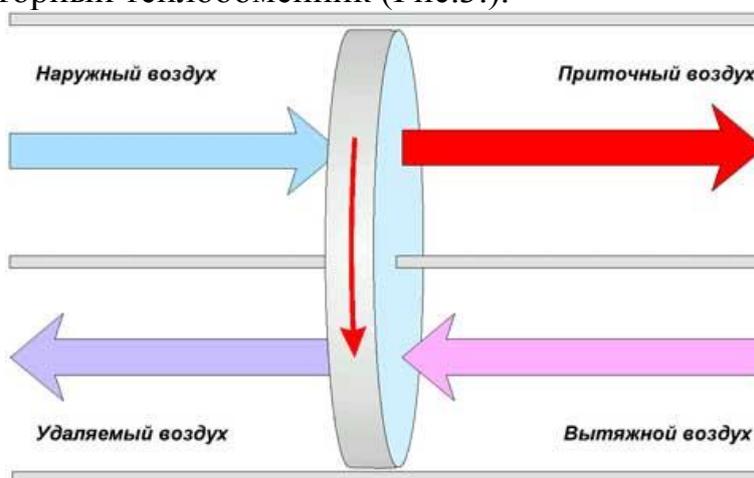


Рис. 3. Роторный рекуператор

Достоинства роторного рекуператора:

- роторные теплообменники обладают эффективностью 60-85%;
- роторный теплообменник в данном виде рекуператоров позволяет возвращать не только тепло, но и влажность;
- регулируя скорость вращения ротора можно регулировать общую эффективность рекуператора.

Недостатки роторного рекуператора:

- загрязненный воздух частично переносится в приток, в связи с чем необходима установка дополнительных фильтров на приток и на вытяжку;
- в данных рекуператорах имеются подвижные части и потребители электроэнергии, в связи с чем необходимо производить техническое обслуживание чаще, чем в пластинчатых рекуператорах.

Камерные рекуператоры.

Камера разделяется на две части заслонкой. Удаляемый воздух нагревает одну часть камеры, затем заслонка изменяет направление воздушного потока таким образом, что приточный воздух нагревается от нагретых стенок камеры.

Достоинства камерного рекуператора:

- характеризуется высокой эффективностью (70-80%);
- передает влажность.

Недостатки камерного рекуператора:

- загрязнение и запахи могут передаваться из удаляемого воздуха в приточный воздух;

- для работы системы необходимо внедрить дополнительные технические элементы, что увеличивает стоимость и сложность обслуживания.

Тепловые трубы.

Данный рекуператор состоит из закрытой системы трубок, заполненных фреоном, который испаряется при нагревании удаляемым воздухом. Когда приточный воздух проходит вдоль трубок, пар конденсируется и вновь превращается в жидкость.

Достоинства тепловых труб:

- не требует частого обслуживания;
- низкая стоимость работ при установке данной системы рекуперации.

Недостатки тепловых труб:

- имеет низкую эффективность (50-70%);
- в случае утечки фреона, оказывает негативное влияние на здоровье человека.

Рекуператоры с промежуточным теплоносителем.

Вода или водно-гликолиевый раствор (Рис.4.) циркулирует между двух теплообменников, один из которых расположен в вытяжном канале, а другой в приточном. Теплоноситель нагревается удаляемым воздухом, а затем передает тепло приточному воздуху. Обладая низкой эффективностью, используются в случае, если удаляемый воздух сильно загрязнен или токсичен, когда смешивание недопустимо.

Достоинства рекуператора с промежуточным теплоносителем:

- теплоноситель циркулирует в замкнутой системе и отсутствует риск передачи загрязнений из удаляемого воздуха в приточный;
- передача тепла может регулироваться изменением скорости циркуляции теплоносителя;
- в качестве теплоносителя может использоваться вода, поступающая из энергоцентрали.

Недостатки рекуператора с промежуточным теплоносителем:

- эти рекуператоры имеют низкую эффективность (45-60%);
- сложная система.



Рис. 4. Рекуператор с промежуточным теплоносителем.

В современном мире экономическая составляющая является одной из главных, поэтому внедрение данных систем будет крайне полезно, т.к. рациональность использования ресурсов в данном случае очевидна. Поэтому можно сделать вывод о том, что наиболее распространенным рекуперативным устройством является система пластинчатого типа из-за простоты конструкции и малой стоимости. Но недостатки присущие данному агрегату не позволяют внедрить данный тип рекуператора в некоторых условиях (постоянство влажности, низкая температура). В этих случаях следует прибегнуть к другим видам рекуперативных систем.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Что такое рекуперация. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.citiair.ru/pages/vent/buildingvent.html>
2. Новые технологии в теплоснабжении и строительстве: Сборник работ аспирантов и студентов - сотрудников научно-исследовательской лаборатории Теплоэнергетические системы и установки. Выпуск 8. - Ульяновск: УлГТУ, 2010. - 274 с.

Научный руководитель: А.А. Шилин, к.т.н., доцент каф ЭПЭО ЭНИН ТПУ.

О ПРИМЕНЕНИИ КВАДРАТИЧНОГО СПОСОБА ЛИНЕАРИЗАЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ ГРЕБНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

А.В. Морозов, В.С. Лавриновский
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Переход от исходного нелинейного математического представления какой-либо технической системы, в том числе и гребного электропривода, к ее линейному аналогу является наиболее распространенным инструментом при построении законов управления и анализе устойчивости этой системы. При этом в настоящее время широко используется способ линеаризации, основанный на методе малых отклонений. Однако такой способ характеризуется низкой степенью точности и неопределенностью при изменении равновесного состояния системы.

Улучшения показателей можно добиться при использовании квадратичного способа линеаризации, основанного на переходе к канонической форме Бруновского [1].

Рассмотрим математическое описание электромагнитных и механических процессов в двухобмоточном асинхронном двигателе (АД) с короткозамкнутым ротором

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{dqs(1,2)} = \mathbf{R}_{s(1,2)} \mathbf{I}_{dqs(1,2)} + \frac{d\Psi_{dqs(1,2)}}{dt} + \mathbf{j}\omega_0 \Psi_{dqs(1,2)}, \\ 0 = R_r \mathbf{I}_{dqr} + \frac{d\Psi_{dqr}}{dt} + \mathbf{j}(\omega_0 - Z_P \omega_r) \Psi_{dqr}, \\ \Psi_{dqs(1,2)} = \mathbf{L}_{s(1,2)} \mathbf{I}_{dqs(1,2)} + L_m \mathbf{I}_{dqr}, \\ \Psi_{dqr} = L_r \mathbf{I}_{dqr} + L_m \mathbf{I}_{dqs(1,2)}, \\ J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_c, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \mathbf{U}_{dqs(1,2)} &= [U_{qs1} \quad U_{ds1} \quad U_{qs2} \quad U_{ds2}]^T; \\ \mathbf{I}_{dqs(1,2)} &= [I_{qs1} \quad I_{ds1} \quad I_{qs2} \quad I_{ds2}]^T; \quad \mathbf{I}_{dqr} = [I_{qr} \quad I_{dr}]^T; \\ \Psi_{dqs(1,2)} &= [\Psi_{qs1} \quad \Psi_{ds1} \quad \Psi_{qs2} \quad \Psi_{ds2}]^T; \quad \Psi_{dqr} = [\Psi_{qr} \quad \Psi_{dr}]^T; \end{aligned}$$

$$\mathbf{R}_{s(1,2)} = [R_{s1} \quad R_{s1} \quad R_{s2} \quad R_{s2}]^T; \quad \mathbf{L}_{s(1,2)} = [L_{s1} \quad L_{s1} \quad L_{s2} \quad L_{s2}]^T;$$

$$\mathbf{j} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} - \text{матрица поворота вектора в пространстве.}$$

При построении канонической формы Бруновского используются некоторые положения теории групп и векторных полей. Систему уравнений (1) не трудно привести к следующему виду

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{X}(\mathbf{x}) + u\mathbf{Y}(\mathbf{x}), \quad (2)$$

где $\mathbf{X}(\mathbf{x}) = [\xi_1(\mathbf{x}), \dots, \xi_n(\mathbf{x})]^T$, $\mathbf{Y}(\mathbf{x}) = [\eta_1(\mathbf{x}), \dots, \eta_n(\mathbf{x})]^T$, – гладкие векторные поля.

Необходимо найти преобразования для замены координат $y = y(\mathbf{x})$, $v = v(\mathbf{x})$, такие, что система приводится к форме

$$\frac{dy}{dt} = \mathbf{A}_k y + \mathbf{B}_k v, \quad y \in R^n, v \in R^m, m < n, \quad (3)$$

где $\mathbf{A}_k, \mathbf{B}_k$ – матрицы размерности $n \times n$ и $m \times m$ соответственно.

Причем, если нашлось преобразование $y_1 = T_1(\mathbf{x})$, то все последующие $i = \overline{2, n}$ преобразования могут быть получены вычислением производных Ли функции $T_1(\mathbf{x})$ вдоль векторного поля $\mathbf{X}(\mathbf{x}) + u\mathbf{Y}(\mathbf{x})$.

В [2] приведен ряд условий, при которых возможен переход к эквивалентной системе (3). Так, должно выполняться свойство инволютивности (совместной интегрируемости) системы $S = \left\{ \text{ad}_X^i \mathbf{Y}(\mathbf{x}), i = \overline{0, n-2} \right\}$, векторы $\text{ad}_X^i \mathbf{Y}(\mathbf{x}), i = \overline{0, n-1}$ должны быть линейно независимы и $\text{ad}_X^{n-1} \mathbf{Y}(\mathbf{x}) \neq 0$ в точке равновесия и ее окрестности. Выполнение данных свойств обуславливает существование преобразования $y_1 = T_1(\mathbf{x})$. Остальные компоненты определяются как

$$y_i = \mathbf{X}^{i-1}(T_1(\mathbf{x})) = T_i(\mathbf{x}) = \mathbf{X}(T_{i-1}(\mathbf{x})) = \left(\frac{\partial T_{i-1}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}, \mathbf{X}(\mathbf{x}) \right), \quad i = \overline{2, n}, \quad (4)$$

При условии, что множество векторных полей инволютивно, а так же при выполнении остальных указанных выше свойств можно получить систему в виде

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}'\mathbf{x} + \mathbf{B}'\mathbf{u} + \gamma^{(2)}(\mathbf{x}), \quad (5)$$

где

$$\gamma(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} Z_p x_2 x_7 \\ -Z_p x_1 x_7 \\ -a_7 x_2 x_7 \\ a_7 x_1 x_7 \\ -a_8 x_2 x_7 \\ a_8 x_1 x_7 \\ -a_{11} x_1 x_4 - a_{11} x_1 x_6 + a_{11} x_2 x_3 + a_{11} x_2 x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_1^{(2)}(\mathbf{x}) \\ \gamma_2^{(2)}(\mathbf{x}) \\ \gamma_3^{(2)}(\mathbf{x}) \\ \gamma_4^{(2)}(\mathbf{x}) \\ \gamma_5^{(2)}(\mathbf{x}) \\ \gamma_6^{(2)}(\mathbf{x}) \\ \gamma_7^{(2)}(\mathbf{x}) \end{bmatrix}; \mathbf{A}' = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1' & \mathbf{A}_2' \\ \mathbf{A}_3' & \mathbf{A}_4' \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}' = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1' \\ \mathbf{B}_2' \end{bmatrix}; \mathbf{A}_1' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$\mathbf{A}_2' = \mathbf{0}_{3 \times 4}$; $\mathbf{A}_3' = \mathbf{0}_{4 \times 3}$; $\mathbf{A}_4' = \mathbf{0}_{4 \times 4}$; $\mathbf{B}_1' = \mathbf{0}_{2 \times 5}$; $\mathbf{B}_2' = \mathbf{I}_5$; $\mathbf{0}_{3 \times 4}$ – нулевая матрица размерности 3×4 .

Согласно теореме, подробно раскрытой в [1], система (5) может быть окончательно линеаризована путем следующей замены переменных

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{x} + \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}), \\ \mathbf{u} &= (1 + \boldsymbol{\beta}(\mathbf{x}))\mathbf{v} + \boldsymbol{\alpha}(\mathbf{x}), \end{aligned} \quad (6)$$

где k – порядок нелинейности.

При этом должно выполняться

$$\mathbf{A}'\boldsymbol{\varphi}^{(k)}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}'\boldsymbol{\alpha}^{(k)}(\mathbf{x}) + f^{(k)}(\mathbf{x}) + \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}^{(k)}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{A}'\mathbf{x} = \mathbf{0}, \quad (7)$$

$$\mathbf{B}'\boldsymbol{\beta}^{(k)}(\mathbf{x}) + \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}^{(k)}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{B}' = \mathbf{0}, \quad (8)$$

Векторы из (6) - (8) для исследуемой системы шестифазного АД могут быть определены как

$$\varphi^{(2)}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_P x_2 x_7 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \alpha^{(2)}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} Z_P x_1 x_7 \\ a_7 x_2 x_7 \\ -a_7 x_1 x_7 \\ a_8 x_2 x_7 \\ -a_8 x_1 x_7 \\ a_{11} x_1 x_4 + a_{11} x_1 x_6 - a_{11} x_2 x_3 - a_{11} x_2 x_5 \end{bmatrix};$$

$$\beta^{(2)}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & a_7 x_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -a_7 x_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_8 x_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -a_8 x_1 \\ -a_{11} x_2 & a_{11} x_1 & -a_{11} x_2 & a_{11} x_1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Подставив в систему (5) выражения (6) с учетом (9) получим линеаризованную систему шестифазного АД.

На рис. 3, а и б приведены результаты моделирования

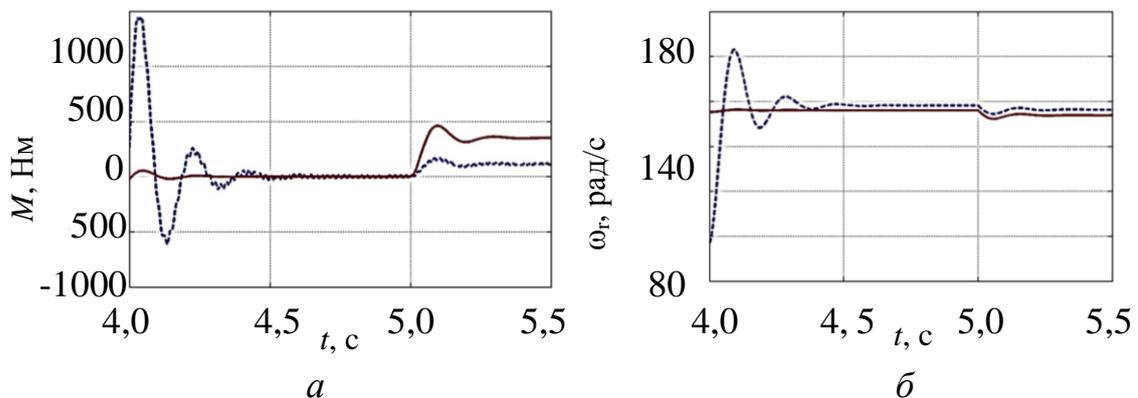


Рис. 1. Результаты моделирования линеаризованной системы

В отличие от метода малых отклонений, квадратичный способ линеаризации позволяет учитывать нелинейности более высокого порядка, и, следовательно, характеризуется более высокой точностью. Однако стоит отметить, что построение канонической формы Бруновского требует использования сложного математического аппарата и применимо лишь для класса нелинейных динамических систем, линейных по управлению.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Parvathy A. K. Complete Quadratic Linearisation of Machine Models / A. K. Parvathy, V.Kamaraj, R.Devanathan // – 16th IEEE International Conference on Control Applications, Systems and Control. – Singapore, 2007. – P. 1130 – 1133.
2. Пупков К. А., Егупов Н. Д. Методы современной теории автоматического управления. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – Т. 3. – 744 с.

Научный руководитель: Б.В. Бруслиновский, к.т.н., доцент каф. САУ, СПбГЭТУ («ЛЭТИ»)

ПОВЫШЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОПРОЦЕССОРОВ

И.М. Корышкин

Казанский государственный энергетический университет

Модульная система в своей основе содержит принцип универсальности и гибкости, под любые требования к исполнению и использованию в широком спектре задач. Применение этой системы очень широко, во всех областях современной техники, построение по модульному принципу схем, или целых систем позволяет снизить затраты на покупку ненужных опций, так же снизит требования к квалификации сервисных инженеров, а так же упрощает ремонт и диагностику устройства.

Рассматривая работу частотных преобразователей в составе технологического процесса с использованием нескольких химических реакторов. Была выдвинута идея о создании микропроцессорной модульной системы управления асинхронными двигателями, включающую в себя возможности подключения разнообразных модулей.

Если учесть необходимость производственной компании использования асинхронный двигателей для приведения во вращения рабочих частей химических реакторов, и всего комплекса в реакторов в целом, и для этого на производстве используются преобразователи частоты. С учетом того что для каждого химического процесса необходима та или иная температура, скорость вращения то есть возможность создания модульной системы управления для манипуляции данным химическим цехом. Для этого необходимо создать один ос-

новной модуль который будет базироваться на основе частотного преобразователя, и его компонентами будут служить самые разнообразные модули, начиная с того что возможно создать совершенно разные модули защиты, модули индикации, так же модули обратной связи, модули связи нескольких частотных преобразователей между собой создавая таким образом систему в которой «Ведущим» элементом будет персональный компьютер оператора а «Ведомым» все соединенные между собой и компьютером частотные преобразователи, это позволит видеть в реальном времени ситуацию в реакторах а так же управлять всей системой и каждым частотным преобразователем в частности. Такая система будет подключать модули по шинной технологии тем самым упростит работу по монтажу и наладке системы. Где каждый модуль будет содержать в себе простейший контроллер (в зависимости от нужд данного модуля). Важной частью данного проекта будет служить программное обеспечение этой системы оно будет представлять из себя так же блочно-модульную систему, в которой по умолчанию будут включены коды для работы со всеми известными модулями, но эти блоки кода будут пропускаться процессором при пустой шине модуля, то есть при отсутствии подключения этого модуля. Это даст системе большую гибкость и удобство в подключении. Самым сложным и важным звеном будет модуль связи с ПК, так как он при подключении будет являться ведущим для всех подключенных к нему преобразователей частоты, и позволит обеспечить двунаправленную шинную связь как к преобразователю частоты так и к ПК.

Научный руководитель: А.А. Варенов, к.т.н., професоор КГЭУ.

ИССЛЕДОВАНИЕ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В НЕПОЛНОФАЗНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Е.П. Сенькив¹, А.Д. Брагин²

^{1,2}Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПЭО, ¹группа 5Г2А

Асинхронные машины сегодня составляют большую часть электрических машин. В основном они применяются в качестве электродвигателей и являются основными преобразователями электрической энергии в механическую. Запуск возможен только в случае соединения обмоток «звездой» с подключением нулевого провода. Если нагрузка не позволит двигателю запуститься и развить номинальные

обороты, то из-за увеличения тока в обмотках и уменьшения охлаждения он выйдет из строя через несколько минут.

Исследование аварийных состояний асинхронного двигателя в составе исполнительных электроприводов опасных производственных объектов предполагает рассмотрение работы двигателя в неполнофазных режимах работы. Обеспечение отказоустойчивого управления со свойством живучести асинхронного электропривода предполагает разработку алгоритмов восстановления работоспособности с полным или частичным восстановлением работоспособности с круговым вращающимся полем.

При разборе двухфазного режима работы трехфазного асинхронного двигателя выделяются два различных режима:

- работа в аварийном режиме с эллиптическим полем в нерегулируемом электроприводе;
- работа в аварийном режиме с алгоритмическим формированием кругового вращающегося поля в частотно-регулируемом электроприводе [1].

При рассмотрении аварийного двухфазного режима работы двигателя с эллиптическим полем в воздушном зазоре его можно разделить на поля прямой и обратной последовательности, используя метод симметричных составляющих. Обобщенная модель электрической машины учитывает лишь поле прямой последовательности. Имеется два варианта представления модели асинхронного двигателя, работающего с эллиптическим полем - модель обобщенной электрической машины с двумя статорами и двумя роторами, модель обобщенной электрической машины с двумя статорами и одним ротором [2]. Первая модель в отличие от второй модели проста в описании, но не дает точные результаты моделирования переходных процессов.

В связи с вышеперечисленными особенностями математического описания обобщенной электрической машины с эллиптическим полем для формирования математической модели выбрана модель с двумя статорами и двумя роторами.

При исследовании несимметричных машин с учетом пространственных гармоник или при наличии несинусоидальных питающих напряжений приводить машину к двухфазной неравномерно, так как поля в зазоре двухфазной и многофазной машин в этих условиях отличаются друг от друга [2]. Так как асинхронный двигатель при обрыве одной из фаз питающей сети является несимметричным – в качестве математической модели может быть принята обобщенная электрическая машина в трехфазной системе координат.

При составлении уравнений и рассмотрении переходных процессов асинхронных машин использованы общепринятые допущения и ограничения, связанные с понятием «идеализированная машина»: машина не насыщена, потерями в стали пренебрегаем; фазные обмотки симметричны и сдвинуты на угол 120 электрических градусов; намагничивающие силы обмоток и магнитные поля распределены синусоидально, вдоль окружности воздушного зазора; воздушный зазор равномерен; ротор симметричен. Реальная распределенная обмотка заменяется сосредоточенной, оси фаз которой сдвинуты на фазный угол, а намагничивающая сила ее равна намагничивающей силе реальной обмотки.

В качестве основы были взяты уравнения модели асинхронного двигателя в заторможенной системе координат [3]. Для упрощения расчетов уравнения для полей прямой и обратной последовательности представлены отдельными системами.

При определении напряжений, подаваемых на обмотки машин, отвечающих за поля прямой и обратной последовательности, учитывалось, что при постоянном питающем напряжении $U_1=U_A=U_B=U_C=\text{const}$ напряжения прямой и обратной последовательности зависят от скольжения [2].

Приведем представленные выше уравнения к нормальной форме Коши. Для случая развязанных фаз, уравнения полей прямой последовательности:

$$\begin{aligned}\frac{d\Psi_{1A}}{dt} &= U_{1A} - R_s \cdot i_{1A}; \\ \frac{d\Psi_{1B}}{dt} &= U_{1B} - R_s \cdot i_{1B}; \\ \frac{d\Psi_{1C}}{dt} &= U_{1C} - R_s \cdot i_{1C}; \\ \frac{d\Psi_{1a}}{dt} &= -R_s \cdot i_{1a} - \frac{(\Psi_{1b} - \Psi_{1c}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}}; \\ \frac{d\Psi_{1b}}{dt} &= -R_s \cdot i_{1b} - \frac{(\Psi_{1c} - \Psi_{1a}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}}; \\ \frac{d\Psi_{1c}}{dt} &= -R_s \cdot i_{1c} - \frac{(\Psi_{1a} - \Psi_{1b}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}};\end{aligned}$$

Для случая связанных фаз:

$$\begin{aligned}\frac{d\Psi_{1AB}}{dt} &= U_{1AB} - R_s \cdot i_{1AB}; \\ \frac{d\Psi_{1BC}}{dt} &= U_{1BC} - R_s \cdot i_{1BC};\end{aligned}$$

$$\frac{d\Psi_{1CA}}{dt} = U_{1CA} - R_s \cdot i_{1CA};$$

$$\frac{d\Psi_{1ab}}{dt} = -R_s \cdot i_{1ab} - \frac{(\Psi_{1bc} - \Psi_{1ca}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}};$$

$$\frac{d\Psi_{1bc}}{dt} = -R_s \cdot i_{1bc} - \frac{(\Psi_{1ca} - \Psi_{1ab}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}};$$

$$\frac{d\Psi_{1ca}}{dt} = -R_s \cdot i_{1ca} - \frac{(\Psi_{1ab} - \Psi_{1bc}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}};$$

Выражения для полей обратной последовательности будут иметь аналогичный вид.

Электромагнитные моменты M_1 и M_2 , создаваемые полями прямой и обратной последовательности, определяются по следующим выражениям:

$$M_1 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A1} i_{c1} + i_{B1} i_{a1} + i_{C1} i_{b1}) - (i_{A1} i_{b1} + i_{B1} i_{c1} + i_{C1} i_{a1})];$$

$$M_2 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A2} i_{c2} + i_{B2} i_{a2} + i_{C2} i_{b2}) - (i_{A2} i_{b2} + i_{B2} i_{c2} + i_{C2} i_{a2})]$$

Уравнение движения электропривода, учитывающее моменты прямой и обратной последовательности:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_1 - M_2 - M_c);$$

Расчет модели проводился в среде Matlab Simulink. Адекватность предложенной математической модели была проверена путем сравнения расчетных и экспериментальных данных полученных при помощи автоматизированного испытательного стенда рис. 1. Результаты сравнения переходных процессов, рассчитанных на модели и полученных экспериментально, приведены на рис. 2-3.

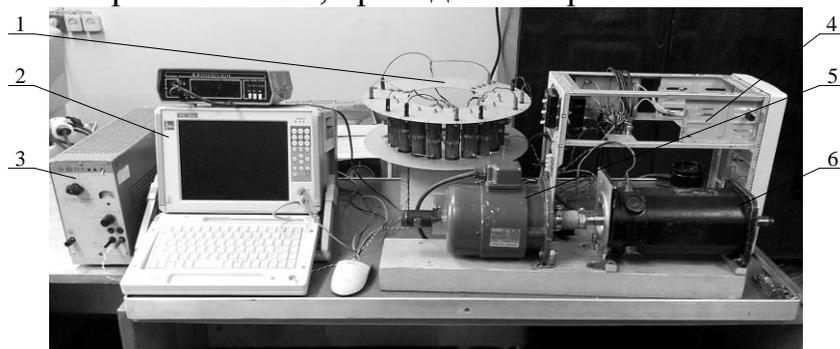


Рис. 1. Автоматизированный испытательный стенд для исследования аварийных и неполнофазных режимов работы асинхронного двигателя: 1- резистивная нагрузка; 2- компьютерная измерительная система МИС-300; 3- источник питания; 4- блок формирования аварийных ре-

жимов работы; 5- асинхронный двигатель АИР63А2; 6- машина постоянного тока серии 1ПИ 12.11

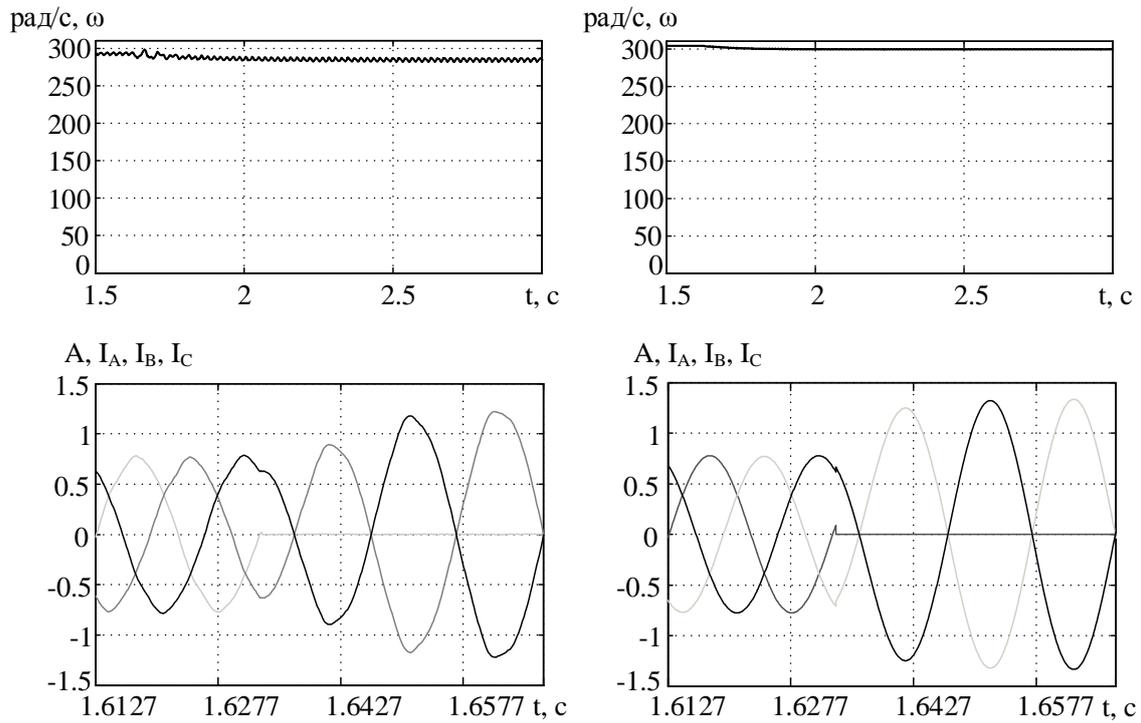


Рис. 2. переходные процессы в аварийном двухфазном режиме работы для связанных фаз

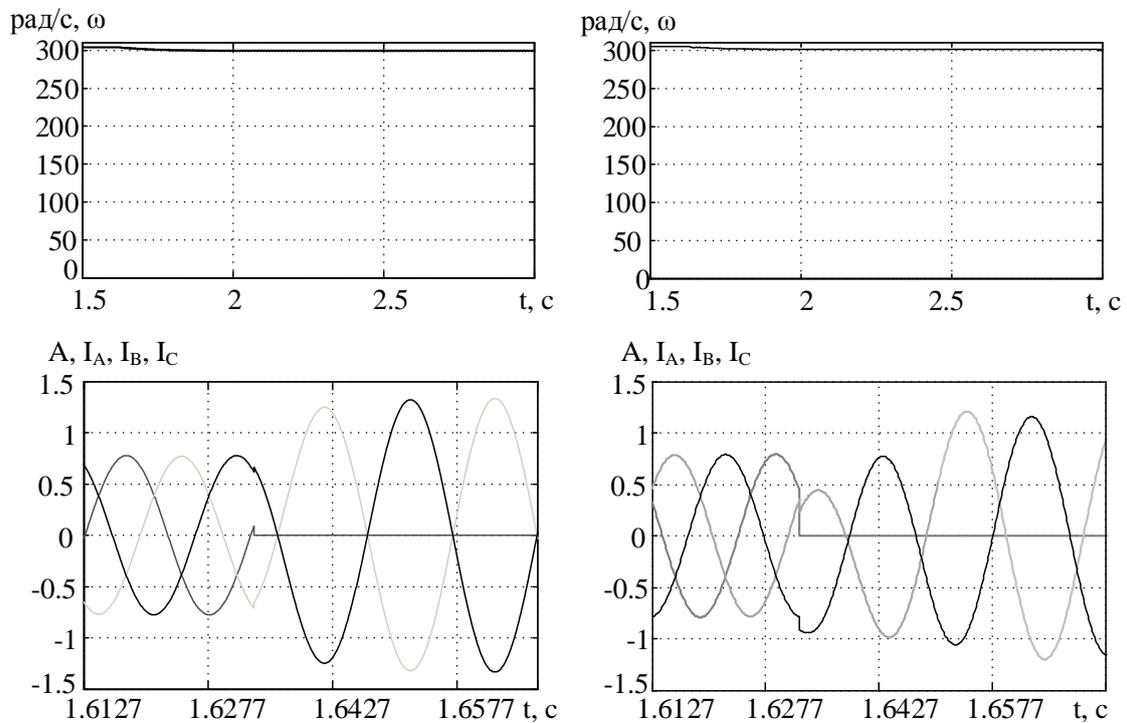


Рис. 3. переходные процессы в аварийном двухфазном режиме работы для развязанных фаз

Данная математическая модель позволяет исследовать асинхронный электродвигатель в аварийном двухфазном режиме работы с учетом поля обратной последовательности, а также в двухфазном режиме работы с алгоритмическим поддержанием кругового вращающегося поля, когда поле обратной последовательности в воздушном зазоре отсутствует.

Выводы

1. Разработана математическая модель асинхронного двигателя для исследования неполно-фазного, аварийного режима работы с учетом воздействия полей прямой и обратной последовательности для схем подключения двигателя со связанными и развязанными фазами.
2. Амплитуда тока статора двигателя в эксперименте для подключения по схеме со связанными фазами при переходе из рабочего трехфазного в аварийный двухфазный режим больше в 1.1 раза по сравнению со случаем подключения по схеме с развязанными фазами. Падение частоты вращения относительно трехфазного режима составило 1,5% для двигателя с подключением по схеме со связанными фазами и 0.8% для двигателя с подключением по схеме с развязанными фазами.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Обеспечение живучести электродвигателей переменного тока: Монография. –Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 187 с.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. - 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
3. Иванов–Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х т. Том 1: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 652 с.

Научные руководители: Г.И. Однокопылов, к.т.н., доцент каф. ЭПЭО ЭНИН ТПУ; Д.В. Толпаров ассистент каф.ЭПЭО ЭНИН ТПУ.

ЭЛЕКТРОПРИВОД ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ ЦЕХА ЭЛЕКТРОВОДОСНАБЖЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ АВР ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ТОМСК»

К.Н. Негодин
Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПЭО, группа 5Г2А

На современных предприятиях ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ТОМСК» необходимо обеспечить надежность работы электропривода узла автоматической задвижки в системе водоснабжения технологических участков. Для предотвращения затопления при пробоях, в трубе стоит автоматическая задвижка с неполноповоротным электроприводом марки AUMA [1].

Вид и элементы электропривода изображены на рис. 1.

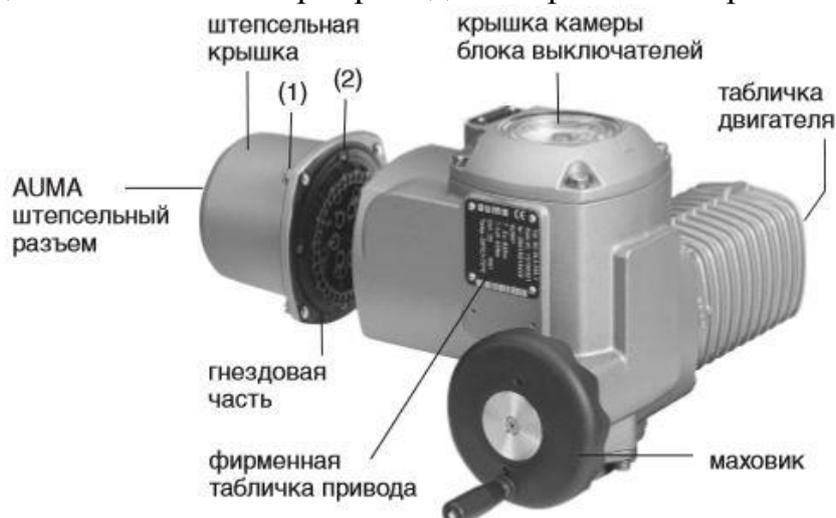


Рис. 1. Неполноповоротный электропривод с однофазным электродвигателем

AUMA – неполноповоротные электроприводы, представляют собой модульную, состоящую из отдельных функциональных блоков, конструкцию. Ручное управление возможно от маховика, без дополнительного переключения. Ограничение по ходу в оба направления вращения осуществляется через путевые выключатели. При срабатывании одного из выключателей в конечном положении следует немедленный сигнал на отключение питания электродвигателя.

Управление электроприводом осуществляется с помощью «Шкафа управления задвижкой» (ШУ). Конструктивно шкаф представляет собой металлический ящик настенного исполнения я [2].

На панели шкафа управления имеются: передняя панель тахометра; 2-х позиционный переключатель режима работы; световая ин-

дикация аварии; световая индикация открытого положения задвижки; световая индикация закрытого положения задвижки; 3-х позиционный переключатель открытия/закрытия задвижки в ручном режиме.

ШУ может работать в двух режимах: ручном и автоматическом. Для перевода ШУ в автоматический режим необходимо переключатель 2 перевести в положение «Автомат».

В автоматическом режиме тахометр следит за расходом счетчика воды и считает количество замыканий геркона в единицу времени. При достижении и превышении расхода в 1,2 куб/мин замыкается выходное реле тахометра, которое в свою очередь дает сигнал реле времени КТ1 на отсчет. Если значение расхода воды будет превышено в течение 10...15 секунд, то сработает реле К1, которое стоит на самоподхвате, ШУ переключается в аварийный режим. В режиме аварии задвижка будет закрыта (горит световой индикатор) и заблокирована, подается световой сигнал аварии на панель, а также срабатывает световая сигнализация на улице.

Для перевода ШУ в ручной режим необходимо переключатель режимов перевести в положение «Ручной». В ручном режиме для открытия задвижки необходимо повернуть 3-х позиционный переключатель в положение «Открыть». Задвижка начнет вращение привода, после открытия загорится световой индикатор задвижки «Открыта». Для закрытия задвижки необходимо 3-х позиционный переключатель повернуть в положение «Закрыть». Задвижка начнет вращение привода, после закрытия загорится световой индикатор задвижки «Закрыта». После открытия/закрытия задвижки необходимо 3-х позиционный переключатель перевести в нейтральное положение.

Управление нагрузками осуществляется в автоматическом режиме с помощью тахометра ОБЕН и реле Finder. Тахометр ОБЕН предназначен для измерения частоты вращения вала, линейной скорости перемещения конвейера, времени наработки агрегатов [3].

Тахометр обладает набором из пяти световых индикаторов для:

- ведения измерения времени наработки;
- выполнения функции тахометра;
- выполнения функции счетчика времени наработки;
- если дискретное выходное устройство включено согласно выбранному режиму работы выходного устройства (ВУ);
- если на выходе ЦАП аналогового ВУ формируется сигнал, соответствующий установленному пользователем верхнему предельному значению ЦАП.

Технологические операции, выполняемые механизмом задвижки и требования к его техническим параметрам

Расход воды отслеживается по счетчику. Когда расход в минуту превышает критическое значение, срабатывает электропривод, который поворачивает задвижку, и подача воды прекращается. На улице срабатывает световая сигнализация, которая оповещает технический персонал об аварии и необходимости устранения неполадок.

Чтобы уменьшить расход воды при пробое и, как следствие уменьшить возможность затопления помещения, привод должен срабатывать быстро. Так же двигатель в приводе должен быть оборудован автоматическим отключением питания для предотвращения расхода электроэнергии и перегрева. Исполнение должно быть выполнено с защитой от пыли и влаги.

Описание принципиальной схемы электропривода

Пускатель состоит из двух контакторов КМ1 и КМ2. На последнем изменено чередование фаз. Кнопочный пост содержит кнопку «Стоп» (SBT) и две кнопки «Пуск» (SBC1 и SBC2) только с замыкающими контактами. Одна кнопка (SBC1) включает контактор КМ1 и запускает двигатель в одном направлении («Пуск вперед»), а другая кнопка (SBC2) включает контактор КМ2 и запускает двигатель в обратном направлении («Пуск назад»). Обе кнопки «Пуск» SBC1 и SBC2 шунтированы замыкающими блок контактами КМ1:4 и КМ2:4 соответствующих контакторов. Защита от одновременного включения контакторов КМ1 и КМ2 выполняется тем, что в цепи между кнопкой SBC1 и катушкой контактора КМ1 включен размыкающий блок контакт КМ2:5 контактора КМ2. Соответственно в цепи между кнопкой SBC2 и катушкой контактора КМ2 включен размыкающий блок контакт КМ1:5 контактора КМ1. Так что при срабатывании контактора КМ1 контакт КМ1:5 в цепи катушки контактора КМ2 размыкается и одновременное срабатывание контактора КМ2 невозможно. Аналогичное явление имеет место при срабатывании контактора КМ2.

Управление двигателем осуществляется через функциональную схему тахометра.

Прибор представляет собой электронное устройство, предназначенное для измерения и контроля скорости вращения двигателя. На счетный вход прибора поступают импульсы с датчика контролирующего одну или несколько меток на валу двигателя [1].

Прибор имеет два дискретных входа для подключения датчиков (счетный вход и вход «Счет наработки»). Устройство согласования осуществляет функцию преобразования уровней входных сигналов. Обработанные им сигналы поступают на блок цифровой обработки,

где происходит фильтрация входных сигналов, измерение мгновенного значения частоты вращения вала, измерение времени наработки на входе «Счет наработки», перевод измеренных значений в реальные физические величины и масштабирование перед их выводом на индикатор, а так же формирование сигналов управления ВУ в соответствии с заданным алгоритмом.

Конфигурирование прибора осуществляется с помощью кнопок для ввода параметров прибора. Результаты измерения или параметры настройки прибора отображаются на семисегментном индикаторе, отображение состояний прибора осуществляется с помощью светодиодных индикаторов.

Встроенный источник питания (ВИП) в зависимости от исполнения прибора (с переменным или постоянным питанием) осуществляет преобразование питающего напряжения для устройства согласования, блока цифровой обработки, ВУ и формирует сигнал, свидетельствующий о пропадании питающего напряжения. Также ВИП формирует постоянное напряжение $24\pm 3\text{В}$ (максимально допустимый ток нагрузки на выходе не менее 50мА) для питания датчиков, подключаемых к входам прибора.

К входам прибора могут быть подключены:

- коммутационные устройства (контакты кнопок, выключателей, герконов, реле и т.п.);
- датчики, имеющие на выходе транзистор n-p-n-типа с открытым коллекторным выходом.

Дискретное ВУ может быть выполнено в виде электромагнитного реле (тип Р), транзисторной оптопары (тип К) или оптосимистора (тип С). Данное ВУ используется для управления нагрузкой (включения/выключения) непосредственно или через более мощные управляющие элементы, такие как пускатели, твердотельные реле, тиристоры или симисторы. Все выходные устройства имеют гальваническую развязку от схемы прибора.

Транзисторная оптопара применяется, как правило, для управления низковольтным реле (до 50В). Схема подключения приведена на рисунке Б.4. Во избежание выхода из строя транзистора из-за большого тока самоиндукции параллельно обмотке реле необходимо устанавливать диод VD1 (типа КД103 или аналогичный). Оптосимистор включается в цепь управления мощного симистора через ограничивающий резистор R1. Номинал резистора определяет ток управления симистора. Оптосимистор может также управлять парой встречно-параллельно включенных тиристоров. Для предотвращения пробоя тиристоров или симисторов из-за высоковольтных скачков напряже-

ния в сети к их выводам рекомендуется подключать фильтрующую RC цепь. ВУ аналогового типа может быть выполнено в виде ЦАП «параметр-ток» (тип И) и «параметр напряжение» (тип У). Преобразование «параметр-ток» осуществляется при помощи встроенного в ВУ десятиразрядного ЦАП. Полученные после преобразования сигналы могут использоваться для регистрации параметров. Для нормальной работы приборов с ВУ типа «И» питание ЦАП должно осуществляться от независимого источника постоянного тока, обеспечивающего гальваническую развязку электрической схемы прибора и схемы пользователя.

В ряде случаев для питания ЦАП может быть использован встроенный в прибор источник постоянного тока 24В, если при этом он одновременно не задействован для питания активных датчиков. При использовании встроенного источника должны быть учтены вышеизложенные требования.

Приборы с ВУ типа «У» оснащены формирователями сигнала постоянного напряжения, преобразующие значение выходных параметров в сигнал напряжения от 0 до 10 В. Сопротивление нагрузки R_n , подключаемой к ЦАП, должно быть не менее 2кОм. Для питания выхода ВУ типа «У» возможно использование встроенного источника питания 24В, который при этом может быть задействован для питания активных датчиков. В блоке цифровой обработки сигналов, поступающие на счетный вход прибора сигналы подвергаются фильтрации. Фильтр характеризуется частотой входного фильтра $Freq$.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Электрические неполноповоротные электроприводы SG 03.3-SG 04.3 с блоком управления AUMA NORM . Инструкция по эксплуатации /ООО АУМА, – Московская обл., г. Химки, 2006 – 32 с.
2. Руководство по эксплуатации ФЮРА.656421.107РЭ / ТПУ – Томск, 2013, - 10 с.
3. Руководство по эксплуатации тахометра ТХ01 / ОВЕН – М., 2010 -52 с.

Научный руководитель: С.Н. Кладиев, к.т.н., доцент кафедры ЭПЭО ЭНИН ТПУ.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЖИВУЧЕСТИ ТРЕХФАЗНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ В АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Е.С. Больных¹, Г.И. Однокопылов²
^{1,2}Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПЭО, ¹группа 5Г2А

Есть множество опасных объектов такие как: военные, ядерные, строительные, химические и многие другие. На таких предприятиях существует проблема, которая заключается в том, что необходимо обеспечить живучесть функционирования технических объектов, важной частью их является вентильный электропривод (ВД). Обеспечение отказоустойчивого управления ВД предполагает его работу в аварийном двухфазном режиме работы.

Представляет интерес рассмотрение алгоритмического восстановления работоспособности трехфазного ВД на основе микроконтроллерной системы управления. Для решения этой задачи необходимо обеспечить выбор и обоснование угла нагрузки в аварийном двухфазном режиме работы.

При разработке математической модели приняты следующие допущения: магнитная цепь двигателя принимается ненасыщенной, потери в стали и механические потери пренебрежимо малы, распределение МДС и индукции синусоидальное, высшие гармоники отсутствуют, воздушный зазор равномерен, механические связи двигателя и нагрузки абсолютно жесткие.

На рис. 1 приведена схема замещения синхронного двигателя при обрыве фазы "В", которой в установившемся режиме соответствуют уравнения в комплексной форме (1) на основе которых была разработана расчетная модель (4) в тригонометрической форме:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{I}_A \cdot r + j \cdot \dot{I}_A \cdot X_S + j \cdot \dot{I}_A \cdot X_A - j \cdot \dot{I}_C \cdot X_M - \dot{E}_A; \\ \dot{U}_C &= \dot{I}_C \cdot r + j \cdot \dot{I}_C \cdot X_S + j \cdot \dot{I}_C \cdot X_A - j \cdot \dot{I}_A \cdot X_M - \dot{E}_C. \end{aligned} \quad (1)$$

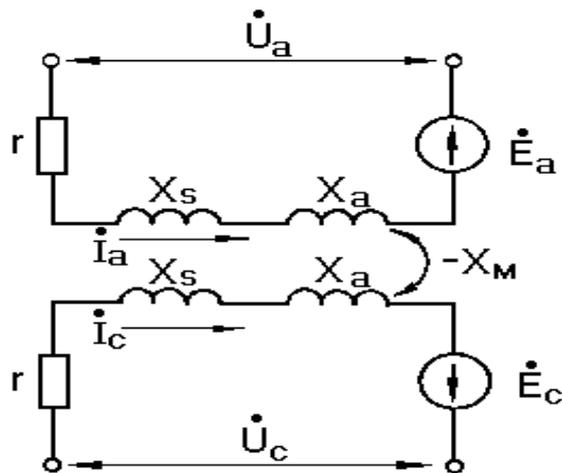


Рис. 1. Схема замещения синхронного двигателя при обрыве фазы "В"

В трехфазном режиме ВД угол нагрузки задается углом θ и электромагнитный момент имеет максимум при максимуме активной мощности для углов $\theta_A = \theta_B = \theta_C = \pi/2$. В двухфазном режиме ВД углы θ_A и θ_C различны, т.к. различны в общем случае вектора фазных напряжений \dot{U}_A и \dot{U}_C по амплитуде, а их фазовые сдвиги φ_A и φ_C относительно векторов тока могут иметь разные знаки. Поэтому построение системы управления ВД в двухфазном режиме с использованием углов θ_A и θ_C в качестве параметров, определяющих максимум момента нецелесообразно, так как это приведет к неоправданному усложнению системы управления электроприводом. Что подтверждает скоростная характеристика ВД в аварийном двухфазном режиме (которая может быть получена, через соотношения вытекающие из векторной диаграммы, построенной по уравнениям (1)) имеющая вид:

$$n = - \frac{60 \langle U_C \cdot \cos \theta_C - U_A \cdot \cos \theta_A + I \cdot r \cdot [\cos \psi_A - \cos(\pi/6 - \psi_A)] \rangle}{pI \langle (L_A + L_C) \cdot [\cos(\psi_A + \pi/6) + \sin \psi_A] - 2M \cdot \cos(\psi_A - \pi/6) \rangle}. \quad (2)$$

С учетом $\theta_A = \psi_A + \varphi_A$, $\theta_C = \psi_A + \varphi_C - \frac{\pi}{3}$, выражение (2) для произвольного ψ_A принимает вид

$$n = - \frac{60 \langle U_C \cdot \cos(\psi_A + \varphi_C - \pi/3) - U_A \cdot \cos(\psi_A + \varphi_A) + I \cdot r \cdot [\cos \psi_A - \cos(\pi/3 - \psi_A)] \rangle}{pI \langle (L_A + L_C) \cdot [\cos(\psi_A + \pi/3) + \sin \psi_A] - 2M \cdot \cos(\psi_A - \pi/3) \rangle};$$

выражение (2) для $\psi_A = \pi/6$:

$$n = - \frac{60 [U_C \cdot \cos(\varphi_C - \pi/6) - U_A \cdot \cos(\varphi_A + \pi/6)]}{pI(L_A + L_C - 2M)}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \varphi_A &= \operatorname{arctg} \frac{1/2 \cdot E_0 - I\omega(L_A + L_C - 1/2 \cdot M)}{\sqrt{3}/2 \cdot E_0 + I(r + \sqrt{3}/2 \cdot \omega M)} ; \\ \varphi_C &= \operatorname{arctg} \frac{1/2 \cdot E_0 + I\omega(L_A + L_C - 1/2 \cdot M)}{\sqrt{3}/2 \cdot E_0 + I(r - \sqrt{3}/2 \cdot \omega M)} . \end{aligned}$$

Выбор и оптимизация значения угла нагрузки в аварийном двухфазном режиме могут быть выполнены на основе статической модели расчета суммарных активной и реактивной мощностей ВД:

$$\left\{ \begin{aligned} U_A &= I_{AM} \sin(\omega t + \pi + \psi_A) r + I_{AM} \sin\left(\omega t + \frac{3\pi}{2} + \psi_A\right) (L_A + L_S)\omega + \\ & \quad \operatorname{sign}(\varphi_C) I_{CM} \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{6} + \psi_A\right) \omega L_M + E_{AM} \sin(\omega t + \pi) ; \\ U_C &= I_{CM} \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \psi_A\right) r + I_{CM} \sin\left(\omega t + \frac{11\pi}{6} + \psi_A\right) (L_A + L_S)\omega + \\ & \quad \operatorname{sign}(\varphi_A) I_{AM} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \psi_A\right) \omega L_M + \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{3}\right) ; \\ & \quad \operatorname{sign}(\varphi) = 1, \text{ если } \varphi \geq 0; \operatorname{sign}(\varphi) = -1, \text{ если } \varphi < 0 \\ P_\Sigma &= \frac{1}{2} (U_{AM} I_{AM} \cos \varphi_A + U_{CM} I_{CM} \cos \varphi_C); \\ Q_\Sigma &= \frac{1}{2} (I_{AM} I_{AM} \sin \varphi_A + I_{CM} I_{CM} \sin \varphi_C), \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где I_{AM} , I_{CM} – амплитудные значения векторов фазных токов равной амплитуды (А), E_{AM} , E_{CM} – амплитудные значения векторов фазных ЭДС равной амплитуды (В), P_Σ – суммарная активная (Вт), Q_Σ – суммарная реактивная (Вар). В результате расчета получены следующие функциональные зависимости для СД ДСТ-0,18: $P_\Sigma(I, \psi)$, $P_\Sigma(n, \psi)$, $Q_\Sigma(I, \psi)$, $Q_\Sigma(n, \psi)$ представленные на рис. 2 а, б.

Как видно из рис. 2 а, б угол ψ может быть сопоставлен с углом θ , определяющим максимум момента в трехфазном режиме, по форме зависимости и диапазону изменения угла π радиан.

Для определения допустимых значений величины и знака погрешности задания угла ψ можно рассмотреть зависимость суммарной реактивной мощности от частоты вращения, тока и угла ψ на рис. 2 в, г. Зависимость $Q_\Sigma(I, \psi)$ построена при условии $n = n_{max} = 6000$ (об/мин). Зависимость $Q_\Sigma(n, \psi)$ построена при: $I = 1$ А. Для значений угла ψ в диапазоне $\pi/6 \dots \pi/3$ радиан функция пересекает нулевую плоскость. Спад активной мощности для зависимостей $P_\Sigma(n, \psi)$, $P_\Sigma(I, \psi)$ при изменении значения угла ψ_A в диапазоне $\psi_A = \pi/6 \dots \pi/4$ радиан не превышает 5%. В силу этого в аварийном двухфазном режиме максимум активной при минимуме реактивной мощности ВД может быть опреде-

лен в функции угла ψ_A в диапазоне значений угла $\psi_A = \pi/6 \dots \pi/4$. Зона предпочтительных рабочих параметров лежит в диапазоне $\psi_A \pm \delta\psi_A$, где $\delta\psi_A$ – погрешность задания угла ψ_A . С целью минимизации реактивной мощности необходимо выполнение условия: $\delta\psi_A < 0,1 \psi_A$ и погрешность задания должна формироваться со знаком плюс.

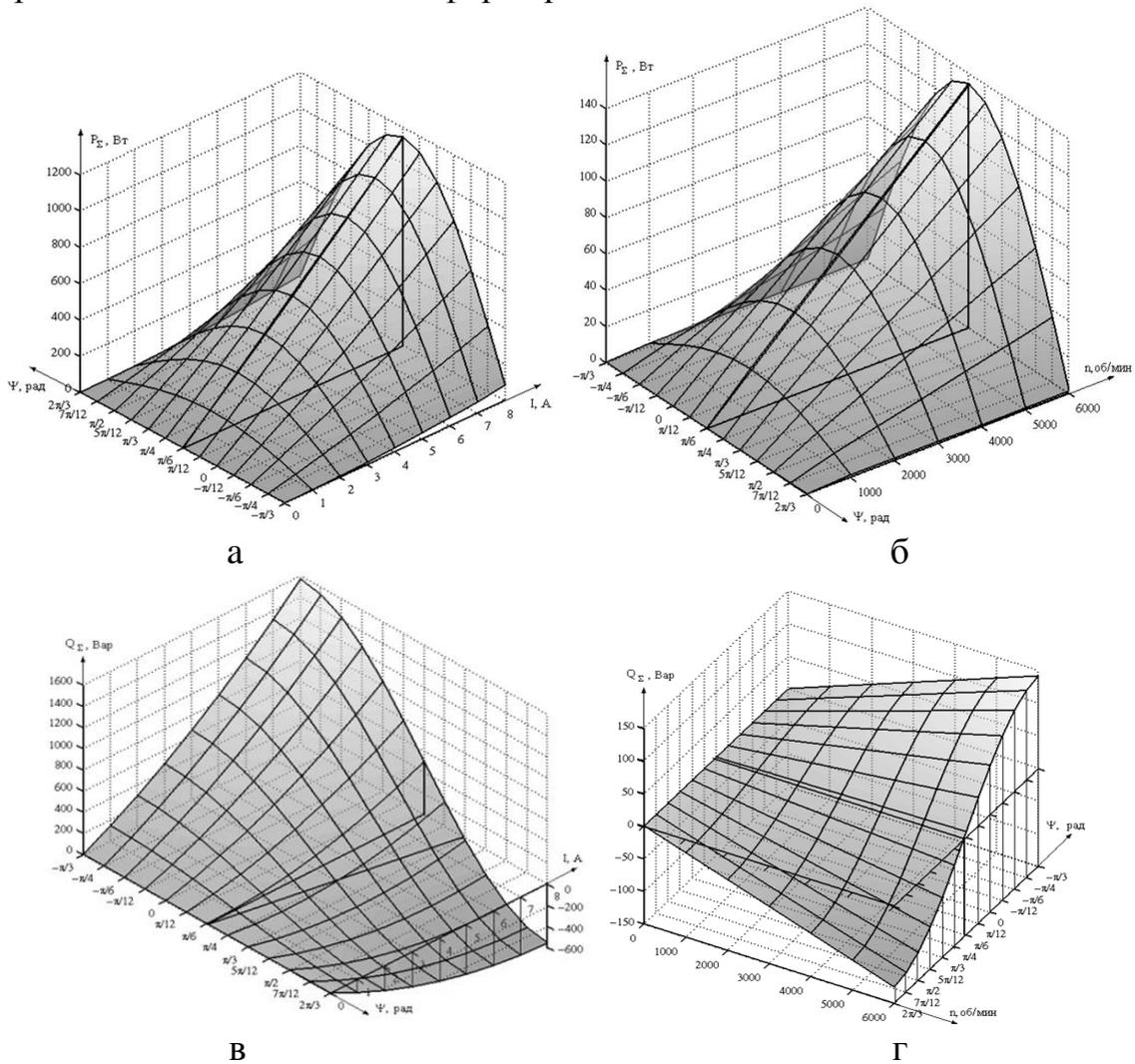


Рис. 2. Зависимости суммарной активной и реактивной мощности ВД в аварийном двухфазном режиме: а - $P_{\Sigma}(I, \psi)$, б - $P_{\Sigma}(n, \psi)$, в - $Q_{\Sigma}(I, \psi)$, г - $Q_{\Sigma}(n, \psi)$

На рис. 3 приведены временные диаграммы переходных процессов в аварийном двухфазном режиме трехфазного ВД выполненного по схеме с развязанными фазами [1, 2] и полученные на основе экспериментальной испытательной установки [3] с алгоритмами восстановления работоспособности вентильного двигателя [4, 5].

На рис. 3 видно, что при неконтролируемой аварийной ситуации момент двигателя с номинальной нагрузкой стремится к нулю и двигатель останавливается, при активизации алгоритма восстановления,

включающего угол нагрузки $\psi_A = \pi/6$, двигатель имеет кратковременный провал электромагнитного момента, что видно по диаграмме суммарного потребляемого тока I_Σ , двигатель продолжает работу с обеспечением свойства живучести при обрыве фазы.

Неконтролируемая аварийная ситуация

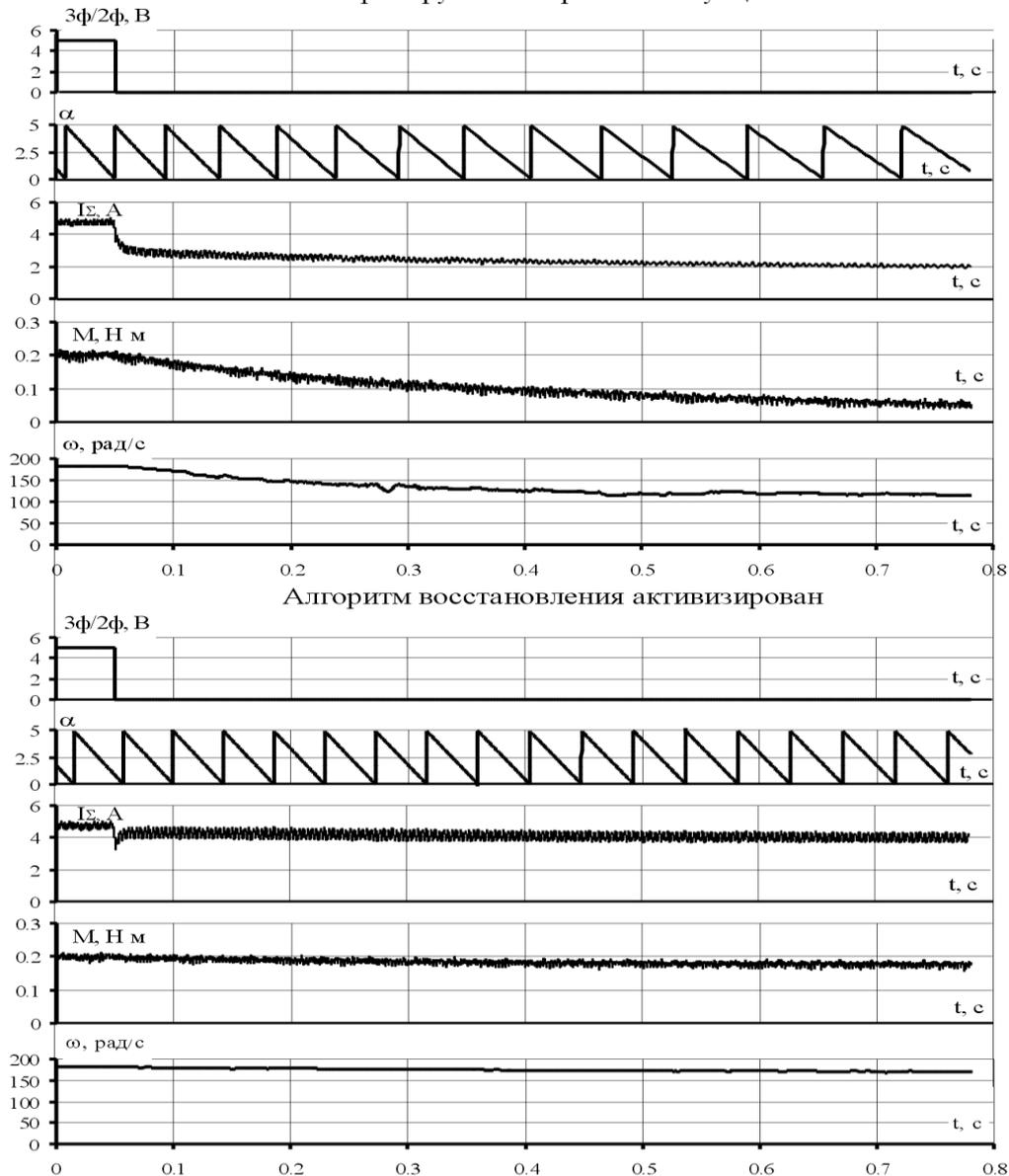


Рис. 3. Временные диаграммы переходных процессов в аварийном двухфазном режиме трехфазного ВД

Выводы по работе:

1. В двухфазном режиме работы трехфазного ВД использование углов между обратными векторами ЭДС и векторами напряжений фаз в качестве параметров, определяющих максимум момента, приводит к усложнению системы управления ввиду их различия и зависимости от режима работы.

2. Получено на математической модели и экспериментально установлено, что использование угла между обратными векторами Э.Д.С. и вектором тока фазы одной из двух фаз в двухфазном режиме ВД позволяет получить максимум активной мощности, максимум момента для значений углов $\psi = \pi/6$, при этом активные мощности фаз равны, а максимум активной мощности не зависит от рабочей частоты и величины фазного тока.
3. Суммарная реактивная мощность в двухфазном режиме трехфазного ВД может принимать как положительные, так и отрицательные значения в функциях рабочей частоты, тока. При $\psi = \pi/6$ суммарная реактивная мощность ВД минимальна.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Патент на ПМ №59905 (RU), H02K 29/06, H02P 6/00. Вентильный электропривод со свойством живучести / Г.И. Однокопылов, К.В. Образцов. – №2006128881; Заявл.08.08.2006; Оpubл.27.12.2006 г. Бюл. №36.
2. Патент РФ на изобретение № 2447561(RU), H02P 7/09. Вентильный электропривод с обеспечением свойства живучести/ Г.И. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, И.Г. Однокопылов, К.В. Образцов – №2011112102; Заявл. 30.03.2011; Оpubл.10.04.2012 Бюл. № 10.
3. Патент РФ на ПМ № 136184(RU), G01R 31/02. Установка для исследований аварийных режимов работы вентильного двигателя/ Г.И. Однокопылов, И.А. Розаев, А.Д. Брагин. – №2013138092; Заявл.14.08.2013; Оpubл.27.12.2013 Бюл. № 36.

Научные руководители: Г.И. Однокопылов, к.т.н., доцент каф. ЭПЭО ЭНИН ТПУ; к.т.н., А.С. Воронина старший преподаватель каф. ЭПЭО ЭНИН ТПУ.

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНВЕРТОРНЫХ СВАРОЧНЫХ АППАРАТОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ

С.А. Коваль

Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПЭО, группа 5Г2Б

На современных предприятиях ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ТОМСК» необходимо обеспечить надежные и качественные швы при

любых тяжелых условиях. Для выполнения поставленных условий компания использует сварочный инвертор KEMPI MINARC 150VRD[1].

Kemppi Minarc является малогабаритной установкой для сварки штучными электродами. Аппарат предназначен для производственной, монтажной и ремонтной сварки. Minarc подключается к однофазной сети.

Устройство сварочного инверторного аппарата

Сварочный инвертор состоит из двух преобразователей напряжения, которые работают при довольно высоких электрических характеристиках. Работа обоих преобразователей управляется электронным микропроцессором (Рис.1). Процесс работы инверторного блока питания основан на инверсии – фазовом сдвиге напряжения, которое осуществляется электронными составляющими устройства, с каскадным увеличением частоты, а также силы тока на выходе (Рис.2). Преобразование происходит дважды. Сначала обычный сетевой переменный ток при напряжении 220 вольт и частотой 50 герц преобразуется в постоянный ток. Затем на втором преобразователе, ток заново становится переменным, однако уже с пониженным напряжением, параметром большой силы тока и высокой частотой.



Рис. 1. Устройство инверторного сварочного аппарата



Рис. 2. Внутреннее устройство сварочного инвертора

Принцип действия

Переменный ток от потребительской сети, частотой 50 Гц, поступает на выпрямитель (Рис.3.).

Выпрямленный ток сглаживается фильтром, затем полученный постоянный ток преобразуется инвертором с помощью специальных транзисторов с очень большой частотой коммутаций в переменный, но уже высокой частоты 20-50 кГц [2].

Затем переменное напряжение высокой частоты понижается до 70-90 В, а сила тока соответственно повышается до необходимых для сварки 100-200 А.

Высокая частота является основным техническим решением, которое позволяет добиться колоссальных преимуществ сварочного инвертора, если сравнивать с другими источниками питания сварочной дуги.

В инверторном сварочном аппарате сила сварочного тока нужной величины достигается путем преобразования высокочастотных токов, а не путем преобразования ЭДС в катушке индукции как это происходит в трансформаторных аппаратах. Предварительные преобразования электрических токов позволяют использовать трансформатор с очень малыми габаритами.

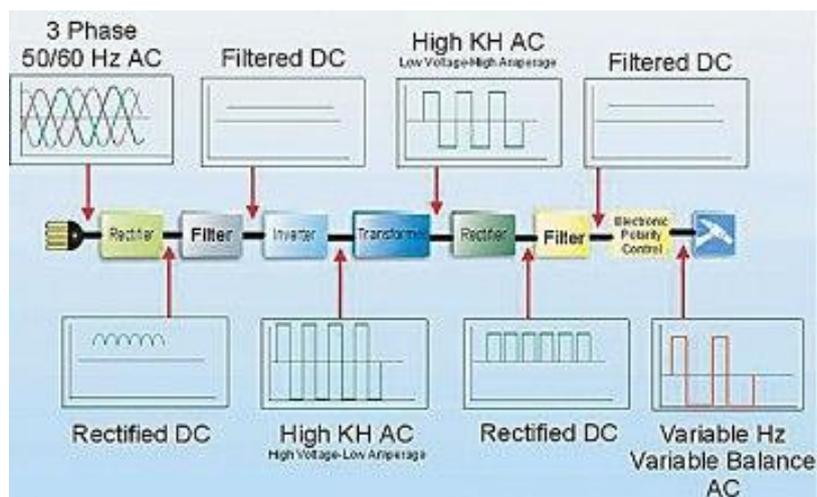


Рис. 3. Принцип действия сварочного инвертора

Преимущества сварочных инверторов:

- Минимальный вес, составляющий всего 6-12 кг.
- Использование электродов как для переменного, так и для постоянного тока.
- Широкий диапазон регулировки сварочного тока.
- Высокий КПД, доходит до 90%.
- Низкое потребление электроэнергии.

Недостатки:

- Высокая стоимость.
- Нельзя использовать при температуре ниже -15°C.
- Небольшая длина сварочных кабелей.

Отличия сварочного инверторного аппарата от классического:

- Наличие двух каскадов преобразования тока .
- Высокое качество сварного шва.
- Низкое потребление электроэнергии.
- Небольшой вес.
- Уменьшена зона разбрызгивания искр при сварке
- Возможность регулирования силы сварочного тока
- Функция «Горячий старт» выбор наиболее оптимальных параметров для розжига электродуги.
- Наиболее частой неисправностью является выход из строя микропроцессора. Однако, как показывает практика, это происходит из-за нарушения условий эксплуатации или хранения устройства.

Выводы:

Достойнейшей заменой устаревшим трансформаторным агрегатам становится оборудование нового поколения – сварочные аппараты инверторного типа. В отличие от предшествующих агрегатов, инвер-

торные сварочные аппараты имеют следующие преимущества: небольшой вес и компактность, что упрощает их транспортировку и эксплуатацию. На сегодняшний день нет среди сварочных аппаратов равных инверторному аппарату. Более того, инвертор – это самый безопасный и наиболее простой в эксплуатации аппарат среди всех приспособлений, предназначенных для сварки разнообразных металлов. С каждым годом его популярность растет.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Welding inverter KEMPPi MINARC 150VRD. Operating manual / Kemppi Oy, –Lahti, 2011 – 18 с.
2. Общие принципы работы инвертора. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://moiinstrumenty.ru/svarochnyj/kak-rabotaet-invertorni-ivarochnyi-apparat.html> – 10.09.2015 г.
3. Устройство сварочного инверторного аппарата. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://kovka-svarka.ru/2012/01/princip-raboty-ivortornogo-svarochnogo-apparata.html> – 10.09.2015 г.

Научный руководитель: С.Н. Кладиев, к.т.н., доцент каф ЭПЭО ЭНИН ТПУ.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОСВЕННЫМ КОНТРОЛЕМ ВЫХОДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ

А.В. Глазачев¹, Ю.Н. Дементьев¹, К.Н. Негодин³, А.Д. Умурзакова⁴
^{1,2,3}Томский политехнической университет,
ЭНИН, ЭПЭО, ³группа 5Г2А
⁴Инновационный Евразийский университет

В приводах конвейеров, транспортеров, дозаторов, подъемных механизмов, при транспортировке жидкости, перемещения нефти и нефтепродуктов и т.д. требуется реализация быстродействующего управления электромагнитным моментом исполнительного двигателя и необходим непрерывный контроль его скорости.

Наиболее распространенными в большинстве случаев, в качестве устройств измерения скорости служат импульсные и тахогенераторные датчики [1], балансирные и трансмиссионные динамометры, торсионные приборы, преобразовательные установки для измерения момента [2]. Применение датчиков скорости вращения ротора позволяет получить ка-

чественное и сравнительно простое управление асинхронным двигателем. Однако наличие этих датчиков существенно ухудшает эксплуатационные характеристики электропривода, а их использование может быть невозможным по условиям функционирования электропривода.

В связи с этим широко востребованы устройства и методы, позволяющие проводить непрерывный контроль электромагнитного момента и угловой скорости общепромышленных механизмов в технологическом процессе, мониторинг загрузки исполнительных двигателей, поддерживать скорость вращения двигателя в заданных пределах либо технологический параметр в соответствии с техническими и технологическими требованиями, когда необходимая информация вычисляется косвенными методами.

Целью данной работы является получение аналитических зависимостей, с помощью которых возможно получить математическое описание электропривода с устройством косвенного контроля величин электромагнитного момента и угловой скорости асинхронного двигателя (АД). Причем в отличие от существующих [3-8] в предложенном в работе математическом описании для снижения погрешности при определении величин электромагнитного момента и угловой скорости отсутствуют интегральные составляющие.

Для определения электромагнитного момента и угловой скорости АД используется математическое описание [6], в котором их значения определяются по данным двигателя и легко измеряемым величинам с помощью известных на практике устройств

$$\begin{cases} M(t) = \sqrt{3} p_n (i_a(t) \int [u_b(t) - R_s i_b(t)] dt - i_b(t) \int [u_a(t) - R_s i_a(t)] dt) \\ \omega(t) = \omega_{и}(t) [1 + \Delta\omega_{инт}(t) + \Delta\omega_{диф}(t)] \end{cases}, (1)$$

где

$$\omega_{и}(t) = \frac{\sqrt{3} [u_a(t) - (R_s + R'_{r\alpha}) i_a(t)]}{\int (R_s [i_a(t) + 2i_b(t)] - [u_a(t) + 2u_b(t)]) dt - L_{\beta} [i_a(t) + i_b(t)]} - \text{из-}$$

меренное мгновeнное значение угловой скорости;

$$\Delta\omega_{инт}(t) = \frac{\int [u_a(t) - R_s i_a(t)] dt}{T'_r [u_a(t) - (R_s + R'_{r\alpha}) i_a(t)]} \text{ динамическая интегральная со-}$$

ставляющая относительного значения угловой скорости;

$$\Delta\omega_{диф}(t) = \frac{L_{\beta} (di_a(t)/dt)}{u_a(t) - (R_s + R'_{r\alpha}) i_a(t)} - \text{динамическая дифференциальная}$$

составляющая относительного значения угловой скорости; $R'_{r\alpha} = \alpha R'_r$ – активное приведенное сопротивление обмотки ротора с учетом ко-

эфициента α ; R'_r – активное приведенное сопротивление ротора; $\alpha = L_s/L'_r$ – коэффициент, равный отношению полной индуктивности обмотки статора L_s к приведенной полной индуктивности обмотки ротора L'_r ; $L_\beta = \beta L_\mu - L_s$ – индуктивность с учетом коэффициента β ; L_μ – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; $\beta = L_\mu/L'_r$ – коэффициент, равный отношению взаимной индуктивности L_μ к приведенной полной индуктивности обмотки ротора L'_r ; $T'_r = L'_r/R'_r$ – постоянная времени ротора.

Наличие интегральных составляющих, имеющих в математическом описании АД с косвенным контролем системой уравнений (1), приводит к появлению погрешностей при определении величин токов и напряжений и может привести к накоплению существенной ошибки в величинах контролируемого электромагнитного момента и угловой скорости АД. Поэтому, если при расчете интегральных составляющих системы уравнений (1) воспользуемся известными математическими выражениями для аналитических сигналов вида

$$u_a(t) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k \sin(k\omega t + \varphi_k) + j \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cos(k\omega t + \varphi_k)$$

$$\begin{aligned} \text{Тогда } \int_0^{1/f} [u_a(t) - z i_a(t)] dt &= \int_0^{1/f} \tilde{U}_a(t) dt = \\ &= \int_0^{1/f} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} A_k \left(\sin k\omega^* t + \varphi_k^* + j \cos k\omega^{**} t + j\varphi_k^{**} \right) \right\} dt - \\ &= \int_0^{1/f} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} B_k \sin k\omega^{**} t + \varphi_k^{**} + j \cos k\omega^{**} t + j\varphi_k^{**} \right\} dt. \end{aligned}$$

Используя формулы Эйлера можно перейти от тригонометрических функций к показательным [9-11], а далее используя преобразование Фурье получим

$$u(t) \approx \int_0^N (a(\omega) \cos \omega t + b(\omega) \sin \omega t) dt = \sum_{k=0}^{\infty} (C_k e^{-kt\omega} + C_{-k} e^{kt\omega}) = \sum_{k=0}^{\infty} -C_k^* \sin \omega t.$$

В результате, получим, что интегральная составляющая переходит в свою ортогональную пару, представляющую сумму ряда. Расчеты коэффициентов ряда C_k можно провести по формулам, представленным в [9, 10].

В окончательном виде с учетом вышеизложенного математическое описание АД с косвенным контролем электромагнитного момента и угловой скорости можно представить следующим образом

$$\begin{cases} M(t) = \sqrt{3} p_n \left[(1 - R_s) e^{j\frac{\pi}{2}} \left\{ 2i_b(t) \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 4}} - i_a(t) \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 4}} \right\} \right], \\ \omega(t) = \omega_{\text{и}}(t) [1 + \Delta\omega_{\text{инт}}(t) + \Delta\omega_{\text{диф}}(t)] \end{cases}, \quad (2)$$

$$\text{где } \omega_{\text{и}}(t) = \frac{\sqrt{3} [u_a(t) - (R_s + R'_{r\alpha}) i_a(t)]}{(R_s - 1) e^{j\frac{\pi}{2}} \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi^4 - 1}} - \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 4}} \right\} - L_{\beta} [i_a(t) + i_b(t)]} ;$$

$$\omega_{\text{инт}}(t) = \frac{e^{j\frac{\pi}{2}} \left\{ \frac{2R_s}{\sqrt{\pi^4 - 1}} - \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 4}} \right\}}{T'_r [u_a(t) - (R_s + R'_{r\alpha}) i_a(t)]} ;$$

$$\omega_{\text{диф}}(t) = \frac{L_{\beta} \frac{di_a(t)}{dt}}{u_a(t) - (R_s + R'_{r\alpha}) i_a(t)} .$$

В результате можно сделать следующие выводы:

1. Предложенные в работе аналитические зависимости математического описания АД с косвенным контролем выходных механических переменных позволяют проводить расчет значений и непрерывный контроль электромагнитного момента и угловой скорости в электроприводе.
2. Для улучшения качества контроля выходных механических переменных предложено в математическом описании АД с косвенным контролем электромагнитного момента и угловой скорости исключить интегральную составляющую переходом в ортогональную пару, используя преобразования Фурье, Эйлера, Парсевалья.

Работа была выполнена в рамках Госзадания «Наука», проект №3852.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лейтман М.Б. Автоматическое измерение выходных параметров электродвигателей / М.Б. Лейтман. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 152 с.

2. Левинтов С.Д. Бесконтактные магнитоупругие датчики крутящего момента / А.М. Борисов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 88 с.
3. Дементьев Ю.Н., Умурзакова А.Д., Мельников В.Ю. Способ измерения угловой скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя // Патент на изобретение РФ № 2525604, 2014. Бюл. № 23.
4. Дементьев Ю. Н. Алгоритм и способ измерения угловой скорости вращения двигателя в асинхронном электроприводе / А.Д. Умурзакова, К. В. Хацевский // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 1. – с. 393–396.
5. Дементьев Ю. Н. Алгоритм контроля угловой скорости двигателя в асинхронном электроприводе / А. Д. Умурзакова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока – 2013. – № 1. – с. 270–272.
6. Дементьев Ю. Н. Измерение механических координат двигателя в асинхронном электроприводе / А. Д. Умурзакова, О. В. Арсентьев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 7. – с. 127–132.
7. Дементьев Ю. Н. Моделирование асинхронного двигателя с устройством косвенного измерения момента / А.Д. Умурзакова, Л.С Удут // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12. – с. 931–935.
8. Дементьев Ю. Н. Модель асинхронного электродвигателя для измерения механических координат / А.Д. Умурзакова, К. В. Хацевский // Омский научный вестник. – 2013. – № 3. – с. 200–205.
9. Диткин В.А. Интегральные преобразования и операционное исчисление / А.П. Прудников. – М.: Наука, 1974. – 542 с.
10. Красс М.С. Основы математики и ее приложения / Б.П. Чурьнов. – М.: Дело, 2003. – 688 с.
11. Пантелеев А.В. Теория управления в примерах и задачах / А.С. Бортаковский. – М.: Высшая школа, 2003. – 583 с.

Научный руководитель: А.В. Глазачев, к.т.н., доцент каф. ЭПЭО ЭНИН ТПУ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ В АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Л.Я. Насибова,¹ И.А. Розаев², Г.И. Однокопылов²
^{1,2}Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПЭО, ¹группа 5Г2А

Для формирования отказоустойчивого управления существует необходимость разработки алгоритмов отказоустойчивого управления отладку которых целесообразно проводить на основе математического моделирования аварийных процессов ЭПТ. Однако стандартными программными средствами эта задача не решается - обрыв фазы двигателя является недопустимой операцией. Поэтому ставится задача разработки математической модели ВИП допускающей возможность моделирования аварийных процессов вплоть до работы двух (одной) фазе двигателя.

В этом случае необходимая избыточность формируется при комплексном использовании функционального резерва основанного на использовании возможности работы трехфазной секции на двух фазах оставшихся работоспособных фазах [1].

В основу математической модели вентильно-индукторного двигателя положены уравнения электрических контуров, составленные для каждой из фаз. Приняты допущения, что магнитные системы каждой фазы идентичны друг другу, гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе не учитываются, а активные сопротивления фаз равны [1, 2].

Исходя из законов Кирхгофа имея схему замещения, запишем уравнения электрического равновесия трех фаз ВИД:

$$\begin{aligned}U_{1A} &= R_s \cdot i_{1A} + \frac{d\Psi_A}{dt}; \\U_{1B} &= R_s \cdot i_{1B} + \frac{d\Psi_B}{dt}; \\U_{1C} &= R_s \cdot i_{1C} + \frac{d\Psi_C}{dt},\end{aligned}\tag{1}$$

где: U_{1A}, U_{1B}, U_{1C} – напряжения приложенные к обмоткам фаз; i_{1A}, i_{1B}, i_{1C} – фазные токи; R_s – электрическое сопротивление фазы; $\Psi_A = \Psi(i_{1A}, \alpha_{1A}), \Psi_B = \Psi(i_{1B}, \alpha_{1B}), \Psi_C = \Psi(i_{1C}, \alpha_{1C})$ – потокосцепления фаз.

Уравнение электрического равновесия трех фаз (1) в матричной форме имеет вид:

$$\begin{bmatrix} U_{1A} \\ U_{1B} \\ U_{1C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1A} \\ i_{1B} \\ i_{1C} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{1A} \\ \Psi_{1B} \\ \Psi_{1C} \end{bmatrix}.$$

Уравнения равновесия напряжений в трех фазах в матричной форме с учетом потокосцеплений:

$$\begin{bmatrix} U_{1A} \\ U_{1B} \\ U_{1C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1A} \\ i_{1B} \\ i_{1C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{1A}(i_{1A}, \alpha) & 0 & 0 \\ 0 & L_{1B}(i_{1B}, \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & L_{1C}(i_{1C}, \alpha) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1A} \\ i_{1B} \\ i_{1C} \end{bmatrix} + \omega \cdot \begin{bmatrix} K_{1A}(i_{1A}, \alpha) & 0 & 0 \\ 0 & K_{1B}(i_{1B}, \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & K_{1C}(i_{1C}, \alpha) \end{bmatrix}.$$

Матричное уравнение равновесия напряжений в фазах трехфазного работоспособного ВИД в нормальной форме Коши имеет вид (2):

$$\frac{d[i_1]}{dt} = [L_{d1}]^{-1} \{ [U_1] - [R_1][i_1] - \omega [K_{\omega 1}] \}, \quad (2)$$

Где: $[i_1]$ – матрица неизвестных (токи статора); $[U_1]$ – матрица напряжений; $[R_1]$ – матрица сопротивлений; $[L_{d1}]$ – прямая матрица дифференциальных индуктивностей в функции фазных токов и текущего положения ротора; $[K_{\omega 1}]$ – матрицы коэффициентов противо-ЭДС в функции фазных токов и текущего положения ротора; ω – частота вращения ротора:

$$\begin{aligned} [i_1] &= \begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{B1} \\ i_{C1} \end{bmatrix}; [U_1] = \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \end{bmatrix}; [R_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \\ [L_{d1}] &= \begin{bmatrix} L_{1A}(i_{1A}, \alpha) & 0 & 0 \\ 0 & L_{1B}(i_{1B}, \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & L_{1C}(i_{1C}, \alpha) \end{bmatrix}; \\ [K_{\omega 1}] &= \begin{bmatrix} K_{1A}(i_{1A}, \alpha) & 0 & 0 \\ 0 & K_{1B}(i_{1B}, \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & K_{1C}(i_{1C}, \alpha) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Для имитации обрыва фазы статора необходимо в уравнения равновесия напряжения в фазах (2) ввести матрицу отказов $[M_{O1}]$ ВИД, позволяющую имитировать неполнофазные аварийные режимы работы:

$$[M_{O1}] = \begin{bmatrix} \overline{a1} & 0 & 0 \\ 0 & \overline{b1} & 0 \\ 0 & 0 & \overline{c1} \end{bmatrix}.$$

При этом единичному состоянию битов отказов a, b, c будет соответствовать номинальный трехфазный режим работы, а нулевому – обрыв соответствующей фазы обмотки статора. Тогда выражение для матрицы активных сопротивлений примет следующий вид:

$$[R_{M1}] = ([1] + k_{\infty}[M_{01}]) \cdot [R_1],$$

где k_{∞} – коэффициент, имитирующий введение высокоомного сопротивления в цепь статора, тогда матричное уравнение равновесия напряжений в фазах трехфазного ВИД с учетом матрицы зов $[R_{M1}]$ в нормальной форме Коши имеет вид:

$$\frac{d[i_1]}{dt} = [L_{d1}]^{-1} \{ [U_1] - [R_{M1}][i_1] - \omega[K_{\omega 1}] \}, \quad (3)$$

Для случая вращающейся электрической машины, зависимость механической энергии от электромеханического момента при изменении положения ротора фазы "А" записывается как [3]:

$$\Delta W_{1A} = M_{1A} \cdot \Delta \alpha,$$

Где: M_{1A} – электромеханический момент двигателя формируемый фазой "А"; W_{1A} – механическая энергия, формируемая фазой "А" на интервале $\Delta \alpha$ угла поворота ротора, где: α – угол положения ротора в радианах.

Принимая момент на валу двигателя равным электромагнитному моменту, изменение механической энергии равно изменению магнитной коэнергии. Известно выражение для мгновенного электромагнитного момента через производную потокосцепления по углу поворота ротора которое для одной фазы может быть записано как [3,4]:

$$M_{1A} = i_{1A} \frac{\partial \Psi_{1A}(i_{1A}, \alpha)}{\partial \alpha}.$$

Учитывая, что: $K_{\omega 1A} = \frac{\partial \Psi(i_{1A}, \alpha_{1A})}{\partial \alpha}$, можно записать:

$$M_{1A} = i_{1A} \cdot K_{\omega 1A},$$

коэффициенты противо-ЭДС и момента численно равны в системе единиц СИ:

$$K_{\omega 1A} (\text{В} \cdot \text{с/рад}) = K_{M1A} (\text{Н} \cdot \text{м/А}),$$

тогда моменты фаз А, В, С могут быть определены как:

$$M_{1A} = i_{1A} \cdot K_{M1A}; M_{1B} = i_{1B} \cdot K_{M1B}; M_{1C} = i_{1C} \cdot K_{M1C};$$

Момент двигателя представляет собой сумму моментов, формируемых фазами, учитывая, что фазы не зависимы и не связаны электрическими и магнитными взаимодействиями. Поэтому суммарный момент M_1 трехфазного ВИД:

$$M_1 = M_{1A}(i_{1A}, \alpha) + M_{1B}(i_{1B}, \alpha) + M_{1C}(i_{1C}, \alpha),$$

где: $M_{1A}(i_{1A}, \alpha)$, $M_{1B}(i_{1B}, \alpha)$, $M_{1C}(i_{1C}, \alpha)$ – моменты, развиваемые фазами А, В, С.

Уравнение движения электропривода:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M_1 - M_c), \quad (4)$$

где: J – момент инерции электропривода; p - число пар полюсов; ω – частота вращения; M_c – момент сопротивления двигателя; M_l – электромагнитные моменты ВИД.

Система уравнений математической модели для описания переходных процессов в неполнофазном аварийном режиме трехфазного ВИП (5) может быть записана на основе выражений (1), (2), (3), и (4):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d[i_1]}{dt} = [L_{d1}]^{-1}\{[U_1] - [i_1][R_{M1}] - \omega[K_{\omega 1}]\}; \\ [R_{M1}] = ([1] + k_{\infty}[M_{01}])[R_1]; \\ T_{\Pi} = t_2 - t_1; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J}(M_1 - M_c); \\ M_1 = M_{A_1}(i_{A_1}, \alpha_m) + M_{B_1}(i_{B_1}, \alpha_m) + M_{C_1}(i_{C_1}, \alpha_m) \\ \alpha_m = p \int_0^t \omega dt = p\alpha, \end{array} \right. \quad (5)$$

где: $[i_l]$, – матрицы фазных токов статора; $[U_l]$ – матрицы фазных напряжений; $[M_{01}]$ – матрицы отказов; $[L_{d1}]$, $[L_{d1}]^{-1}$ прямая и обратная матрица дифференциальных индуктивностей в функции фазных токов и текущего положения ротора; $[K_{\omega 1}]$ – матрицы коэффициентов противо-ЭДС в функции фазных токов и текущего положения ротора; $[R_1]$ – матрица сопротивлений до отказа и $[R_{M1}]$ – после отказа; $[1]$ – единичная матрица, размером 3 на 3; k_{∞} - коэффициент, имитирующий введение высокоомного сопротивления в цепь статора; T_{Π} – время переключения структуры ЭП, t_1 – момент времени выявленного отказа, t_2 – момент времени восстановления значения частоты вращения (момента) до уровня предшествующего отказу; M_l – электромагнитный момент; $M_{A_1}(i_{A_1}, \alpha)$, $M_{B_1}(i_{B_1}, \alpha)$, $M_{C_1}(i_{C_1}, \alpha)$ - моменты фаз А, В, С первой соответственно в функции фазных токов и текущего положения ротора (определенные по (2.5) или (2.6)); M_c – момент сопротивления двигателя; J - момент инерции ЭП; ω – частота вращения ротора; α_m , α – механический и электрический углы ДПР; p - число пар полюсов.

Исходя из проведенных исследований, можно сделать вывод, что разработана математическая модель трехфазного вентильно-индукторного электропривода, позволяющая исследовать рабочие и аварийные режимы электропривода и разрабатывать алгоритмы восстановления работоспособности в аварийных и неполнофазных режимах работы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Odnokopylov G. I., Rozaev I. A. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive (Article number 012035) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2014 - Vol. 66 - №. 1. - p. 1-7
2. Любарский Б. Г., Рябов Е.С. «Моделирование электроприводов на основе реактивных индукторных двигателей в среде MatLab Simulink». Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина.–С. 411-414.
3. K.I. Hwu. Applying POWERSYS and SIMULINK to modeling Switched reluctance motor/ Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 429-438 (2009).
4. R. Krishnan. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. Boca Raton: CRC Press, 2001. Т 1, pp. 143-169.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука» проект №3852.

Научный руководитель: Г.И. Однокопылов, к.т.н., доцент каф. ЭПЭО ЭНИИ ТПУ.

ПУСКО-РЕГУЛИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.

Я.К. Старостина

Ульяновский государственный технический университет

Основным рабочим режимом асинхронного электропривода турбомеханизмов (вентиляторов, компрессоров, насосов и др.) служит режим длительной продолжительности включения ($PВ \geq 60\%$), причём значительную долю времени работа может происходить вхолостую при низких значениях коэффициента мощности. Данный режим не всегда обусловлен технологической необходимостью и часто объясняется стремлением избежать неблагоприятного влияния пусковых токов асинхронных двигателей (АД) на качество напряжения в распределительных сетях. Переход на повторно-кратковременную работу лишь во время нагрузений увеличивает количество запусков привода в течение суток, требуя применения устройств плавного пуска в ста-

туса обязательной составной части асинхронного привода. Однако распространение пуско-регулирующих устройств (ПРУ) сдерживается отсутствием достаточно простых решений в данной сфере. Использование альтернативных устройств в виде тиристорных регуляторов переменного напряжения (ТРН) с фазовым регулированием увеличивает потребление реактивной мощности, делая форму тока статорных обмоток АД прерывистой, а потому величину пускового момента исчезающе малой.[1]

В пусковых режимах необходимость отдельного регулирования напряжения в фазных обмотках АД отпадает, предоставляя возможность существенного упрощения пуско-регулирующего устройства. На рисунке 1 изображена схема ПРУ, выполненного по минимальной структуре на одном силовом транзисторе, размещённом в общей для всех фаз трансформатора цепи. В случае соединения первичных обмоток по схеме звезды такой цепью является нулевая точка звезды, функции которой в схеме рис.4 выполняет единственный силовой транзистор *VT1* на выходе диодного моста *VD1*. Можно видеть, что коммутации транзистора в этой схеме способны привести к одновременному регулированию напряжения вольтодобавки во всех трёх статорных обмотках двигателя, причём этот процесс происходит без прерывания и заметного искажения формы токов на сетевом входе и в статорных обмотках двигателя.[2]

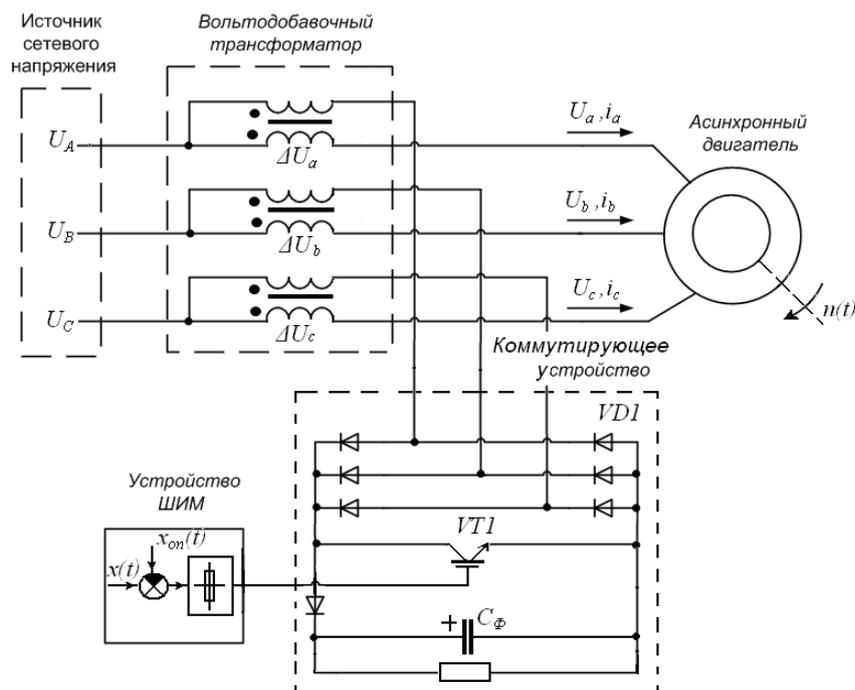


Рис. 1. Схема малоэлементного ПРУ с квазисинусоидальной формой токов в статорных обмотках асинхронного двигателя.

Для защиты от возникающих в моменты записывания *VT1* перенапряжений предусмотрен вывод избыточной электромагнитной энергии первичных обмоток в параллельно подключенный демпфирующий конденсатор C_{ϕ} . Представленные на рис.5 результаты компьютерного моделирования отражают протекание пускового режима в разомкнутой системе ПРУ-АД. Показано, что плавное наращивание напряжения статорных обмоток с нуля до номинального значения $U_{сн}$ можно обеспечить уменьшением до нуля встречного напряжения обмоток вольтодобавочного трансформатора

$$U_{a(b,c)}(t) = U_{A(B,C)}(t) - \Delta U_{a(b,c)}(t) \rightarrow U_{сн} \text{ при } \Delta U_{a(b,c)}(t) \rightarrow 0.$$

Требуемый закон изменения статорного напряжения задаётся формой управляющего сигнала $x(t)$ на входе широтно-импульсного модулятора. В данном случае этот сигнал обеспечивает кратковременную первоначальную форсировку с последующим монотонным возрастанием статорного напряжения по линейному закону. Полученный процесс плавного пуска с нулевых начальных значений результирующего напряжения, тока статорных обмоток и скорости вала иллюстрирует рисунок 2,б. Видно, что по сравнению с процессом прямого пуска (см.рис.2,а) результат выражается в уменьшении на 50% первоначального броска тока статорных обмоток $I_a(t), I_b(t), I_c(t)$ и в соответствующем увеличении времени нарастания скорости вала $n(t)$. [3]

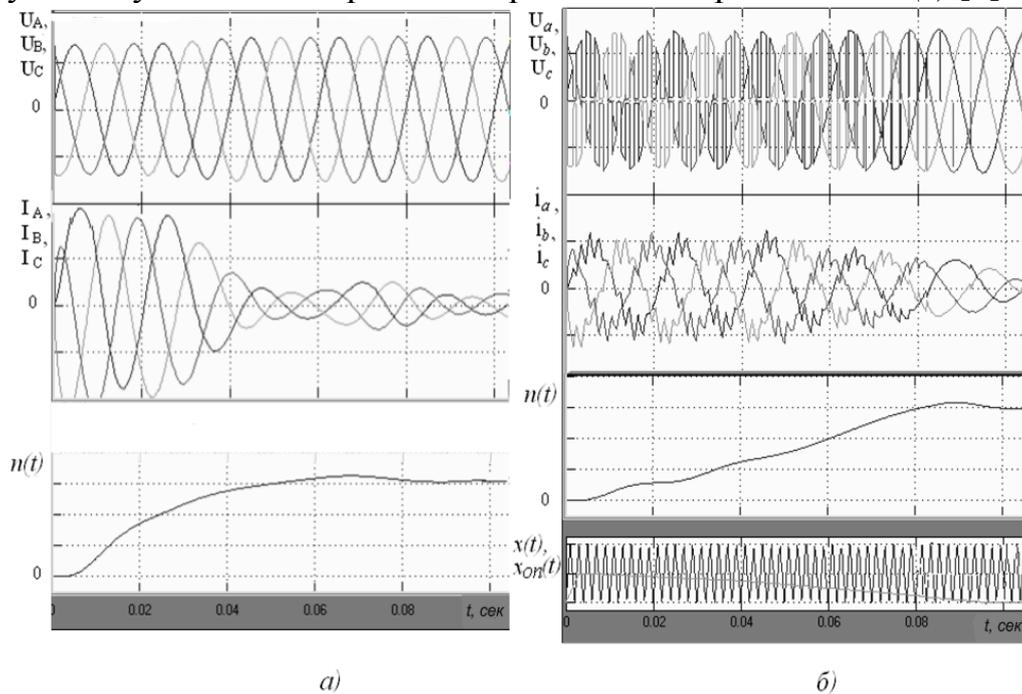


Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования фазных напряжений $U_a(t), U_b(t), U_c(t)$ и токов $I_a(t), I_b(t), I_c(t)$ статорных обмоток, а также скорости вала $n(t)$ асинхронного двигателя в режимах прямого (а) и плавного (б) пуска.

Выводы

1. Предлагаемый вариант пуско-регулирующего устройства на основе малоэлементного импульсного регулятора в цепях вольтодобавочного трансформатора устраняет недостатки альтернативных решений, часто выражающихся в неоправданно большом для кратковременно работающего «пускателя» количестве полупроводниковых ключей, а так же в существенных искажениях напряжений и токов.
2. Необходимость введения в схему ПРУ вольтодобавочного трансформатора технико-экономически оправдывается сравнительно малой, по причине кратковременности нагружения, установленной мощностью данного элемента, а так же возможностью уменьшения массо-габаритных показателей трансформатора, вследствие питания напряжением повышенной частоты.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кобзев А.В. и др. Стабилизаторы переменного напряжения с высокочастотным широтно-импульсным регулированием. М.: Энергоатомиздат, 1986. 120 с.
2. Старостина Я.К., Сидоров С.Н. Малоэлементное пуско-регулирующее устройство для асинхронного электропривода в режиме минимального энергопотребления. // Труды 7-й Международной (19-й Всероссийской) по автоматизированному электроприводу АЭП- 2014. г. Саранск. Изд. Мордовского университета. 2014. С.93-96.
3. Старостина Я.К., Сидоров С.Н. Малоэлементное пуско-регулирующее устройство для турбомеханизмов. // Труды Международной научно-практической конф. «Современные наукоемкие инновационные технологии», г. Самара . 2014г.

Научный руководитель: С.Н. Сидоров, к.т.н., доцент Ульяновский государственный технический университет.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В СТАЛИ ТОРЦЕВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С МАССИВНЫМ РОТОРОМ

Э.И. Михайлов

Ульяновский государственный технический университет

Применение торцевых асинхронных двигателей с массивным ротором (ТАДМР) в приводе маховичных накопителей энергии позволяет увеличить запас кинетической энергии накопителя за счет повышения частоты вращения ротора, а также увеличить надежность устройства в связи с повышенной прочностью массивного ротора [1]. Однако повышенные частоты вращения ротора ТАДМР требуют использования повышенных частот питания что, как следствие, сопровождается увеличением потерь в стали статора. Известные методики расчета параметров магнитопровода статора на высоких частотах с учетом насыщения имеют недостаточную точность и нуждаются в опытных доказательствах, поэтому экспериментальное определение параметров контуров вихревых токов в магнитопроводе статора является актуальной задачей.

Разработана конструкция двухпакетного асинхронного двигателя с плоским массивным ротором, совмещенным с ротором инерционного накопителя энергии. На рисунке 1 показано: 1, 2 - магнитопроводы торцевого АД, 3 - подшипниковый узел, 4 - обмотки статора, 5 - маховик, 6 - корпус, 7 - обмотка ротора. Торцевое исполнение двигателя позволяет увеличить момент инерции, а массивный ротор обеспечивает большой пусковой момент при небольшом пусковом токе.

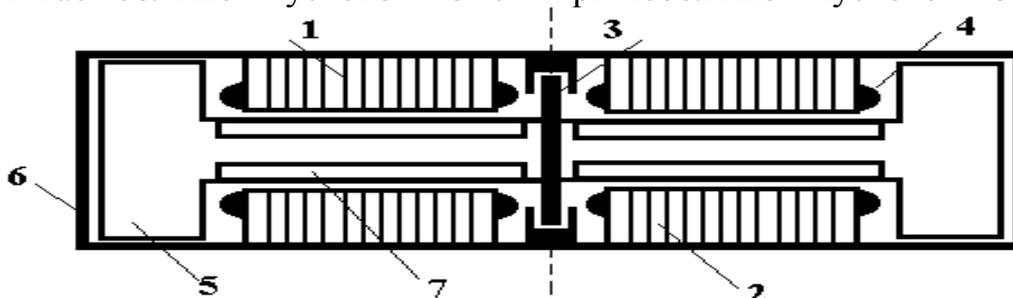


Рис.1. Инерционный накопитель энергии на базе ТАДМР.

Активное сопротивление контура вихревых токов в стали ТАДМР наиболее просто определить экспериментальным путем. Для этого два однотипных статора торцевого двигателя устанавливают друг против друга без зазора, что позволяет описать устройство упрощенной схемой замещения, без учета параметров ротора и намагнивающего контура (рис.2).

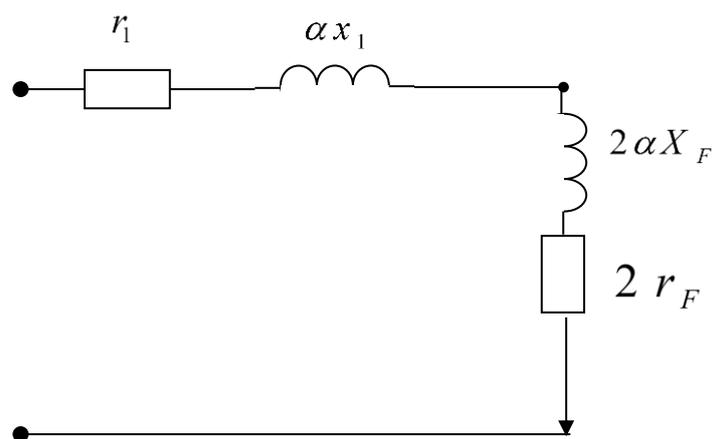


Рис.2. Схема замещения ТАДМР для определения параметров контура вихревых токов магнитопровода статора.

Активное сопротивление статора r_1 определяется известными методами с помощью амперметра и вольтметра. Учитывая, что напряжение серийных высокочастотных источников питания, как и при частоте 50 Гц, равно 220 В, то в тех же габаритах обмотка статора ТАДМР выполняется с меньшим числом витков и проводом большего диаметра. Это обуславливает необходимость при проведении испытаний на высоких частотах учитывать эффект вытеснения переменного тока на поверхность проводников. На практике изменение активного сопротивления учитывается с помощью коэффициента Филда [2].

Сопротивление рассеяния статора x_1 можно определить экспериментальным путем при удалении ротора [3].

К статору машины подводят напряжение испытываемой частоты такой величины, чтобы ток не превышал номинального. При подаче трехфазного питания в обмотку статора без ротора индуктивное сопротивление обмотки x_Σ будет состоять из двух частей: составляющей x_1 , определяемой потоками рассеяния поперек пазов, между головками зубцов и вокруг лобовых частей, которая и является искомым индуктивным сопротивлением рассеяния, и составляющей x_p , определяемой потоком на активной поверхности статора, создаваемым обмоткой в том пространстве, которое нормально занимает ротор.

Задачей опыта является определение общего индуктивного сопротивления x_Σ и отделение от него последней составляющей:

$$x_1 = x_\Sigma - x_p. \quad (1)$$

При опыте измеряются: приложенные фазные напряжение U , ток I и подводимая мощность P . Вычисляются полное сопротивление одной фазы, ее активное и индуктивное сопротивления:

$$Z = \frac{U}{I}; R = \frac{P}{3I^2}; X_{\Sigma} = \sqrt{Z^2 - R^2}. \quad (2)$$

Составляющая X_P может быть определена опытным путем; с этой целью на активной поверхности статора укладывается контрольная катушка, длина которой равна полной длине сердечника статора, а ширина - полюсному делению. Активные стороны этой катушки укрепляются на поверхности пазов, а лобовые части должны быть оттянуты в плоскость ярма статора, с тем, чтобы устранить влияние потоков рассеяния вокруг лобовых частей обмотки.

Если обозначить через W число витков фазы статора, через k — обмоточный коэффициент обмотки, через W_k - число витков контрольной катушки и через U_k - измеренное на ней напряжение, то индуктивное сопротивление обмотки статора будет равно

$$X_P = \frac{U_k}{I} \frac{Wk}{W_k}. \quad (3)$$

При малых зазорах определение X_I по методу вынужденного ротора связано с погрешностью из-за большого влияния дифференциального рассеяния.

Установив два статора торцевого двигателя друг против друга и измеряя напряжение питания γU , ток I_0 и мощность P в режиме питания обмоток одного из двух индукторов, можно определить активное сопротивление контура вихревых токов по формуле:

$$r_F = \frac{P}{3I_0^2} - r_1. \quad (4)$$

Индуктивное сопротивление этих контуров определится из соотношения:

$$x_F = \frac{\sqrt{Z^2 - (r_1 + r_F)^2} - \alpha x_1}{2\alpha}, \quad (5)$$

где Z - полное сопротивление схемы замещения (рис.2)

$$Z = \frac{\gamma U}{I_0}. \quad (6)$$

Изменяя частоту и напряжение сети можно определить параметры контуров вихревых токов в стали в функции насыщения и частоты. Полученные значения сопротивлений могут использоваться при со-

ставлении полной схемы замещения ТАДМР, а также в математических моделях инерционных накопителей энергии.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Дмитриев В. Н., Лебедев В.В. Оптимизация электромеханического инерционного накопителя энергии. Научно-производственный журнал «Научно-технический калейдоскоп», Серия «Электро и теплоэнергетика».- Ульяновск, 2002, с.36 - 40.
2. Соколов Н.И., Киркин Б.И. Определение частотных характеристик синхронных машин. // Электричество, 1962, № 1, с. 29-35.
3. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.

Научный руководитель; В.Н. Дмитриев, д-р техн. наук, профессор Ульяновского государственного технического университета.

ЗАПУСК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДПУ-87, ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Н.В. Гусев, А.В. Киселев
Томский политехнический университет

Среди проблем, которые возникают перед пользователем среды разработки встроенных систем управления, одной из самых распространенных является осуществление регулируемого пуска двигателя средствами MexBIOS Development Studio. Подробно рассмотрим поэтапный процесс пуска коллекторного двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов ДПУ-87 с учебно-отладочным комплектом МСВ-04 «Тип К» производства НПФ «Mechatronica-PRO», двигателем ДПУ-87 [4], цифровым инкрементальным энкодером, мультиметром и программным обеспечением [1,2].

Формализованная постановка задачи. Необходимо произвести запуск двигателя имеющимися программно-аппаратными средствами с применением двухконтурной системы регулирования по току и скорости». Для упрощения решения данной задачи и ознакомления пользователя с процессом пуска целесообразно разбить решение на несколько базовых этапов.

Подключение двигателя и нерегулируемый пуск

Перед подключением двигателя к МСВ-04 необходимо тщательно ознакомиться с документацией, входящий в состав комплекта,

и сопоставить эту информацию с номинальными параметрами подключаемого двигателя в целях соотнесения возможности его подключения без разработки дополнительных драйверов и/или замены имеющегося преобразователя.

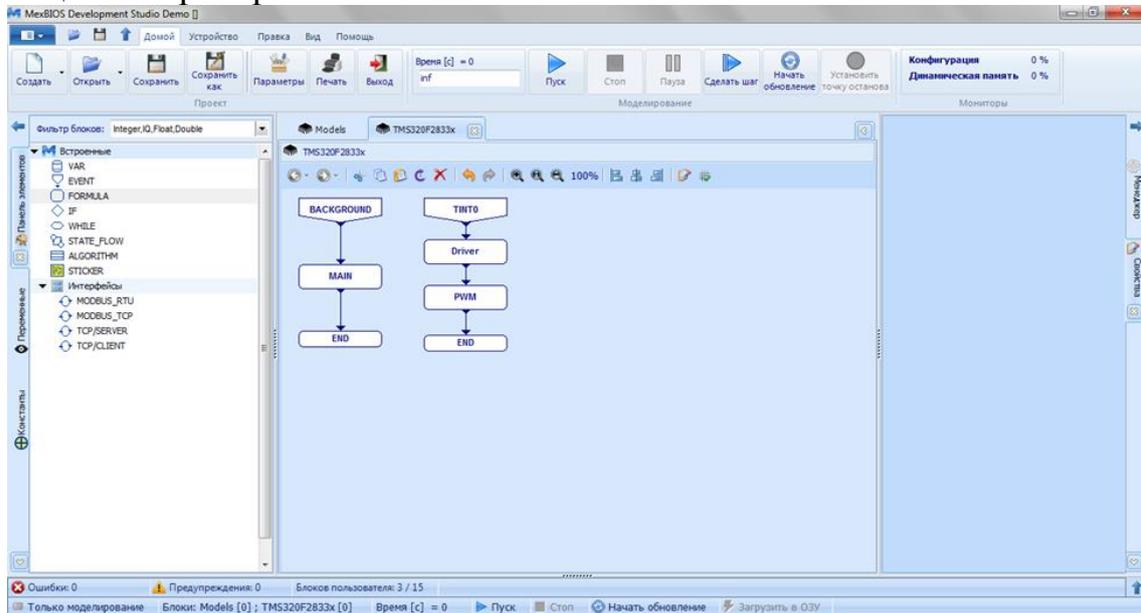


Рис. 1. Основное окно программы

Преобразователь, входящий в состав МСВ-04, обеспечивает напряжение питания 24В при максимально-допустимом токе 3А. Подключение двигателя постоянного тока осуществляется между клеммами «U» «V» на силовой плате преобразователя соединительными проводами.

После физического подключения двигателя к преобразователю можно приступать к настройке программной части, реализующей нерегулируемый пуск. Для этого создается базовый проект в среде проектирования MexBIOS Development Studio. Блоки, представленные в основном окне программы, формируют основную структуру программы и содержат в себе необходимые функции [1, 3].

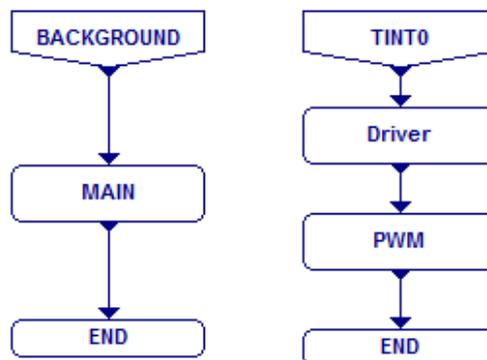


Рис. 1. Основные блоки программы

Параметры блоков программы соответствуют следующим значениям:

EVENT – *Источник*: 2: Аппаратное; *Вектор*: 26: TINT0; *Период*: 0.0002; *Режим моделирования*: 2: Непрерывное.

FORMULA – *Имя*: Driver

FORMULA – *Имя*: PWM

Для реализации нерегулируемого пуска блок Driver остается без наполнения, так как на данном этапе отсутствует необходимость в обратных связях, а значит и в обработке показаний датчиков. Основная работа на данном этапе лежит в блоке PWM.

Внутренняя структура на данном этапе имеет следующий вид [1, 3]:

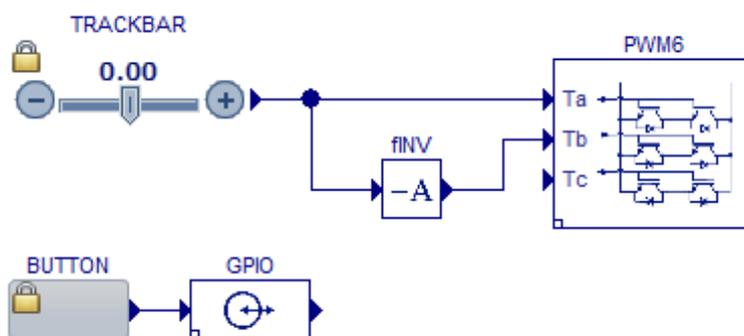


Рис. 2. Содержание блока PWM

Параметры блоков соответствуют следующим значениям:

- **TRACKBAR** – *Минимум*: -0,95; *Максимум*: 0,95; *Шаг*: 0.05; *Формат*: 31: Float; *Value*: 0.2.

Данные параметры обеспечивают возможность безопасно задавать скорость в двух направлениях, регулируя скважность ШИМ. Начальное значение Value (равное 0,2) позволит запустить двигатель на минимальной скорости.

- **PWM6** – *SysClk*: 150; *Id*: 0: EPWM1-3/GPIO0-5; *Frequency*: 5000; *DeadTime*: 3; *Polarity*: 0; *SocPulse*: 0: Нет.

Настройка блока ШИМ позволит управлять ключами, соединенными с выводами GPIO 0-5 с частотой, равной частоте аппаратного прерывания (период блока Event $1/0,0002 = 5000$ Гц).

- **GPIO** – *Type*: 1: Output; *Pin*: 31: GPIO31; *Value*: 0.

Блок GPIO с указанными выше настройками позволяет управлять включением и отключением ШИМ (Разрешение ШИМ). Следует отметить, что данный блок работает на обратной логике, т.е. 1 на входе соответствует состоянию Выкл., а 0 – Вкл.

- **Button** – Группа: 1; Значение «Отпущено»: 1; Значение «Нажато»: 0; Формат: 0: Integer; Value: 1.

Кнопки группы 1 работают аналогично кнопкам с фиксацией или самошунтированием, формат данных на выходе должен строго соответствовать формату данных на входе подключенного блока, иначе возникнет конфликт данных, и блоки будут некорректно работать. Начальное значение 1 соответствует отпущенному состоянию и говорит о том, что ШИМ в данный момент запрещена.

Загрузив в ОЗУ данный проект и начав обновление, пользователь может, используя имеющиеся органы управления, вручную управлять скоростью и направлением вращения двигателя. Для этого необходимо однократно нажать на кнопку (на плате должен загореться зеленый светодиодный индикатор разрешения ШИМ), а затем, используя Trackbar установить желаемую

Подключение и настройка обратных связей

Для того чтобы обеспечить работу регуляторов необходимо настроить работу обратных связей под которыми понимаются показания датчика скорости, выполненного в виде цифрового энкодера, прикрепленного к валу двигателя, и показания датчика тока с одного из каналов АЦП.

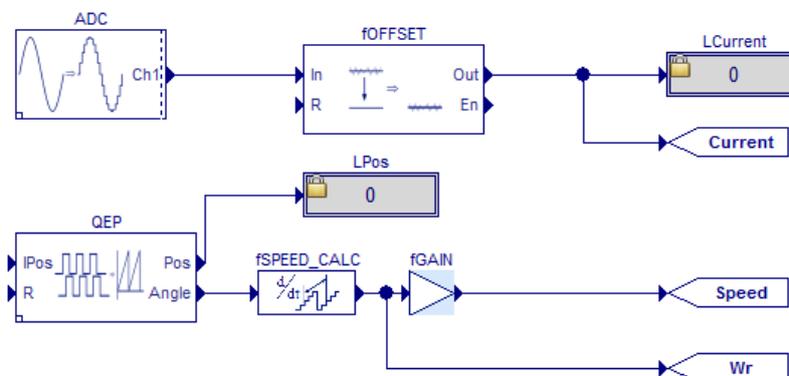


Рис. 3. Внутренняя структура блока Driver

- **ADC** – ChanCount: 1; Frequency: 7: 10714; Trigger: Continious; Chan1: 8: ADCINB0.

Подключаем один канал АЦП для измерения тока якоря двигателя, проводя измерения в фазе «V», которая подключена к каналу ADCINB0.

- **fOffset** – StartOffset: 0; TimeOfsCalc: 500; GainA: 1.

Данный блок автоматически, за указанное время, установит необходимое смещение АЦП. На данном этапе настройки обратной связи по току следует обратить внимание на то, что неизвестен

коэффициент масштабирования, который можно определить по следующей методике:

- Подключить в цепь якоря мультиметр для измерения тока якоря
- Запустить двигатель и в установившемся режиме зафиксировать некое среднее значение тока
- Используя показания метки LCurrent (Блок Label) определить масштабирующий коэффициент, разделив реальный ток на показания модуля АЦП и занеся полученное значение в качестве параметра GainA блока fOffset.

Для передачи информации о токе в другие узлы схемы устанавливаются соответствующие переходные метки TP_OUT, указав в поле *Тег* «уникальное имя» сигнала. Для удобства пользователя имена тегов можно продублировать в раздел *Имя* блока переходной метки.

- **QEP** – *Id*: 0; EQEP1/GPIO20-21; *PosMax*: 10000.

В зависимости от типа энкодера и места его подключения данные параметры могут изменяться. Данная настройка соответствует энкодеру, подключенному к разъемам XT6, XT7 со значением 10000 импульсов на 1 оборот. Определить данное значение можно загрузив проект в ОЗУ и, не запуская двигатель, вручную совершить 1 оборот энкодера, наблюдая за состоянием метки LPos (необходимо помнить о совпадении форматов).

- **fSpeed_Calc** – *SampleTime*: 0.0002; *BaseSpeed*: 650; *Period*: 10.

Блок расчета скорости на основании угла поворота ротора требователен к показаниям номинальной скорости, которая записывается в параметр *BaseSpeed*. Определить реальное значение скорости можно исходя из экспериментальных и номинальных данных двигателя. Для этого необходимо во время пробного пуска двигателя замерить напряжение, подаваемое на обмотку якоря, мультиметром. Определив ЭДС можно по известным параметрам двигателя определить его номинальную скорость. Если значения неизвестны, то данное значение подбирается экспериментально.

Блок **fGain**, установленный после блока расчета скорости, содержит масштабирующий коэффициент, равный номинальной скорости, определенной в предыдущем пункте и позволяет отображать скорость в об/мин.

Регулируемый пуск двигателя

Наибольшее распространение для решения такой задачи получила система управления электропривода, выполненная по принципу подчиненного регулирования координат.

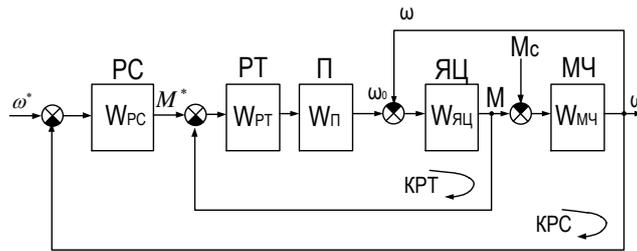


Рис. 4. Структурная схема системы управления электропривода

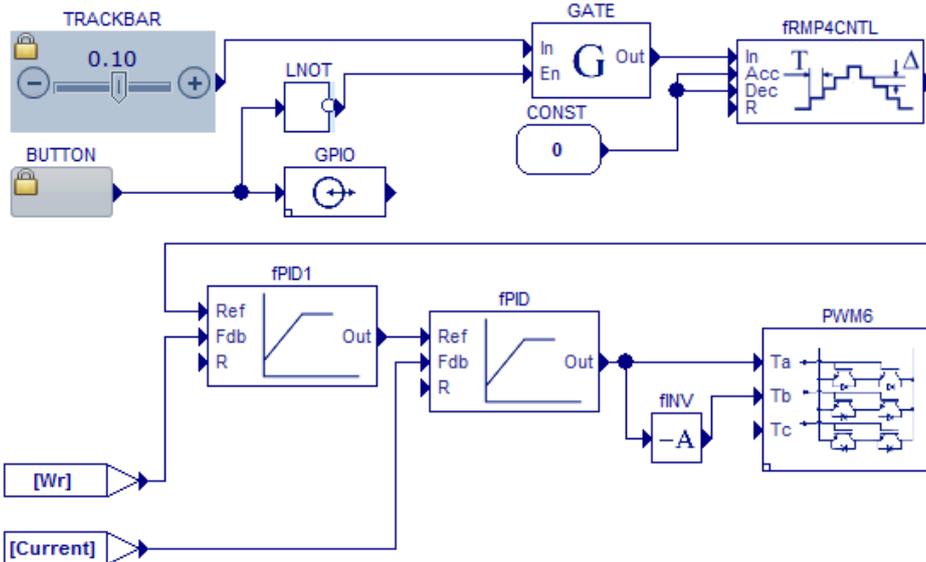


Рис. 5. Система управления в блоке PWM

Для реализации двухконтурной системы подчиненного регулирования модифицируем структуру блока PWM, добавив в нее задатчик интенсивности (блок **fRMP4CNTL** с параметрами *DelayMax* 90 при **CONST** = 0.1) ПИД регуляторы **fPID1** (контур скорости) и **fPID** (контур тока).

Настройка контуров тока и скорости производится методом последовательной коррекции. В общем случае методика настройки контуров подразумевает расчетную и практическую части. Расчетная часть выполняется по известным методикам. Практическая часть нужна для коррекции полученных расчетных значений, но если параметры двигателя неопределенны или их определение затруднено, то в некоторых случаях можно определить коэффициенты регуляторов эмпирическими методами оптимальной настройки ПИД-регуляторов, либо полностью экспериментальным методом согласно приведенному ниже алгоритму и правилам ручной настройки ПИД-регуляторов [5]:

Ручная настройка ПИД-регулятора:

- увеличение пропорционального коэффициента увеличивает быстродействие и снижает запас устойчивости;

- с уменьшением интегральной составляющей ошибка регулирования с течением времени уменьшается быстрее;
- уменьшение постоянной интегрирования уменьшает запас устойчивости;
- увеличение дифференциальной составляющей увеличивает запас устойчивости и быстродействие.

Алгоритм ручной настройки:

1. Первичная настройка производится для первого контура системы управления, для этого необходимо отключить контур скорости и подавать задание напрямую на регулятор тока.
2. Подключив к контуру тока, в качестве основного сигнала задания на вход *Ref*, блок IN добавим его в наблюдаемые переменные для задания тока якоря электродвигателя.
3. Для оперативной настройки рекомендуется добавить блок ПИД-регулятора в раздел наблюдаемых переменных и производить подбор параметров на ходу, для обеспечения безопасной настройки следует установить предельное значение на выходе регулятора в пределах $\pm 20 \dots 50\%$ от номинальной величины, такая настройка позволит избежать опасных эффектов возникающих при неверной настройке регуляторов.
4. Загрузив данный проект в ОЗУ, и начав обновление, подбираем такой пропорциональный коэффициент ПИД-регулятора, чтобы обеспечивалось достаточное быстродействие системы (для этого необходимо, чтобы реверс скорости двигателя происходил мгновенно) с сохранением устойчивости.
5. После настройки П-составляющей регулятора, необходимо настроить И-составляющую регулятора, подбирая ее таким образом, чтобы достичь оптимальной точности достижения задания.
6. После настройки И-составляющей ПИД-регулятора, настраивается его Д-составляющая, путем увеличения ее до достижения оптимальной длительности переходного процесса.
7. После настройки контура тока, необходимо заново собрать исходную схему системы и повторить данный алгоритм для настройки контура скорости.

Табл. 1. Коэффициенты ПИД-регулятора после настройки (двигатель ДПУ-87)

| | K_p | K_i | K_c | k_d | min | max |
|-----------------|-------|--------|--------|-------|-------|------|
| Контур тока | 0.32 | 0.0009 | 0.001 | 0 | -1 | 1 |
| Контур скорости | 8 | 0.0003 | 0.0002 | 0,001 | -0,95 | 0,95 |

Графики работы двигателя на стенде представлены на рисунках 7 и 8.

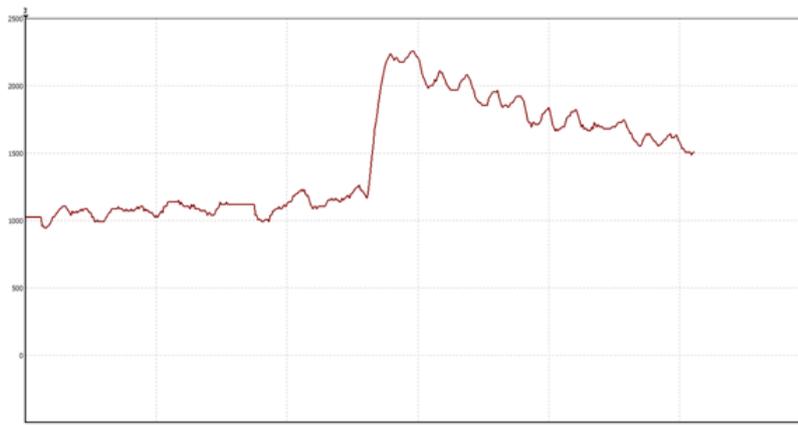


Рис. 6. Ток фазы «V», мА

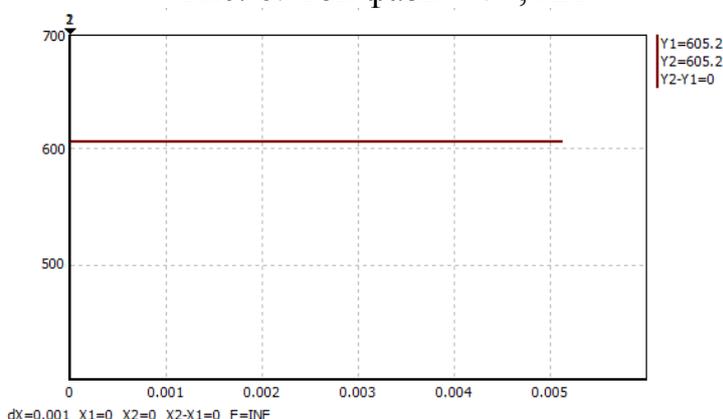


Рис. 7. Частота вращения вала двигателя, об/мин

В результате проведенных экспериментов двигатель показал свою работоспособность в среде MexBIOS DS. Алгоритмы настройки, приведенные в данной статье, показали свою пригодность для настройки экспериментальных приводов. При этом, проведя анализ проделанных операций в процессе настройки, представляется возможным реализация автоматического подбора коэффициентов, руководствуясь теми же правилами что и в ручном режиме.

ЛИТЕРАТУРА:

1. MexBIOS Development Studio [Электронный ресурс] // URL: <http://mechatronica-pro.com/ru/catalog/software/mexbiosdevelopmentstudio/35>.
2. Учебно-отладочный комплект МСВ-04 «Тип К» [Электронный ресурс] // URL: <http://mechatronica-pro.com/ru/catalog/education-equipment/49>

3. Mechatronica-Pro [Электронный ресурс] // URL: <http://mechatronica-pro.com/ru>
4. АО "Томский электротехнический завод" [Электронный ресурс] // URL: <http://tetz.ru/>
5. ПИД-регуляторы, ручная настройка [Электронный ресурс] // URL: http://www.bookasutp.ru/Chapter5_5.aspx

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ FEMM ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВЕНТИЛЬНОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Р.И. Прошутинский

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

Одним из важнейших этапов проектирования электромеханических преобразователей (ЭМП) вентильных тяговых двигателей (ВТД) является расчет магнитной цепи с построением характеристики намагничивания. В настоящее время имеется возможность применять на этом этапе программы моделирования магнитных полей.

Свободно распространяемая программа FEMM версии 4.2 [1] позволяет решать двумерные задачи магнитного поля постоянных и переменных токов, электростатические и тепловые задачи методом конечных элементов. В программу встроен скриптовый язык Lua 4.0, дающий возможность автоматизировать процесс построения геометрии модели, проведения расчета или серии расчетов. Кроме того, имеется возможность обеспечить взаимодействие с другим ПО через интерфейс ActiveX, а для совместной работы с программами MATLAB, Octave, Scilab, Mathematica существуют специальные пакеты связи (OctaveFEMM, SciFEMM, MathFEMM). Основы работы в программе изложены в [2], а примеры ее применения для расчета электрических машин – в [3],[4].

Программа имеет два режима работы – препроцессор и постпроцессор. В первом режиме задаются геометрия модели и исходные данные для решения задачи, во втором – отображаются результаты расчета. Геометрия модели может быть построена непосредственно в программе (вручную, посредством скрипт-файла на языке Lua либо с помощью связанных с FEMM сторонних программ) или импортирована из файла .dxf.

Получим зависимость магнитного потока Φ от тока возбуждения I_b с использованием модели с геометрическими размерами и параметрами ЭМП ВТД НБ-601 электровоза ВЛ80В-661.

Для этого последовательно решается двумерная задача магнито-статике при следующих допущениях:

1. Магнитное поле считается плоскопараллельным и одинаковым на всей расчетной длине машины, за которую принята длина статора;
2. Магнитное поле заключено внутри магнитопровода машины;
3. Ферромагнитные материалы представлены нелинейными в магнитном отношении, но изотропными на всем пространстве модели;
4. Реальная обмотка заменена ее эффективными проводниками.

Для решения задачи в режиме препроцессора задана геометрия модели. В связи с тем, что отношение числа пазов статора Z_1 к числу полюсов $2p$ для двигателя НБ-601 является целым числом (96/8), для моделирования можно ограничиться только 1/8 частью реального поперечного сечения машины, или одним полюсным делением.

Свойства материалов модели (воздуха, проводников, ферромагнетиков магнитопровода), цепные свойства, граничные условия заданы в соответствующих диалоговых окнах и затем сопоставлены определенным участкам модели. Магнитная нелинейность сталей статора и ротора учтена введением в программу соответствующих кривых намагничивания $B(H)$; кроме того, для учета шихтованности сердечников заданы величины толщины листа и коэффициента заполнения сталью. Для моделирования обмотки возбуждения применены цепные свойства, при которых обмотка задается величиной протекающего по ней тока и числом витков. В модели заданы граничные условия Дирихле $A=0$, примененные к внутренней поверхности ротора и внешней поверхности статора для обеспечения второго допущения (см. выше). Для обеспечения адекватности картины поля в выбранной расчетной области к отрезкам, составляющим боковые границы модели, попарно применены антипериодические граничные условия.

По результатам расчета в программе получено распределение векторного магнитного потенциала, на основании которого имеется возможность построить картину магнитного поля (рис. 1) и определить различные интегральные величины, характеризующие поле. Для определения величины магнитного потока Φ , входящего в статор на протяжении всего полюсного деления, строится дуговой контур на внутренней границе статора. Описанная процедура повторяется при различных значениях тока возбуждения I_b .

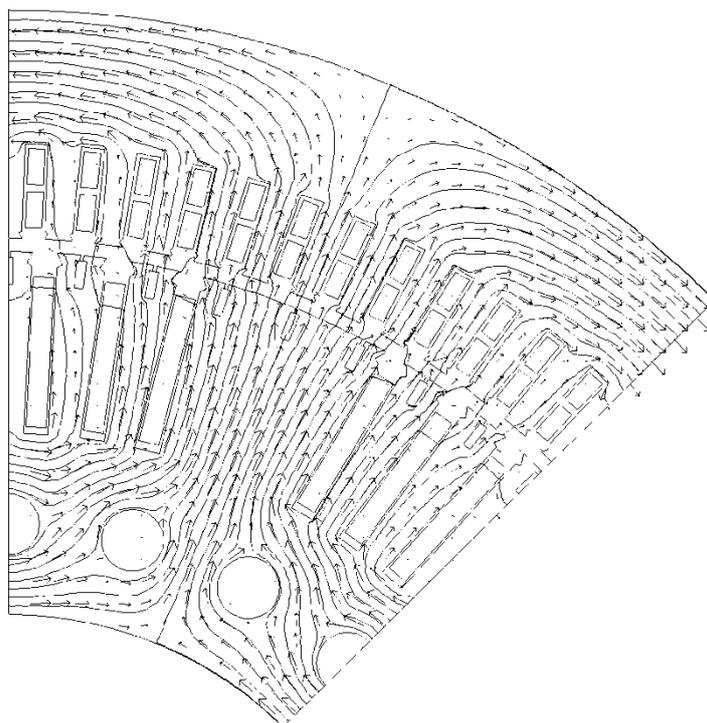


Рис. 1. Результат расчета магнитного поля ЭМП ВТД НБ-601 в режиме холостого хода при токе возбуждения номинального режима $I_b = 205$ А – картина линий равного векторного магнитного потенциала и направлений вектора магнитной индукции.

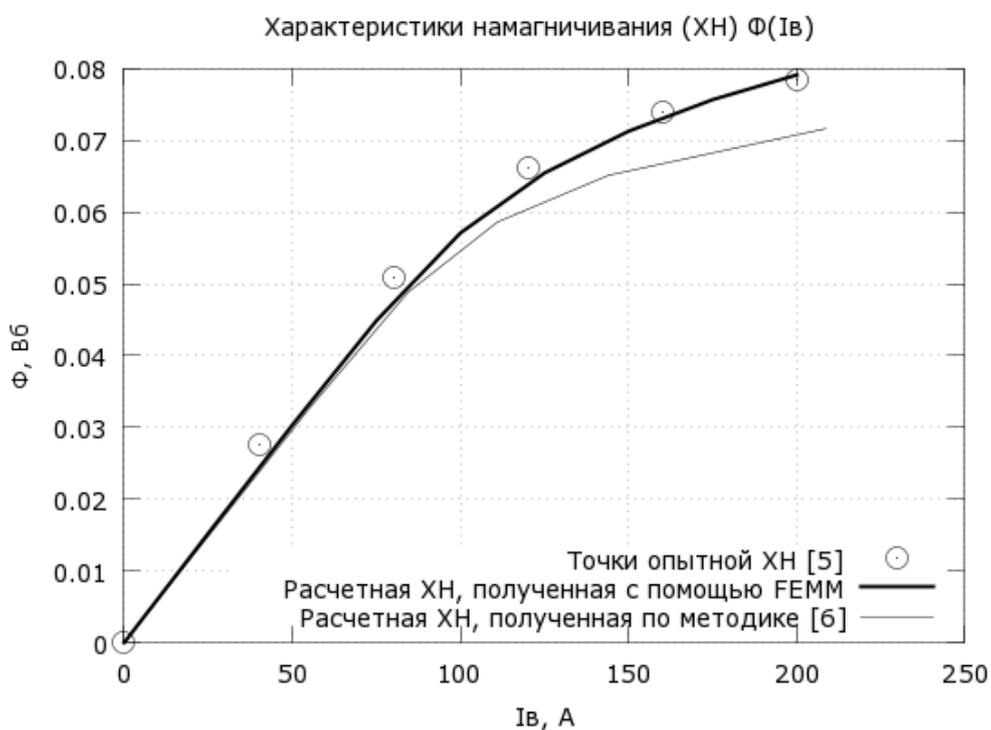


Рис. 2. Опытная и расчетные характеристики намагничивания ЭМП ВТД НБ-601.

Из рис. 2 видно, что рассчитанная с помощью программы FEMM характеристика намагничивания имеет в зоне $I_b > 80$ А лучшую сходимость с опытной кривой [5], чем рассчитанная по методике [6]. Это дает возможность более точно рассчитывать электромеханические характеристики ВТД в зоне пуска и малых скоростей движения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Finite Element Method Magnetics [сайт]. URL: <http://www.femm.info>. (дата обращения – 09.08.2015).
2. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM. – М.: Академия, 2005. – 335 с.
3. Милых В.И. Расчетно-экспериментальное тестирование программы FEMM и преодоление проблем ее использования для расчета магнитного поля электрических машин / В.И. Милых, И.В. Поляков, Н.В. Полякова, Е.И. Штангеев // Электротехника і електромеханіка. – 2004. - №3. – С. 38-43.
4. Иванов-Смоленский А.В. Применение конечно-элементных моделей при учебном проектировании синхронных машин / А.В. Иванов-Смоленский, В.И. Гончаров, Тейн Наинг Тун // Известия вузов. Электромеханика. – 2010. – №2. – С. 71-76.
5. Курбасов А.С. Результаты испытаний вентильного тягового двигателя / А.С. Курбасов, В.А. Сенаторов, В.В. Шумейко // Вестник ВНИИЖТ. - 1973. - №1. - С. 1-5.
6. Проектирование тяговых электрических машин // М.Д. Находкин, Г.В. Василенко, В.И. Бочаров, М.А. Козорезов. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.

Научный руководитель: О.В. Колодкин, к.т.н., доцент каф. ЭМ-КиС, ПГУПС Императора Александра I.

МОНИТОРИНГ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Д.В. Щербина, О.С. Белоусов
Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова

Аннотация: Рассмотрены методы деструкции и дефекты, появляющиеся в асинхронных двигателях при извлечении обмоток при

ремонте. Предлагается анализировать состояние магнитной системы двигателя по форме кривой распределения магнитного потока в воздушном зазоре.

Ключевые слова: асинхронный, двигатель, деструкция, магнитный, спектр

На долю асинхронных двигателей в промышленности приходится около 90% всего парка электродвигателей, а совокупная мощность превышает 60%. Повышение срока службы таких электродвигателей позволяет увеличить эффективность всего комплекса технологического оборудования в целом в производственной сфере. На ОАО «ММК» парк электродвигателей переменного тока превышает 100 тыс. ед. при диапазоне мощности от десятков кВт до 20 МВт.

Послеремонтный срок службы двигателя после череды ремонтов заметно снижается. Это обусловлено накоплением неисправимых дефектов, вызванных не только старением изоляции в электрической части, но и повреждениями непосредственно в магнитной системе электродвигателя. По этой причине на первый план выдвигается широкий круг задач, связанных с разработкой и внедрением принципиально новых методов неразрушающего контроля состояния электродвигателей.

При оценке состояния электродвигателей после ремонта, службами ООО «Электроремонт», на соответствие паспортным данным, отмечается ухудшение магнитного состояния АД после каждого ремонта на 4-5%. Таким образом, возникает необходимость определения состояния магнитной системы асинхронного двигателя непосредственно после ремонта и в процессе послеремонтной эксплуатации.

Общеизвестно, что магнитное состояние электрической машины характеризуется положением рабочей точки на участке колена кривой намагничивания ближе к участку насыщения. При этом наиболее простым аналитическим представлением кривой намагничивания является зависимость:

$$\psi_m(i_m) = \psi_1 \left(1 - e^{-\frac{i_m}{i_1}} \right) + k i_m, \quad (1)$$

где все необходимые параметры (ψ_1, i_1, k) аппроксимирующей функции определяются из кривой намагничивания. Величина результирующего тока намагничивания АД в каждый момент времени определяется согласно выражению:

$$i_m = \sqrt{\frac{i_{ma}^2 + i_{mb}^2 + i_{mc}^2}{3}}, \quad (2)$$

где $i_{mj} = i_{sj} + i_{rjs}$.

Исходя из найденного значения намагничивающего тока и аналитически заданной кривой намагничивания, величина взаимной индуктивности определяется согласно выражению:

$$L_m = \frac{\psi_m(i_m)}{i_m} \quad (3)$$

Учет влияния насыщения в большинстве случаев приводит к усложнению модели двигателя, поэтому в конкретных задачах нужна оценка состояния цепи намагничивания АД. В этой связи предлагается рассмотреть программу расчета асинхронных двигателей, которая после модификации привела к разработке сайта «MotorAnalysis. Конечно-элементный анализ асинхронных двигателей». Рассматривая картину относительной магнитной проницаемости в поперечном сечении с силовыми линиями магнитного поля (рис.1), можно отмечать местоположение неисправностей в магнитной системе асинхронного двигателя.

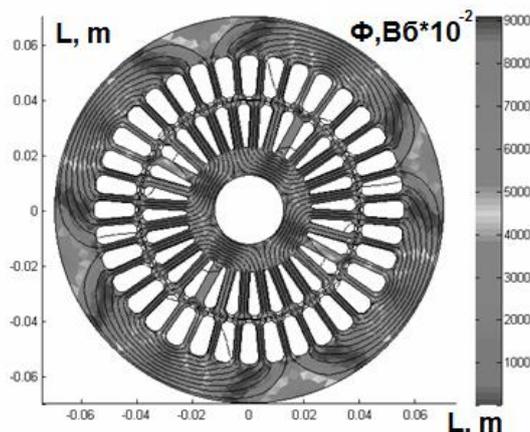


Рис. 1. Распределение потока магнитной индукции вдоль поперечного сечения двигателя в каждый момент времени

Тот или иной дефект можно идентифицировать при рассмотрении потока магнитной индукции в воздушном зазоре и анализе его спектра (рис. 2).

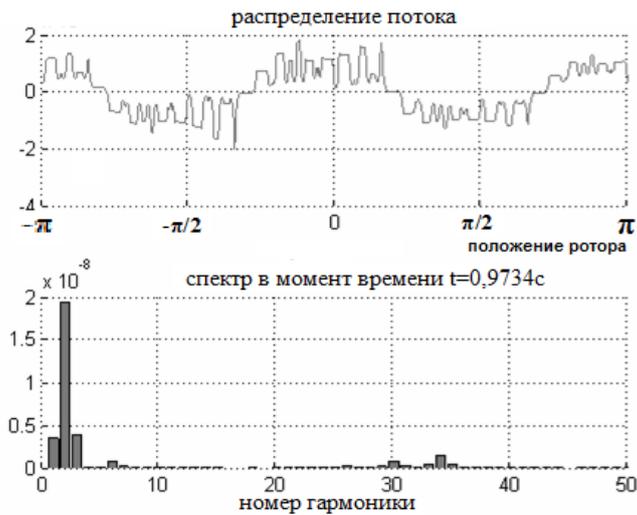


Рис. 2. Форма кривой распределения магнитного потока в воздушном зазоре двигателя и его высших гармоник в каждый момент времени

Для двигателя АЗ мощностью 500кВт и напряжением 3000В, проходившего ремонт в 2001г., перед следующим ремонтом в августе 2014г. были записаны значения пусковых токов и по ним построена кривая обобщенного вектора тока. Затем она была обработана в пакете MatLab (рис.3а). При последующем вводе в эксплуатацию получена аналогичная кривая (рис. 3б).

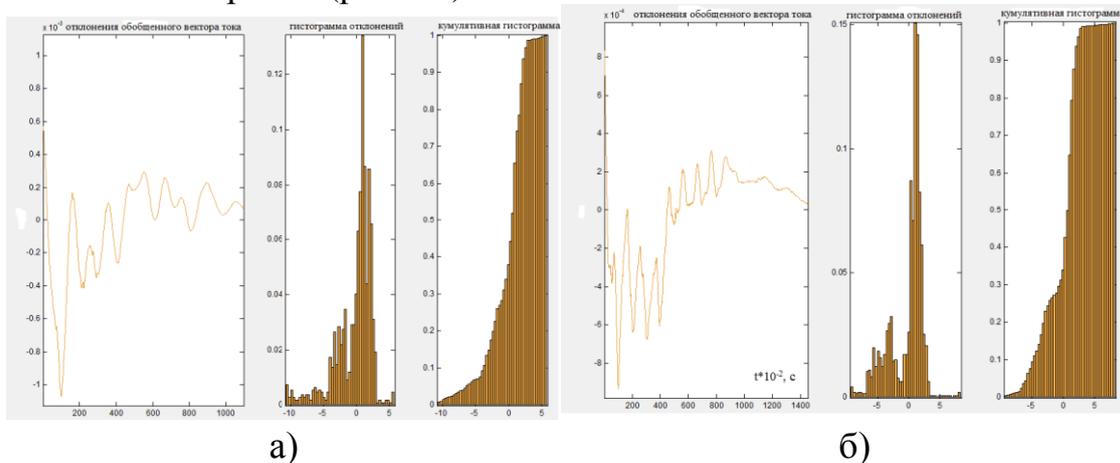


Рис. 3. Кривая обобщенного вектора тока, его гистограмма и кумулятивная гистограмма для асинхронного двигателя: а – до ремонта; и б – после ремонта

Выводы

Исследования пускового тока двигателя с помощью непрерывного вейвлет-преобразования наглядно свидетельствует об изменениях, произошедших в двигателе при ремонте. Измерения тока холостого хода показало его увеличение на 5%, это может говорить либо о том, что нарушена магнитная система. Предлагаемая методика исследова-

дований на основе конечно-элементной модели асинхронного двигателя позволяет выявлять эти неисправности, причем как в электромагнитной, так и в магнитной системах.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сарваров А.С. Анализ состояния электроприводов агрегатов ГОП ОАО «ММК» и пути модернизации / А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, Д.М. Анисимов, М.В. Вечеркин, Д.Ю. Усатый // Вестник МГТУ им. Г.И.Носова. – 2011. – №3. — С.8-11.
2. Motor Analysis: Matlab application development for finite element analysis and simulation of induction motors. — URL: <http://motoranalysis.com> (дата обращения 23.09.2014).
3. Сарваров А.С. Разработка метода диагностирования асинхронного двигателя на основе конечно-элементной модели: монография/ А.С. Сарваров, В.В. Купцов, М.Ю. Петушков. — Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И.Носова, 2010. —141с.

Научный руководитель: М.Ю. Петушков, к.т.н., профессор МГТУ им. Г.И. Носова.

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПУСКЕ МНОГОПОЛЮСНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВЕНТИЛЯТОРОМ НА ВАЛУ

М.Ю. Русяева, М.Р. Шмигель

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

На компрессорных станциях магистрального транспорта газа получили широкое применение многополюсные асинхронные двигатели (АД), в частности, серии ВАСО мощностью 37 кВт. Эти двигатели осуществляют привод вентиляторов в установках охлаждения газа. При этом благодаря большому количеству полюсов ($p=24$) скорость вращения ротора близка к 250 об/мин, что позволяет устанавливать вентиляторы непосредственно на вал АД.

Представляет интерес исследование переходных процессов, которые происходят в системе электроснабжения при пуске АД с вентилятором на валу. Из-за большой инерционности мехатронной системы эти процессы происходят в течение нескольких секунд и сопровождаются перегрузкой источника питания [1].

Для исследования переходных процессов построена имитационная модель в среде MATLAB (версия R2012a) с пакетом расширения Simulink [2]. Схема модели показана на рис. 2. Основой модели АД с вентиляторной нагрузкой является блок Asynchronous Machine из библиотеки Machines пакета power System Blockset, использующий уравнения в системе Парка – Горева. Этот блок имеет четыре входа и один выход. Первые три входа (A,B,C) являются клеммами для соединения с электрической сетью. Вход T_m служит для задания момента сопротивления M_C . Выход блока (m) предназначен для передачи вектора переменных состояния машины на информационную шину, в которой активизированы функции контроля токов ротора и статора, частоты вращения ротора и электромагнитного момента.

Момент сопротивления $M_C = K_B \cdot \omega^2$, создаваемый вентиляторной нагрузкой двигателя, моделируется блоками Math Function и Product из библиотеки Math Operations, а также блоком Constant библиотеки Sources.

Источник питания, магнитный пускатель, подключающий исследуемый АД к источнику питания, и батарея компенсирующих конденсаторов моделируются соответственно блоками Three-Phase Source, Three-Phase Breaker и Three-Phase Parallel RC Load.

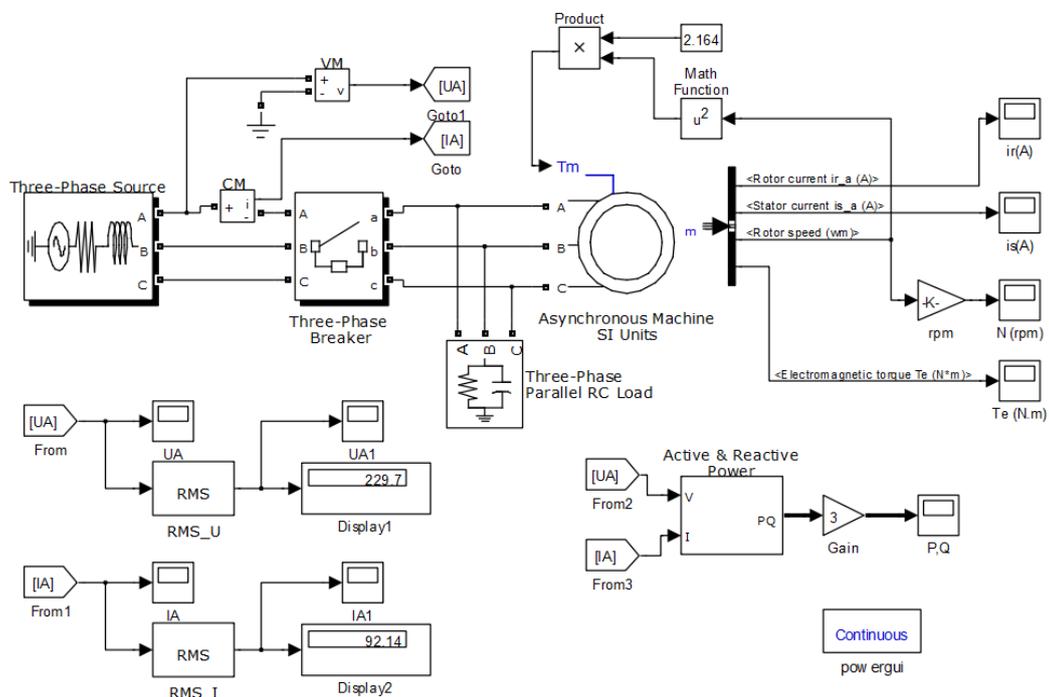


Рис. 2. Схема имитационной модели

Для наблюдения за изменяющимися в процессе моделирования переменными модель снабжена виртуальными осциллографами (блоки Scope из библиотеки Sinks). Для измерения действующих значений

сетевого напряжения и входного тока в модель введены блоки RMS. Значения активной и реактивной мощностей формируются с помощью блока Active&Reactive Power.

Результаты моделирования представлены на рис. 2 – 4. При моделировании полагалось, что линейное напряжение источника питания составляет 0,4 кВ. Индуктивность и активное сопротивление источника питания были приняты как 46 мкГн и 3,78 мОм соответственно (параметры трансформатора ТМЗ-630).

Предполагается, что подключение АД к сети производится через 0,2 с после начала моделирования (это время задается в поле настройки Transition блока Three-Phase Breaker. Для решения дифференциальных уравнений выбран метод ode15s (stiff/NDF).

Из графиков видно, что переходные процессы при пуске АД с вентиляторной нагрузкой можно разделить на три стадии.

В начальной стадии, которая продолжается примерно 50 периодов, происходит формирование магнитного поля АД. Эта стадия характеризуется резкими бросками электромагнитного момента и токов.

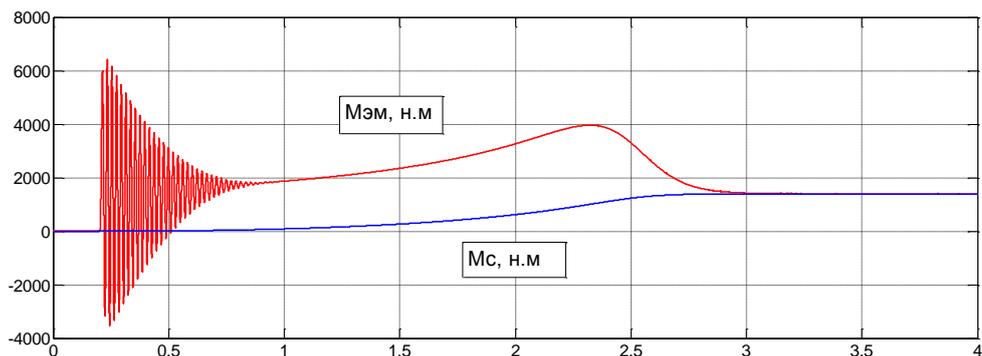


Рис. 2. Графики изменения электромагнитного момента и момента сопротивления

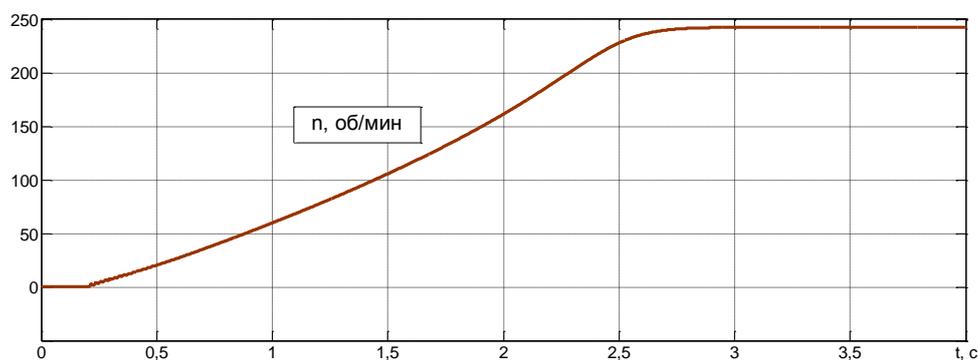


Рис. 3. График изменения частоты вращения ротора

Из графика на рис. 2 видно, что броски момента достигают 6000 Н·м, амплитуда статорного тока близка к 600 А. Частота вращения ротора при этом плавно увеличивается, что объясняется большим моментом инерции ротора с вентилятором на валу. Когда процессы, определяемые электромагнитной постоянной времени устанавливаются, колебания электромагнитного момента затухают.

Во второй стадии переходного процесса, пока продолжается разбег ротора, потребляемая из сети электроэнергия расходуется на увеличение механической энергии мехатронной системы и совершение работы. Токи АД медленно уменьшаются, электромагнитный момент и частота вращения ротора (рис. 3) плавно увеличиваются.

В третьей, завершающей стадии переходного процесса происходит резкий всплеск электромагнитного момента и плавный выход ротора на установившуюся частоту вращения. Токи АД (рис. 4) при этом быстро уменьшаются до значений, которые определяются нагрузкой АД, в частности, углом установки лопастей вентилятора на валу АД.

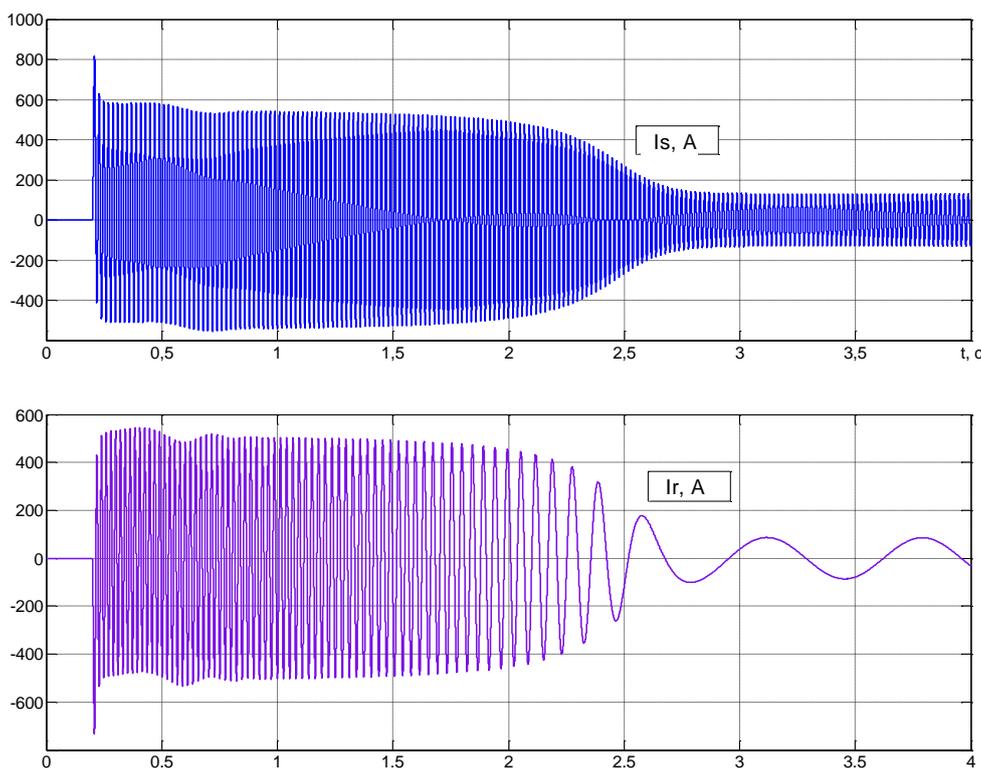


Рис. 4. Токи статора и ротора

В процессе моделирования также выявлено, что реактивная составляющая полной мощности АД в переходном режиме превышает активную составляющую в 4,4 раза. Отсюда следует вывод, что пус-

ковой ток многополюсного АД можно значительно уменьшить за счет компенсации реактивной составляющей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аршакян И.И., Артюхов И.И. Динамические процессы в системах электроснабжения установок охлаждения газа. – Саратов: СГТУ, 2004. – 120 с.
2. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

Научный руководитель: И.И. Артюхов, д.т.н., профессор, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОВЫШЕННОЙ ЖИВУЧЕСТЬЮ

К.В. Иванов

Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПЭО, группа 5ГМ51

Для электроприводов в составе опасных производственных объектов: ядерные, военные, химические, строительные, металлургические, транспортные, в том числе трубопроводный транспорт – целесообразно применение отказоустойчивого управления с обеспечением свойства «живучести» устройства. Важность решения этой проблемы отмечена в постановлении Правительства РФ № 241 «О мерах по обеспечению промышленной безопасности опасных производственных объектов на территории Российской Федерации» от 28.03.2001.

По ГОСТ 27.002 – 89 свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов – определяется термином «живучесть».

Известны технические решения для многосекционных трехфазных электроприводов [1], где в случае отказа в одной из секций происходит ее отключение, в случае технического решения [2] возможно

восстановление работоспособности для одного отказа в одной секции асинхронного электропривода с обеспечением свойства живучести.

Живучесть электропривода может быть обеспечена при рассмотрении трехфазного АД как мехатронной системы с ненагруженным резервом. При возникновении аварийной ситуации (в одной из 3 фаз) АД может быть переведен в двухфазный режим работы с реализацией алгоритма восстановления работоспособности.

Силовые преобразователи для асинхронных двигателей выполняются по схеме с развязанными фазами на основе трех преобразовательных ячеек, выполненных по мостовой или полумостовой схемам (рис.1.3 а, б). С целью уменьшения времени переключения структуры электропривода T_{π} необходимо обеспечивать максимальную скорость нарастания формируемых фазных токов (обеспечивать минимальное падение напряжения на ключах и широтно-импульсное регулирование тока осуществлять, используя только индуктивность обмоток двигателя).

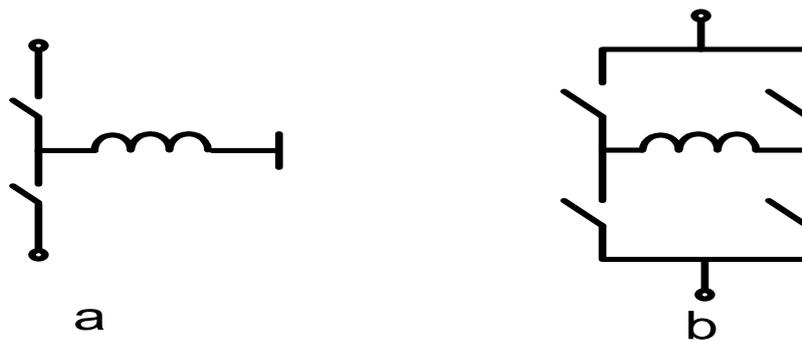


Рис. 1. Изображена преобразовательная ячейка а - полумоста, б - моста.

В работе рассмотрено обеспечение управления с повышенной живучестью n -секционного трехфазного асинхронного электропривода в случае одиночных или множественных отказов.

В предложенном асинхронном электроприводе с повышенной живучестью используется математическая модель, который позволяет выявить отказ в одном из n -преобразователей частоты, либо выявить отказ одного из фаз n -секционного двигателя. В результате по программе микроконтроллера происходит адаптация структуры электропривода из рабочего трехфазного в аварийный двухфазный режим работы. При этом вектор одного из токов в отказавшей секции смещается на угол $\pi/3$ с сохранением одинаковой амплитуды токов в фазах [3] и в результате обеспечивается сохранение кругового вращающегося поля в магнитном зазоре той секции электрического двигателя, где произошел отказ, при этом оставшиеся $n-1$ секции электропривода продолжают работать в трехфазном режиме.

При последующих отказах в этой же секции она выбывает из работы, и электропривод функционирует с пониженной активной мощностью, но с обеспечением свойства живучести. В процессе плавного исчерпания рабочего ресурса электропривода – структурного (за счет формирования избыточности в виде n -секций вместо одной) и функционального (за счет обеспечения работоспособности каждой из n -секций двигателя на двух оставшихся фазах трехфазного двигателя в аварийном режиме) резервов минимальном составе электропривода обеспечивается работа на двух оставшихся фазах одной работоспособной секции при отказавших $n-1$ секциях включительно, что позволяет обеспечить работоспособность как при одиночных, так и при множественных отказах электропривода с обеспечением свойства повышенной живучести.

На основе полученной математической модели произведено построение имитационной модели электропривода в среде MatlabSimulink (рисунок 3.4). Представленная модель содержит блок матрицы отказов (1,1), имитирующий возникновение аварийной ситуации; двух секционный асинхронный двигатель (2), содержащий в своей структуре выражения для расчета полей прямой и обратной последовательности, а также механических процессов; источник сигнала задания (3); систему управления (5), которая включает в себя в зависимости от выбранного типа САУ требуемые регуляторы; два преобразователя частоты (5); блок задания момента нагрузки (6); блок измерений (7);

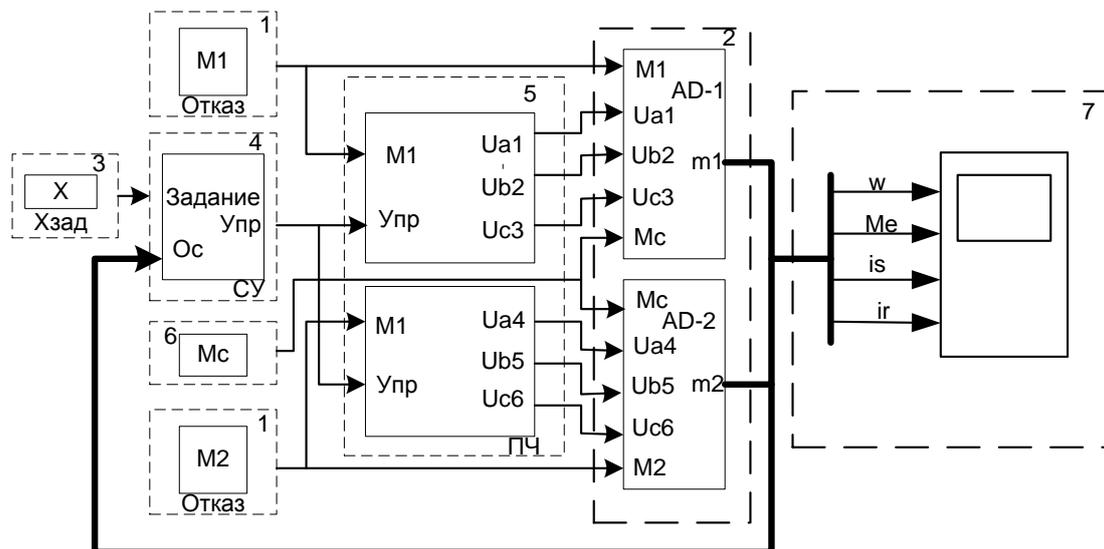


Рис. 3.4. Схема имитационной модели отказоустойчивого двух секционного асинхронного электропривода в среде MatlabSimulink

Предложенная схема была спроектирована в системе *MatLab*, и позволяет применить математическое моделирование в нормальной

форме Коши для описания переходных процессов в аварийном неполнофазном режиме двухсекционного трехфазного АД для схемы включения с развязанными фазами двигателя (1).

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{d}{dt} [i_1] = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_1] - \langle [R_{M1}] + [L_2] \frac{p\omega}{\sqrt{3}} \rangle \cdot [i_1] \right\}; \\
 \frac{d}{dt} [i_2] = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_2] - \langle [R_{M1}] + [L_2] \frac{p\omega}{\sqrt{3}} \rangle \cdot [i_2] \right\}; \\
 \frac{d}{dt} [i_3] = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_3] - \langle [R_{M2}] + [L_2] \frac{p\omega}{\sqrt{3}} \rangle \cdot [i_3] \right\}; \\
 \frac{d}{dt} [i_4] = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_4] - \langle [R_{M2}] + [L_2] \frac{p\omega}{\sqrt{3}} \rangle \cdot [i_4] \right\}; \\
 [R_{M1}] = ([1] + k_\infty [M_{01}]) \cdot [R_1]; \\
 [R_{M2}] = ([1] + k_\infty [M_{02}]) \cdot [R_2]; \\
 T_{\Pi} = t_2 - t_1; \\
 \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_1 - M_2 + M_3 - M_4 - M_c); \\
 M_1 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A1} i_{c1} + i_{B1} i_{a1} + i_{C1} i_{b1}) - (i_{A1} i_{b1} + i_{B1} i_{c1} + i_{C1} i_{a1})]; \\
 M_2 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A2} i_{c2} + i_{B2} i_{a2} + i_{C2} i_{b2}) - (i_{A2} i_{b2} + i_{B2} i_{c2} + i_{C2} i_{a2})]; \\
 M_3 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A3} i_{c3} + i_{B3} i_{a3} + i_{C3} i_{b3}) - (i_{A3} i_{b3} + i_{B3} i_{c3} + i_{C3} i_{a3})]; \\
 M_4 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A4} i_{c4} + i_{B4} i_{a4} + i_{C4} i_{b4}) - (i_{A4} i_{b4} + i_{B4} i_{c4} + i_{C4} i_{a4})]
 \end{array} \right. \quad (1)$$

где $[i_1]$, $[i_2]$ – матрицы фазных токов статора и ротора первой секции прямой и обратной последовательности соответственно; $[i_3]$, $[i_4]$ – матрицы фазных токов статора и ротора второй секции прямой и обратной последовательности соответственно; $[U_1]$, $[U_2]$ – матрицы фазных напряжений первой секции прямой и обратной последовательности соответственно; $[U_3]$, $[U_4]$ – матрицы фазных напряжений второй секции прямой и обратной последовательности соответственно; $[M_{01}]$ – фазная матрица отказов первой секции ЭП; $[M_{02}]$ – фазная матрица отказов второй секции ЭП; $[L_1]$, $[L_2]$ – фазные матрицы индуктивностей; $[L_1]^{-1}$ – обратная матрица $[L_1]$; $[R_1]$ – фазная матрицы сопротивлений до отказа и $[R_{M1}]$ – после отказа; $[R_2]$ – фазная матрицы сопротивлений до отказа и $[R_{M2}]$ – после отказа; $[1]$ – единичная матрица, размером 6 на 6, k_∞ – коэффициент, имитирующий введение высокоомного сопротивления в цепь статора, T_{Π} – время переключения структуры ЭП, t_1 – момент времени выявленного отказа, t_2 – момент времени восстановления кругового вращающегося поля, ω – частота вращения, M_1 , M_2 – электромагнитный момент полей прямой и обратной последовательности первой секции, M_3 , M_4 – электромаг-

нитный момент полей прямой и обратной последовательности второй секции, M_c – момент сопротивления двигателя, J – суммарный момент инерции электропривода, p – число пар полюсов, L_s, L_R – индуктивности статора и ротора, L_m – взаимная индуктивность.

$$\begin{aligned}
 & [i_1] = \begin{bmatrix} i_{1A} \\ i_{1B} \\ i_{1C} \\ i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix}; [U_1] = \begin{bmatrix} U_{1A} \\ U_{1B} \\ U_{1C} \\ U_{1a} \\ U_{1b} \\ U_{1c} \end{bmatrix}; [i_2] = \begin{bmatrix} i_{2A} \\ i_{2B} \\ i_{2C} \\ i_{2a} \\ i_{2b} \\ i_{2c} \end{bmatrix}; [U_2] = \begin{bmatrix} U_{2A} \\ U_{2B} \\ U_{2C} \\ U_{2a} \\ U_{2b} \\ U_{2c} \end{bmatrix} [M_{O1}] = \\
 & \begin{bmatrix} \overline{a1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \overline{b1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \overline{c1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; [M_{O2}] = \begin{bmatrix} \overline{a2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \overline{b2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \overline{c2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; [R_1] = \\
 & \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; [R_2] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; \\
 & [L_1] = \begin{bmatrix} L_s & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_m & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} \\ -\frac{L_m}{2} & L_s & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_m & -\frac{L_m}{2} \\ -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_s & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_m \\ L_m & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_R & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} \\ -\frac{L_m}{2} & L_m & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_R & -\frac{L_m}{2} \\ -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_m & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_R \end{bmatrix} \\
 & [L_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_m & -\frac{3}{2}L_m & 0 & (L_R + \frac{1}{2}L_m) & -(L_R + \frac{1}{2}L_m) \\ -\frac{3}{2}L_m & 0 & \frac{3}{2}L_m & -(L_R + \frac{1}{2}L_m) & 0 & (L_R + \frac{1}{2}L_m) \\ \frac{3}{2}L_m & -\frac{3}{2}L_m & 0 & (L_R + \frac{1}{2}L_m) & -(L_R + \frac{1}{2}L_m) & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

В результате мы можем наблюдать увеличение токов в обмотки двигателя при отказе одной или нескольких фаз.

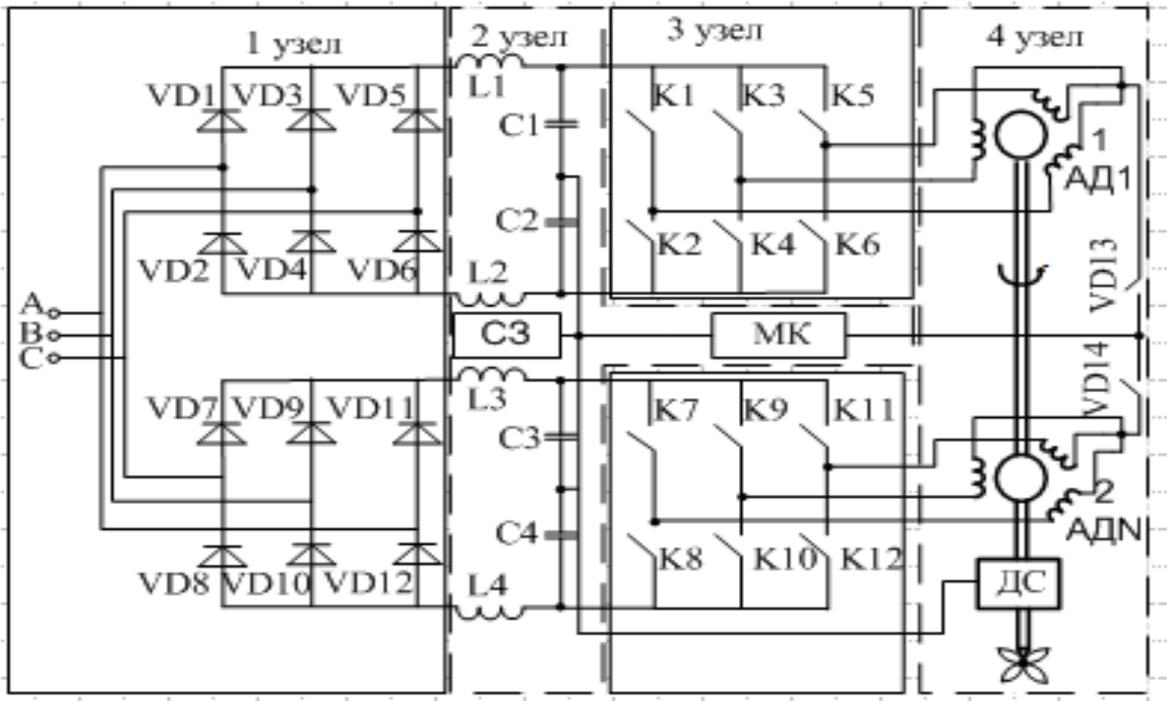


Рис. 1. Функциональная схема модели отказоустойчивого асинхронного электропривода

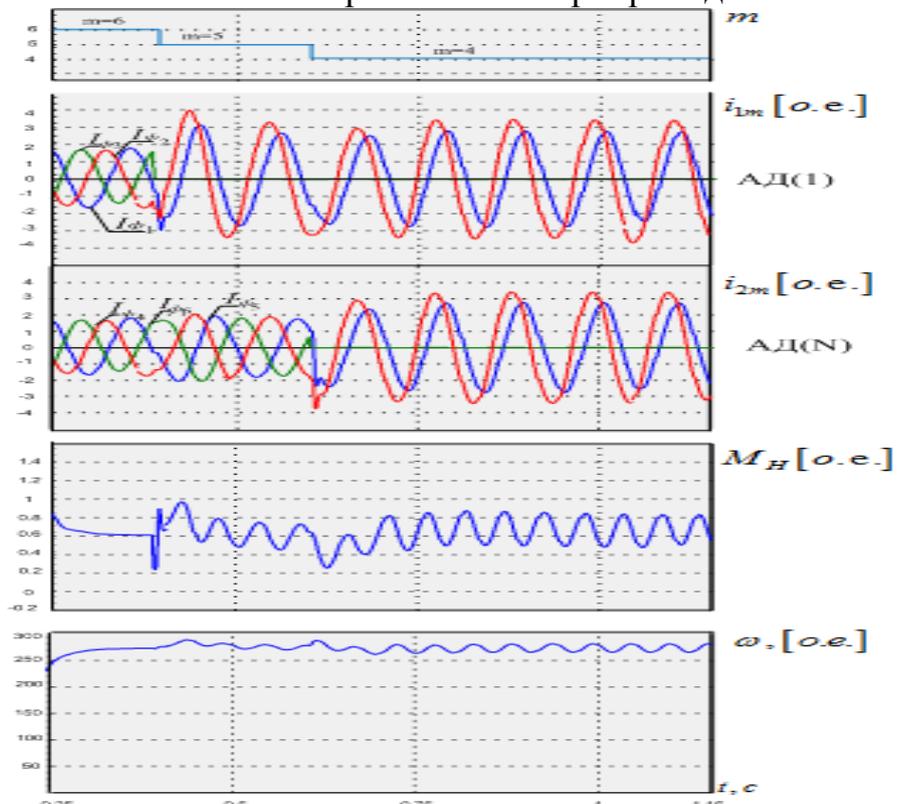


Рис. 2. Диаграмма токов при однократном или множественном отказе фаз

На участки времени от (0.25-0,65) АД(N) переходит в номинальный режим, на диаграмме видно что все 3 фаз имеют синусоидальную форму, АД(1) участок (0.25-0.40) происходит обрыв фазы $I_{\phi 3}$ начинается переходный процесс, при котором мощность двигателя уменьшается на 20% ,а ток в оставшихся фазах увеличивается за счет векторного управления, и сдвига фаз на $\frac{\pi}{3}$, при этом на рис. В на участке (0.40-0,65) увеличивается ток на 5%, компенсирую нагрузку на валу. При обрыве фазы $I_{\phi 6}$ в АД(N) участок (0.65-1.15) ток увеличивается в 3.60 раз. Двигатель теряет мощность, но сохраняет живучесть и позволяет довести технологический процесс до конца процесс до конца.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Глухов Д.М. Моделирование многофазных асинхронных двигателей в аварийных режимах: автореферат Изд-во ТПУ, 2005. – 18 с.
2. Патент РФ на изобретение № 2460190(RU), Н02Н 7/09, Н02Н 7/12, Н02Н 7/122. Способ управления и обеспечения живучести трехфазного асинхронного двигателя вращательного или поступательного движения/ Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, Й. Центнер – № 2011113290; Заявл. 06.04.2011; Опубл.27.08.2012 Бюл. № 24.
3. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. –Высшая школа, 1988. – с. 479.

Научный руководитель: Г.И. Однокопылов, к.т.н., доцент каф. ЭПЭО ЭНИН ТПУ; С.Н. Кладиев, к.т.н., доцент каф. ЭНИН ТПУ.

ДВУХКОНТУРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ С ВОДЯНЫМ КАЛОРИФЕРОМ

П.Ю. Колесов
Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПЭО, группа 5ГМ4Б

Автоматические системы вентиляции широко распространены в современных зданиях и сооружениях, где основным показателем качества работы является температура приточного воздуха. Однако для систем, где применен водяной калорифер, существуют ограничение на

температуру обратного теплоносителя связанное с требованием теплосети. Также возможны режимы работы системы при очень низкой температуре нагреваемого воздуха, когда мощности калорифера недостаточно для обеспечения основного показателя качества. В работе предложен метод управления объемом воздуха с помощью частотного управления двигателем, в упомянутых режимах.

Причиной превышения температуры обратного теплоносителя является некачественный расчет калорифера, параметры которого не позволяют обеспечивать теплообмен при заданном объеме нагреваемого воздуха. В этом случае автоматическая система поддерживает заданное значение температуры обратного теплоносителя, при этом температура приточного воздуха может значительно снижаться. Удерживать температуру в заданном коридоре можно снизив объем воздуха. Также управлением потоком воздуха можно решить вторую проблему, связанную с режимами когда температура обратного теплоносителя снижается ниже точки замерзания.

Для решения задачи управления объемом воздуха предлагается разделить по задающей температуре работу клапана и вентилятора, так, чтобы задающее значение второго контура преобразователя частоты вентилятора был на 1-2 градуса ниже чем значение для первого контура управления клапаном калорифера. В этом случае второй контур при снижении температуры подающего воздуха более чем на 2 градуса от заданного значения обеспечит постепенное уменьшение скорости вентилятора до оптимального данному режиму объема воздуха. При условии соблюдения заданной температуры подающего воздуха второй контур обеспечит увеличение потока воздуха для заданных пределов. Рассмотрим более подробно реализацию предложенной работы системы вентиляции. Структурная схема системы управления вентиляцией представлена на рис. 1.

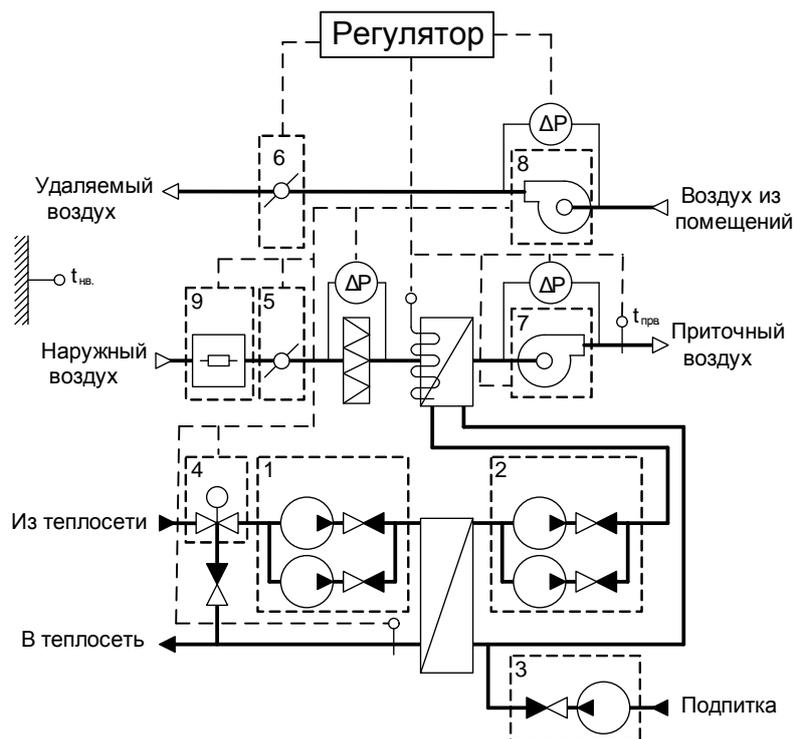


Рис. 1. Распространенный тип подключения системы вентиляции: 1 – насосная группа внешнего контура теплоснабжения; 2 – насосная группа внутреннего контура теплоснабжения; 3 – повысительная (подпиточная) насосная группа; 4 – электропривод регулирующего клапана узла теплоснабжения; 5 – электропривод заслонки приточной установки; 6 – электропривод заслонки вытяжной установки; 7 – вентилятор и электродвигатель приточной установки; 8 – вентилятор и электродвигатель вытяжной установки; 9 – электронагреватель заслонки.

На рис.2. представлены динамические параметры, и реализован релейный регулятор в среде FBD-программирования Agiar [1]. Управление трехпозиционным клапаном (в контуре вентиляции) производится одинаковым широтно-импульсным способом, но по независимым друг от друга пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) законам регулирования [2].

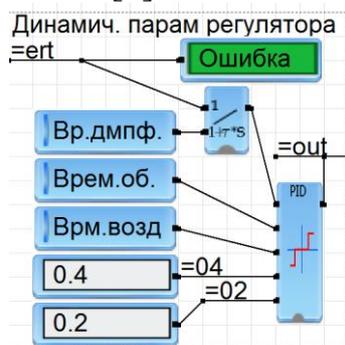


Рис. 2. Динамические параметры регулятора

Измеряемые и заданные параметры представлены на рис. 3. Для формирования управляющих сигналов задается параметр "Заданная температура приточного воздуха". С помощью датчиков температуры измеряется температура обратного теплоносителя и приточного воздуха. В этом режиме обеспечивается управление положением клапана для поддержания приточного воздуха, при этом не допускается допускать высокую температуру обратного теплоносителя, а значит, в хороших условиях постепенно увеличивается подача объема воздуха, но до определенного заданного значения (рис. 4.).

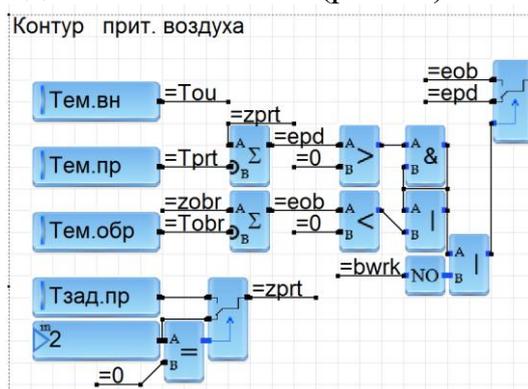


Рис. 3. Параметры управления клапана

В случаях, когда заданная температура приточного воздуха не поддерживается, то выполняется условие регулирование скорости вентилятора, т.е. медленное уменьшение подачи объема воздуха. Система проходит этап стабилизации показателей регулирования, это выдерживание температуры обратного теплоносителя и уменьшение потока воздуха для обеспечения температуры приточного воздуха (рис. 4.).

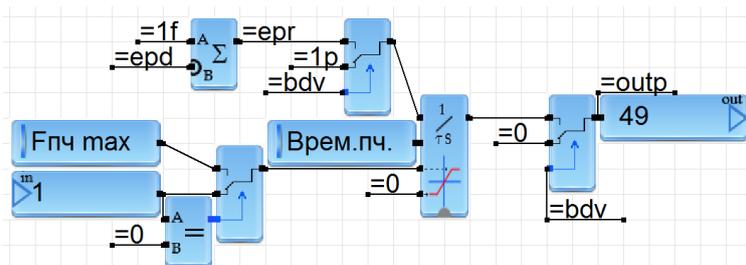


Рис. 4. Регулирование скорости вентилятора

Регулирование скорости вентилятора реализовано на И-регуляторе. Для ограничения максимальной скорости задается параметр, кроме того, задается постоянная времени изменения скорости оборотов вращения вентилятора. Целью этого является, поддержание температуры приточного воздуха на 1°C ниже заданной.

Система способна восстановить оптимальный объем воздуха при смягчении погодных условий.

Предложенный тип управления системой вентиляции является работоспособным. Данный проект реализован на регуляторе ВЭСТ-02 в среде FBD-программирования Аkiar, на объекте г. Томск ул. Фрунзе 11. Это динамика управления температуры воздуха по управлению от частотного привода. И-регулятор (рис.4.) обладает устойчивостью и точностью с большой постоянной времени. При этом дальнейшее быстроедействие объекта не рассматривалось. Данное направление может стать объектом дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Шилин А.А. Моделирование нелинейных систем на FBD-блоках / А.А. Шилин, В.Г. Букреев., Е.И. Гладышева // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 1 (25). – С. 107–114.
2. Шилин А.А. Математическая модель нелинейной теплообменной системы с запаздыванием / А.А. Шилин, В.Г. Букреев, К.И. Койков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 6. – С. 15–22.

Научный руководитель: А.А. Шилин, к.т.н., доцент каф. ЭПЭО ЭНИН ТПУ.

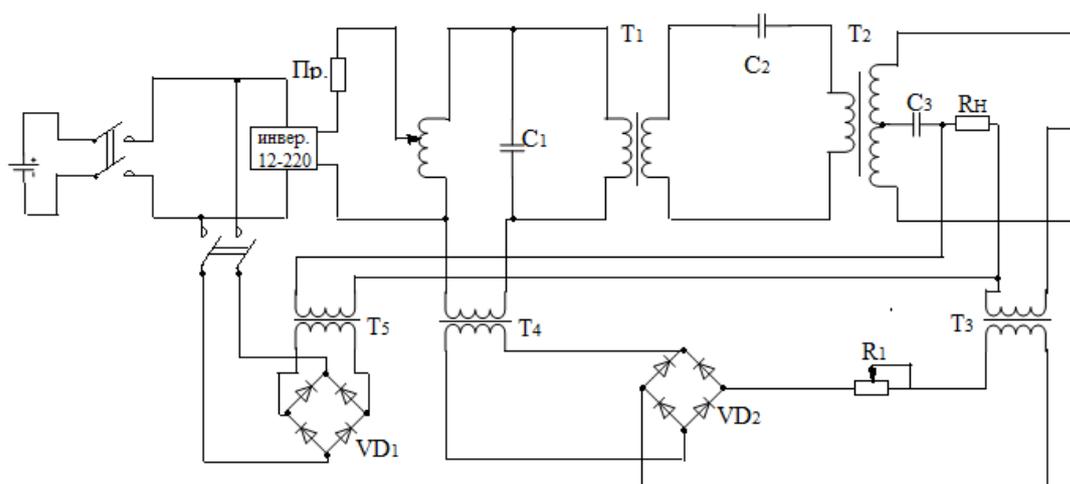
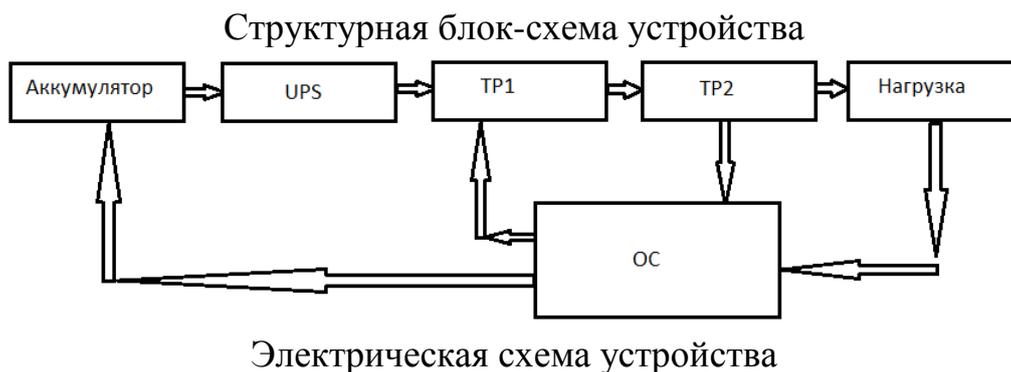
АВТОНОМНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ НА 220 ВОЛЬТ, 50 ГЕРЦ МОЩНОСТЬЮ 200 ВТ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

М.Г. Грецингер, Э.М. Исмаилов
Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПЭО, группа 5ГЗА

Название: Автономный источник питания на 220 вольт, 50 герц мощностью 200 Вт с обратной связью.

Назначение: Источник питания предназначен для преобразования постоянного напряжения 12 вольт в напряжение 220 вольт, 50 герц, мощностью 200 ватт.

Принцип работы: В основе работы источника питания используется резонанс напряжений в трансформаторах. Через обратную связь происходит поддержание резонанса на устройстве и подзарядка аккумулятора. При правильном изготовлении устройства и настройке его в автоматическом поддержании резонанса позволяет подзаряжать аккумулятор при работе.



Научный руководитель: Н.М. Балахонов, инженер каф. ЭПЭО ЭНИН ТПУ.

АВТОНОМНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ НА ТРАНСФОРМАТОРЕ ТЕСЛА МОЩНОСТЬЮ 150 ВАТТ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Д.В. Чурилов¹, В.Ю. Позднякова²
Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПЭО, ¹группа 5А42, ²группа 5А3Г

Назначение: источник питания предназначен для преобразования постоянного низкого напряжения 12 вольт в переменное напряжение 220 вольт, частотой 2,5 кГц, мощностью 150 ватт.

Принцип работы: в основе работы источника питания используется резонанс напряжений в высоковольтном, высокочастотном трансформаторе и резонанс токов и напряжений в низковольтной, низкочастотной схеме устройства.

Структурная блок-схема устройства представлена на рисунке 1:

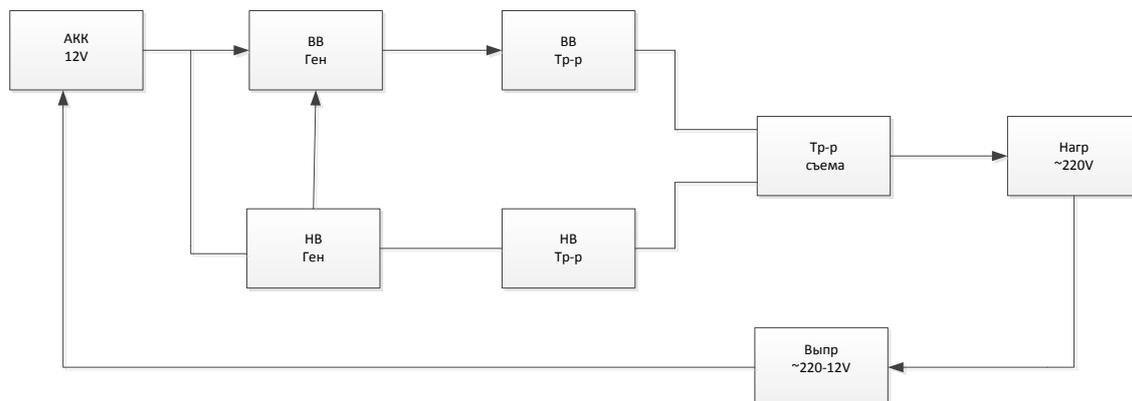


Рис. 1. Структурная блок-схема автономного источника питания

От аккумулятора 12В напряжение подается на высоковольтный генератор (ВВГен) и низковольтный генератор (НВГен). С высоковольтного генератора напряжение подается на первичную обмотку высоковольтного трансформатора (ВВТ). Со вторичной обмотки трансформатора напряжение проходит через дроссель (dr1) и подается на антенну. Антенна создает высокочастотное электромагнитное поле и наводит в катушке съема (КС) высокочастотное ЭДС.

С низковольтного генератора напряжение подается на первичную обмотку низковольтного трансформатора (НВТ). Со вторичных обмоток трансформатора напряжение подается на катушку съема.

Параллельно катушке съема подсоединен конденсатор С2, и параллельно конденсатору С2 подсоединен трансформатор Т1, который осуществляет обратную связь. Со вторичной обмотки трансформатора Т1 снимается напряжение 12В, выпрямляется через выпрямитель D3 и подается на вход генератора, параллельно аккумулятору.

С1 и С2 настроены в резонанс с индуктивностями низковольтного трансформатора и катушки съема.

Принципиальная электротехническая схема устройства представлена на рисунке 2:

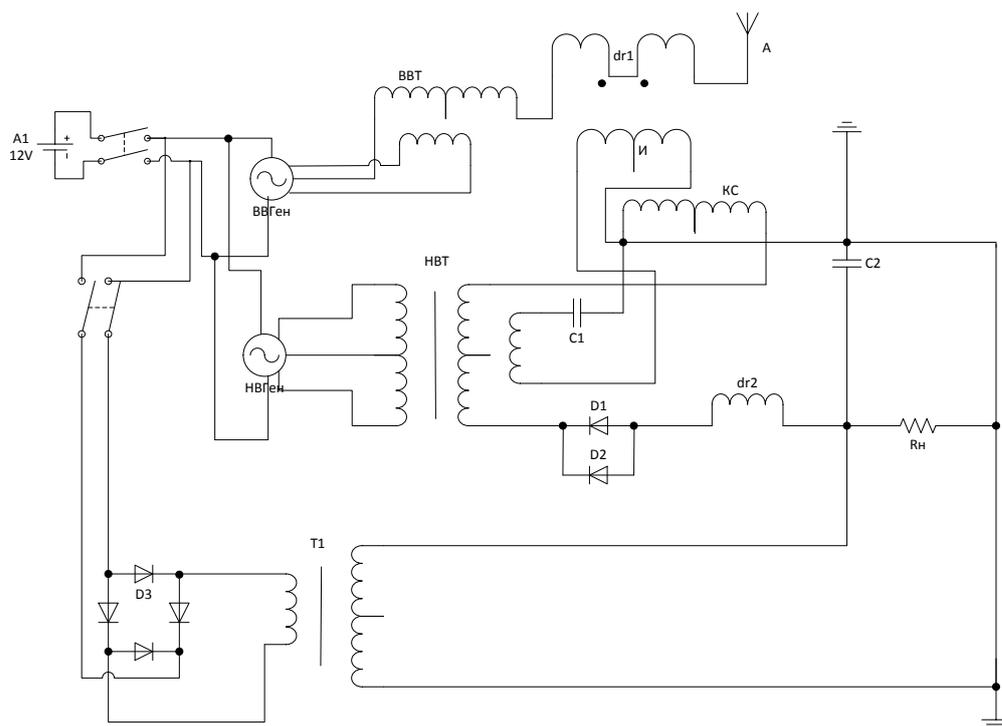


Рис. 2. Принципиальная электротехническая схема автономного источника питания

Данная схема позволяет обеспечить продолжительную работу устройства, вследствие подзарядки аккумулятора через трансформатор Т1.

Научный руководитель: Н.М. Балахонов, инженер каф. ЭПЭО ЭНИИ ТПУ.

**СЕКЦИЯ 6.
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ АВТОНОМНЫХ
ОБЪЕКТОВ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ РЕДУКЦИЕЙ СКОРОСТИ В ANSYS
MAXWELL**

И.А. Кремлёв, В.А. Гилев, М.В. Зеленин
Томский политехнический университет
ИК, ИКСУ, группа 8Е31

В последнее десятилетие становятся все более популярными специальные программные комплексы для расчета параметров электромагнитных полей. Одним из мощнейших инструментов для решения этой задачи является программа Maxwell от компании Ansys. ANSYS Maxwell — это ведущее программное обеспечение для моделирования двумерных и трехмерных электромагнитных полей, используемое для исследования и проектирования двумерных и трехмерных моделей, датчиков, трансформаторов, двигателей и других электромеханических и электрических устройств различного применения. Она базируется на методе конечных элементов (Finite Element Method — FEM) и точно рассчитывает гармонические, а также статические электрические и электромагнитные поля и переходные процессы в полевых задачах. [1]

Данная работа связана с исследованием синхронных реактивных двигателей с электромагнитной редукцией скорости. Электродвигатели с электромагнитной редукцией скорости используются в основном в машинах, работающих на основе зубцовых гармоник, например в составе электропривода антенн космических аппаратов. Исследование динамических режимов работы подобного класса электрических машин невозможно без использования специализированного программного обеспечения, обладающего возможностями моделирования трехмерных магнитных полей и расчетом его интегральных характеристик. Суть работы данного типа двигателей заключается в том, что электродвигатель состоит из статора с полюсами, на внутренней поверхности которых присутствуют зубцы, m -фазная обмотка, которая выполнена в виде $2\text{-}m$ катушек (где p - число пар полюсов), которые размещены на полюсах. Также содержит коммутационный аппарат, и безобмоточный зубчатый ротор, по окружности которого расположены короткозамкнутые витки из немагнитного и высоко-

токопроводящего материала. Эти витки расположены на зубцах ротора таким образом, что при повороте ротора под каждым полюсом статора находится не менее одного витка. [2]

У такого типа электродвигателей можно выделить следующий недостаток: в короткозамкнутой обмотке, которая пересекает магнитное поле первой гармоники, и при синхронной скорости вращения ротора появляется ток, который вызывает некоторые потери. Это связано с тем, что тип ротора, так называемая, "беличья клетка" определяет характер протекания тока в роторе, а от этого зависит как магнитное насыщение стали ротора при нагрузке, так и электрические потери энергии в нем. И в итоге, все это снижает энергетические показатели двигателя. Также недостатком данного типа электродвигателей можно назвать то, что происходит значительное снижение стабильности частоты вращения ротора из-за пульсации вращающего момента, вследствие чего возникают такие явления, как сильная вибрация и шум, которые вызваны низкочастотными колебаниями.

Учитывая недостатки, первоочередной задачей является электромагнитный анализ двигателя, который успешно может быть выполнен с использованием возможностей дополнения RMXprt. ANSYS RMXprt — программа, которая ускоряет процесс оптимизации и проектирования вращающихся электрических машин. В ней используется метод эквивалентной магнитной цепи для вычисления рабочих характеристик машины и классическая аналитическая теория электрических машин, что позволяет намного быстрее проанализировать модель и дать результат [3].

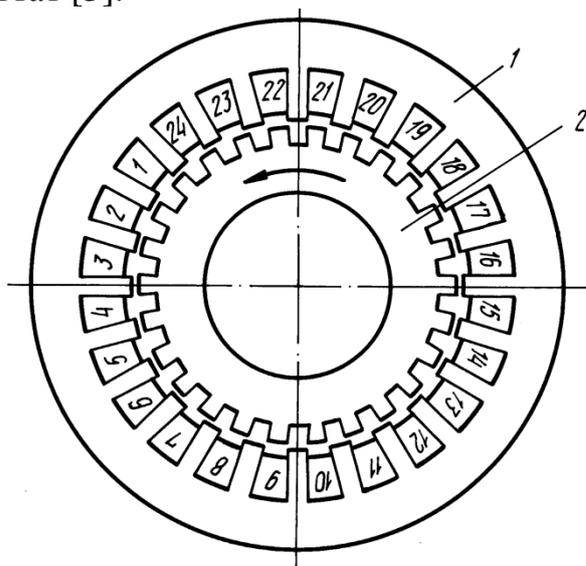


Рис. 1. Модель двигателя

Вопрос исследования магнитного поля электрических машин, часто затруднён задачей точного описания геометрии магнитной системы. В программной среде Maxwell в составе библиотеки RMXprt есть возможность точного описания особенностей геометрии зубцовой зоны и рассчитать кривые тока, ЭДС и электромагнитного момента с учетом гармонических составляющих (рис.1). При описании геометрии магнитной системы есть возможность поддержки систем автоматизированного проектирования, т.е. модель может быть выполнена в любом САД-приложении, например в SolidWorks.

Далее для расчета двигателя были определены свойства материалов всех твердотельных объектов в составе магнитной системы. При проведении теоретических исследований установлено, что неправильный подбор материалов искажает картину электромагнитного поля, что естественно влияет на результаты расчета. Итогом нашей работы стало исследование следующих характеристик синхронного реактивного электродвигателя с электромагнитной редукцией скорости: потребляемая мощность, коэффициент полезного действия, номинальные скольжение, вращающий момент, скорость и данных по электрическому состоянию обмоток ротора и статора (рис.2).

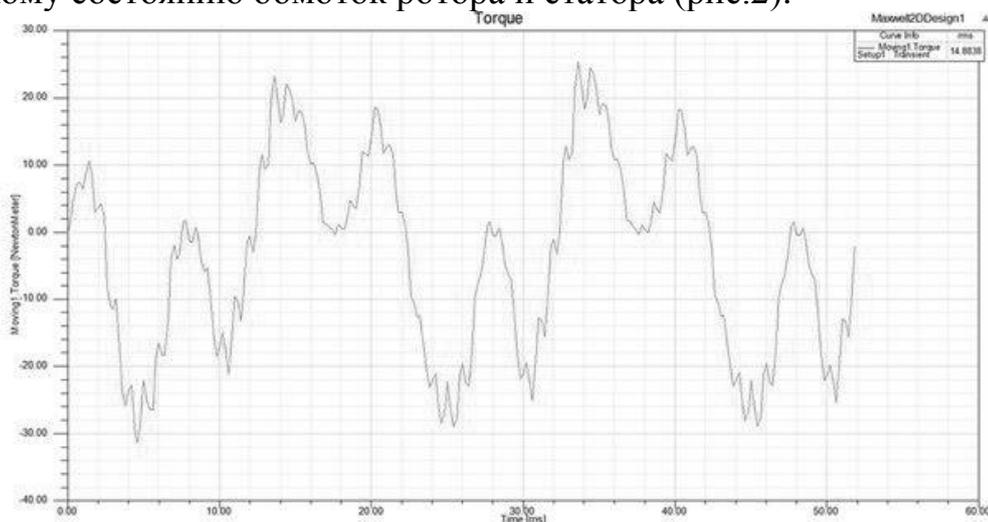


Рис. 2 Электромагнитный момент двигателя

Анализируя влияние геометрических характеристик электродвигателя на его внешние статические характеристики, были определены варианты наиболее эффективного исполнения зубцовой зоны с позиции снижения пульсаций электромагнитного момента. При этом меняли следующие параметры зубцовой зоны: высота и ширина зубца, число витков в пазу, форма паза, свойства материалов магнитопровода ротора. На рисунке ниже представлена картина электромагнитного поля ротора.

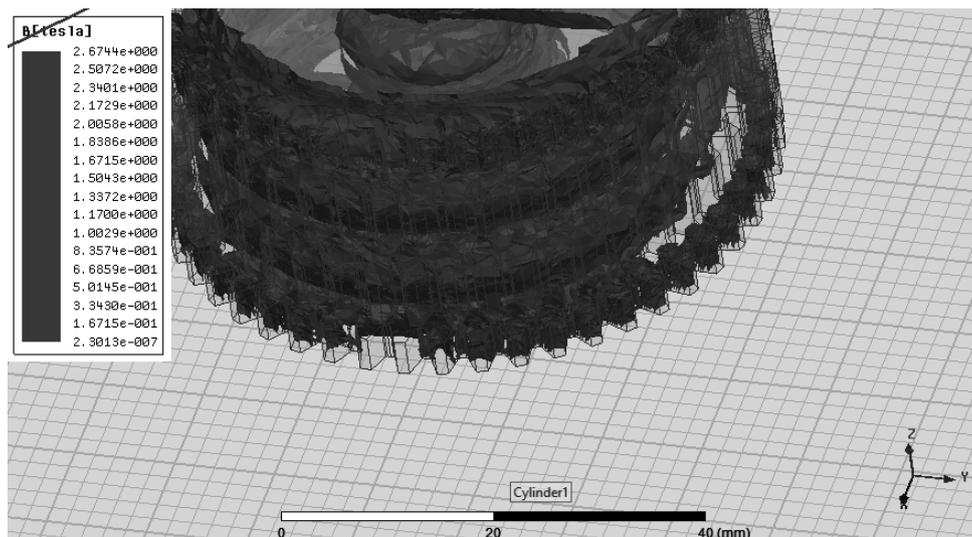


Рис. 3 Картина электромагнитного поля ротора

В целом, использование RMXprt позволило сократить время исследования режимов работы синхронного реактивного электродвигателя в части автоматизированной обработки данных. В тех случаях, когда требуется перейти от аналитического к более точному решению для детального рассмотрения процессов, происходящих внутри машины, ANSYS RMXprt позволяет перейти от виртуальной модели к двумерной или трехмерной полевой в ANSYS Maxwell 2D/3D.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Неофициальный сайт программы ANSOFT Maxwell [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ansoft-maxwell.narod.ru/>
2. Пат. 2006142 РФ. Н 02 К 19/06. Синхронный двигатель с электромагнитной редукцией частоты вращения / К.Г. Новоселов, Е.Б. Баталов; Опубл. 1986.
3. RMXprt. Общая информация [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://cae-expert.ru/product/rmxprt>
4. Леонов С.В. Федянин А.Л. Муравлев О.П. Статическая модель герметичного синхронного двигателя дискового типа с магнитосвязанными полюсами. Известия ТПУ Выпуск № 4 / том 312 / 2008.

Научный руководитель: С.В. Леонов, кандидат технических наук, доцент, кафедра интегрированных компьютерных систем управления.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОРОНОСТОЙКОСТИ ЭМАЛИРОВАННЫХ ПРОВОДОВ

Д.И. Чарков, Е.Ю. Солдатенко
Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭКМ

Согласно Энергетической стратегией России на период до 2020 года важнейшее стратегическое направление - снижение энерго- и электроемкости экономики и повышение эффективности использования энергоносителей. Такая финансовоёмкая программа формирует масштабные потребности электроэнергетики на все виды электротехнического оборудования: генераторы, трансформаторы, коммутационная аппаратура и т.п. Важное место в этом перечне занимает оборудование силовой электроники и регулируемого электропривода. [1]

Частотно-регулируемый электропривод, построенный на базе асинхронного двигателя, применяется достаточно широко во многих сферах деятельности и по разным оценкам на долю асинхронных двигателей приходится от 40 % до 70 % всей электрической энергии, преобразуемой в механическую. [2] Основными преимуществами ЧРП являются: высокая точность регулирования, экономия электрической энергии в случае переменной нагрузки, повышенный ресурс оборудования, стабилизация скорости вращения при изменении нагрузки, плавный пуск двигателя, значительно уменьшающий его износ и многое другое. [3]

Внедрение системы частотного управления позволило в значительной степени увеличить частоту коммутационных операций (до 20 кГц), минимизировать потери электроэнергии и улучшить производительность частотно-регулируемого привода. Однако, повышение скорости коммутаций сократило время нарастания импульсов напряжения, которое негативно отразилось на протекании переходных процессов в цепи «частотный преобразователь – питающий кабель – двигатель». Рассогласование полных сопротивлений между инвертором, кабелем и двигателем возбудило волновые процессы в кабеле и явление отражения сигнала, что привело к перенапряжениям на клеммах двигателя [4]. Такие электрические нагрузки ужесточили условия эксплуатации изоляционной системы частотно-регулируемого привода и, прежде всего, межвитковой изоляции, как наиболее слабого элемента изоляции обмотки. В порах и воздушных зазорах стали возникать коронные разряды, приводящие к ускоренному старению изоляции и дальнейшему пробою [5].

В данном случае под коронными разрядами понимаются поверхностные разряды 5в изоляции обмотки электрической машины. Короностойкость диэлектрика представляет собой способность выдерживать влияние коронного разряда без недопустимого ухудшения свойств. Корона может формироваться с течением времени из-за износа электродов и старения изоляции. Она ограничена относительно узкой областью, прилегающей к электроду. Под воздействием короны и образующихся под ее влиянием химических соединений происходит эрозия изоляционного материала, которая может достигать такой степени, что оставшаяся изоляция не выдерживает приложенного напряжения и происходит пробой. Возможно также изменение физических свойств материала под действием короны: материал изменяет размеры, становится хрупким, трескается, выделяет газы [6].

Проблема является достаточно новой и актуальной, так как традиционно считалось: возникновение короны в низковольтной изоляции невозможно. В связи с этим при рассмотрении вопросов надежности подобных систем электрическим старением пренебрегали. Помимо этого, обозначилась проблема выбора критерия, методов и технических средств, позволяющих оценить стойкость межвитковой изоляции к эксплуатационным нагрузкам при работе ЧРП на базе ШИМ.

Не смотря на наличие некоторых рекомендаций [7], существующие методы не применимы для определения короностойкости эмалированных проводов: конструкция образцов не имитирует межвитковую изоляцию, предлагаемые критерии условны и не дают адекватной оценки, характер и величины прикладываемых напряжений не соответствуют реальным нагрузкам на изоляцию ЧРП.

Поставленную проблему предлагается решить путем проведения испытаний образцов провода на стойкость к действию высокочастотного модулированного сигнала. В качестве образцов используются скрутки провода (согласно ГОСТ 15634.4-70), испытания проводят при температуре класса нагревостойкости. Совместно с ООО «НПО Редвилл» был разработан и смонтирован учебно-исследовательский стенд для определения короностойкости изоляции эмалированных обмоточных проводов. Общий вид стенда представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Общий вид учебно-исследовательского стенда.

Электрические нагрузки характерны для работы частотного преобразователя воспроизводится с помощью высокочастотного блока (ВЧ блок) со следующими характеристиками: подаваемое напряжение переменного тока с амплитудой 1200 В, частота 400 Гц с частотой (модуляции) квантования напряжения 5 кГц с (длительность фронта волны) крутизной нарастания переднего фронта 4 мкс. Подобные условия обеспечивают появление коронных разрядов по всей длине испытуемого образца. Критерием короностойкости принято время до пробоя изоляции образца.

В работе были испытаны ряд марок современных эмалированных проводов: ПЭТД-180, ПЭТД2-К-180, ПЭТ-155, ПЭЭА-155. Испытывались как пропитанные, так и непропитанные скрутки (пропиточные компаунды КП-50, КП-55-5, и лак КО-916К). Отмечено: наибольшая короностойкость у провода ПЭТД-2К-180 в сочетании с компаундом КП-50 и лаком КО-916К.

Изоляция данного провода представляет собой двухслойную композицию. Первый слой изоляции выполнен из короностойкого или модифицированного полиэфиримидного лака, куда входят наночастицы оксида кремния, внедренные в эмалевую изоляцию. Второй слой изоляции выполнен из полиамидимидного лака.

В случае действия коронного разряда, наночастицы оксида кремния за счет сильного взаимодействия образуют защитный слой, препятствующий дальнейшему разрушению изоляционного слоя. Тем самым, замедляется процесс разрушения изоляции.

Результаты работы внедрены в учебный процесс подготовки магистров по направлению 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротех-

ника», профиль «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника, дисциплина «Изоляция электрических машин и аппаратов».

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лазарев Г.Б., " Частотно-регулируемый электропривод – эффективная технология энергосбережения при техническом перевооружении и новом строительстве тепловых электростанций . " [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://en-res.ru/wp-content/uploads/2012/12/Лекция-ЧРП-8-9-09-2.pdf> (дата обращения: 15.09.15).
2. Асинхронный двигатель. Устройство и принцип действия однофазного и трехфазного асинхронного электродвигателя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.eti.su/articles/elektroprivod/elektroprivod_36.html (дата обращения: 03.03.15).
3. Частотное регулирование электроприводов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.e-audit.ru/chrp/index.shtml> (дата обращения: 03.03.15).
4. Transient Effects of PWM Drives on Induction Motors, Christopher J. Melhorn, Le Tang, Electrotek Concepts, Inc., Knoxville, Tennessee 37932.
5. R. Kerkman, D. Leggate, G. Skibinski. "Interaction of Drive Modulation & Cable Parameters on AC Motor Transients," IEEE IAS Conference Proceedings, 1996.
6. Melfi, M., Sung, A.M.J., Bell, S., Skibinski, G.L. Effect of Surge Voltage Risetime on the Insulation of Low Voltage Machines Fed by PWM Converters // Industry Applications, IEEE Transactions on, Jul/Aug 1998, pages (766 - 775).
7. ГОСТ 27427-87 - Материалы электроизоляционные. Методы относительного определения сопротивления пробоем поверхностными разрядами

Научный руководитель: А.П. Леонов, к.т.н., доцент кафедры ЭКМ ЭНИН ТПУ.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ГАЗОКОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ

И.С. Токарев¹, Ю.Н. Ужастов²

^{1,2}Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭСиЭ, ²группа 5АМ4Г

Современные системы электроснабжения промышленных объектов должны обеспечивать надежное функционирование в принципиально различных режимах работы. Здесь и автономные режимы электростанций, и параллельная работа энергоагрегатов, и работа на мощную сеть, и возможность слабых связей с энергосистемой, и соизмеримость нагрузки, и проблемы с качеством внешней сети.

Сегодня эти проблемы решаются, по сути, методом проб и ошибок, в лучшем случае на громоздких натуральных стендах, что весьма затратно и малоэффективно. Зачастую многие проблемы всплывают лишь на этапе пуско-наладочных испытаний, что ведет к необходимости жестко ограничивать режимы работы уже созданных автономных энергосистем и систем электроснабжения промышленных объектов [1]. Для разрешения проблемной ситуации необходимо совершенствовать системы управления энергосистемами. Для этого необходимо подробное математическое описание объекта управления, роль которого играет многоагрегатная мини-электростанция или крупный потребитель электроэнергии от внешней сети с резкопеременной асинхронной нагрузкой. При этом набор элементов системы, а также ее структура должны изменяться произвольным образом, в реальном времени.

Решение задач обеспечения надежного электроснабжения должно осуществляться, опираясь на данные, полученные из моделирования систем электроснабжения объектов на моделирующих комплексах. Современные моделирующие комплексы в реальном времени позволяют получить данные о работе практически любого электрооборудования энергосистемы в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы.

Одним из таких комплексов является RTDS. Устройство цифрового моделирования энергосистемы в режиме реального времени (Real Time Digital Simulator – RTDS) – это специализированный инструмент, ориентированный на исследование электромагнитных и электромеханических переходных процессов [2].

Основные задачи, решаемые с применением RTDS:

- Моделирование систем различной конфигурации, включающих как традиционные элементы (генераторы, трансформаторы, линии), так и современные внедряемые устройства (силовые полупроводниковые комплексы - FACTS, HVDC, SVC)
- Детальное исследование режимов (установившихся режимов, электромагнитных и электромеханических переходных процессов) систем переменного и постоянного тока.
- Всесторонние испытания реального оборудования в условиях, максимально близких к тем, которые имеют место в реальных энергосистемах;
- Разработка и проверка алгоритмов действия устройств управления, регулирования и защиты (в том числе систем управления FACTS, HVDC, SVC).

На первом этапе работы, была произведена оценка малой автономной энергосистемы газокompрессорной станции (ГКС) «Сахалин». Автономные энергосистемы промышленных предприятий должны иметь высокую надежность работы. На программно-аппаратном комплексе RTDS в реальном времени была создана модель автономной энергосистемы с подробным описанием всех ее элементов. Очень сложным являлся процесс моделирования генераторов с уникальной системой АРВ.

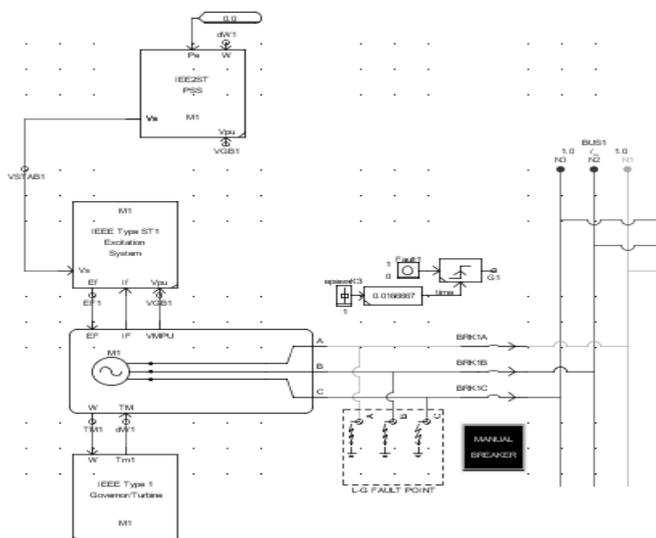


Рис. 1. Имитация короткого замыкания на шинах генератора на моделирующем комплексе RTDS.

На полученной модели можно оценить различные режимы работы энергосистемы, такие как короткое замыкание или резкий наброс асинхронной нагрузки. Появилась возможность проверки и настройки

устройств релейной защиты и автоматики, проверки электромагнитной совместимости вновь устанавливаемого электрооборудования (дополнительная нагрузка, генерирующее оборудование и др.) в существующую энергосистему.

В качестве примера на (рис. 1) приведена модель генератора, мощностью 1.1 МВт, в составе автономной энергосистемы ГКС.

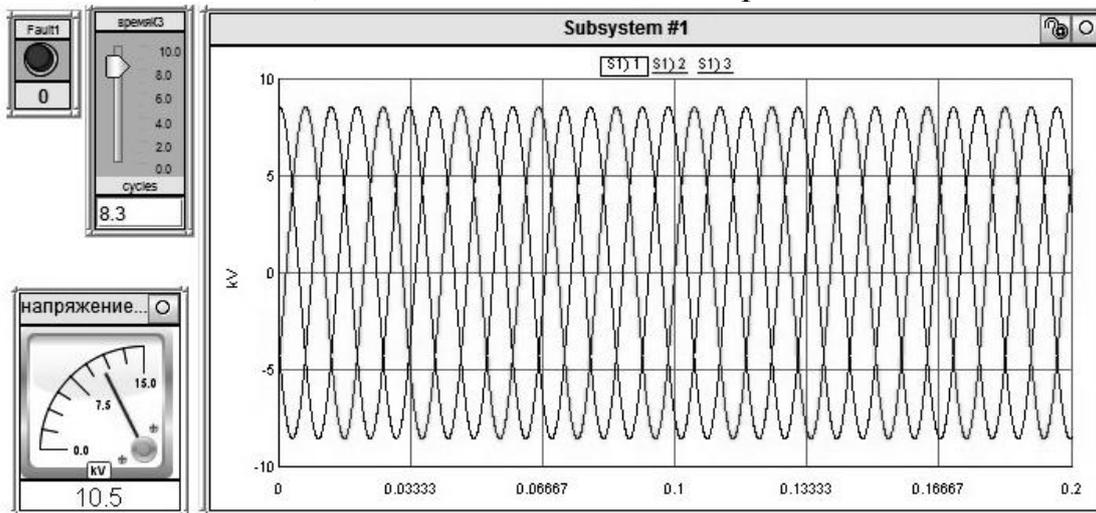


Рис. 2. Напряжение генератора в нормальном режиме.

На (рис. 2) приведены синусоиды напряжения генератора и вольтметр генератора в нормальном режиме работы. Программно-аппаратный комплекс RTDS позволяет получать данные в реальном времени любого переходного процесса в энергосистеме. С помощью множества функций комплекса можно снимать показатели всех необходимых электрических величин, которые влияют на режим работы энергооборудования.

В работе будут рассмотрены следующие вопросы:

1. моделирование различных режимов работы автономной энергосистемы ГКС;
2. возможность повышения устойчивости работы энергосистемы путем изменения настроек автоматического регулирования возбуждения генератора;
3. применимость комплекса RTDS к анализу систем электроснабжения электроприводных компрессорных станций.

Применение программно-аппаратного комплекса RTDS для моделирования режимов работы энергосистем потенциально предоставляет новые возможности по повышению их надежности и устойчивости. Однако в каждом случае необходимо выполнить сложную работу по построению конечной модели конкретной энергосистемы в формате RTDS.

На сегодняшний день ведутся работы по исследованию амплитудно-фазовых частотных характеристик снятых с модели энергосистемы на комплексе RTDS, по критерию Найквиста.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Петроченков А.Б., канд. техн. Наук, Кавалеров Б.В., канд. техн. наук, Математическое моделирование газотурбинных мини-электростанций и мини-энергосистем, журнал электро 6/2010, стр.19-23
2. Программно – аппаратный симулятор реального времени RTDS, учебное пособие, версия RSCAD 4.0, 87 с.

Научный руководитель: Ю.В. Хрущев, д.т.н., профессор каф. ЭСиЭ ЭНИН ТПУ.

АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Д.С. Кунулеков
Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭКМ

Силовые трансформаторы являются в электрических сетях и системах основными элементами, определяющими надежность и экономичность их функционирования. Аварийные отключения или отказы в работе приводят к значительным убыткам.

Стоимость одного силового трансформатора в среднем достигает 250 тыс. - 1,5 млн. долл. США, а с демонтажем поврежденного трансформатора, транспортными расходами, с работами по восстановлению и монтажом нового – достигает 2,5 млн.

На данный момент в Казахстане (как в прочем и в России) отработали свой нормативный срок службы в 25 лет (ГОСТ 11677-85) большая часть силовых трансформаторов. В связи с этим все большее значение приобретает проблема оценки возможности дальнейшей эксплуатации вырабатывающий свой нормативный ресурс оборудования и продления срока службы[1].

Обеспечение надёжной, бесперебойной работы силовых трансформаторов необходимо, в первую очередь, для предотвращения аварийных последствий, таких как, пожары из-за внутренних повреждений трансформатора или выбросы масла[2].

На работу трансформатора влияют как аномальные режимы работы энергосистемы, так и сильные внешние воздействия. Перечислим основные воздействия и их последствия.

Коммутационные и грозовые перенапряжения, приводящие к повреждениям главной и витковой изоляции при недостаточных запасах их электрической прочности.

Повышения рабочего напряжения вызывающие перевозбуждение трансформаторов. Первозбуждение магнитной системы приводит к повышенному нагреву не только сердечника, так и конструктивных стальных деталей, что опасно для изоляции соприкасающаяся с ними.

Токи Короткого Замыкания воздействующие ударными механическими воздействиями на обмотки. Опасное влияние со стороны сети является воздействие на трансформаторы токов коротких замыканий, вызывающих повреждения и деформацию обмоток при их динамической нестойкости.

Перегрузка трансформатора по току. Так же на продолжительность службы силового трансформатора влияет по причине старения режим нагрузки.

В жаркое время года опасное влияние оказывает тепловое воздействие перегрузок, которые становятся причиной выхода из строя герметичных вводов ВН. Наиболее нагретые верхние слои масла нагревают данные вводы в нижней части. В результате таких повреждений образуется желтый налет внутри крышки. [3].

Проанализируем повреждаемость силовых трансформаторов 110 кВ ТЭЦ-3 АО «Павлодарэнерго» и ТЭЦ-1 ОАО «АЛЮМИНИЙ КАЗАХСТАНА», г. Павлодара за 2009-2011 годы. В результате наблюдений за двухлетний период получено сорок пять значений наработок до отказа трансформаторов.

Распределение повреждений в зависимости от места повреждения (узла/системы) трансформатора, приведено в таблице.

Наиболее часто повреждается витковая изоляция – 10 случаев (22%), причиной возникновения неисправности могут быть старение изоляции, постоянные перегрузки, динамические усилия при коротких замыканиях.

Второе место среди причин повреждений занимают вводы – 8 случаев (17%), основные неисправности связаны с увлажнением и загрязнением изоляции негерметичных вводов, что приводит к развитию теплового и электрического пробоя изоляции ввода. Также неисправности связаны с отложением осадка на внутренней поверхности фарфора и на поверхности остова. Они адсорбируют влагу и загрязне-

ния, в том числе металлосодержащие. И приводит к возникновению проводящих дорожек, развитию разрядов и пробоем масляного канала ввода. Также случаи течи масла из вводов через резиновые прокладки. Возможно вызванные дефектами монтажа, ремонта и эксплуатации. Что приводит к снижению давления масла, нарушению герметичности, попаданию влаги и воздуха во ввод.

Табл. 1. Распределение повреждений

| Поврежденный узел | Количество | % |
|--|------------|-------|
| Междуфазная изоляция | 2 | 4,45 |
| Обмотки и изоляция (из-за динамических усилий) | 7 | 15,55 |
| Витковая изоляция | 10 | 22,23 |
| Переключатели ответвлений | 6 | 13,33 |
| Активная сталь | 1 | 2,23 |
| Вводы | 8 | 17,77 |
| Отводы | 1 | 2,23 |
| Токоведущие части | 3 | 6,66 |
| Бак | 3 | 6,66 |
| Радиаторы | 1 | 2,23 |
| Прочие | 3 | 6,66 |
| Итого | 45 | 100 |

Третье место занимают по повреждаемости обмотки – 7 случаев (15%). Наиболее часто обмотки выходят из строя по причине плохих контактных соединений и витковых КЗ.

Следующее место среди причин повреждения занимают недостатки переключающих устройств, которые начинаются с 14 лет эксплуатации. Максимальное количество повреждений переключающих устройств при 15-23 годов эксплуатации трансформаторов. Неисправности связаны с отсутствием контакта и оплавлением контактной поверхности.

Дефекты проходной изоляции, бака, фильтров, радиаторов, неисправности системы охлаждения малочисленны, но не менее опасны.

Не редко, трансформаторы отключаются в результате недостатков релейной защиты. В последнее время наблюдается возрастания таких отказов, что скорее всего связана с нехваткой квалифицированных релейщиков и большой текучкой кадров в группах РЗиА. Хотя такая тенденция характерна для всего обслуживающего персонала ТЭЦ-1 и ТЭЦ-3.

Проанализировав собранные данные определим вероятность безотказной работы трансформаторов 110 кВ ТЭЦ-3 АО «Павлодар-

энерго» и ТЭЦ-1 ОАО «АЛЮМИНИЙ КАЗАХСТАНА», г. Павлодара за двухлетний период. Времени $t_i = 4000, 10000, 18000$ ч, если интенсивность отказов $\lambda = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$. Закон распределения отказов экспоненциальный.

При экспоненциальном законе распределения справедливы соотношения:

$$P(t) = e^{-\lambda t}; f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda}; \lambda = \text{const}$$

Отсюда

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda} = \frac{10^4}{2,4} = 4166 \text{ ч};$$

$$P(4000) = \exp\left[-\frac{4000}{4166}\right] = e^{-0,96} = 0,625$$

$$P(10000) = \exp\left[-\frac{10000}{4166}\right] = e^{-2,4} = 0,427$$

$$P(18000) = \exp\left[-\frac{18000}{4166}\right] = e^{-4,32} = 0,284$$

В результате полученных расчетных данных строим график зависимости вероятности безотказной работы от времени $P(t) = e^{-\lambda t}$ трансформаторов 110 кВ, изображенный на рис. 1.

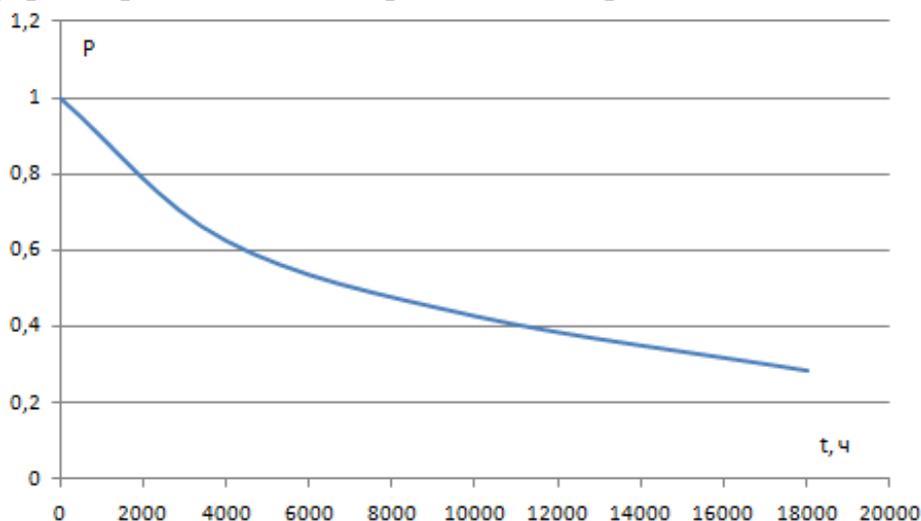


Рис. 1. Вероятность безотказной работы трансформаторов
Заключение

Таким образом, можно сделать вывод о том, что с увеличением времени эксплуатации трансформаторов (находящиеся в работе более 25 лет), вероятность безотказной работы будет снижаться согласно кривой рис.1. Следовательно, требует более тщательного обслуживания, проведения капитальных ремонтов или замены устаревшего оборудования, в случае нерентабельности дальнейшей эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Чупак Т. М. Прогнозирование технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов дис. канд. тех. наук. – Красноярск, 2007. – 196 с.
2. Аль Хамри Саид Сейф Сабир Исследование дефектов в силовых трансформаторах и разработка мероприятий по повышению эффективности их диагностирования: дис. канд. тех. наук. – Ивана, 2005. – 152 с.
3. Ярославкина Е. Е. Информационно-измерительная система стендовых испытаний силовых трансформаторов в режимах холостого хода и короткого замыкания: дис. канд. тех. наук. – Самара, 2010. – 168 с.

Научный руководитель: О.П. Муравлев, д.т.н., профессор каф. ЭКМ ЭНИИ ТПУ.

LIMITATION OF CURRENT SINGLE PHASE GROUND FAULT

R.S. Fediuk

Far Eastern Federal University, Military Training Center

Single-phase ground faults are the prevailing type of damage in the electrical medium voltage of 6-10 kV (75...90% of total electrical defects), which are accompanied by an arc that could cause a fire and destroy the current conductors in a short circuit, which is why single-phase fault may switch to two-or three-phase.

To ensure the greatest possible reliability of the network it is necessary to short-circuit current was so small that for a sufficiently long time (time needed to search for and eliminate damage) could be dispensed without disabling customers.

The RMS value of fault current is declining rapidly to a slight stabilized value, if grounded neutral point of the electric network to ground via throttle reactor, the inductive reactance at the frequency where the voltage source feeding the power grid, equal to the resistance at this frequency, the total capacity of all three phases of the mains relative to the ground.

The objective of this article is to improve a set of indicators of a device to limit the current single-phase ground short-circuit in an electrical network, while providing:

- reducing of weight, power and noise control unit, increasing its performance and efficiency;

- reducing of noise and increase of the quality factor of the power element, compared with that inherent in the power element formed in a reactor with a continuously adjustable air gap.

Electrical block diagram of a device to limit the current 1 single phase ground short-circuit in an electrical network with unearthed neutral 2 is shown in Fig. 1. Block 3 is a three-phase voltage source. Block 9 are capacitors with capacitances simulates capacitive conductivity phase, relative to the ground. Resistor R simulates the resistance of the single-phase ground fault for phase C. The inductive component of the device 1 is unit 4, which includes the unit 6 - electric filter, unit 7 – multiplier, unit 8 - voltage controlled current source, unit 5 - command block.

When the fault occurs on the neutral mains voltage appears which is supplied to the input of the electric filter 6. Schematic diagram of a filter constructed as a low-pass filter is shown in Fig. 2.

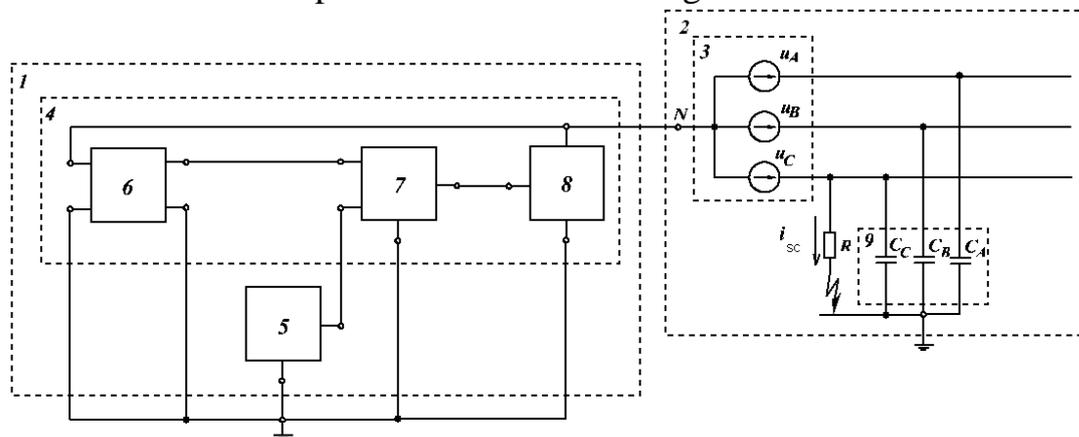


Fig. 1. Schematic block diagram of a device to limit the current single phase short-circuit

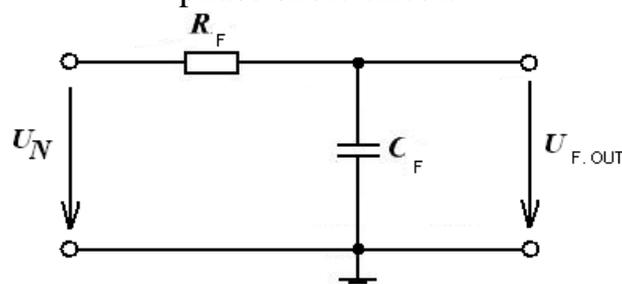


Fig.2. The low pass filter

The transfer function of the filter as shown in Fig. 2, has the form:

$$W_{RC}(S) = \frac{U_{F.OUT}}{U_N(S)} = \frac{1}{1 + \tau \cdot s}, \quad (1)$$

where $\tau = R_F C_F$ - the time constant of the filter. This time constant is many times greater than the reciprocal of the angular frequency ω_1 of source 3. Therefore, when the rotary frequency satisfying the condition $\omega \geq \omega_1$, the amplitude and phase frequency indicators of the filter 6, which is

obtained after substitution $s=j\omega_1$ into the transfer function Eq. 1, have small differences from those indicators an ideal integrator with a transfer function $1/(\tau \cdot s)$.

The output voltage of the filter that represented in complex form:

$$\bar{U}_{F.OUT} = \frac{\bar{U}_N}{1 + j\omega_1\tau} \quad (2)$$

where \bar{U}_N - the voltage on the neutral, ω_1 - circular frequency.

The instantaneous value of the voltage supplied to the second input of the multiplier 7, on the first input terminal which served the required value of the transfer conduction G_{TC} by voltage-controlled current source 8. Thus the output current of the current source is described by:

$$\bar{I}_{TC} = \bar{U}_{F.OUT} \cdot G_{TC} = \frac{\bar{U}_N \cdot G_{TC}}{1 + j\omega_1\tau} \quad (3)$$

From Eq. 3 it is relevant \bar{U}_N to \bar{I}_{TC} that determines impedance equivalent to the inductive component 4:

$$\underline{Z}_{IC} = \frac{1}{G_{TC}} + j \frac{\tau \cdot \omega_1}{G_{TC}} \quad (4)$$

Imaginary component \underline{Z}_{IC} is equivalent to the inductive reactance of the inductive component and is:

$$X_{IC} = \frac{\tau \cdot \omega_1}{G_{TC}} \quad (5)$$

The inductance of the inductive components:

$$L_{IC} = \frac{\tau}{G_{TC}} \quad (6)$$

The real part \underline{Z}_{IC} is equivalent to active resistance and inductive component is:

$$R_{IC} = \frac{1}{G_{TC}} \quad (7)$$

The Q factor of the inductive component:

$$q_{IC} = \frac{X_{IC}}{R_{IC}} = \frac{\omega_1 \cdot L_{IC}}{R_{IC}} = \omega_1 \cdot \tau \quad (8)$$

The Q factor q_{IC} of the inductance component greatly exceeds the arc suppression coil quality factor, since the time constant τ can reach one or more seconds. Consequently, the quality factor of the inductive component in 6 or more times may exceed the quality factor of throttle reactor.

When replacing the inductive component 4 equivalent complex impedance \underline{Z}_{IC} , consisting of resistance R_{IC} and inductance L_{IC} , turns equivalent

lent circuit (Fig. 3) of the system with earthed through an inductive component.

Parallel to the inductive component of switched capacitor with a total capacity of three phases to ground ($3C$). Circuit consisting of two parallel branches included ($3C$ and \underline{Z}_{IC}), can be configured for current resonance. Then the sum of the currents of the branches becomes a minimum. This resonance is achieved at zero reactive of the parallel connection, that is, must fulfill the conditions $X_{IC} = X_{C\Sigma}$. Of it is a equation for the required transfer conduction voltage-controlled current source 8:

$$G_{TC} = \tau \cdot \omega_1^2 \cdot C_\Sigma, \quad (9)$$

where C_Σ - the total capacity of the phase-to-earth.

Before connecting the inductive component 4 to the power supply 2, it is necessary to command block 5 set the value of the transfer of the conductivity G_{TC} , which depends, according to Eq. 9, the total capacity of all phases relative to the ground. The corresponding signal value G_{TC} with the output terminal command block 5 is supplied to the first input terminal of the multiplier 7.

REFERENCES

1. Cai B. Research on parallel operation technology of following-setting compensation mode arc-suppression coils // Applied Mechanics and Materials.- 2014. – 532. – Pp. 595-602.
2. Xu B., Cai X. An improved method for arc suppression coil tuning during single-phase to earth fault // Dianwang Jishu/Power System Technology. – 2014. – 38. – Pp. 107-112.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ» ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ

Р.М. Минибаев

Самарский государственный технический университет

Мировой рынок ветровой энергетики развивается быстрее, чем любой другой вид возобновляемой энергетики. Ветроэнергетические системы (ВЭС) являются наиболее привлекательным решением мировых энергетических проблем. По сравнению с ископаемыми ресурсами ветер – мощный естественный источник энергии, который по-

стоянно доступен практически в любой стране мира и не зависит от колебаний цен на топливо.

«Интеллектуальные» ВЭС позволяют в реальном времени отслеживать и контролировать процесс выработки, передачи и потребления электроэнергии, в автоматическом режиме оперативно реагировать на изменения различных параметров и осуществлять электроснабжение с максимальной надежностью и экономической эффективностью.

В климатических условиях Самарской области наибольшую экономическую целесообразность имеет применение ВЭС в качестве автономного источника электроэнергии в южных и восточных районах области, где среднегодовая скорость ветра составляет 5-7 м/с. Кроме того, эти районы характеризуются низкой плотностью населения на больших, слабо освоенных в промышленном отношении территориях, в результате чего, стоимость доставки энергоресурса в этой местности превышает его себестоимость.

В настоящее время наиболее актуальным направлением развития ветроэнергетики в Самарской области является разработка «интеллектуальных» ВЭС для снабжения электрической и тепловой энергией объектов социальной и образовательной инфраструктуры небольших поселков и деревень. Как показали наши наблюдения, наибольшая эффективность ВЭС наблюдается в зимний период, когда появляется естественная необходимость в значительном количестве тепла, а так же характерно увеличение ветроэнергетического потенциала.

Кроме того, при использовании энергии ветра для теплоснабжения предъявляются невысокие требования к качеству электроэнергии, вырабатываемой ВЭС. Важно лишь, чтобы её количество было достаточно для покрытия тепловой нагрузки. Это приводит к максимальному упрощению конструкции ВЭС (т.к. нет необходимости в использовании аккумуляторных батарей (АБ) и инвертора), снижению общей стоимости и повышению надежности.

В летний период, когда потребности в теплоснабжении значительно снижаются, ВЭС работает как автономный источник электроэнергии для бытовых нужд. Однако здесь возникают проблемы связанные с утилизацией этой энергии из-за несовпадения графиков нагрузки потребителей и ветровых условий. Как правило, утилизация электроэнергии происходит с помощью АБ, но это не решает задачу полностью – зарядный ток аккумулятора ограничен, поэтому мы предлагаем повышать энергоэффективность ВЭС с помощью применения управляющего балласта.

Управление мощностью балласта осуществляется с помощью полупроводниковых регуляторов, построенных по принципу фазового регулирования. Для полного использования энергии ветра мощность балласта P_6 должна быть равной разнице максимальной (для данной скорости ветра) мощности ветрогенератора P_r и мощности нагрузки в любой момент времени: $P_6 = P_r - P_n$. Это условие достигается за счет регулятора мощности балласта, включаемого на выход генератора параллельно цепи полезной нагрузки станции. В качестве балластной нагрузки можно использовать электронагревательные элементы, обеспечивающие потребителя горячей водой.

Кроме того, для повышения энергоэффективности ВЭС необходимо правильно выбрать тип генератора. В современной литературе представлены, как правило, типовые схемы ВЭС большой и средней мощности, где используются генераторы с электромагнитным возбуждением или возбуждением от постоянных магнитов [1].

В нашем случае, мы исследовали энергоэффективность применения ВЭС в небольших населенных пунктах Самарской области, где мощность генератора не превышает 7 кВт, и работа всей установки происходит в условиях случайной скорости ветра и случайного характера изменения сопротивления нагрузки.

Проведенные нами исследования и компьютерное моделирование показало, что наиболее оптимальным для такого случая, является выбор генератора на постоянных магнитах, который прост по конструкции, надежен и не требует дополнительного питания со стороны обмотки возбуждения. Отсутствие трансформатора и редуктора улучшает массогабаритные показатели системы, а применение буферной аккумуляторной батареи достаточной емкости, постоянно подсоединенной к нагрузке, обеспечивает более стабильное напряжение ВЭС в условиях случайных колебаний скорости ветра и мощности нагрузки.

При оценке экономической эффективности и срока окупаемости «интеллектуальной» ВЭС в условиях Самарской области были сделаны следующие выводы:

1. При использовании ВЭС по двум направлениям – для тепло- и электроснабжения, средний срок окупаемости составляет 3 года;
2. Применение ВЭС малой мощности (до 5-7 кВт) экономически эффективно при скоростях ветра 4-7 м/с;
3. В условиях степной и лесостепной зоны удаленных и малонаселенных районов Самарской области ветроэнергетика является оптимальным источником возобновляемой электроэнергии.

Таким образом, перспективы использования в Самарской области энергии ветра как источника снабжения автономного потребителя электрической и тепловой энергией имеют большой потенциал.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лукутин Б.В. Энергоэффективные управляемые генераторы для ветроэлектростанций / Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова, А.И. Муравлев // Известия вузов. Сер. Электромеханика. – 2008. – № 6. – С. 63-66.

Научный руководитель: В.П. Степанов, д.т.н., профессор, Самарский государственный технический университет.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО» ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.А. Овчинников, О.В. Филимонова
Самарский государственный технический университет

Повышение экономической эффективности нефтегазодобывающей отрасли на современном этапе возможно лишь на основе поиска и внедрения «интеллектуальных» технологий добычи углеводородов, направленных на оптимизацию добычи и сокращение потерь путем своевременного выявления проблем и быстрого принятия совместных решений многопрофильных групп на основе данных в режиме реального времени.

Для высокорентабельной разработки месторождений нефти и газа необходимо создание умных нефтегазовых комплексов, характеризующихся высокой степенью автоматизации, безлюдными добычными комплексами, интеллектуальными системами управления технологическими, энергетическими, транспортными, производственными процессами.

Концепция построения иерархической системы управления нефтегазовым комплексом выделяет четыре уровня управления:

1. инструментальный уровень – применение оптоволоконных сенсоров, датчиков для непрерывного сбора данных работы подземного, подводного и поверхностного оборудования, скважин в основных технологических процессах;

2. информационный уровень – анализ большого объема геолого-промысловой информации;
3. операционный уровень – применение систем управления процессами добычи нефти и газа типа SCADA, систем типа MES для умных энергосистем;
4. управленческий уровень – использование интегрированных интеллектуальных информационных систем типа ERP для оперативного и стратегического управления нефтегазовым комплексом в целом.

В настоящее время одной из важнейших проблем является разработка «умных» скважин первого и второго поколения, где применение элементов «умной» энергетики занимает ключевые позиции, так как концепция «интеллектуального» нефтегазового комплекса включает создание роботизированных систем управления траекторией ствола скважины и, соответственно, снижение энергетической составляющей в структуре себестоимости ее разработки.

В данном случае комплексный подход при разработке нефтегазовых месторождений основан на трех составляющих: энергоэффективное оборудование; подбор оборудования по критерию максимального КПД при добыче нефти или газа; обеспечение работы насосной установки с максимальным КПД при эксплуатации средствами интеллектуальной системы управления.

Использование в установках электроцентробежных насосов (УЭЦН) вентильных двигателей позволяет снизить потери электроэнергии на 25%, а посредством применения комплексного подхода можно добиться снижения удельного энергопотребления на 40% и более.

Вентильный двигатель (ВД) является наиболее перспективным и универсальным типом электропривода переменного тока, в котором регулирование скорости и момента вращения осуществляется подводимым напряжением, током возбуждения и углом опережения включения вентилей при самоуправлении по частоте питания. Он обладает регулировочными качествами машин постоянного тока и надежностью систем переменного тока. Особенностью магнитокоммуникационных электрических машин является наличие общей магнитной системы статора, состоящей из двух групп, где при перемещении ротора возникает циркуляция двух переменных во времени магнитных потоков, максимальные значения которых сдвинуты по фазе на период, и, поскольку, каждый из этих периодически переключаемых магнитных потоков пронизывает обмотку якоря, в последней индуцируется переменная во времени ЭДС. Так как максимальный магнитный поток

замыкается через магнитопровод статора, ферромагнитные элементы ротора и немагнитный рабочий зазор, то зависимость Φ_{\max} от тока возбуждения аналогична кривой намагничивания обычных синхронных машин (СМ).

Современные исследования показывают, что ВД с коммутацией магнитного потока за счет наиболее полного использования всего объема машины и устранения при этом из системы пассивных электрических и магнитных контуров, не участвующих в процессе электромеханического преобразования энергии, позволяют обеспечить достижение высоких удельных массогабаритных и энергетических показателей [1].

В вентильных магнитокоммутационных двигателях рационально используются электрические и магнитные материалы, отсутствует перемагничивание и связанные с ним потери в магнитных контурах вследствие однонаправленных магнитных потоков возбуждения. Сокращение длины силовых линий магнитного поля улучшает использование объема электромагнитного ядра и уменьшает массу расходоуемой электротехнической стали, что также ведет к снижению добавочных потерь на вихревые токи и гистерезис и, таким образом, способствует увеличению КПД машины.

В процессе разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений основная проблема при работе стандартных УЭЦН на базе асинхронного двигателя состоит в том, что из 100% энергии, потребляемой из сети, 29% — приходится на потери в насосе, 13% — в двигателе и 10% — в кабеле. Еще 9% энергии теряется в системе управления и трансформаторе. Таким образом, 61% электроэнергии, потребляемой при эксплуатации УЭЦН, тратится вхолостую — на обогрев, вибрацию, износ и т.д. Лишь 39% электроэнергии идет непосредственно на подъем жидкости.

При проектировании рабочего режима скважины нефтяники постоянно сталкиваются с проблемой подбора оптимальной компоновки насоса. В этом случае, как правило, используется следующий алгоритм: вывод УЭЦН на номинальный режим при максимальном КПД; поддержание оптимального давления при подачи жидкости; поддержание максимального дебита в рабочей области насоса; периодическая эксплуатация УЭЦН с максимальным КПД.

Применение вентильных магнитокоммутационных двигателей позволяет роботизированной системе управления поддерживать работу установки в точке оптимального КПД насоса непосредственно при эксплуатации. Этому способствуют такие характеристики ВД как плавный пуск, точная регулировка и полная защита электродвигателя

от перегрузок за счет встроенного блока электронного управления; диапазон регулирования скорости до 90% от максимального режима. Необходимая производительность УЭЦН достигается меньшим числом оборотов, и, соответственно, снижается уровень шума и повышается надежность.

В настоящее время применение вентильных магнитокоммутационных двигателей в составе роботизированных систем управления траекторией ствола месторождения открывает возможность бурить скважины сложной пространственной архитектуры, а также решать задачу обеспечения энергоэффективности забойных модулей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Герман-Галкин С. Г. Анализ и синтез мехатронной системы с магнитокоммутационной машиной в пакетах Matlab Simulink // Силовая электроника. №1, 2009. – С. 82-86.

Научный руководитель: В.Е. Высоцкий, д.т.н., профессор, Самарский государственный технический университет.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕНТИЛЬНЫХ МАГНИТОКОММУТАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА БУРОВЫХ УСТАНОВКАХ

А.А. Гладков, О.В. Филимонова
Самарский государственный технический университет

Одной из важнейших проблем повышения конкурентоспособности отечественной продукции на мировом рынке является снижение энергетической составляющей в структуре ее себестоимости. Тенденция развития современного производства заключается в повышении единичных мощностей машин и оборудования при одновременном уменьшении их энергопотребления и снижении стоимости, для чего, в настоящее время активно развивается производство энергоэффективных регулируемых электроприводов с вентильными преобразователями.

Комплексный подход к энергосбережению при добыче нефти основан на трех составляющих: энергоэффективное оборудование; подбор оборудования по критерию максимального КПД при добыче;

обеспечение работы насосной установки с максимальным КПД при эксплуатации средствами интеллектуальной системы управления.

Использование в УЭЦН энергоэффективных ступеней и вентиляльных двигателей позволяет снизить потери электроэнергии на 25%, а посредством применения комплексного подхода можно добиться снижения удельного энергопотребления на 40% и более.

Вентильный двигатель (ВД) является наиболее перспективным и универсальным типом электропривода переменного тока, в котором регулирование скорости и момента вращения осуществляется подводимым напряжением, током возбуждения и углом опережения включения вентиля при самоуправлении по частоте питания. Он обладает регулировочными качествами машин постоянного тока и надежностью систем переменного тока. Особенностью магнитокоммуникационных электрических машин является наличие общей магнитной системы статора, состоящей из двух групп, где при перемещении ротора возникает циркуляция двух переменных во времени магнитных потоков, максимальные значения которых сдвинуты по фазе на период, и, поскольку каждый из этих периодически переключаемых магнитных потоков пронизывает обмотку якоря, в последней индуцируется переменная во времени ЭДС. Так как максимальный магнитный поток замыкается через магнитопровод статора, ферромагнитные элементы ротора и немагнитный рабочий зазор, то зависимость Φ_{\max} от тока возбуждения аналогична кривой намагничивания обычных синхронных машин (СМ).

Современные исследования показывают, что ВД с коммутацией магнитного потока за счет наиболее полного использования всего объема машины и устранения при этом из системы пассивных электрических и магнитных контуров, не участвующих в процессе электромеханического преобразования энергии, позволяют обеспечить достижение высоких удельных массогабаритных и энергетических показателей [1]. В вентильных магнитокоммутационных двигателях рационально используются электрические и магнитные материалы, отсутствует перемагничивание и связанные с ним потери в магнитных контурах вследствие однонаправленных магнитных потоков возбуждения. Сокращение длины силовых линий магнитного поля улучшает использование объема электромагнитного ядра и уменьшает массу расходуемой электротехнической стали, что также ведет к снижению добавочных потерь на вихревые токи и гистерезис и, таким образом, способствует увеличению КПД машины.

В процессе добычи нефти основная проблема при эксплуатации стандартных УЭЦН на базе асинхронного двигателя состоит в том,

что из 100% энергии, потребляемой из сети, 29% — приходится на потери в насосе, 13% — в двигателе и 10% — в кабеле. Еще 9% энергии теряется в системе управления и трансформаторе. Таким образом, 61% электроэнергии, потребляемой при эксплуатации УЭЦН, тратится впустую — на обогрев, вибрацию, износ и т.д. Лишь 39% электроэнергии идет непосредственно на подъем жидкости. При проектировании рабочего режима скважины нефтяники постоянно сталкиваются с проблемой подбора оптимальной компоновки насоса. В этом случае, как правило, используется следующий алгоритм: вывод УЭЦН на номинальный режим при максимальном КПД; поддержание оптимального давления при подачи жидкости; поддержание максимального дебита в рабочей области насоса; периодическая эксплуатация УЭЦН с максимальным КПД.

Применение вентильных магнитокоммутационных двигателей позволяет системе управления поддерживать работу установки в точке оптимального КПД насоса непосредственно при эксплуатации. Этому способствуют такие характеристики ВД как плавный пуск, точная регулировка и полная защита электродвигателя от перегрузок за счет встроенного блока электронного управления; диапазон регулирования скорости до 90% от максимального режима. Необходимая производительность УЭЦН достигается меньшим числом оборотов, и, соответственно, снижается уровень шума и повышается надежность.

В настоящее время вентильные магнитокоммутационные двигатели находят широкое применение в приборном электроприводе, в промышленной автоматике и робототехнике, в современных транспортных системах, в медицине, в мехатронных судовых и авиационных системах. Такие машины представляют собой дискретные конструкции, которые совместно с системами управления позволяют создавать энергоэффективные мехатронные устройства с информационными и энергетическими возможностями, недоступными для традиционных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Герман-Галкин С. Г. Анализ и синтез мехатронной системы с магнитокоммутационной машиной в пакетах Matlab Simulink // Силовая электроника. №1, 2006. – С. 82-86.

Научный руководитель: В.Е. Высоцкий, д.т.н., профессор, Самарский государственный технический университет.

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРНЫМ КОМПЛЕКСОМ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ МОЩНОСТЬЮ 30 КВТ

А.Е. Яковенко, И.В. Васюков, Р.Р. Мустафаев
Южно-Российский государственный политехнический университет
(НПИ) им. М.И. Платова

Одним из наиболее важных направлений развития электроэнергетики является применение энергосберегающих технологий. Особенно актуальными являются вопросы экономии и качества электроэнергии на автономных электроустановках (ЭУ) ответственных объектов. Вопросы повышения энергоэффективности также актуальны и в автономных ЭУ широкого применения. ЭУ комплектуются синхронными (СГ) или асинхронными генераторами (АГ). На текущий момент в Интернете не удалось найти ни у нас в стране, ни за рубежом предприятий, выпускающих автономные передвижные ЭУ на базе АГ мощностью свыше 15 кВт. Вместе с тем асинхронные генераторные комплексы (АГК), оснащённые регулятором напряжения, составной частью которого является батарея конденсаторов возбуждения, обладают рядом преимуществ по сравнению с установками на базе СГ (см. табл. 1).

Табл. 1.

| № п/п | Наименование показателя | АГК-30 | СГК-30 |
|-------|---|--|---|
| 1 | Конструктивное исполнение | Бесконтактное | Встроенный возбудитель |
| 2 | Степень защиты (серийное исполнение) | IP54 | IP23 |
| 3 | Наработка на отказ, час. | 10 000 | 5 000 |
| 4 | Ресурс до капремонта, час. | 30 000 | 20 000 |
| 5 | Расход топлива в год, кг | 22 950 | 23 464 |
| 6 | КПД (серийное исполнение) | 91,5 | 89,5 |
| 7 | Параллельная работа: - наличие уравнивающих соединений; - обменные колебания мощности, %; - допустимый угол рассогласования, эл. град.; - устройство синхронизации; - защита от короткого замыкания; | Нет 100 70 не требуется не требуется | Есть 150 25 требуется требуется |

Примечание. Расход топлива вычислялся по формуле $(0,35 \cdot 8 \cdot 250 / \eta)$, где 0,35 кг топлива расходуется на выработку 1 кВт электроэнергии при работе 8 ч. в сутки в течение 250 дней; η – КПД генератора.

Дополнительное искажение напряжения синхронных генераторных комплексов (СГК) даёт также параллельное подключение выпрямительной нагрузки. Поэтому разработка автономных подвижных АГК свыше 15 кВт является актуальной задачей. В ЮРГПУ(НПИ) на кафедре «Теоретическая электротехника и электрооборудование» инициативно была выполнена разработка микропроцессорной системы управления АГК мощностью 30 кВт. Устройство АГК-30 представлено на функциональной схеме рис. 1. Регулятор напряжения асинхронного генератора 1, содержит блок микропроцессорной системы управления (МСУ) 2, батарею некоммутируемых конденсаторов 3, подключённых к зажимам АГ, батарею коммутируемых конденсаторов 4, разделённых на N ступеней, блоки тиристорных коммутаторов ТК 5 на базе антипараллельно включённых тиристоров 7 и 8, коммутирующих две фазы при прохождении коммутируемого напряжения через «ноль» и управляемых с помощью драйверов 9 и 10 блоком МСУ, блоки датчиков напряжения ДН 11 и тока 12 нагрузки, блок добавочных резисторов 13, два трёхфазных управляемых контактора 14 и 15, блоки динамического разряда 6 (рис. 1).

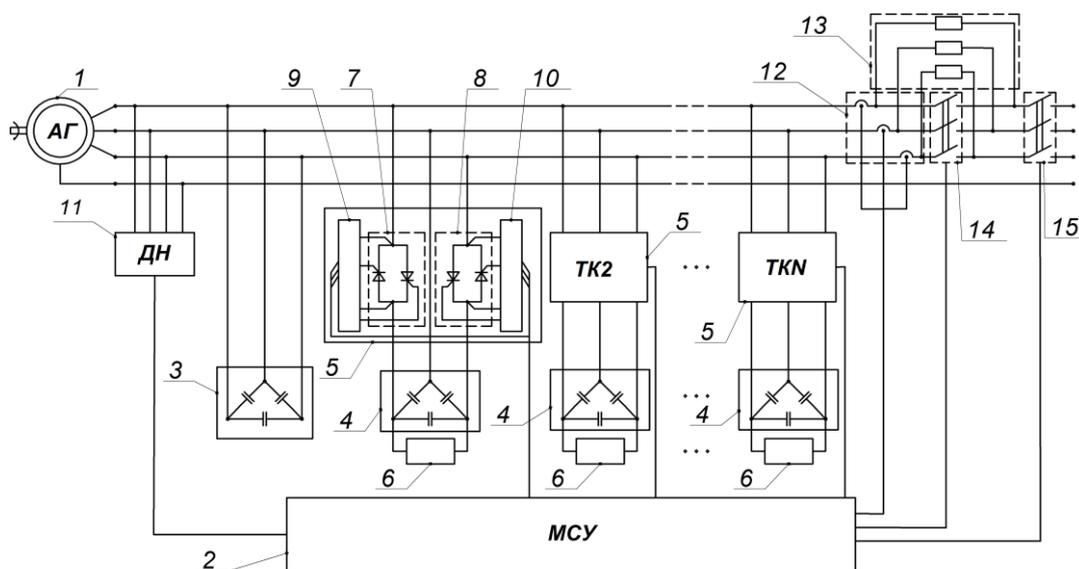


Рис. 1. Функциональная схема макетного образца АГК-30

Разрядный блок подключается параллельно секции коммутируемых конденсаторов 4 к тем линейным зажимам, к которым также подключены электронные коммутаторы 7 и 8 (рис.1), и обеспечивает после отключения коммутируемых конденсаторов их частичный раз-

ряд и гарантированное последующее включение при регулировании и стабилизации напряжения. В устройстве реализована система регулирования и стабилизации напряжения АГ при изменении нагрузки путём дискретного изменения ёмкости конденсаторов возбуждения. Максимальная ёмкость C_{\max} батареи конденсаторов возбуждения на фазу (сумма фазной ёмкости некоммутируемой батареи холостого хода и полной фазной ёмкости всех ступеней коммутируемых конденсаторов) выбирается из условия обеспечения требуемой перегрузки при минимальном заданном коэффициенте мощности активно-индуктивной нагрузки. Минимальная ёмкость C_{\min} ступени коммутируемых конденсаторов определяется требованиями точности поддержания стабилизированного напряжения в установившемся режиме при постоянной нагрузке. Количество ступеней определяется из соотношения $2^N \cdot C_{\min} \geq C_{\Sigma}$, где C_{Σ} – суммарная фазная ёмкость всех коммутируемых конденсаторов [1]. При пуске асинхронного двигателя (АД) соизмеримой мощности или коротком замыкании (КЗ) в нагрузке для ограничения тока последовательно с нагрузкой включаются резисторы R . Для автоматического выбора в процессе работы величины ёмкости коммутируемой ступени конденсаторов в зависимости от нагрузки применена МСУ. Тиристоры управляются драйверами со встроенным детектором нуля.

Плата управления МСУ имеет девять аналоговых токовых входов для обработки сигналов с датчиков напряжения и тока. Дискретные линии платы управления подключаются к плате ввода-вывода для их согласованной работы. Также на плате есть два развязанных входа для подключения датчиков температуры обмоток генератора. Для связи с верхним уровнем управления предусмотрено два гальванически развязанных интерфейса: *CAN* и *RS-485*. В качестве управляющего микроконтроллера выбран *TMS320F28069*, работающий на частоте 90 МГц и имеющий в своём составе сопроцессор, работающий на той же частоте. Это микроконтроллер фирмы Texas Instruments серии управления электроприводами и силовой преобразовательной техникой. Для повышения помехозащищённости, все линии управления имеют оптронную гальваническую развязку.

Была разработана и изготовлена МСУ для макетного образца АГК-30 (рис. 2) и проведены испытания на активную нагрузку мощностью 33 кВт и активно-индуктивную мощностью 30 кВт с коэффициентом мощности 0,8. Результаты испытаний показали, что разработанная МСУ для АГК-30 обеспечивает качество напряжения в соответствии с ГОСТ Р 53936-2010 для класса *G3* и гарантированный пуск ненагруженного асинхронного двигателя соизмеримой мощности

(рис. 3). Время восстановления напряжения при пуске АД 1,2 с. По результатам работы подана заявка на патент РФ (дата 24.07.2015, регистрационный номер 2015130937). Планируется провести работы по адаптации АГК-30 для ЭУ широкого применения.

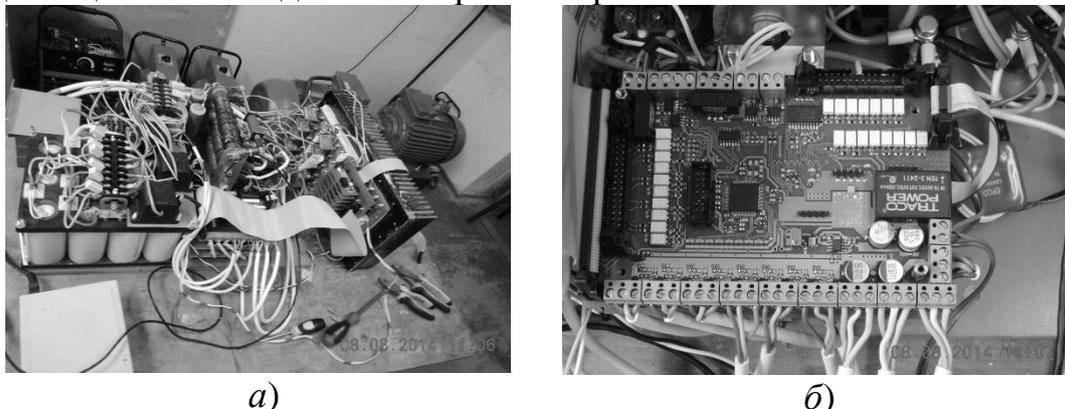


Рис. 2. Макетный образец АГК-30: *а* – регулятор напряжения без корпуса на переднем плане, спарка асинхронных машин и активная нагрузка – тепловые вентиляторы на заднем плане; *б* – плата МСУ

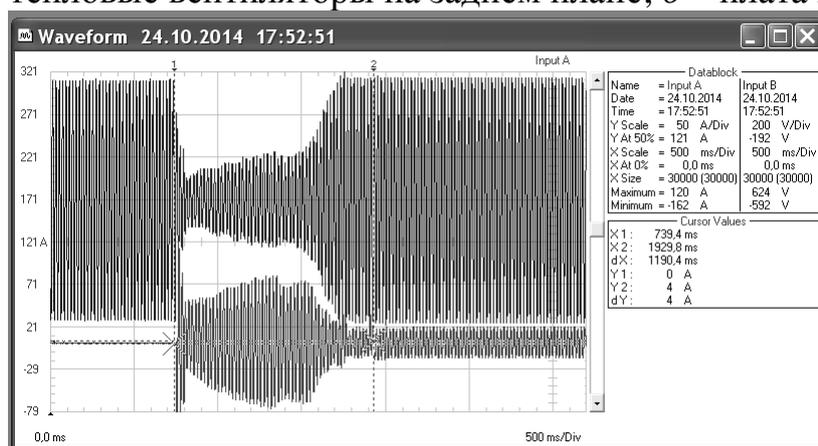


Рис. 3. Прямой пуск ненагруженного АД мощностью 15 кВт.

Осциллограммы линейных напряжения (верхняя) и тока (нижняя)

Авторы выражают благодарность компании ООО «Ново-Траст» (г. Новочеркасск), оплатившей расходы на изготовление МСУ макетного образца АГК-30 и испытательного стенда.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Вишневский Л.В., Пасс А.Е. Системы управления асинхронными генераторными комплексами. – К: Одесса: из-во «Лыбидь» при Киев. ун-те, 1990. – 168 с.

Научный руководитель: Г.К. Птах, д.т.н., проф. каф. ТЭ и ЭО ЮРГПУ (НПИ).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ С ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ

М.И. Мель

Сибирский федеральный университет

В Красноярском крае 48,8 тыс. человек проживают в районах с отсутствием центрального электроснабжения. В настоящее время обеспечение данных районов электроэнергией осуществляется с помощью дизельных электростанций (ДЭС). Электроэнергия, выработанная ДЭС, стоит существенно дороже, чем электроэнергия в районах с центральным электроснабжением.

Одним из направлений снижения затрат на использование ДЭС является использование альтернативных источников энергии: ветряных, солнечных и малых гидроэлектростанций.

Разрабатывать, проектировать и моделировать электроснабжение децентрализованных районов без знания режимов электропотребления невозможно. Соизмеримость мощностей генерирующего оборудования и электрической нагрузки требуют тщательного согласования режимов производства и потребления электроэнергии. Достоверный прогноз режимов, как в целом, так и по сезонам года, определение летнего и зимнего максимумов нагрузки, а также формы суточного графика электрических нагрузок является необходимым условием проектирования и модернизации систем автономного электроснабжения.

Основная сложность прогнозирования режимов потребления электроэнергии заключается в том, что исходной информации о населенных пунктах с автономным электроснабжением крайне мало и чаще всего она ограничивается лишь численностью населения, количеством и типом социальных и производственных объектов. Предлагаемый метод позволяет смоделировать графики режимов электропотребления при наличии лишь этих данных.

Население, количество и тип социальных объектов были определены по данным сайта wikimapia.org[1]. Бытовая нагрузка определяется количеством частных домов. Количество частных домов определено исходя из численности населения из расчета три человека на дом.

Типовые графики электропотребления представлены в относительных единицах и позволяют по известному значению максимальной мощности получить суточный график расчетной нагрузки для

любого дня года [2]. В [3] приведены показатели максимальной мощности и коэффициенты сезонности для основных объектов электропотребления характерных для сельских поселений.

Режим электропотребления носит стохастический характер, этот эффект моделируется с помощью коэффициента вариации. Коэффициент вариации показывает в процентах максимально возможное отклонение фактического электропотребления от типового. Типовые графики и коэффициенты вариации представлены в [3]. Расчет потребляемой активной мощности производится по формуле:

$$P_i = P_{it} P_M (1 \pm C \cdot \delta) \cdot K_C \quad (1)$$

где P_i – расчетная потребляемая мощность на i -ом часу суточного графика, кВт; P_{it} – мощность, потребляемая на i -ом часу согласно типовому графику, о.е.; C – коэффициент вариации, о.е.; δ – случайная величина от 0 до 1; K_C – коэффициент сезонности, о.е.

На первом этапе в MS Excel произведем расчет типовых графиков нагрузки для каждого социального и бытового объекта электропотребления, с учетом коэффициентов сезонности и без учета коэффициента вариации и путем суммирования получим сезонные графики нагрузки села Фарково. На рис. 1 представлены суточные графики нагрузки для разных времен года.

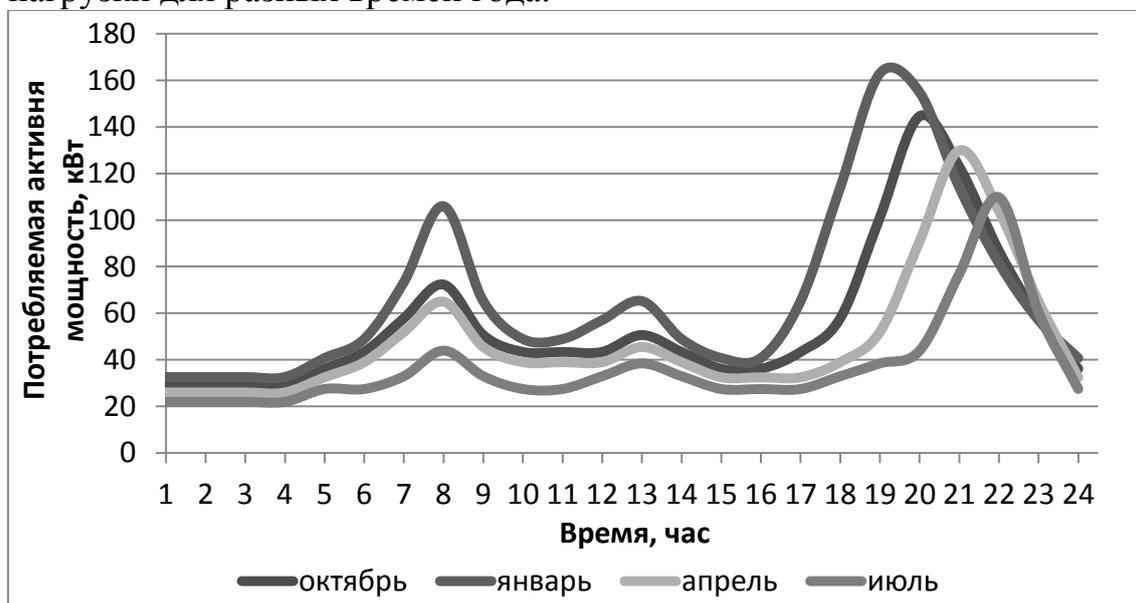


Рис. 9. Сезонные графики нагрузки с. Фарково

Для учета коэффициента вариации, в среде MatLAB Simulink была разработана модель нагрузки, представленная на рис.

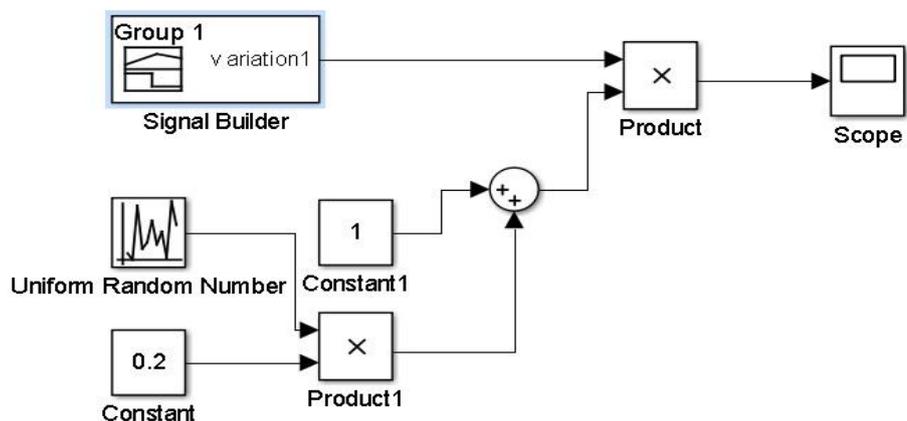
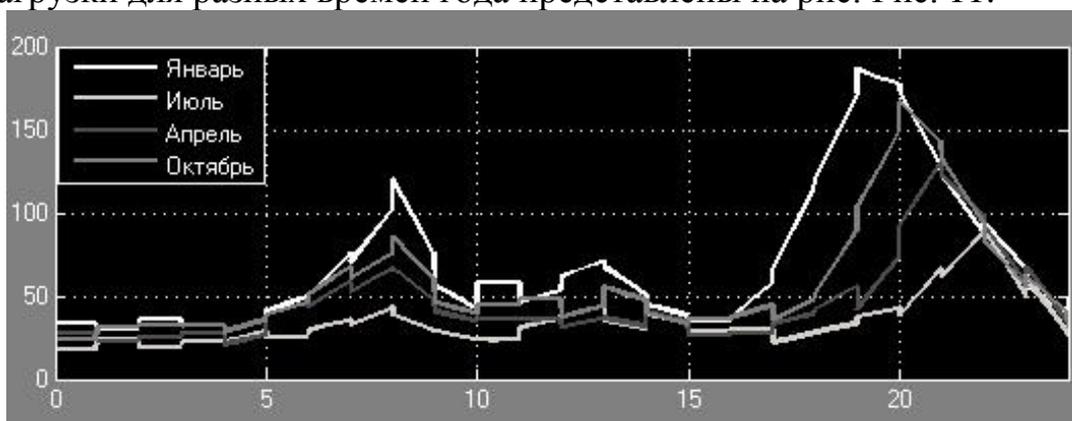


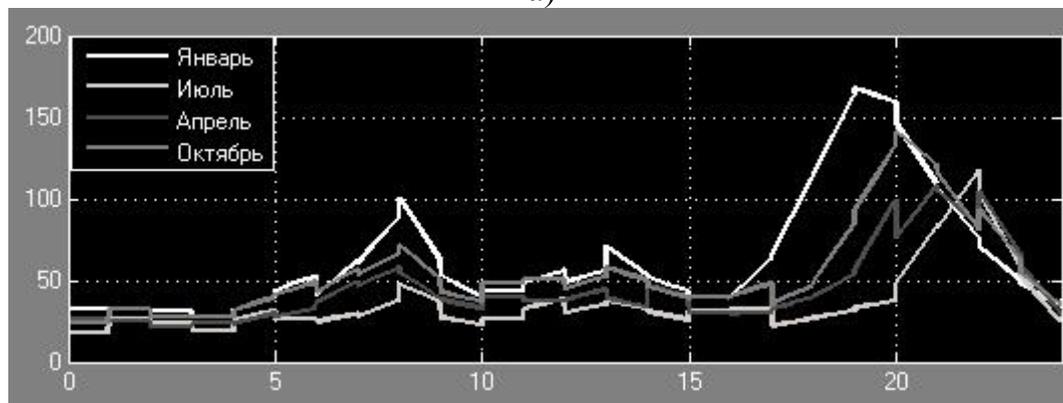
Рис. 10. Модель расчета графиков нагрузки в MatLAB Simulink

При помощи блока Signal Builder осуществляется импорт рассчитанных файлов из среды Excel. Uniform Random Number генерирует случайные числа от -1 до 1. Блок Constant определяет значение коэффициента вариации, в данном примере принято значение 20%. Далее расположены блоки математических операций и блок вывода результатов на экран. Модель соответствует формуле (1).

Результаты генерации двух случайных суточных графиков нагрузки для разных времен года представлены на рис. Рис. 11.



а)



б)

Рис. 11. Графики нагрузки с. Фарково

По результатам моделирования было рассчитано годовое потребление электроэнергии с. Фарково, оно составило 451,98 тыс. кВт*ч. По данным предоставленным администрацией Красноярского края электропотребление с. Фарково за 2013 г. составило 428,3 тыс. кВт*ч. Следовательно, отклонение смоделированных показателей электропотребления от официальных данных составляет 5,53 %, что говорит о высокой точности предполагаемой модели.

Таким образом, изложенный метод моделирования электропотребления населенных пунктов в районах с децентрализованным электроснабжением позволяет более эффективно проектировать возобновляемые источники энергии для данных населенных пунктов и системы управления ими.

ЛИТЕРАТУРА:

1. wikimaria.org – географическая онлайн энциклопедия. [электронный ресурс].
2. Обухов С.Г., Плотников И.А., Маров Д.Ю. Физическая модель электрических нагрузок автономных энергосистем // Промышленные АСУ и контроллеры.- 2011.- N 11.- С. 37-40.
3. РД 34.20.178 Методические указания по расчету электрических нагрузок в сетях 0,38-110 кВ сельскохозяйственного назначения. М.: Институт «Сельэнергопроект», 1981 г.

Научный руководитель: В.И. Пантелеев, д.т.н., заведующий кафедрой ЭТКиС ПИ СФУ.

КОНТРОЛЬНО-ФИДЕРНЫЕ ЯЧЕЙКИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ С УДАЛЕННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

А.С. Горбунов
Сибирский федеральный университет

Наиболее совершенным и экологически безвредным видом городского пассажирского транспорта является электротранспорт. Городской электрический транспорт (ГЭТ) является важной частью городского электрического хозяйства. Качественная, надежная, эффективная и бесперебойная работа ГЭТ определяется не только минимальными затратами по времени и удобством для населения при передвижении по городу, а также системой электроснабжения (СЭС), одним из основных элементов которой являются тяговые подстанции

(ТП). ТП городского электротранспорта служат для преобразования трехфазного переменного тока $6\div 10$ кВ в постоянный ток.

Современная ТП- сложное электротехническое сооружение, оснащенное силовым, преобразовательным, коммутационным и релейным оборудованием, большая часть которого работает в режиме автотелеуправления и постоянно совершенствуется. Значительную долю затрат на эксплуатацию ГЭТ составляют затраты на их содержание. Основная статья затрат - это оплата труда дежурного персонала ТП. При автоматизации объекта, ранее обслуживаемого персоналом, обычно на первом этапе автоматика копирует действие персонала, однако при автоматическом управлении всегда удается улучшить технологию работы объекта. Это обусловлено рядом причин. Автоматическое управление, автоматический контроль и регулирование работают непрерывно, в отличие от ручного обслуживания. Кроме того, автоматика практически лишена таких недостатков, свойственным людям, как забывчивость, рассеянность, небрежность, усталость и пр. Дистанционное же управление ТП позволяет работать без персонала, но с непрерывным контролем над работой из диспетчерского пункта, что в свою очередь уменьшает риск отказа оборудования или неправильной работы его частей. Такой вид управления относят к автотелеуправляемым подстанциям.

Перечислим основные технико-экономические показатели автотелеуправляемых подстанций:

1. удельный объем здания автотелеуправляемых тяговых подстанций может быть уменьшен до $0,5-0,2$ м³/кВт вместо 1 м³/кВт;
2. территория на современных тяговых подстанциях может отсутствовать, т.е. такие подстанции могут быть построены в виде отдельно стоящих зданий без ограждения их забором. При этом удельная площадь территории может быть снижена с $0,5$ до $0,1$ м²/кВт;
3. стоимость проекта и сроки его выпуска для одно-двух-агрегатных автотелеуправляемых тяговых подстанций могут быть значительно снижены;
4. удельная стоимость монтажа и строительства, а также сроки ввода в эксплуатацию автотелеуправляемых подстанций сокращаются. Это происходит за счет большой простоты здания и возможности применения агрегатного монтажа и блочного строительства;
5. протяженность трасс кабелей постоянного тока резко снижается, но зато протяженность кабелей переменного тока возрастает. [4]

Целью данного проекта является разработка методов, алгоритмов, аппаратной части программы системы удаленного управления фидерных ячеек тяговой подстанции с помощью микроконтроллеров (СIP-51) телеуправления ТП, а также исполнительного устройства актуатор. Схема телеуправления ТП (ТУТП) представлена ниже.

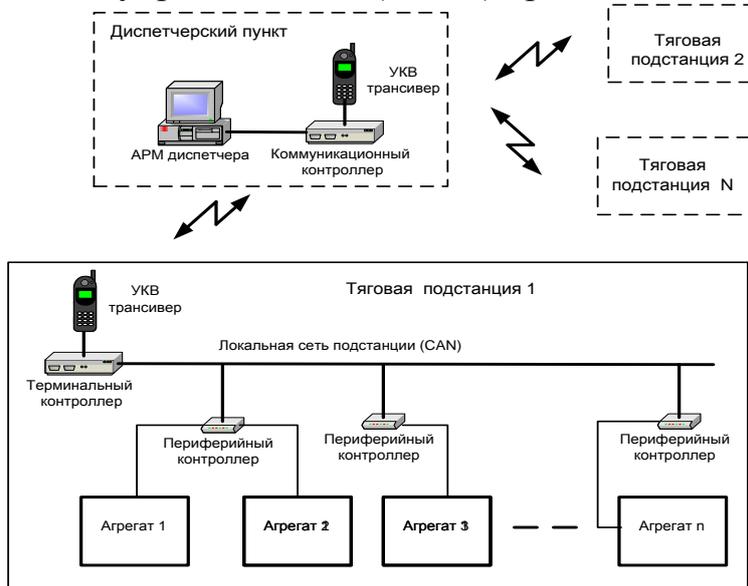


Рис. 1. Структурная схема системы ТУТП.

Электрифицированная железная дорога является потребителем 1-й категории, нарушение электроснабжения которого может принести значительный ущерб. Поэтому схемы питания тяговых подстанций от энергосистем должны обеспечивать высокую надежность и бесперебойность электроснабжения.

Микроконтроллер — это микросхема, предназначенная для управления электронными устройствами. Типичный микроконтроллер сочетает на одном кристалле функции процессора и периферийных устройств, содержит ОЗУ и ПЗУ. [3]

В данном проекте будет использоваться микроконтроллеров (СIP-51). СIP-51 использует конвейерную архитектуру, что существенно повышает скорость выполнения команд по сравнению со стандартной 8051 архитектуры. В стандартном 8051, все инструкции для MUL и DIV, за исключением 12 или 24 тактовых циклов для выполнения с максимальными системными часами 12-к-24 МГц. В отличие от основной СIP-51 исполняют 70% своих команд за один или два системных тактовых циклов, и только четыре команды требуют более четырех системных тактовых циклов и имеет максимальная тактовая частота 100 МГц. СIP-51 имеет в общей сложности 109 команд. [3]

Микроконтроллер позволит обеспечить автоматическое отключение по аварийным сигналам, защиту от отжига контактного про-

да, автоматическое повторное включение, анализ исправности коммутационных аппаратов, управление звуковой сигнализацией подстанции, подачу сигналов на АРМ диспетчера и на актуатор.

Исполнительное устройство актуатор — это устройство системы автоматического управления или регулирования, воздействующее на процесс в соответствии с получаемой командной информацией. [2]

Актуатор позволяет осуществлять линейное перемещение (линейный актуатор, линейный привод) или вращение (актуатор вращения, привод вращения) исполнительного устройства – штока, каретки, поворотного стола. При этом в конструкции актуатора может быть предусмотрено преобразование одного типа движения в другое. Например вращения электродвигателя в поступательное при помощи червячного редуктора и передачи гайка-винт, так и работа без преобразования типов движения – в соленоидах, линейных двигателях. В технике исполнительные устройства представляют собой преобразователи, превращающие входной сигнал (электрический, оптический, механический, пневматический и др.) в выходной сигнал (обычно в движение), воздействующий на объект управления.

В данном проекте реализация актуатора будет осуществляться следующим образом. Микроконтроллер будет получать информацию о состоянии фидерной ячейки к которой он будет подключен, соответственно если возникнет какое-либо короткое замыкание микроконтроллер подает команду актуатору на отключение коммутационного аппарата. После того как диспетчер пришел сигнал на АРМ об отключении фидера, он сможет так же подать сигнал на микроконтроллер, который в свою очередь подает команду актуатору на включение коммутационного аппарата.

Таким образом применение микроконтроллера совместно с актуатором позволяет:

1. Оперативно устранять неполадки на фидере;
2. Снизить бесперебойность работы ГЭТ;
3. Обеспечить постоянный контроль за состоянием фидера.

Внедрение системы удаленного управления позволит автоматизировать процесс управления ТП, снизить затраты, повысить качество перевозки пассажиров.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Марикин А.Н., Мизинцев А.В. Новые технологии в сооружении и реконструкции тяговых подстанций. - М.: 2008.- 220 с.

2. Солодовников В.В. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования (в четырёх томах). - М.: 1967.- 492 с.
3. Бродин В.Б., Калинин А. В. Системы на микроконтроллерах и БИС программируемой логики.- М.: ЭКОМ, 2002. – 399 с.
4. Загайнов Н.А. Тяговые подстанции трамвая и троллейбуса. Автоматика и телеуправление. – М.:1988. - 327 с.

Научный руководитель: Е.Б. Измайлов, к.т.н., доцент кафедры ЭТКиС ПИ СФУ.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МОРСКОГО АВТОНОМНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО БУЯ

Д.В. Воротынцев, Н.Д. Карпов, Я.Л. Муравицкий
Московский энергетический университет

Одним из методов изучения поверхностных течений является метод поплавков. Он реализует подход, предложенный Лагранжем в рамках классической гидромеханики, и предполагает наблюдение за движением каждой отдельной частицы. Местоположение частицы фиксируется через определенные промежутки времени, что позволяет восстанавливать траекторию и скорость ее движения и далее составлять схемы циркуляции поверхностных вод. На практике в качестве наблюдаемой частицы используется дрейфующий буй - дрифтер [1].

На рисунке 1 изображена конструкция дрейфующего буя. Разработанный буй представляет собой конструкцию, состоящую из поплавка с закрепленным на нем ГНСС- приемником и GSM- модулем передачи данных, подводного паруса и груза [1].

Проблема такого дрифтера заключается в малом времени автономной работы из-за недостаточной емкости питающих аккумуляторов, причем подключение к электрической сети невозможно, а установка крупных аккумуляторов нецелесообразна по ряду причин (утяжеление конструкции, цена батарей, габариты и т.п.). В таблице 1 приведены основные характеристики аккумуляторной батареи, используемой в дрифтере.

Табл. 1. Основные характеристики аккумуляторной батареи

| Параметр | Значение |
|-------------------------------------|--|
| Тип аккумулятора | Li-Ion 3.7V 3200 мА·ч |
| Номинальное напряжение аккумулятора | 3,7 В |
| Потребление энергии | Максимальное (режим трекера) < 300мА·ч |

При анализе возможных методов решения проблемы были определены несколько направлений получения электроэнергии для подзарядки аккумулятора:

1. Электромеханический генератор;
2. Солнечный фотоэлектрический преобразователь.

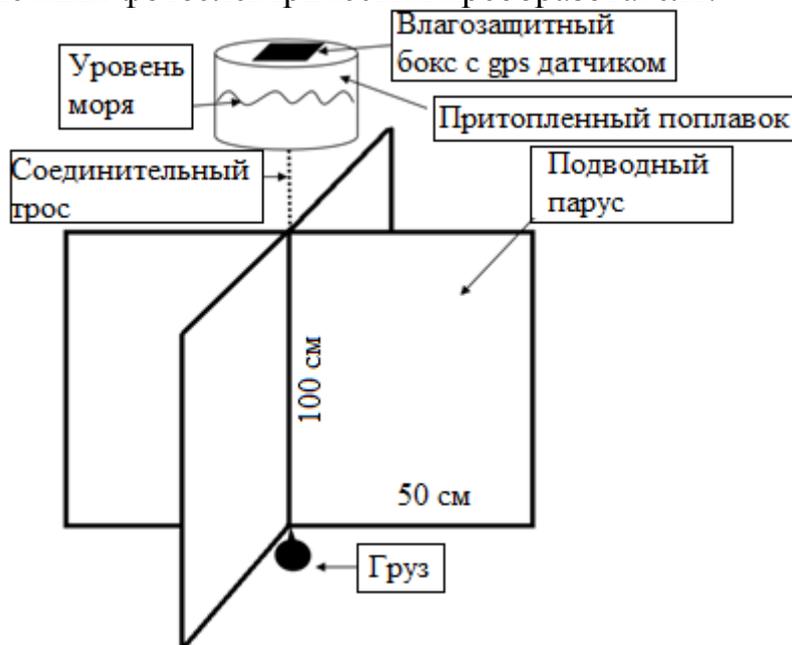


Рис.1. Конструкция дрейфующего буя

Электромеханический генератор

Предлагаемый принцип функционирования электромеханического преобразователя энергии волн в электрическую заключается в следующем. Волнение поверхности воды создает колебательные движения, в результате чего дрейфтер и система линейных генераторов, размещённых внутри его корпуса, меняет свое положение. Постоянные магниты, произвольно перемещаясь под действием силы тяжести внутри обмотки генератора, создают индукционный ток. Из-за стохастичности направлений колебания дрейфтера предлагается монтаж нескольких линейных генераторов, расположенных в разных плоскостях, для обеспечения постоянного питания.

Для энергетических испытаний был изготовлен опытный образец линейного генератора. В качестве корпуса использовалась полипропиленовая сантехническая труба диаметром 20 мм, внутренним диаметром 12,5 мм, общая длина – 200 мм. В качестве ротора генератора использовались 5 постоянных магнитов цилиндрической формы 12x20 мм. На поверхности корпуса равномерно установлено 4 обмотки статора из провода диаметром 0.6 мм, каждая на 100 витков. Контакты обмоток выведены для возможного различного соединения. В ходе экспериментов исследована эффективность линейного генерато-

ра при параллельном и последовательном соединении обмоток, в результате чего удалось достичь напряжения холостого хода в 0.2 В, тока короткого замыкания - 10 мА.

С учетом требуемых значений тока и напряжения, обеспечивающих заряд аккумулятора дрейфтера, данная конструкция признана не способной обеспечить питанием датчик даже при достаточно большом числе генераторов ввиду ограниченных размеров самого буя. Однако, исследование применимости подобной конструкции электромеханического генератора авторами будут продолжены. Среди возможных причин малой эффективности генератора можно предположить: недостаточное число витков и толщина провода обмотки статора, большая толщина стенок корпуса.

Солнечный фотоэлектрический преобразователь

На рисунке 2 представлена вольт - амперная характеристика (ВАХ) данного солнечного элемента. На основании расчета было получено, что для обеспечения требуемого времени работы необходимо 36 солнечных элементов. Площадь солнечного элемента составляет 3503 мм².

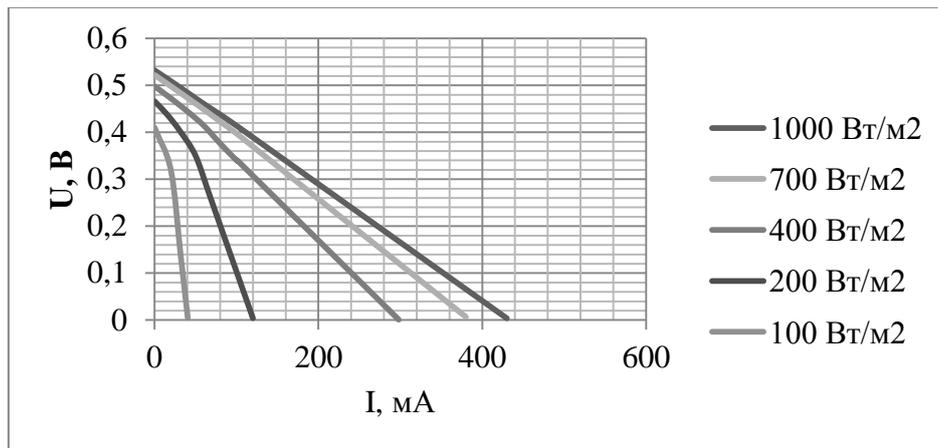


Рис. 2. ВАХ солнечного элемента.

Для определения выработанной электроэнергии солнечным модулем, необходимой для подзарядки аккумуляторной батареи, были использованы данные [3] для:

- Евпатория (Республика Крым. 45° с. ш., 33° в. д.);
- Сочи (Краснодарский Край. 43° с. ш., 39° в. д.).

Текущее значение запасенной в аккумуляторной батарее электроэнергии можно представить как:

$$\mathcal{E}_{\text{АБ}} = \mathcal{E}_0 + \Delta\mathcal{E}_i, \quad (1)$$

где \mathcal{E}_0 - начальное состояние аккумуляторной батареи; $\Delta\mathcal{E}_i$ - изменение содержания энергии в аккумуляторной батарее за интервал времени i .

В свою очередь, изменение энергии, запасенной в аккумуляторной батарее, за интервал времени i можно представить как:

$$\Delta \mathcal{E}_i = \mathcal{E}_{\Sigma i} \cdot N_{\text{ЭЛ}} \cdot \eta \cdot S - \mathcal{E}_i, \quad (2)$$

где $\mathcal{E}_{\Sigma i}$ - среднемесячные часовые суммы суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность при средних условиях облачности, за i -ый промежуток времени, Вт·ч/м² [3]; $N_{\text{ЭЛ}}$ - количество солнечных элементов, шт; η - КПД солнечного элемента, о.е.; S - площадь солнечного элемента, м²; \mathcal{E}_i - потребляемая дрейфтером энергия за i -ый промежуток времени, Вт·ч.

При средних значениях $\mathcal{E}_{\Sigma} = 0,27$ кВт·ч/м², полученных для июня - августа [3], время автономной работы дрейфтера составляет 2 - 3 месяца при числе солнечных элементов $N_{\text{ЭЛ}} = 36$ и схеме их соединения в 3 параллельные цепочки по 12 солнечных элементов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Мысленков С.А., Самсонов Т.Е. Исследование течений на шельфе Черного моря с помощью ГНСС - мониторинга // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2014. - № 3. - С. 62-70.
2. Хитерер М.Я., Овчинников И.Е. Синхронные электрические машины возвратно - поступательного движения, СПб.: Корона принт, 2004.- 368 с.
3. Научно-прикладной справочник по климату СССР. С.-Пб: Гидрометеиздат, 1992.

Научный руководитель: А.Г. Васьков, к.т.н., ст. преподаватель МЭИ.

ВОЗМОЖНЫЕ ТОЛКОВАНИЯ ПРОЦЕССА САМОВОЗБУЖДЕНИЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Д.А. Падалко
Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭКМ

Выполнен обзор по теме “Физика процесса самовозбуждения асинхронного генератора (АГ)”. Проанализированы области применения АГ в промышленности и на автономных объектах. Произведена

оценка основных трактовок причин самовозбуждения. Отмечены возможные преимущества предложенного направления развития асинхронных генераторов с самовозбуждением от полупроводниковых преобразователей.

Ключевые слова: асинхронный генератора, полупроводниковый преобразователь, емкостное возбуждение, трактовки самовозбуждения.

Одним из важнейших вопросов современной энергетики является создание высоконадежных и высокоэффективных систем генерирования электроэнергии. Особенно значимо это направление для автономных объектов, в авиационной промышленности, морских и речных судах, в автомобильных комплексах и т.д. Источники электроэнергии, предназначенные для автономных систем, кроме того должны удовлетворять таким требованиям, как простота конструкции, удобство обслуживания, компактность и высокие энергетические показатели (кВА/кг). Асинхронные генераторы соответствуют этим требованиям. Работы по исследованию генераторных комплексов на основе асинхронных машин ведутся как в России, так и за рубежом. Например, в Германии компанией Siemens, AEG, AKW[1], в Норвегии – ABB KraftAs и Corporate Research, в Швейцарии – Liaisons Electroniques Mecaniques[2]. Большой вклад в развитие теории АГ внесли советские ученые Анисимова Н.Д., Балагуров В.А., Нетушил А.В., Новиков А.В., Джиндзубаев А.Р., Зубков С.К., Торопцев Н.Д., Лесник В.А., Кунцевич П.А., Паутов Д.Н., Попов А.Ю., Хватов С.В., Титов В.Г., Костырев М.Л. и другие деятелей науки.

Асинхронные генераторы с емкостным самовозбуждением находят достаточно разнообразное применение в различных областях хозяйства, известно использование электрической асинхронной машины в качестве автономного источника тока[3]. Широкое распространение АГ так же получил в системах электроснабжения сельского хозяйства, одной из причин выбора именно данного типа генератора служила высокая надежность и простота обслуживания [4], также используется в установках электросварки, системах автоматики и телеуправления. Применение АГ в автономных объектах долгое время сдерживалось, в первую очередь, по причине отсутствия малогабаритных силовых конденсаторов, способных компенсировать реактивную мощность нагрузки и обеспечить возбуждение генератора. Вторым сдерживающим фактором является задача стабилизации параметров генерируемой электроэнергии, обеспечение постоянной амплитуды и частоты при переменной скорости вращения ротора. Использование АГ в автономных системах было рассмотрено в ряде ра-

бот. Так в своей работе Здзислав Гентковски рассмотрел модель с полупроводниковым преобразователем частоты, в том числе и с разработанным транзисторным (IGBT) источником реактивной энергии. В работе был исследован АГ емкостного возбуждения с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками для автономных систем электроснабжения.

Возможные трактовки причин самовозбуждения асинхронного генератора

Как отмечалось, исследованию асинхронных генераторов посвящено большое количество работ, как в отечественной, так и в зарубежной литературе. В этих работах рассматриваются различные режимы работы генератора и решаются разнообразные задачи, выдвигаемые необходимостью практического применения. Наибольшее внимание по исследованию АГ уделяется явлению асинхронного самовозбуждения и раскрытию природы физического процесса самовозбуждения.

Одна из трактовок самовозбуждения АГ основывалась на явлении остаточного намагничивания [4], сопоставляя процесс возбуждения АГ с процессом в генераторе постоянного тока параллельного возбуждения. Остаточный магнитный поток ротора при этом является первоначальным импульсом для начала процесса самовозбуждения. В таком случае ЭДС статора наводится вращением ротора внешним моментом и согласно емкостной составляющей, создаваемый поток статора будет сонаправлен остаточному магнитному потоку, что дает увеличение суммарного потока, создающего в свою очередь большую ЭДС, таким образом происходит лавинообразный процесс увеличения значений тока и напряжения, до точки пересечения вольтамперной характеристики с характеристикой холостого хода.

Однако, при такой трактовке остаточный поток ротора создаст синхронное вращающееся магнитное поле статора, что противоречит теории энергетического преобразования в асинхронной машине, согласно которой скорость поля должна быть отлична от скорости ротора. Одним из литературных источников показывающих, что самовозбуждение АГ возможно без начального магнитного потока является статья [7], в которой приведены результаты опытов по возбуждению асинхронного генератора с немагнитным ротором, кроме того для окончательного подтверждения своих результатов, автор описывает процесс самовозбуждения АГ с ротором, выполненным из немагнитного материала.

Следующая трактовка пыталась объяснить самовозбуждение путем резонанса, в индуктивно-емкостном контуре линейной цепи, одна-

ко для возникновения резонанса необходимо наличие в статоре независимой возбуждающей ЭДС с частой равной частоте резонанса в L – C цепи. Но даже при отсутствии вынуждающей ЭДС наблюдался процесс самовозбуждения, что показывало ошибочность данного суждения.

Наиболее вероятна трактовка самовозбуждения, как явления параметрического резонанса в контуре АГ – батарея конденсаторов, но подобная модель встречает сложности математического характера. Для подтверждения были проведены исследования самовозбуждения в различных электрических машинах. Для анализа самовозбуждения была рассмотрена система дифференциальных уравнений, описывающая переходные процессы и уравнения равновесия электрической цепи.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Murthy S.S., Malik O.P.: Analysis of self-excited induction generators. IEE Proc. C, v. 129, 1982, Nr 6, p. 260-265.
2. Ishiguro A. et al.: A novel control method for forced commutated cycloconverters using instantaneous values of input line-to-line voltages. IEEE Trans on Ind. Electr. v. 7, 1991, Nr 3.
3. Зубков Ю. Д. Асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением. -Алма-Ата: ШД-ЪО АН Каз. ССР, 1949, -112с.
4. Чернышев А. С. Разработка источника бесперебойного питания на базе асинхронной машины с инерционным накопителем энергии: Автореферат, дис. канд. техн. наук. ~М., 1988.-20с.
5. Щумов Ю. Н. К расчету внешних характеристик автономного асинхронного генератора. -Изв. вузов. Электромеханика/1978, N7,С. 787-789.
6. Зубков Ю. Д. Асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением. -Алма-Ата: ШД-ЪО АН Каз. ССР, 1949, -112с.
7. Нетушил, А.В. Самовозбуждение асинхронного генератора / А.В. Нетушил, С.П. Бояр-Созонович, А.В. Китаев // Изв. вузов. Электромеханика. -1981.-№ 6. -С. 613-617.

Научный руководитель: А.Г. Гарганеев, д.т.н., зав. каф. ЭКМ ЭНИН ТПУ.

ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ В КАЧЕСТВЕ НАКОПИТЕЛЕЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ И СИСТЕМАХ МАЛОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ ВЕТРО-СОЛНЕЧНЫХ УСТАНОВОК

Д.А. Козюков

Кубанский государственный аграрный университет

Системы накопления энергии становятся одним из наиболее конкурентоспособных сегментов отечественного энергетического хайтека и вызывают огромный интерес у профильных инвесторов и потребителей в различных отраслях [1].

В настоящее время накопители электроэнергии (НЭЭ) рассматриваются в качестве одной из важнейших составляющих электроэнергетики будущего как неотъемлемый элемент «интеллектуальных электроэнергетических систем». Основное свойство накопителей – способность аккумулировать электроэнергию с ее последующей выдачей в нужное время – имеет особое значение для создания принципиально новых методик оптимального управления энергосистемами [2].

На современном этапе используются следующие НЭЭ: гидроаккумулирующие станции; накопители, в которых энергия сохраняется за счет нагнетания сжатого воздуха (подземного и наземного исполнения); батареи различного типа исполнения (сернисто-натриевые, свинцово-кислотные, кадмиево-никельные, ионно-литиевые), а также маховики.

Основной проблемой, препятствующей масштабному использованию НЭЭ, является их высокая стоимость. Однако уже сейчас в ряде стран (США, Япония, Индия, Бразилия, Российская Федерация) отмечается активизация исследований и практических разработок, направленных на создание накопителей новых типов (суперконденсаторы, различные типы электрохимических и асимметричных накопителей), наряду с поиском вариантов снижения стоимости и изучением аспектов их использования для решения прикладных задач оптимизации управления энергосистемой.

Особенно актуальными являются исследования, связанные с применением НЭЭ для обеспечения интегрирования в систему ветряных и солнечных электростанций, использованием систем НЭЭ как в интересах конечного потребителя (покрытие пиковых нагрузок), так и для решения системных вопросов (выравнивание графиков нагрузок).

Анализ эффективности применения НЭЭ является сложной многокритериальной задачей. Одно из основных условий целесообразности использования НЭЭ выражается в наличии как минимум двух суточных тарифов на электроэнергию. Для анализа эффективности применения устройств накопления электроэнергии (УНЭ), необходимо проанализировать суточный график нагрузки конкретного потребителя или участка распределительной сети.

К основным сферам применения НЭЭ относят покрытие пиковых нагрузок, регулирование частоты и напряжения, замещение вращающегося резерва, уменьшение загруженности линий электропередачи и перенос на более поздний срок необходимости их модернизации, повышение надежности и качественных показателей электроснабжения, обеспечение интеграции возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) в систему.

Таким образом, существенной причиной развития систем НЭЭ являются тенденции увеличения генерации на основе возобновляемых источников энергии (в первую очередь ветро-солнечными установками), а также возрастающие требования к надежности электроснабжения и вопросам экологии [2].

Накопители энергии (НЭ) являются базовыми структурными элементами автономных систем электроснабжения (АСЭ) на базе ВИЭ. Наиболее распространенными и динамично развивающимися в настоящее время системами ВИЭ являются солнечные фотоэлектрические станции (СФЭС) и ветроэнергетические установки (ВЭУ). Для автономных систем электроснабжения (АСЭ) на основе ветро-солнечных установок наиболее действенным стимулом практического использования НЭЭ является возможность накапливать электроэнергию в период снижения спроса на нее с последующей выдачей во время максимального (пикового) потребления.

Особенностью ФЭС и ВЭУ является непостоянство (нестабильность) выдаваемых ими уровней мощности. Отсюда возникает необходимость в НЭ, которые способны эффективно накапливать избыточную электроэнергию во время пиковой генерации и отдавать ее во время снижения мощности, генерируемой ВИЭ, удовлетворяя требования по надежности и качеству электроснабжения конкретных потребителей. В установках, имеющих подключение к сети, наличие НЭ и связанных с ними преобразователей позволяет сохранить электроснабжение потребителей при отключениях сети.

Для каждого из указанных применений имеет значение энергоемкость НЭЭ (количество электроэнергии, которое устройство способно накапливать и сохранять на протяжении определенного перио-

да), выдаваемая в единицу времени мощность на протяжении периода разряда, длительность разряда (способность выдавать требуемую мощность в течение конечного временного интервала) и КПД.

Среди НЭ, предлагающихся сегодня для использования в сфере ВИЭ, особый интерес представляют электрохимические конденсаторы (ЭК) [3].

Электрохимический конденсатор, он же «ионистор» (Россия), «суперконденсатор», «гиперконденсатор» (Япония), «ультраконденсатор» (Германия, США, Корея) – это сверхвысокоемкий конденсатор с органическим или неорганическим электролитом, с двойным электрическим слоем («обкладками») на границе раздела электродов и электролита (международное обозначение *EDLC* – *Electric double-layer capacitor*).

Отличительными особенностями ЭК являются: способность заряжаться и разряжаться неограниченное количество раз; способность разряжаться за время от нескольких миллисекунд до нескольких минут, отдавая высокие мощности; способность заряжаться от нескольких секунд до нескольких минут (благодаря небольшой постоянной времени RC); высокая удельная мощность; отсутствие нагрева в процессе цикла заряда-разряда; отсутствие опасности перегрева (полностью заряженный СК просто перестает принимать заряд); устойчивость к превышению напряжения; отсутствие эффекта «глубокого разряда», характерного для химических батарей; длительный срок службы; широкий диапазон рабочих температур (–40 °С ...+70 °С); отсутствие материалов, которые при разрушении корпуса могли бы причинить вред окружающей среде; кпд 95 – 97%; относительно низкое внутреннее сопротивление (0,35..100 мОм).

Недостатками и ограничительными факторами применения ЭК являются относительно низкая плотность энергии и высокий саморазряд. Однако ЭК имеют большую выходную мощность, что позволяет использовать их вместе с АКБ, объединяя их достоинства и компенсируя недостатки. Перспективным представляется применение ЭК в системах электроэнергетики, в том числе в системах на основе ВИЭ, для стабилизации напряжения и сглаживания пиковых нагрузок.

Учитывая особенности ЭК, целесообразно их совместное использование с АКБ в ветро-солнечных системах. ЭК и АКБ формируют собой гибридный накопитель (ГН). При формировании ГН на основе ЭК и АКБ для ветро-солнечных установок актуальной задачей становится разработка зарядно-разрядных устройств с обоснованием параметров и режимов их работы. При этом необходимо, чтобы разрабатываемые устройства обеспечивали оптимальные режимы заря-

да/разряда ЭК и их взаимодействие с другими компонентами системы, сетью и потребителем [4].

ЭК находят применение в составе *сетевых накопителей энергии (СНЭ)*, например, совместно со свинцово-кислотными аккумуляторами (LA&DL-CAP) в «умных сетях».

Наряду с мировой практикой применения ЭК в большой энергетике особый интерес представляет проведение дальнейших научных исследований по их использованию в системах малой распределенной энергетики (МРЭ) на базе возобновляемых источников (в частности, СФЭС и ВЭУ) [5].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Инвесторы оценили потенциал инновационных накопителей энергии. – Режим доступа: <http://sk.ru/news/b/news/archive/2014/12/11/investory-ocenili-potencial-segmenta-innovacionnyh-nakopiteley-energii.aspx>
2. Чернецкий А.М. Оценка экономической эффективности использования накопителей электроэнергии в энергосистеме / А.М. Чернецкий // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ - Энергетика: междунар. научно-технич. журнал. - 2013. - №4. - С. 21 - 28.
3. Козюков Д.А. Применение ионисторов в установках на основе возобновляемых источников энергии / Актуальные проблемы технических наук: сборник статей Международной научно-практической конференции (10 июня 2015 г., г. Уфа). – Уфа: АЭТЕРНА, 2015. С. 84-86.
4. Козюков Д.А. Гибридные накопители электроэнергии в ветро-солнечных установках / Д.А. Козюков // Инновационная наука. Т1. 2015. №7. С. 33-35.
5. Козюков Д.А. Предпосылки развития малой распределенной энергетики / Д.А. Козюков // Проблемы и перспективы технических наук: сборник статей Междунар. науч.-практич. конфер.(10 августа 2015 г., г. Уфа). - Уфа: АЭТЕРНА, 2015. С.28-29.

Научный руководитель: Б.К. Цыганков, к.т.н., профессор Кубанский государственный аграрный университет.

ЛОКАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ НА БАЗЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В.И. Саенко

Московский энергетический институт

Целью данной работы являлся выбор типовых моделей ветро-электрических установок (ВЭУ), внедряемых в существующие локальные электротехнические комплексы (ЭТК) 22 населённых пунктов Ненецкого автономного округа. Выбор моделей ВЭУ в составе локального ЭТК зависит от ветрового потенциала на месте установки ВЭУ, мощности ДЭС, графика электрической мощности потребителя и комплектации локального ЭТК. В данной работе осуществлялся выбор энергоэффективных моделей по критерию энергоэффективности без учёта графика нагрузки.

Вся территория Ненецкого А.О. относится к децентрализованной энергосистеме, энергоснабжение населённых пунктов осуществляется от локальных энергосистем, в основном базирующихся от ДЭС и характеризующихся высоким износом ДЭС и линий электропередач (ЛЭП) [1]. Количество жителей в населённых пунктах меняется от 15 до 1589 человек, что свидетельствует о существенной разнице в установленной мощности локальных ДЭС (см.табл.1).

Табл. 1. Распределение децентрализованных потребителей Ненецкого автономного округа на группы по мощности

| Группа мощности | Количество населённых пунктов | Численность населения, чел. | Диапазон мощностей, кВт | Средняя пиковая мощность н/п, кВт | |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----|
| 1 | 11 | <250 | 25-100 | 46 | |
| 2 | 12 | <600 | 100-293 | 245 | |
| 3 | 8 | >600 | 293-859 | 379 | |
| | Всего: | 31 | 15376 | 25-859 | 175 |

Для определения установленной мощности локальных энергосистем были использованы данные по удельному потреблению дизельного топлива на одного жителя населённых пунктов (см.табл.1), которое существенно меняется от 0,18 до 3,85 тн/чел и учитывает так же промышленную нагрузку населённых пунктов [1]. Такая разница в потреблении дизельного топлива связана с различным родом деятельности населения, которая в данной работе не анализировалась.

Проведенная оценка установленной мощности локальных энер-

госистем выявила диапазон её изменения от 25 кВт до 859 кВт. Для выбора оптимальных типовых моделей ВЭУ в точках расположения различных населенных пунктов было проведено условное разделение потребителей на 3 группы по мощности (см.табл.1):

Выбор моделей ВЭУ осуществлялся в соответствии с классами безопасности по ИЕС 61400-1 (или ИЕС 61400-2). Для применения в составе локальных ЭТК Ненецкого автономного округа было предварительно выбрано 23 варианта ВЭУ малого (от 30 до 100 кВт) и среднего (от 100 до 800 кВт) диапазона мощностей, параметры и энергетические характеристики которых были получены из СБД «Современное ветроэнергетическое оборудование» [4].

В качестве критерия перспективности использования предполагаемой модели ВЭУ на площадке объекта был принят среднееголетний коэффициент использования установленной мощности $K_{иум}$:

$$K_{иум} = \frac{\mathcal{E}_{ВЭУ}(T)}{(N_{вэу}^{уст} \cdot T)}, \quad (1)$$

где $N_{вэу}$ – установленная мощность ВЭУ, $\mathcal{E}_{ВЭУ}(T)$ - энергия, вырабатываемая ВЭУ за период времени T (один год) определяется выражением:

$$\mathcal{E}_{ВЭУ}(T) = \sum_{i=1}^k N_{ВЭУ}(V_i^{Ah}) \cdot \Delta t_i \quad (2)$$

где V_i^{Ah} - расчетные среднечасовые скорости ветра на высоте оси ветроколеса для среднееголетнего года; $k=8760$ - количество часов в год, Δt_i – интервал времени (равный 1 часу), $N_{ВЭУ}(V_i^{Ah})$ - рабочая мощность ВЭУ определяемая по энергетической характеристике ВЭУ.

Расчет и анализ ветровых ресурсов Ненецкого автономного округа проводился по многолетним рядам (1990-2013 гг.) Δt -часовых значений скорости и направлений ветра на высоте 10 метров на площадках 22 метеостанций (МС), полученных с сайта «Погода России» [2].

Для моделирования вертикального профиля ветра на площадках 29 населённых пунктов была использована эмпирическая зависимость среднемесячного показателя Хеллмана от среднемесячной скорости ветра $m(V_0) = 1,0008 \cdot V_0^{-0,912}$ для аэрологической метеостанции (АМС) Нарьян-Мар, а на площадках 2 населённых пунктов $m(V_0) = 0,78 \cdot V_0^{-0,82}$ для АМС Салехард [3].

Выбор АМС аналогов осуществлялся по критерию соответствия формирования годового хода скорости ветра и удалённости от площадки населенного пункта. В качестве примера приводится сравнение годового хода скорости ветра в о.е. и многолетней «розы ветров» для населённого пункта Нижняя Пеша (см.рис.1, 2)

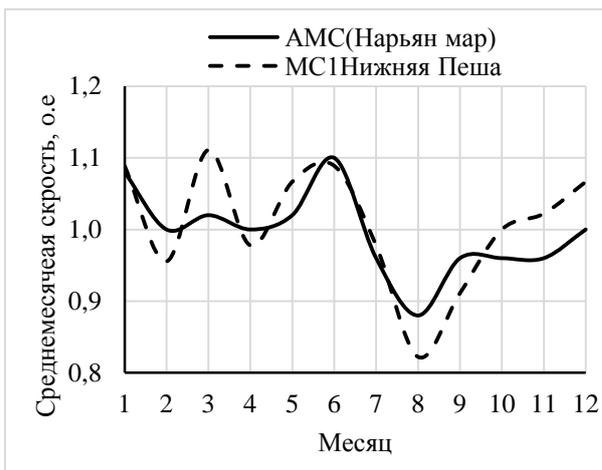


Рис. 1. Среднемесячные (многолетние) скорости ветра на высоте 10 м (в о.е.) на площадках АМС Нарьян-Мар и МС1

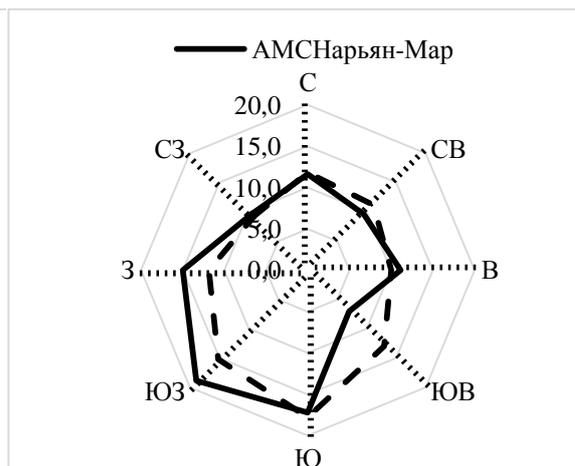


Рис. 2. Многолетние повторяемости направлений ветра на площадках АМС Нарьян-Мар и МС1

Табл. 2. Выбор единичной мощности ВЭУ для населённых пунктов, относящихся к различным группам по мощности

| Группа | Наименование ВЭУ | Мощность единичной ВЭУ, кВт |
|--------|---|--|
| 1 | BWC Excel, Jacobs, ЛЭМЗ, NG, WindPower, АОС | 10, 20, 30, 33, 35, 50 |
| 2 | Northwind, Norwin | 100, 200, 225, 275 |
| 3 | Norwin, Vergnet | 275, 500, 600, 750, 780, 800, 850, 900 |

Для всех выбранных моделей ВЭУ для каждой группы потребителей по мощности был осуществлён расчёт коэффициентов использования установленной мощности и по критерию максимума произведён выбор типовых моделей ВЭУ.

Табл. 3. Выбор Энергоэффективной Модели Вэу Для Населенных Пунктов (П.Бугрино) Второй Группы

| модель ВЭУ | Нб, м/ Nвэу, кВт | 30 | 37 | 40 | 50 | 55 | 60 |
|------------|---------------------|------|------|------|------|------|-----|
| Northwind | 100 | 0,33 | 0,35 | | | | |
| Norwin | 200 | 0,32 | 0,34 | 0,35 | | | |
| Norwin | 225 | 0,31 | 0,33 | 0,34 | 0,36 | | |
| Vergnet | 275 | | | | | 0,39 | 0,4 |

Вывод: В результате расчёта для каждой группы потребителей была выбрана общая типовая модель ВЭУ с одинаковой высотой башни: 1 группа модель WindPower (Endurance Wind Power, США) мощностью 35 кВт, с высотой башни 30 м., 2 группа модель Northwind 100 (Northern Power Systems, США) мощностью 100 кВт, с высотой башни

37 м., 3 группа Norwin (Дания) мощностью 500 кВт, с высотой башни 40 м.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Развитие энергетического комплекса Ненецкого автономного округа и повышение энергоэффективности региональной экономики. Том 1 Анализ энергетического комплекса НАО, ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис».
2. Российский метеорологический сайт «Погода России» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.info.space.ru>.
3. Свидетельство Российской Федерации № 2012620870 от 28.08.2012 о государственной регистрации базы данных для ЭВМ «Специализированная база данных «Вертикальный профиль ветра» / Васьков А.Г., Дерюгина Г.В., Тягунов М.Г., Чернов Д.А.. Правообладатель: ФГБОУ ВПО "НИУ "МЭИ" (RU).

Руководитель. Г.В. Дерюгина, старший преподаватель, НИУ МЭИ.

РАЗРАБОТКА НАСТОЛЬНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАТУРНОЙ МОДЕЛИ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

О.В. Ануфриев, П.В. Крапивко
Московский энергетический институт

1. Описание лабораторного стенда «Натурная модель ВЭУ». Комплект типового лабораторного оборудования «Нетрадиционная электроэнергетика – Натурная модель ветроэлектродгенератора» НЭЭ2- ВЭГ-Н-Р предназначен для проведения лабораторно-практических занятий по дисциплинам «Проектирование и эксплуатация СЭС и ВЭС» и «ВИЭ». Лабораторный стенд позволяет получать основные механические рабочие характеристики ветроэлектрической установки наглядным способом на натурной модели ВЭУ.

Лабораторный стенд состоит из следующих элементов и блоков (см. рис. 1):

1. Ветроэлектродгенератор (поз. 1 на рис. 1);
2. Блок нагрузки и измерения (поз. 2 на рис. 1);
3. Вентилятор напольный (поз. 3 на рис. 1);
4. Анемометр (поз. 4 на рис. 1);
5. Тахометр на подставке (поз. 5 на рис. 1)

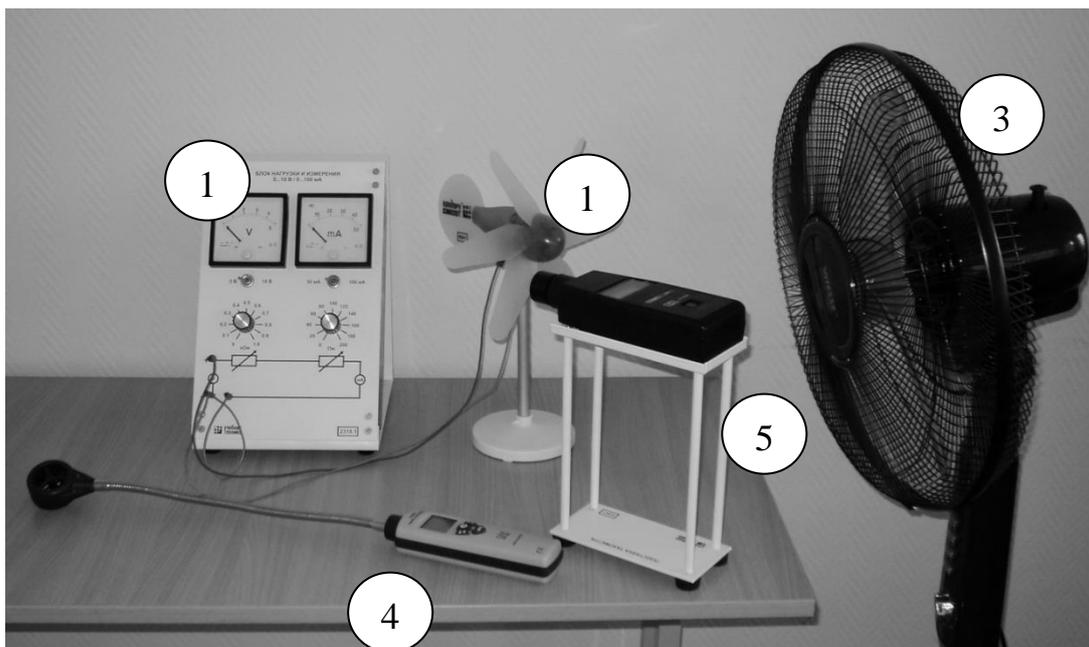


Рис. 1. Внешний вид лабораторного стенда «Натурная модель ВЭУ»

Вентилятор напольный предназначен для создания ветрового потока заданной скорости. Регулирование скорости ветрового потока осуществляется переключением скорости вращения вентилятора и изменением расстояния между вентилятором и ветроэлектрогенератором. Блок нагрузки и измерения предназначен для моделирования нагрузки и измерения режимных параметров ветроэлектрогенератора. Технические характеристики блока нагрузки и измерения приведены в табл. 1.1.

Табл. 1. Технические характеристики блока нагрузки и измерения

| | | |
|----------------------|--------------------------------|----------|
| Нагрузка | Напряжение, В не более | 10 |
| | Ток, мА, не более | 100 |
| | Сопротивление нагрузки, Ом | 0...1200 |
| Измеряемые параметры | Напряжение постоянного тока, В | 0...10 |
| | Постоянный ток, мА | 0...100 |

Анемометр позволяет измерять скорость ветрового потока в диапазоне 0...30 м/с. Тахометр имеет предел измерений 0...10000 м/с.[2]

2. В процессе использования лабораторного стенда по изучению характеристик натурной модели ветроэлектрической установки был выявлен ряд проблем, которые было необходимо решить в данной работе:

- Неравномерность ветрового потока по скоростям в пространстве и времени, вызванные несовершенством напольного вентилятора. В связи с этим получаем неравномерное поле скоростей и непостоянные характеристики ВЭУ;

- Турбулентные и встречные потоки, вызванные наличием помех;
- Недостаточность регулировочного диапазона скоростей воздушного потока (3 фиксированные скорости вращения вентилятора) для максимального использования возможностей стенда.

Актуальность данной работы состоит в том, что в связи с несовершенством, возможности лабораторного стенда ограничены, а выполнение работы требует избегать многих факторов, негативно влияющих на результаты измерений.

3. Основной задачей при проектировании настольной аэродинамической трубы являлась стабилизация ветрового потока при условии сохранения мобильности и простоты конструкции стенда. При поиске оптимальной конструкции аэродинамической трубы были изучены и проработаны разные варианты исполнения. Так, были изучены возможности создания:

- Полуцилиндрической трубы, с жесткими стенками;
- Цилиндрической трубы большого радиуса, который и был выбран в качестве основы для прототипа.

Основой для цилиндрической трубы прототипа был взят листовой поликарбонат.

Диаметр трубы (450 мм) был выбран исходя из размеров натурной модели трёхлопастного ветроэлектродгенератора.

Длина трубы (1 м) была выбрана на основании проведенных ранее опытов, где выбиралось расстояние от вентилятора до оси ветроэлектродгенератора для оптимизации заданной скорости ветрового потока.

Труба установлена на двух опорах, обеспечивающих устойчивость конструкции.

В ходе тестовых испытаний было выяснено, что имеющийся напольный вентилятор (60 Вт) не мог обеспечить стабильности ветрового потока и постоянной скорости вращения ветроэлектродгенератора. Для обеспечения стабильного потока был выбран новый вентилятор под заданные размеры, мощностью 120 Вт.

Для расширения регулировочного диапазона и плавной регулировки скорости воздушного потока был подобран диммер, позволивший регулировать скорость ветрового потока от 0,9 до 7,1 м/с. В связи с необходимостью измерения скорости вращения ветроколеса с помощью тахометра, было сделано отверстие диаметром 30 мм для прохождения светового луча тахометра.

Для равномерного распределения ветрового потока по радиальному сечению трубы, на расстоянии 20 см от оси вентилятора, была дополнительно установлена ламинирующая сетка.

Итоговая конструкция представляет собой:

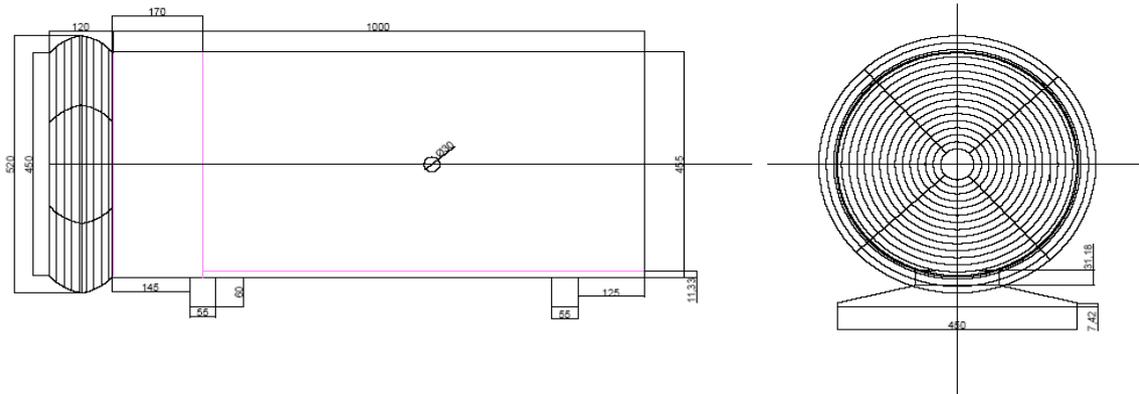


Рис. 2. Чертёж «Прототип аэродинамической трубы»

4. После окончания сборки всей установки и проведения лабораторных опытов были получены следующие результаты:

- С помощью аэродинамической трубы и нового вентилятора удалось добиться ламинарности воздушного потока, избежать посторонних помех, минимизировать потери ветрового потока. В результате, характеристики лабораторного ветроэлектродвигателя стали более приближенными к характеристикам реальной ВЭУ.
- С помощью диммера добились плавности и более широкого диапазона регулировки скоростей от 0,9 до 7,1 м/с.

5. Планы и дальнейшая работа со стендом.

- В связи с изменившимися условиями проведения опытов, заменой имеющегося оборудования и добавлением нового, было принято решение переработать «Руководство по выполнению базовых экспериментов».[1]
- На данной установке будет проведен ряд экспериментов и опытов, не связанных непосредственно с имеющейся ВЭУ, что делает данную установку multifunctionальной.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сенигов П.Н. Натурная модель ветроэлектродвигателя. Руководство по выполнению базовых экспериментов. НМВЭГ.001 РБЭ (959.3). – Челябинск: Инженерно-производственный центр «Учебная техника», 2009. -25с.

2. Васьков А.Г., Матвиенко Н.И., Солдаткин А.Ю. Методические указания по проведению лабораторных работ по курсам «Проектирование и эксплуатация СЭС и ВЭС» и «Возобновляемые источники энергии» -М.: Изд-во МЭИ, 2015. - 74с.

Научные руководители: Т.А. Шестопалова; к.т.н., доцент МЭИ; А.Г. Васьков, к.т.н., доцент МЭИ.

ВЛИЯНИЕ НА ПИТАЮЩУЮ СЕТЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

С.В. Молот, Б.К. Салимов

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Современные преобразователи частоты (ПЧ) для частотного управления асинхронными электродвигателями изготавливают, в основном, по схеме с промежуточным звеном постоянного тока. Структурная схема такого ПЧ содержит следующие основные блоки: неуправляемый входной выпрямитель, сглаживающий фильтр и автономный инвертор напряжения (АИН) на модулях типа IGBT с широтно-импульсной модуляцией.

ПЧ потребляет из сети ток, который по форме отличается от синусоиды. Спектр этого тока представлен гармониками с номерами $n = 6 \cdot k \pm 1$. При этом уровень высших гармоник в кривой тока зависит от ряда факторов, в том числе схемы выпрямителя и параметров сглаживающего фильтра на его выходе.

Потребление несинусоидального тока из питающей сети приводит к тому, что на последовательных элементах сети возникают падения напряжения несинусоидальной формы. Вследствие этого сетевое напряжение также приобретает несинусоидальную форму [1].

Для решения задач электромагнитной совместимости ПЧ с питающей сетью в среде Matlab (версия R2012a) с пакетом расширения Simulink разработана имитационная модель, схема которой показана на рис. 1. Силовую часть комплекса моделируют следующие блоки: питающую сеть Three-Phase Source, трехфазный выпрямитель Universal Bridge, сетевые дроссели на входе выпрямителя Three-Phase Series RLC Brach, сглаживающий дроссель LD, RD, емкостной фильтр с параллельно подключенным активным сопротивлением RI, СФ. Блок Three-Phase Parallel RL Load моделирует активно-индуктивную нагрузку сети.

Инвертор, входящий в состав ПЧ, представлен активным сопротивлением R_I . Правомерность такого подхода обусловлена тем, что в рассматриваемом случае целью моделирования электротехнического комплекса является анализ влияния канонических гармоник в спектре входного тока ПЧ на качество электроэнергии в питающей сети. Спектр гармоник, вызванных коммутациями IGBT-модулей, смещен в высокочастотную область [2].

Для анализа гармонического состава сетевого напряжения и входного тока ПЧ разработаны subsystemы *Subsystem_U* и *Subsystem_I*. Блок *Active&Reactive Power* осуществляет вычисление активной мощности P . С помощью блоков *Product* и *Gain* вычисляется полная мощность S . Блок *Divide* позволяет найти коэффициент мощности по формуле $\chi = P/S$.

В состав модели входят также виртуальные измерительные приборы: вольтметры *Voltage Measurement*, *Current Measurement*, цифровые дисплеи *Display*. Кривые токов и напряжений можно наблюдать на экранах осциллографов *Scope*.

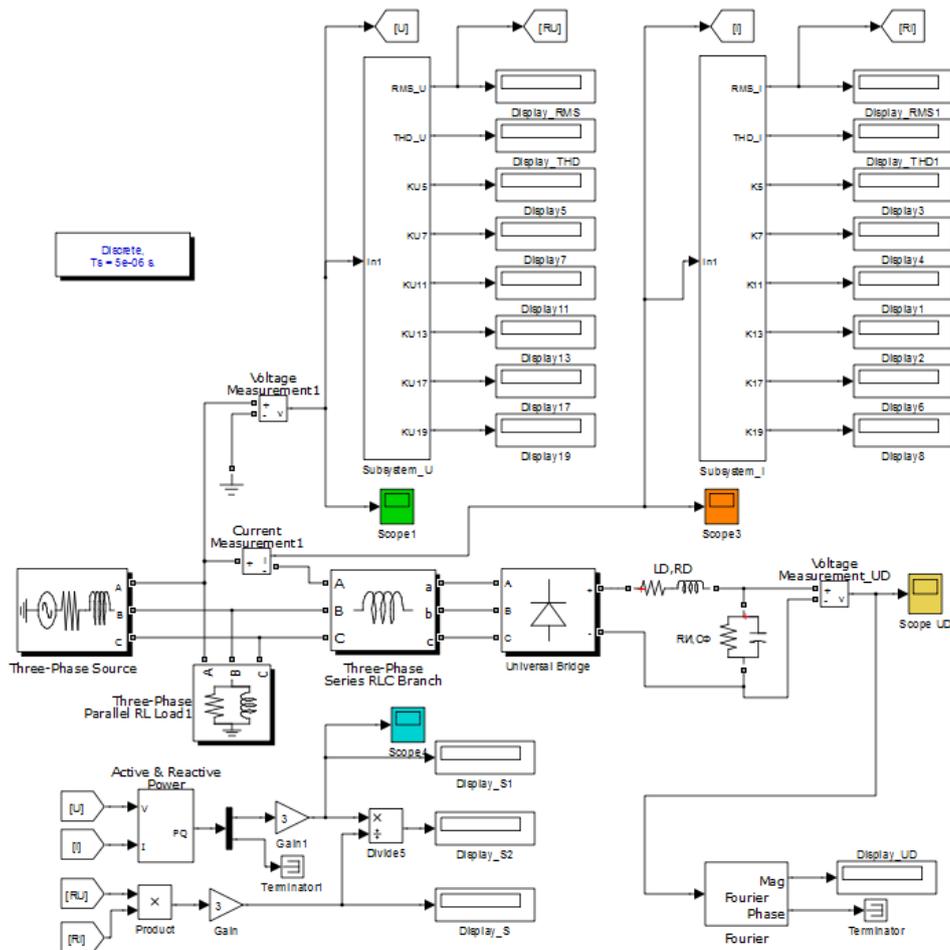


Рис. 1. Схема имитационной модели

На рис. 2 – 4 показаны результаты моделирования для следующего набора параметров: номинальное напряжение сети 380 В, частота 50 Гц; индуктивность и внутреннее сопротивление сети 24 мкГн и 0,0068 Ом соответственно; индуктивность сетевых дросселей 10 мкГн; индуктивность и емкость сглаживающего фильтра 120 мкГн и 5000 мкФ соответственно. Эквивалентное сопротивление РИ изменялось таким образом, что выходная мощность электропривода изменялось в диапазоне от 100 до 500 кВт.

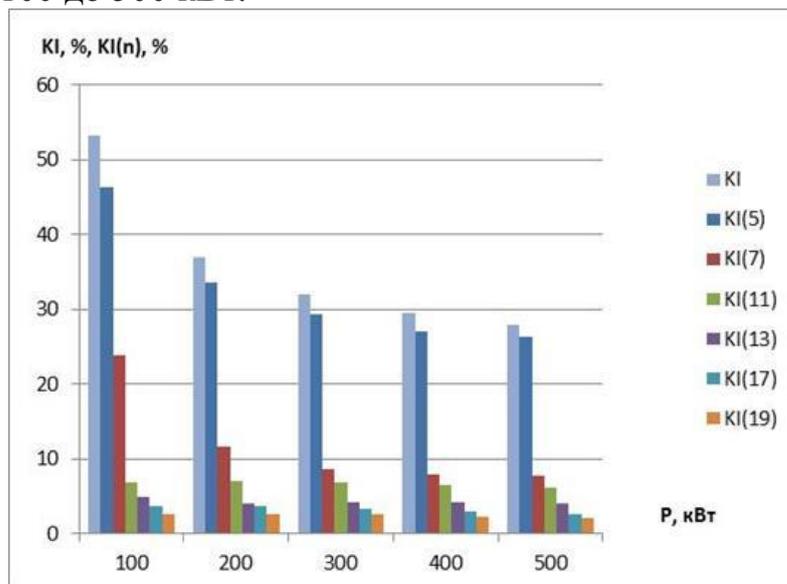


Рис. 2. Зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих KI и коэффициентов гармоник $KI(n)$ входного тока ПЧ от мощности нагрузки

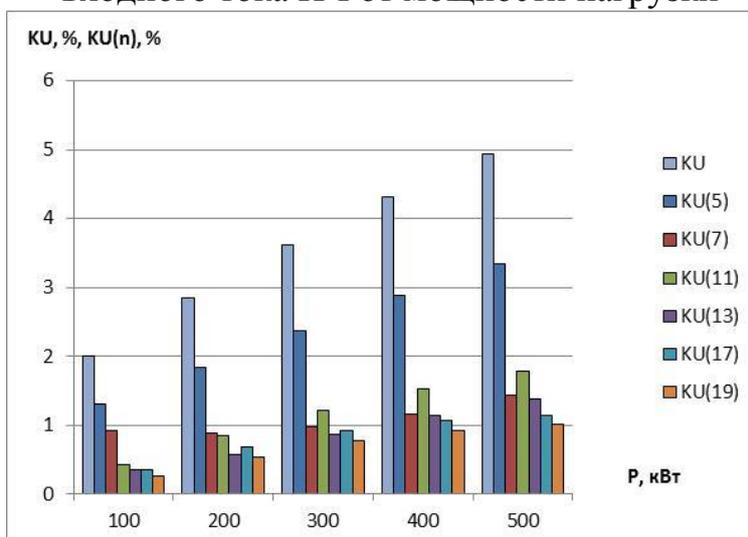


Рис. 3. Зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих KU и коэффициентов гармоник $KU(n)$ сетевого напряжения от мощности нагрузки

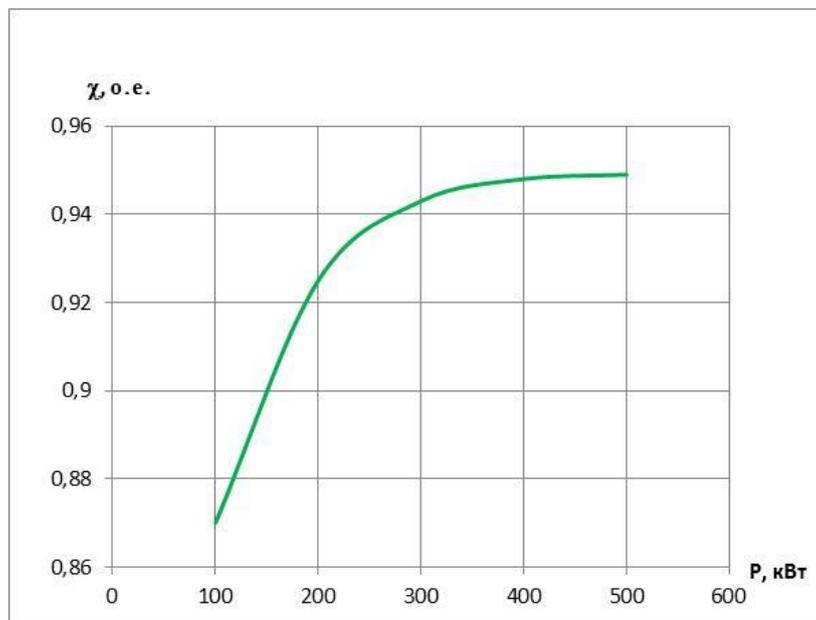


Рис. 4. Зависимости коэффициента мощности ПЧ от мощности нагрузки

Из графиков на рис. 2 и 3 следует, что наибольший вклад в искажение формы кривой сетевого напряжения вносит 5-я гармоника, уровень которой во входном токе ПЧ с увеличением мощности нагрузки уменьшается, а в сетевом напряжении – наоборот, возрастает. Коэффициент мощности ПЧ в заданном диапазоне нагрузок изменяется от 0,87 до 0,95.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лукутин Б.В. Силовые преобразователи в электроснабжении: учеб. пособие / Б.В. Лукутин, С.Г. Обухов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. - 144 с.
2. Артюхов, И.И. Электромагнитная совместимость и качество электроэнергии в системах электроснабжения / И.И. Артюхов, И.И. Бочкарева, А.Г. Сошинов: учеб. пособие. Саратов: Издательский Дом «Райт-Экспо», 2013. – 96 с.

Научный руководитель: И.И. Артюхов, д.т.н., профессор СГТУ имени Гагарина Ю.А.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ ОБМОТОК СТАТОРОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С.А. Смолярчук, А.Л. Федянин
Томский политехнический университет

Введение

Трехфазные асинхронные двигатели (АД) являются наиболее многочисленной продукцией российского электромашиностроения. При соблюдении условий эксплуатации и обслуживания АД, можно добиться высоких показателей надежности при их использовании. В силу простоты конструкции около 95% электроприводов оснащают именно АД, которые потребляют более 60% всей производимой электроэнергии в стране и в мире.

В процессе эксплуатации электродвигателей по разным причинам в них возникают неисправности, которые могут привести к простоям в работе технологического оборудования.

В связи с этим задачу исследования надежности электрических машин (ЭМ), т.е., по существу задачу определения количественных характеристик надежности, целесообразно рассматривать, как задачу исследования вероятностных свойств ЭМ, функционирующих в реальных условиях, когда на них действуют случайные возмущения. Только на основе анализа надежности можно разработать мероприятия по повышению безотказности и долговечности электрических машин, обосновать межремонтные периоды, нормативы расхода запасных частей, объемы ремонтов и сформулировать требования по надежности применительно к заданным условиям эксплуатации и решить многие другие важные задачи [2].

Задачи и методы исследования

Ссылаясь на исследования, проводимые в области определения надежности асинхронных двигателей, наиболее слабым их звеном являются обмотки статоров, надежность работы которых будет рассмотрена далее.

Цель данной работы состоит в определении фактических значений показателей безотказности статорных обмоток, характеризующих надежность АД, применяемых в химической промышленности на стадии эксплуатации.

Полученные результаты будут использованы для расчета показателей надежности на стадии проектирования и изготовления АД и

совершенствовании системы их технического обслуживания и ремонта.

Для проведения исследования эксплуатационной надежности выбраны АД, установленные на арматуре подачи и выдачи продукта в аппараты радио-химического завода АО «СХК».

Оборудование, управляющее закрытием и открытием запорной арматуры, в настоящее время превратилось в один из основных решающих факторов, определяющих эффективность производства. Правильный выбор оборудования влияет на нормальную работу и обеспечение высокой производительности производства. Невозможно обеспечить его устойчивый ритм на современной ступени интенсификации без согласования безотказной работы.

Наиболее широко в химической промышленности используются электроприводы типа “А” с двухсторонней муфтой ограничения крутящего момента. Его предназначение – дистанционное и местное управление трубопроводной запорной арматурой.

Изучение материалов эксплуатации АД показало, что 85-95% отказов происходит в результате повреждения обмотки статора; 2-5% отказов – вследствие повреждения подшипников. В такой обмотке около 93% отказов приходится на межвитковые замыкания, 5% – на повреждения межфазовой изоляции и 2% – на повреждения корпусной изоляции.

Причинами отказов являются низкое качество изготовления двигателей (30-35%), недостатки эксплуатации (35-50%) и несоответствие конструктивного исполнения двигателей условиям эксплуатации (15-35%). В процессе эксплуатации двигатели выходят из строя в основном в результате отсутствия или неудовлетворительного состояния тепловой защиты, так как при использовании плавких предохранителей двигатели не защищены от недопустимого повышения тока при работе на двух фазах.

Существенно влияют на надежность двигателей частота их включения и влажность окружающей среды. При частых включениях и реверсах быстрее разрушаются сепараторы подшипников, а в обмотках возникают значительные динамические усилия и коммутационные перенапряжения, снижающие надежность обмотки. При работе двигателя в условиях химически агрессивной среды происходит разрушение изоляционных материалов и ухудшению качества смазки подшипниковых узлов.

Всего 10-12% двигателей выходят из строя в результате процессов износа и старения. Асинхронный двигатель – изделие ремонтируемое. Однако при отказе обмотки статора, требующем полной ее пе-

ремонтки, стоимость ремонта примерно равна стоимости изготовления нового электродвигателя.

Значительная часть отказов приходится на обмотку статора АД. Поэтому в статье мы рассматриваем математическую модель, связанную с наработками на отказ статорных обмоток, которая является описанием системы, функционирующей в условиях различного рода возмущений, т. е. в реальных условиях эксплуатации.

Задача исследования надежности системы формулируется как задача исследования вероятностных свойств параметров системы, когда по заданным вероятностным характеристикам случайных параметров элементов определяются вероятностные характеристики параметров системы. Полной вероятностной характеристикой случайной величины является ее функция распределения, которую будем моделировать [3–6].

Оценка параметров законов распределения отказов обмоток статоров по данным эксплуатации асинхронных двигателей в химической промышленности

Для оптимального управления любым производственным объектом очень важно иметь его математическую модель (ММ), характеризующую качественно и количественно реальный процесс поведения объекта под воздействием эксплуатационных факторов и описываемую с помощью того или иного адекватного математического аппарата. Математическая модель любых технических средств, в том числе АД в химической промышленности, строится по результатам статистических наблюдений. Отправным пунктом построения ММ оценки эксплуатационной надежности АД для химической промышленности должны быть согласующиеся с опытом эксплуатации допущения. В основе предлагаемой ММ лежат следующие допущения:

- считается, что наработки до отказа являются статистически независимыми;
- анализируемые объекты идентичны по устройству, назначению и условия эксплуатации относительно однородны;
- в качестве исходных данных для статистической обработки эксплуатационной информации применяются случайные наработки до отказов;
- для оценки и анализа эксплуатационной надежности в качестве основных вероятностей безотказной работы АД приняты функции распределения, которые адекватно сопоставляются с наработкой на отказ для электромеханических систем: нормальная, логарифмически-нормальная и функция распределения Вейбулла.

Опираясь на данные допущения, представляется возможным построить математическую модель, на базе которой можно дать строгое количественное описание процессов, влияющих на эксплуатационную надежность АД в химической промышленности. В качестве исходных данных ММ мы рассматриваем эксплуатационную информацию объемом N , содержащую наработки t_i ($i=1,2,\dots, N$), которые являются наработками до отказов первоначально работающих АД, а также двигателей, работавших после замен или восстановлений.

Для оценки надежности АД в химической промышленности по принятой информации может быть использован показатель вероятности безотказной работы $P(t)$. Эта функция обладает хорошей наглядностью, по ней легко определить остальные показатели надежности (функцию вероятности отказа $Q(t)$, среднюю наработку до отказа T_{cp} , интенсивность отказов $\lambda(t)$ и т. д.)

Под вероятностью безотказной работы АД понимается вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ не возникнет. Вероятность безотказной работы является основной количественной характеристикой безотказности объекта на заданном временном интервале.

Разработанное программное средство позволяет оценить параметры для трех моделей надежности: Вейбулла, нормальной и логарифмически-нормальной.

Табл. 1. Параметры моделей надежности и коэффициенты корреляции

| Закон распределения | | | | | | | | |
|---------------------|---------|-------|------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| Вейбулла | | | Нормальный | | | Логнормальный | | |
| η | β | r | σ | μ | r | σ | μ | r |
| 2341 | 2,153 | 0,995 | 994 | 2005 | 0,994 | 0,567 | 7,558 | 0,994 |

Таблица 1 определяет результаты выбора закона распределения: коэффициенты r корреляции максимальны для нормального распределения, следовательно, для расчета надежности обмоток статоров асинхронных двигателей в химической промышленности принимаем нормальную модель надежности и плотность распределения времени до отказа в этом случае описывается кривой Гаусса [7]

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(t-T_{cp})^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

а функция ВБР равна

$$P(t) = \frac{1}{2} \left[1 - efr \left(\frac{t-T_{cp}}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right], \quad (2)$$

где T_{cp} , σ – параметры нормального распределения (математическое ожидание и стандартное отклонение);

$erf(x)$ – функция ошибок [7]:

$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (3)$$

Средняя наработка до отказа для нормальной модели надежности совпадает с параметром T_{cp} .

После получения оценок параметров моделей надежности, рассчитываются границы доверительных интервалов для этих параметров с доверительной вероятностью α , равной 0,95.

Точность нормальной модели надежности оценивалась с помощью коэффициента корреляции Пирсона [6].

Результаты моделирования

На основании эксплуатационных наблюдений и результатов моделирования законов распределения отказов обмоток статоров при эксплуатации АД в химической промышленности на рис. 1 построена гистограмма и функция плотности распределения наработок на отказ обмоток статоров. Проведенные расчеты подтверждают, что отказы обмоток статоров для двигателей всех приводов подчиняются нормальному закону распределения, который в теории надежности считается теоретически наиболее обоснованным в тех случаях, когда надежность технического устройства определяется большим количеством факторов, среди которых нет явно доминирующих. Для обмоток статоров эти требования всегда выполняются. При изготовлении обмоток на их надежность влияет качество изоляционных материалов (витковая и корпусная изоляция, пропитывающий лак, технология изготовления), а в процессе эксплуатации – режимы работы двигателей и условия окружающей среды. Все эти факторы являются случайными величинами и определяют надежность обмоток статоров АД в химической промышленности. Функция вероятности безотказной работы, одна из основных показателей надежности, которые используются при проектировании, изготовлении, эксплуатации и совершенствовании системы технического обслуживания и ремонта АД, представлена на рис. 2.

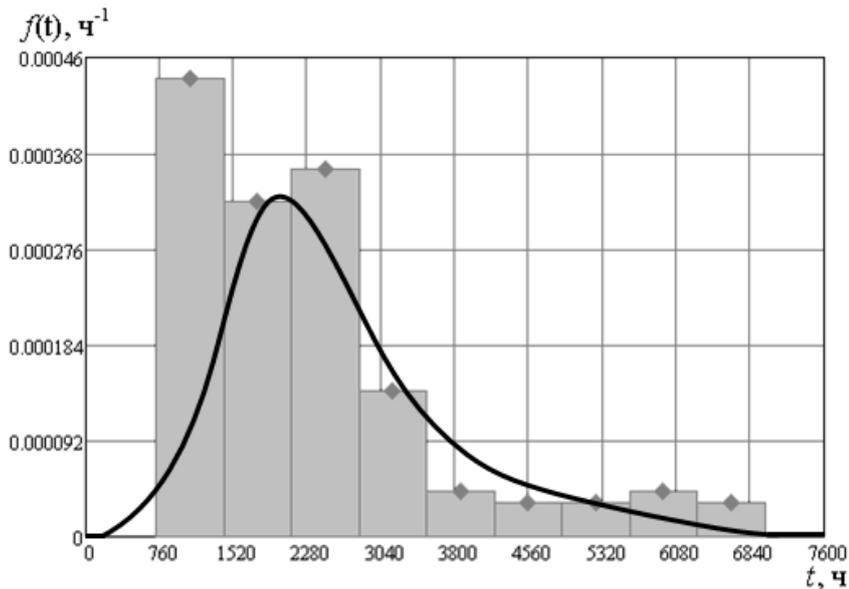


Рис. 1. Гистограмма и функция плотности распределений наработок на отказ обмоток статоров асинхронных двигателей в химической промышленности.

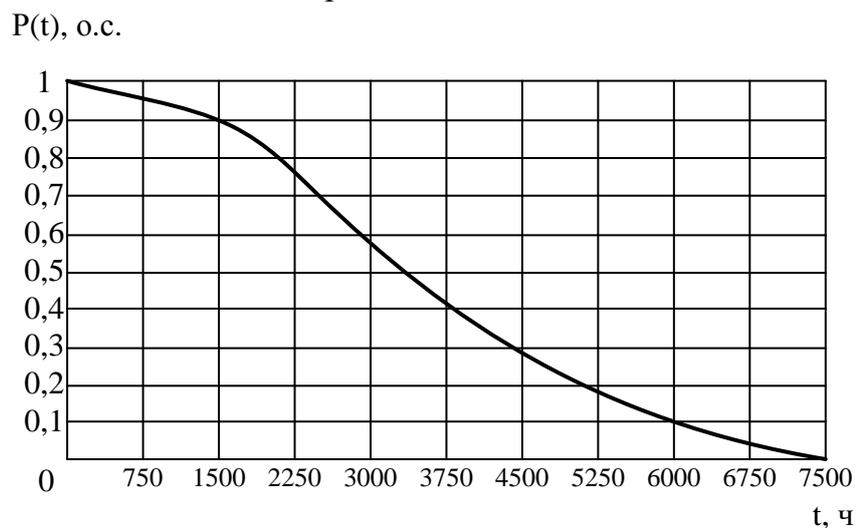


Рис. 2. Функция вероятности безотказной работы обмоток статоров асинхронных двигателей в химической промышленности

Выводы

1. Проведено моделирование эксплуатационной надежности обмоток статоров асинхронных двигателей в химической промышленности. Исходные данные для моделирования определены в процессе эксплуатации для всех приводов;
2. На основании рассмотрения трех моделей надежности (модель надежности Вейбулла, нормальная и логнормальная модели) для всех отказов обмоток статоров выбран нормальный закон распределения отказов;

3. Построены гистограммы и функции плотности распределения наработок на отказ обмоток статора, которые необходимы для определения показателей эксплуатационной надежности;
4. Получены фактические значения вероятности безотказной работы, которые наряду с наработкой на отказ определяют эксплуатационную надежность асинхронных двигателей в химической промышленности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов / Н.Л. Кузнецов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
2. Гольдберг О.Д. Качество и надежность асинхронных двигателей. - М.: Энергоиздат, 1968. – 176 с.
3. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.: ил.
4. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин: Учеб. Пособие для вузов по спец. «Электро-механика». – М.: Высш. Шк., 1988. – 232с.: ил.
5. Горский Л.К. Статистические алгоритмы исследования надежности. – М.: Наука, 1970. – 400 с.
6. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

Научный руководитель: О.П. Муравлев, д.т.н., профессор каф. ЭКМ ЭНИН ТПУ.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИСТОЧНИКЕ ПИТАНИЯ МАГНЕТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Е.С. Гордеев

Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.

Магнетронные генераторы малой мощности (до 1000 Вт) широко применяются в бытовых печах СВЧ нагрева, а также в промышленных электротехнологических установках с распределенным подводом СВЧ энергии [1]. Магнетроны для таких генераторов выпускаются крупными сериями рядом зарубежных фирм, в частности, LG,

SAMSUNG, DAEWOO. Перечень номенклатуры магнетронов данных фирм очень широк. В России выпускаются магнетроны типа М-136, М-151, М-156 и другие с аналогичными характеристиками.

Магнетронный генератор является электротехническим комплексом, который осуществляет преобразование электрической энергии 50 Гц в энергию СВЧ колебаний, имеющих, в частности, частоту 2450 МГц. Соответствующая блок-схема показана на рис. 1.



Рис.1. Блок–схема СВЧ генератора магнетронного типа

Для работы магнетрона необходимо наличие двух источников, один из которых осуществляет накал катода, другой служит для питания анодной цепи.

Наиболее часто применяется схема (рис. 2), которая совмещает в себе обе эти функции. Основной схемой является силовой трансформатор Т с двумя вторичными обмотками.

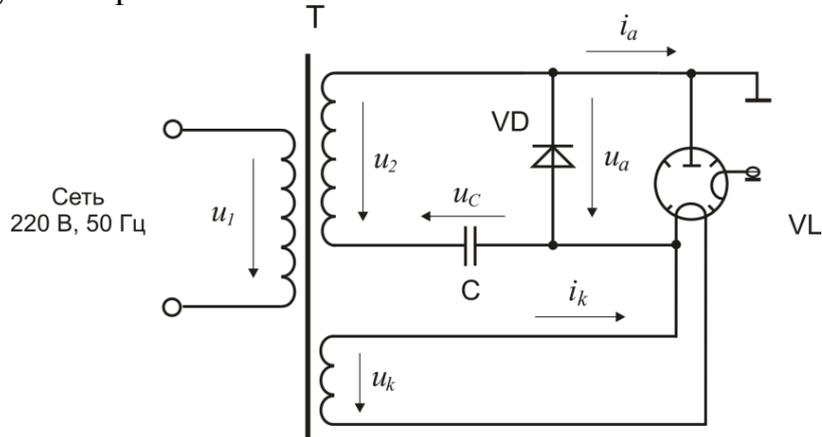


Рис. 2. Схема электропитания магнетрона малой мощности

Работа источника питания состоит из двух полупериодов. В первый из них происходит заряд конденсатора С от вторичной обмотки трансформатора Т через диод VD. При этом напряжение на аноде $u_a = 0$. Во второй полупериод напряжение u_2 на обмотке трансформатора суммируется с напряжением u_c на конденсаторе С. Как только анодное напряжение $u_a = u_2 + u_c$ становится больше порогового значения (порядка 3 кВ), через магнетрон начинает протекать ток i_a , и возникает генерация СВЧ колебаний. Затем в течение всего интервала работы магнетрона анодное напряжение и ток магнетрона изменяются в соответствии с траекториями, которые определяются динамическим сопротивлением магнетрона и параметрами трансформатора [2].

На рис. 3 представлены осциллограммы анодного напряжения, тока магнетрона и мгновенной мощности на магнетроне, которые были получены при экспериментальном исследовании источника питания для магнетрона М-105 [3].

Для снятия осциллограмм анодного тока i_a в цепь питания был включен шунт, сопротивление которого составляет 1 Ом. Для осциллографирования анодного напряжения u_a параллельно диоду VD подключался резистивный делитель для снижения напряжения в 100 раз. Поэтому значения по оси ординат для осциллограммы анодного тока соответствуют значению этого тока в амперах, а значения по осям ординат для осциллограмм напряжения и мгновенной мощности для получения фактических величин необходимо умножить на 100.

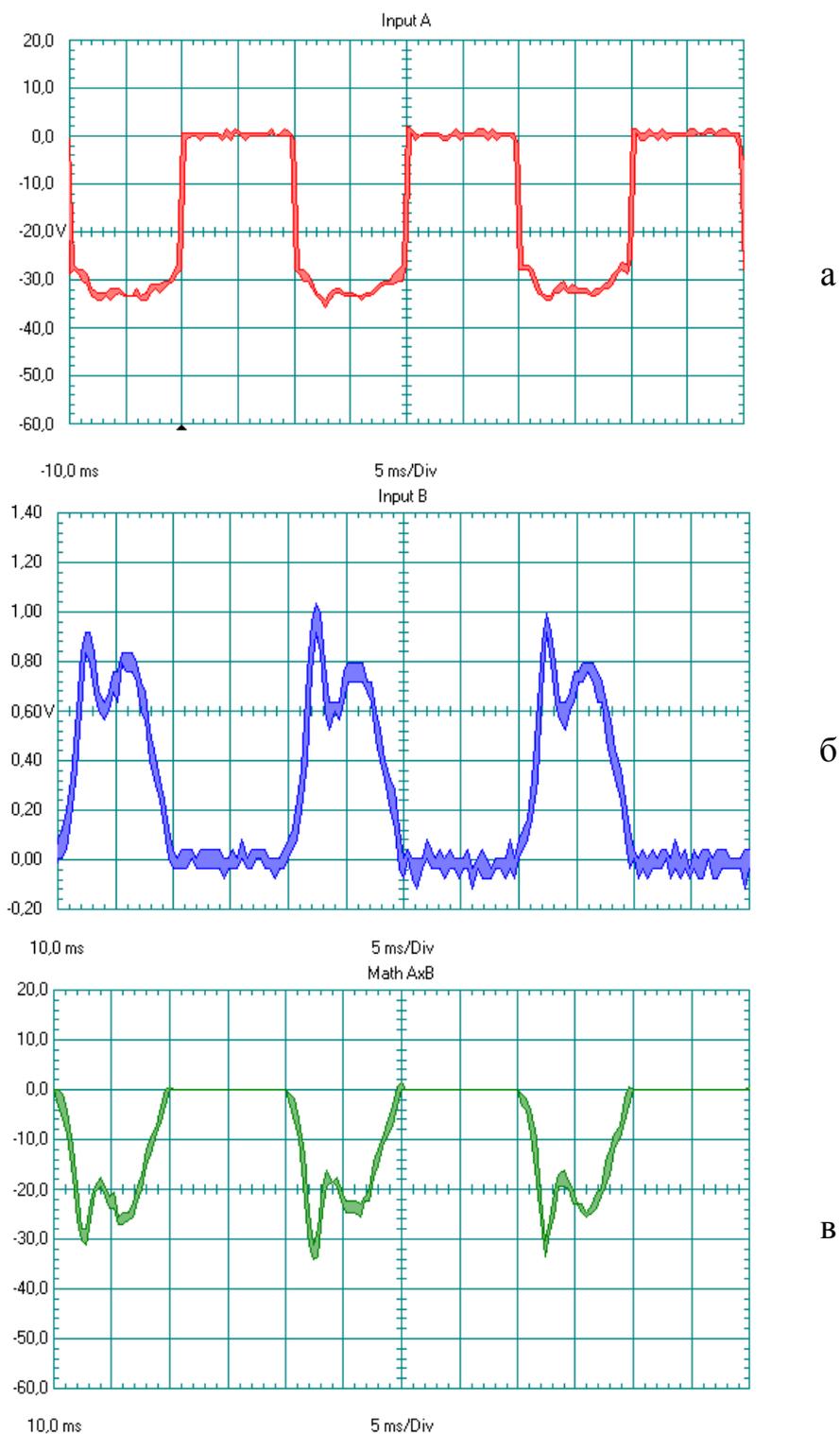


Рис. 3. Осциллограммы анодного напряжения (а), тока магнетрона (б) и мгновенной мощности на магнетроне (в)

Так как анод магнетрона соединен с корпусом установки, осциллограммы анодного напряжения смещены в отрицательную область. Соответствующий вид имеет и график мгновенной мощности.

Мгновенная мощность на аноде магнетрона определяется по следующему выражению:

$$p(t) = u_a(t) \cdot i_a(t).$$

Мощность, отдаваемая магнетрону источником питания на периоде T , определяется выражением

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u_a(t) i_a(t) dt.$$

Вследствие импульсного режима работы источника питания амплитудное значение мгновенной мощности $p(t)$ почти в 4 раза превышает среднее значение.

Из осциллограмм на рис. 3 видно, что ток в цепи магнетрона начинает протекать тогда, когда мгновенное значение анодного напряжения приближается к значению 2,8 кВ. Затем в течение всего интервала работы магнетрона анодное напряжение и ток магнетрона изменяются в соответствии с траекториями, которые определяются динамическим сопротивлением магнетрона и параметрами трансформатора.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Артюхов И.И., Земцов А.И. Направления совершенствования мультигенераторных СВЧ электротехнологических установок // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – № 1(54). – Вып. 3. – С. 151 – 156.
2. Артюхов И.И., Земцов А.И. Динамические характеристики магнетронного генератора // Антенны. – 2012. – № 3. – С. 47 – 49.
3. Артюхов И.И., Земцов А.И., Тютманова В.В. Экспериментальное исследование характеристик магнетронного генератора малой мощности // Вопросы электротехнологии. – 2015. – 2(7). – С. 72 – 76.

Научный руководитель: И.И. Артюхов, д.т.н., профессор СГТУ имени Гагарина Ю.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СУДНА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОРМОЗНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Ф.С. Ефименко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

В данной работе проведено исследование возможности исключения из состава оборудования системы электродвижения (СЭД) тормозных резисторов или возможного снижения их мощности применительно к СЭД.

На рисунке 1 представлена структурная схема физической модели. Физическая модель состоит из следующих основных узлов:

- щита распределительного (ЩР1) трехфазного на напряжение 380 В и частой 50 Гц;
- статических двухзвенных преобразователей частоты (ПЧ1 и ПЧ2) «ОМЕГА-2»;
- электродвигателей асинхронных трехфазных (АД1, АД2);
- генератора постоянного тока (ГПТ1);
- резистивной нагрузки (РН1);
- двигателя постоянного тока (ДПТ1);
- регулировочного резистора (R1);
- обмотка возбуждения двигателя (ОВД);
- источника постоянного тока (Е1).

Силовая часть преобразователей представляет собой двухступенчатый преобразователь энергии трехфазного тока сети в энергию трехфазного тока с регулируемым напряжением и частотой. Сетевое напряжение преобразуется в постоянное с помощью выпрямителя В и фильтруется с помощью LC – фильтра. Постоянное напряжение преобразуется автономным инвертором напряжения (АИН) в трехфазное для питания гребного электродвигателя.[1,2]

В данном эксперименте разрядные резисторы RT от преобразователей частоты отключены. Рекуперация энергии в питающую сеть у ПЧ1 и ПЧ2 конструктивно не доступна, а возможна только в звено постоянного тока. Корректировка алгоритма работы системы управления ПЧ не производилась.

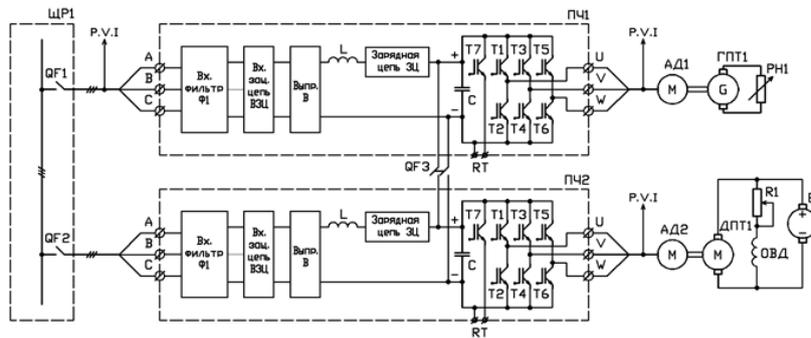


Рис. 1 – Структурная схема физической модели

Автоматическими выключателями QF1 и QF2 производится подключение ПЧ1 и ПЧ2 к сети 380 В, причем первым подключается ПЧ с минимальным напряжением в звене постоянного тока, контролируется ток несимметрии между ПЧ1 и ПЧ2. Осуществляется частотный запуск асинхронных двигателей АД1 и АД2 от преобразователей частоты ПЧ1 и ПЧ2. После выхода АД1 на номинальную частоту вращения, осуществляется включение нагрузки РН1, которая подключается к генератору постоянного тока ГПТ1. Посредством изменения нагрузки РН1 устанавливается номинальная мощность асинхронного двигателя АД1. Плавным изменением напряжения возбуждения двигателя постоянного тока ДПТ1 производится перевод АД2 в генераторный режим. Генерируемая мощность от АД2 поступает в звено постоянного тока ПЧ2 и ПЧ1, при этом потребляемая мощность ПЧ1 от сети должна уменьшиться при сохранении мощности на АД1.

Изменение возбуждения ДПТ1 производилось до срабатывания защит ПЧ1 или ПЧ2, при этом диапазон изменения напряжения возбуждения ДПТ1 был незначителен.

Входные токи ПЧ1 полученные в результате эксперимента приведены на рисунке 2.

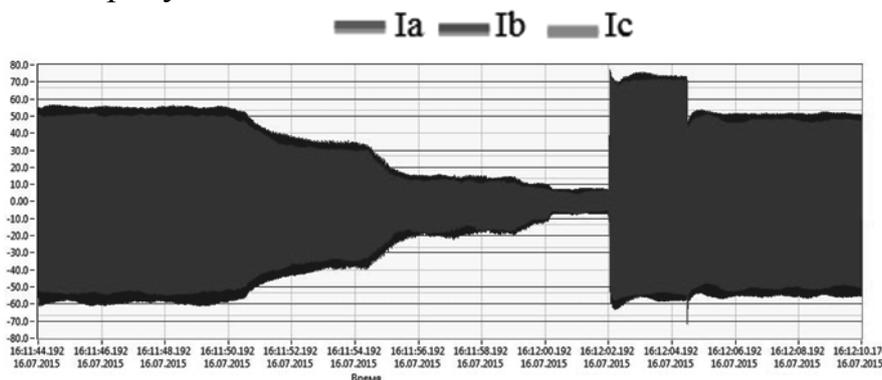


Рис. 2 – Входные токи ПЧ1

Как видно при генерировании энергии двигателем АД2 происходит уменьшение потребляемого тока у ПЧ1, следовательно происходит перераспределение мощности.

Выходные токи ПЧ1 приведены на рисунке 3.

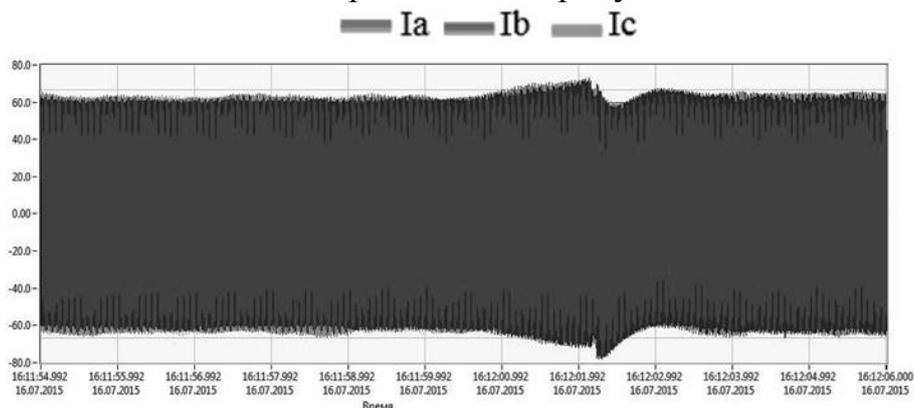


Рис. 3 – Выходные токи ПЧ1

Как видно из рисунка выходной ток ПЧ1 изменяется только во время срабатывания защиты у ПЧ2 и повышения напряжения в звене постоянного тока. Выходной ток практически не изменен при перераспределении малой мощности.

Выходные токи ПЧ2 представлены на рисунке 4.

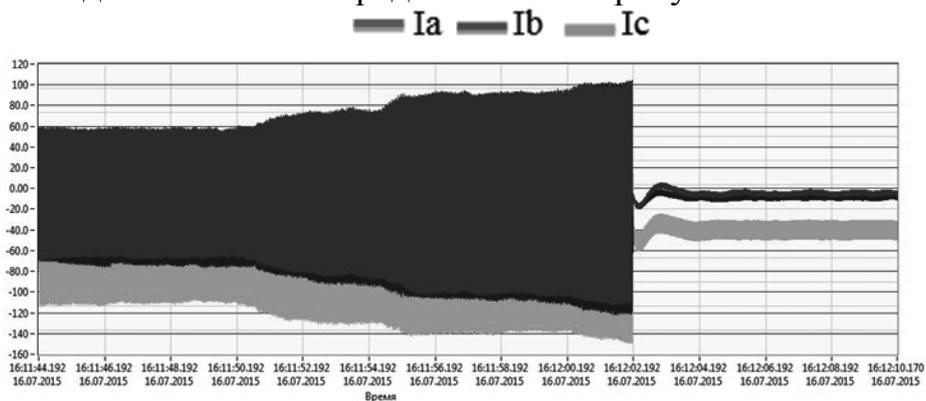


Рис. 4 – Выходные токи ПЧ2

При рекуперации энергии от двигателя АД2 отмечаются повышенные токовые нагрузки на инвертор ПЧ2.

Выходные напряжения ПЧ1 приведены на рисунке 5.

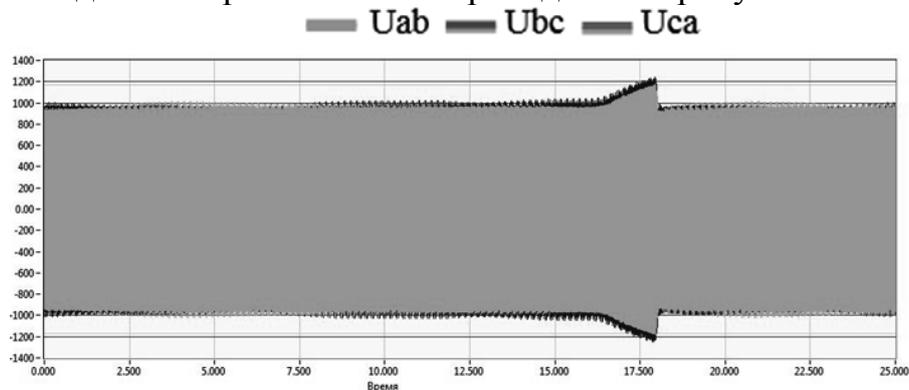


Рис. 5 – Выходные напряжения ПЧ1

При перераспределении мощности сопоставимой с мощностью двигателя АД1 часть энергии возвращается через обратные диоды IGBT – моста в звено постоянного тока, заряжая конденсаторы LC – фильтра до недопустимых напряжений, что приводит к срабатыванию защиты у ПЧ2.

Изменение мощности на входе ПЧ1 отображено на рисунке 6.

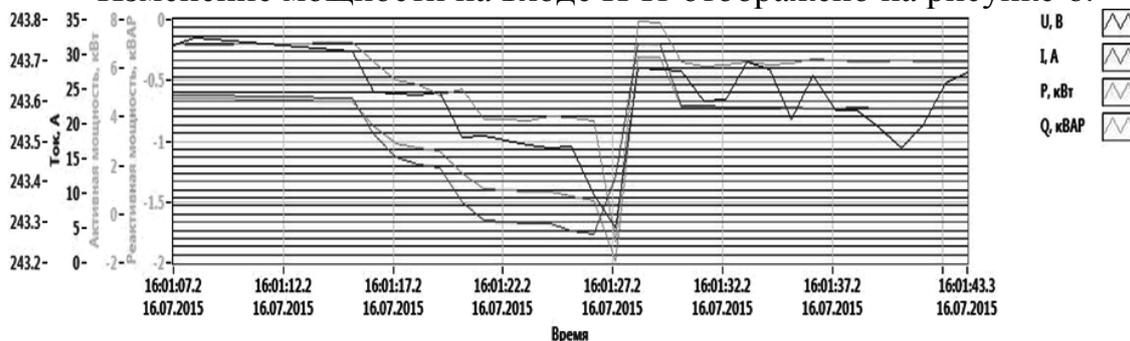


Рис. 6 – Изменение мощности на входе ПЧ1

Как видно из рисунка 6 при рекуперации мощности от АД2 происходит снижение потребляемой мощности из сети ПЧ1.

В проделанной работе показана возможность рекуперации энергии от гребного электродвигателя, работающего в генераторном режиме через звено постоянного тока. Отмечено уменьшение потребления энергии из сети АД1. Использование в звене постоянного тока элементов с большим номиналом должно позволить увеличить отдаваемую АД2 энергию.

ЛИТЕРАТУРА:

1. А.Б. Дарьенков и др. Гребные электрические установки: Учеб. пособие по направлению «Электроэнергетика и электротехника»/А.Б. Дарьенков, Г.М. Мирясов, В.Г. Титов, М.Н. Охотников. – НН.:НГТУ им.Р.Е. Алексеева, 2014 – 219с.
2. С.Б. Рукавишников Автоматизированные гребные электрические установки – Л.: Судостроение, 1983 – 240 с.

Научный руководитель: Н.Д. Поляхов, д.т.н., профессор СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 4. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

| | |
|--|----|
| Гвоздяков Д.В., Губин В.Е. Численный подход к оценке загрязнения атмосферы продуктами сгорания твердых топлив | 3 |
| Zenkov A.V., Larionov K.B., Gubin V.E. Study of the electrophysical intra-stratal method of gasification at different heating rates of coal | 7 |
| Кондаков А.А., Матвеев А.С., Шевелев С.А. Численный анализ движения частиц жидкости в криволинейных каналах | 10 |
| Ларионов К.Б., Гвоздяков Д.В., Зенков А.Ю., Калугин Б.Ф. Оценка эффективности регенеративной системы подогрева питательной воды для высокотемпературных турбоустановок на децентрализованных объектах энергетики..... | 15 |
| Москалёв И.Л. Практический опыт использования геоинформационной системы Zulu 7.0..... | 19 |
| Поляков Д.А. ТЭЦ с энергоблоками на ультра-сверхкритических параметрах..... | 23 |
| Попов В.А. Оптимизация режимов нагрузки гидроэлектростанций | 30 |
| Сорокин И.В., Коротких А.Г. Анализ эффективности использования топлив на примере Томской ГРЭС-2 | 34 |
| Ромашова О.Ю., Туболев А.А. Себестоимость продукции в системе совместной выработки тепла, холода и электроэнергии на ТЭЦ..... | 38 |
| Уваров А.А. Анализ начальных параметров пара в парогазовой установке с высокотемпературной ГТУ | 42 |
| Максимов А.С., Чалбышев А.В. Оптимизация режимов работы ТЭЦ в условиях работы на оптовом рынке электроэнергии..... | 46 |
| Матвеева А.А., Беляев Л.А., Зайцев А.С., Шевелев С.А. Дисперсность частиц жидкости при сходе пленки с кромок сопловых лопаток турбинных ступеней | 51 |
| Дергачёв И.С., Ткаченко И.Г. Методика расчета прямоточных парогенераторов | 55 |

| | |
|---|-----|
| Кнышев В.В. Пороговые нейтронно-физические процессы в мультиплицирующих системах с торием | 59 |
| Королев А.С. Сравнительный анализ турбоустановок АЭС различной мощности..... | 63 |
| Парилов Е.А. Корпус переработки жидких радиоактивных отходов Кольской атомной станции | 67 |
| Кель В.А., Савина К.И., Лавриненко С.В. Компьютерное моделирование теплогидравлического процесса в теплообменном оборудовании..... | 71 |
| Вдовин Д.Э., Лавриненко С.В. Проект «Прорыв»..... | 75 |
| Дмитриев В.О. Проектирование парогенератора АЭС с жидкометаллическим теплоносителем | 77 |
| Фролов А.А. Перспективное ядерное топливо | 79 |
| Виноградов М.П. Исследование температурного состояния графитовой кладки реактора РБМК-1000..... | 82 |
| Китаев Г.А. Эволюция материалов теплообменных труб парогенераторов АЭС | 87 |
| Кабанова М.А. Перспективные реакторы: исследование активных зон | 92 |
| Горшенин С.Д., Ледуховский Г.В. Моделирование процессов термического разложения гидрокарбонатов в деаэрационных баках с паровым барботажом | 96 |
| Росляков А.Н., Разинков А.А., Ледуховский Г.В. Разработка эмпирического обеспечения модели деаэрации воды в центробежно-вихревых деаэраторах | 100 |
| Багаутдинов Д.Ю., Филимонова О.В. Повышение энергоэффективности турбогенератора с помощью технологии плазменного напыления | 104 |
| Заугольникова Я.А., Ромашова О.Ю., Скребатун Е.А. Экономичность использования газотурбинной надстройки на энергоблоках ТЭС | 107 |
| Чиж Е.П., Лешок В.И. Пути повышения эффективности работы Белорусской энергосистемы | 111 |
| Шевцова А.А. Повышение эффективности работы тепловых сетей Тольяттинской ТЭЦ..... | 114 |

Смышляев В.Б. Регулируемый диапазон нагрузок энергоблока ПГУ-220Т 118

Домрачев А.Л. Паровые турбины для парогазовых установок, проблемы создания и эксплуатации 124

СЕКЦИЯ 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Сагдатуллин А.М., Нафиков Т.А., Сафин И.Н., Шакирова К.Н. Повышение энергоэффективности системы транспорта и подготовки нефти 128

Прохоров С.В. Рекуперативные установки в системах воздухообмена промышленных предприятий 132

Морозов А.В., Лавриновский В.С. О применении квадратичного способа линеаризации для анализа устойчивой работы гребного электропривода 137

Корышкин И.М. Повышение функциональных возможностей электроприводов с использованием микропроцессоров 141

Сенькив Е.П., Брагин А.Д. Исследование на математической модели трехфазного асинхронного двигателя в неполнофазном режиме работы 142

Негодин К.Н. Электропривод запорной арматуры цеха электроводоснабжения Управления АВР ООО «Газпром Трансгаз Томск» 148

Больных Е.С., Однокопылов Г.И. Обеспечение живучести трехфазного вентильного двигателя в аварийном режиме работы... 153

Коваль С.А. Применение современных инверторных сварочных аппаратов в производстве 158

Глазачев А.В., Дементьев Ю.Н., Негодин К.Н., Умурзакова А.Д. Математическая модель асинхронного электродвигателя с косвенным контролем выходных механических переменных 162

Насибова Л.Я., Розаев И.А., Однокопылов Г.И. Моделирование трехфазного вентильно-индукторного двигателя в аварийном режиме работы 167

Старостина Я.К. Пуско-регулирующее устройство для асинхронного электропривода 171

Михайлов Э.И. Определение потерь в стали торцевых асинхронных двигателей с массивным ротором 175

| | |
|---|-----|
| Гусев Н.В., Киселев А.В. Запуск электродвигателя постоянного тока ДПУ-87, проблемы и решения | 178 |
| Прошутинский Р.И. Применение программы FEMM для построения характеристики намагничивания электромеханического преобразователя вентильного тягового двигателя | 186 |
| Щербина Д.В., Белоусов О.С. Мониторинг магнитной системы асинхронного двигателя | 189 |
| Русяева М.Ю., Шмигель М.Р. Переходные процессы при пуске многополюсного асинхронного двигателя с вентилятором на валу | 193 |
| Иванов К.В. Моделирование отказоустойчивого асинхронного электропривода с повышенной живучестью..... | 197 |
| Колесов П.Ю. Двухконтурное управление системой вентиляции с водяным калорифером | 203 |
| Грецингер М.Г., Исмаилов Э.М. Автономный источник питания на 220 вольт, 50 герц мощностью 200 Вт с обратной связью | 207 |
| Чурилов Д.В., Позднякова В.Ю. Автономный источник питания на трансформаторе Тесла мощностью 150 Ватт с обратной связью | 208 |

СЕКЦИЯ 6. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

| | |
|--|-----|
| Кремлёв И.А., Гилев В.А., Зеленин М.В. Моделирование синхронного двигателя с электромагнитной редукцией скорости в Ansys Maxwell..... | 211 |
| Чарков Д.И., Солдатенко Е.Ю. Разработка метода определения короностойкости эмалированных проводов..... | 215 |
| Токарев И.С., Ужастов Ю.Н. Исследование устойчивости работы автономной энергосистемы собственных нужд газокompрессорной станции..... | 219 |
| Кунулеков Д.С. Анализ эксплуатационной надежности силовых трансформаторов..... | 222 |
| Fediuk R.S. Limitation of current single phase ground fault | 226 |
| Минибаев Р.М. Особенности проектирования «интеллектуальных» ветроэнергетических систем в условиях Самарской области .. | 229 |

| | |
|---|-----|
| Овчинников А.А., Филимонова О.В. Оптимизация разработки нефтегазовых месторождений при помощи «интеллектуального» энергоэффективного оборудования | 232 |
| Гладков А.А., Филимонова О.В. Применение вентильных магнитокоммутационных двигателей для повышения энергоэффективности электрооборудования на буровых установках | 235 |
| Яковенко А.Е., Васюков И.В., Мустафаев Р.Р. Микропроцессорная система управления асинхронным генераторным комплексом автономной электроустановки мощностью 30 кВт | 238 |
| Мель М.И. Моделирование электропотребления населённых пунктов с децентрализованным электроснабжением..... | 242 |
| Горбунов А.С. Контрольно-фидерные ячейки тяговых подстанций с удаленным управлением | 245 |
| Воротынцев Д.В., Карпов Н.Д., Муравицкий Я.Л. Разработка системы электроснабжения морского автономного исследовательского буя..... | 249 |
| Падалко Д.А. Возможные толкования процесса самовозбуждения асинхронного генератора для автономных объектов..... | 252 |
| Козюков Д.А. Вопросы применения электрохимических конденсаторов в качестве накопителей в интеллектуальных энергосистемах и системах малой распределенной энергетики на основе ветро-солнечных установок..... | 256 |
| Саенко В.И. Локальные электротехнические комплексы на базе ветроэнергетических установок | 260 |
| Ануфриев О.В., Крапивко П.В. Разработка настольной аэродинамической трубы для изучения характеристик натурной модели ветроэлектрической установки | 263 |
| Молот С.В., Салимов Б.К. Влияние на питающую сеть преобразователей для частотно-регулируемого электропривода | 267 |
| Смолярчук С.А., Федянин А.Л. Оценка параметров законов распределения отказов обмоток статоров при эксплуатации асинхронных двигателей в химической промышленности | 271 |
| Гордеев Е.С. Электромагнитные процессы в источнике питания магнетронного генератора малой мощности..... | 277 |
| Ефименко Ф.С. Исследование возможности рекуперации энергии при торможении гребных электродвигателей судна без использования тормозных резисторов..... | 282 |

Научное издание
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Материалы III Международного молодежного форума
28 сентября-2 октября

Том 2

Издается в авторской редакции

Подписано в печать 05.11.2015. Тираж 50 экз.
Кол-во стр. 291. Заказ 48-15
Бумага офсетная. Формат А5. Печать RISO.
Отпечатано в типографии ООО «РауШ мбх»
634034, г.Томск, ул. Усова 7, оф. 046.
Тел. 8-9528074686