

## **Секция №6**

# **ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ**



## **Scientific section №6**

# **INDUSTRIAL POWER SYSTEMS. ENERGY EFFICIENCY**

# К РАСЧЕТУ ГАЗОМАЗУТНЫХ ГОРЕЛОК ДЛЯ ТОПОК СУШИЛЬНЫХ БАРАБАНОВ

Безруков А.М., Кулагин С.М., Колибаба О.Б.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»  
Иваново, Россия  
e-mail: dronxd23@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Расчет горения мазута и выбор мазутной форсунки для газомазутной горелки – это сложный, многогранный процесс, требующий глубокого понимания физико-химических основ горения, гидродинамики, теплообмена и особенностей различных типов мазутов. В настоящее время в этой области наблюдается активное развитие, обусловленное стремлением к повышению эффективности, снижению эмиссий и адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации. Выбор мазутной форсунки является критически важным для обеспечения эффективного и экологичного горения. Основная задача форсунки – распылить мазут на мелкие капли с равномерным распределением по объему топки, обеспечивая максимальную площадь поверхности для испарения и полного сгорания.

**Материалы и методы:** Использовался аналитический метод.

**Результаты:** Определены теоретическое и необходимое количество воздуха на горение мазута, параметры горения мазута при различных коэффициентах избытка воздуха. Определен размер факела мазутной форсунки. Снижение действительной температуры горения с увеличением коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ). Более высокое значение  $\eta$  (КПД) (меньшие тепловые потери) приводит к более высокой действительной температуре.

**Выводы:** Рассмотрена методика определения основных термодинамических параметров процесса горения мазута, что является фундаментальным шагом для дальнейшего проектирования и оптимизации работы горелок, включая выбор оптимальных условий работы и выбор соответствующей форсунки.

**Ключевые слова:** мазут, горение топлива, мазутная форсунка, газомазутная горелка.

## OPTIMIZATION OF GAS-OIL BURNERS FOR DRYING DRUM FURNACES

Andrei Bezrukov, Sergei Kulagin, Olga Kolibaba  
Ivanovo State Power Engineering University  
Ivanovo, Russia  
e-mail: dronxd23@mail.ru

## Abstract

**Background:** The state of the issue: The calculation of fuel oil combustion and the choice of a fuel oil nozzle for a gas-oil burner is a complex, multifaceted process that requires a deep understanding of the physico-chemical foundations of combustion, hydrodynamics, heat and mass transfer and the characteristics of various types of fuel oil. Currently, there is an active development in this area, driven by the desire to increase efficiency, reduce emissions and adapt to changing operating conditions. The choice of a fuel oil nozzle is critical to ensure efficient and environmentally friendly combustion. The main task of the nozzle is to spray fuel oil into small droplets with uniform distribution over the volume of the furnace, ensuring maximum surface area for evaporation and complete combustion.

**Materials and methods:** The analytical method was used.

**Results:** The theoretical and necessary amount of air for, the parameters of the combustion of fuel oil at different coefficients of excess air are determined. The size of the fuel oil nozzle flare has been determined. A decrease in the actual combustion temperature with an increase in the coefficient of excess air ( $\alpha$ ). A higher value of (lower heat loss) leads to a higher actual temperature.

**Conclusions:** A methodology for determining the basic thermodynamic parameters of the fuel oil combustion process has been performed, which is a fundamental step for further designing and optimizing the operation of burners, including choosing optimal operating conditions and selecting the appropriate nozzle.

**Keywords:** fuel oil, fuel gorenje, fuel oil nozzle, gas-oil burner.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Сжигание жидкого топлива, в частности сернистого мазута марки М100, является ключевым процессом в теплоэнергетике, направленным на получение тепловой энергии. Эффективность и экологичность данного процесса напрямую зависят от тщательного расчета параметров горения. Данная работа посвящена детальному анализу процесса сжигания сернистого мазута марки М100 при заданных условиях: коэффициенте избытка воздуха  $\alpha=1,2$  и температуре подогрева мазута  $130\text{ }^\circ\text{C}$ . Мазут применяется в газомазутных горелках, которые в свою очередь используются в промышленных котлах, печах различного назначения и сушильных установках. Наш расчет применим, в частности, для топок сушильных барабанов для производства минеральных удобрений.

Эффективность и экологическая безопасность работы газомазутных горелок в значительной степени определяются качеством распыления мазута, которое, в свою очередь, напрямую зависит от конструкции и правильного выбора мазутной форсунки. Газомазутные горелки, предназначенные для работы на двух видах топлива, требуют особого подхода к проектированию, поскольку необходимо обеспечить оптимальные условия горения как для газа, так и для мазута, а также их эффективное взаимодействие

## II. РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ МАЗУТА

### 1. Расчет процесса горения жидкого топлива

Мазут сернистый марки М100. Коэффициент избытка воздуха при сжигании мазута  $\alpha=1,2$ . Температура подогрева мазута  $130\text{ }^\circ\text{C}$ . [1]

Состав горючей массы

- $C^r=87,60\%$ ;
- $H^r=10,50\%$ ;
- $S^r=0,90\%$ ;
- $O_2^r=0,50\%$ ;
- $N_2^r=0,50\%$ ;
- $A^p=0,14\%$ ;
- $W^p=10\%$ .

Содержание других элементов в рабочем топливе:

$$C^p = C^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100}, \quad (1.1)$$

где  $C^p$  – содержание отдельной составляющей рабочей массы топлива, % (здесь – углерод),  $C^r$  – содержание той же составляющей горючей массы топлива, %. По формуле 1:

$$C^p = C^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 87,60 \frac{100 - (0,14 + 10)}{100} = 78,717;$$

$$H^p = H^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 10,50 \frac{100 - (0,14 + 10)}{100} = 9,435;$$

$$S^p = S^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 0,90 \frac{100 - (0,14 + 10)}{100} = 0,809;$$

$$N_2^p = N_2^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 0,50 \frac{100 - (0,14 + 10)}{100} = 0,449;$$

$$O_2^p = O_2^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 0,70 \frac{100 - (0,14 + 10)}{100} = 0,449;$$

Теплоту сгорания жидкого топлива  $Q_H^p$ , кДж/кг, можно рассчитать по формуле Менделеева, зная элементарный состав рабочего топлива [3]:

$$\begin{aligned} Q_H^p &= 339C^p + 1030H^p - 108,9(O^p - S^p) - 25W^p = \\ &= 339 \cdot 78,717 + 1030 \cdot 9,435 - 108,9(0,449 - 0,449) - 25 \cdot 10 = 36192,687. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Теоретически необходимый для горения расход сухого воздуха ( $L_0$ ,  $\text{нм}^3/\text{кг}$ ) для жидкого топлива:

$$\begin{aligned} L_0 &= 0,0899C^p + 0,265H^p - 0,0333(O^p - S^p) = \\ &= 0,0899 \cdot 78,717 + 0,265 \cdot 9,435 - 0,0333(0,449 - 0,809) = 9,51. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Действительный расход сухого воздуха ( $L_d$ ,  $\text{нм}^3/\text{кг}$ ):

$$L_d = \alpha L_0 = 1,2 \cdot 9,51 = 11,41 \quad (1.4)$$

При полном сгорании любого топлива образуется следующие газообразные продукты:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{SO}_2$ . Обычно горение происходит с избытком воздуха, поэтому в продуктах горения топлива присутствует  $\text{O}_2$ , содержание которого зависит от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ . Объемы дымовых газов ( $\text{нм}^3/\text{нм}^3$ ) по отдельности рассчитывают по формулам:

Объем продуктов горения кислорода:

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)L_0 = 0,21 \cdot (1,2 - 1) \cdot 9,51 = 0,399 \quad (1.5)$$

Для жидкого топлива:

Объем продуктов горения углекислого газа

$$V_{CO_2} = 0,01855C^p = 0,01855 \cdot 78,717 = 1,46; \quad (1.6)$$

Объем продуктов горения воды:

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= 0,112H^p + 0,0124(W^p + 100w_{\text{пар}}) + 0,0016 \cdot d \cdot L_d = \\ &= 0,112 \cdot 9,435 + 0,0124(10 + 100 \cdot 0,1) + 0,0016 \cdot 3,2 \cdot 11,41 = 1,36, \end{aligned} \quad (1.7)$$

где  $w_{\text{пар}}$  – количество пара, вводимого для распыления жидкого топлива в форсунках высокого давления, кг/кг (принимается  $0,1\text{ кг/кг}$ ).  $d$  – влагосодержание (г/кг сухого воздуха, определяем по среднегодовой температуре воздуха и влажности, при температуре  $1\text{ }^\circ\text{C}$  и влажности  $80\% = 3,2\text{ г/кг}$ ).

Объем продуктов горения сернистого газа:

$$V_{SO_2} = 0,007S^P = 0,007 \cdot 0,809 = 0,0057; \quad (1.8)$$

Объем продуктов горения азота:

$$V_{N_2} = 0,79L_{дл} + 0,008 \cdot N^P = 0,79 \cdot 11,41 + 0,008 \cdot 9,435 = 9,02. \quad (1.9)$$

Общий объем продуктов горения топлива,  $\text{нм}^3/\text{кг}$  ( $\text{нм}^3/\text{нм}^3$  газа), рассчитывают по формуле:

$$V_a = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{SO_2} = 1,46 + 1,36 + 9,02 + 0,399 + 0,0057 = 12,248. \quad (1.10)$$

Суммарная объемная доля трехатомных газов и объемная доля водяных паров в продуктах сгорания (данные нужны для главы 3):

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_a} = \frac{V_{CO_2} + V_{SO_2}}{V_a} = \frac{1,416 + 0,020}{12,248} = 0,12; \quad (1.11)$$

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_a} = \frac{1,36}{12,248} = 0,11; \quad (1.12)$$

$$r_n = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,12 + 0,11 = 0,23. \quad (1.13)$$

Для упрощения определения теоретической температуры горения пользуются  $i - t$  - диаграммой, построенной для продуктов горения топлива с учетом диссоциации, которая приведена на рис. 1 – для низких температур и на рис. 2 – для высоких температур. Пунктирные линии на диаграмме рис. 2 соответствуют калориметрической температуре газов, сплошные – теоретической температуре при разных значениях коэффициента избытка воздуха.

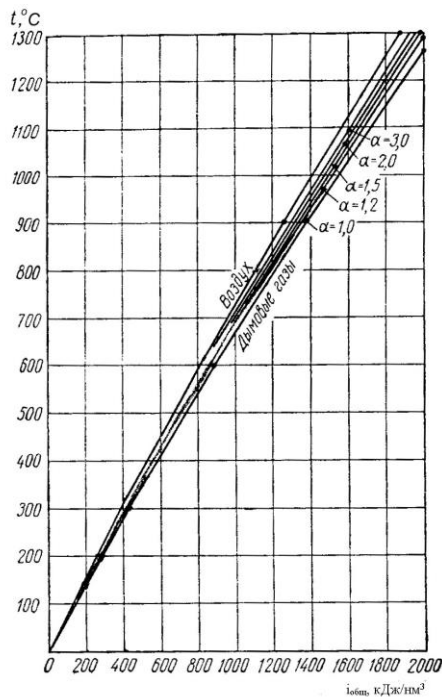


Рис. 1.  $i - t$  - диаграмма низких температур[4]

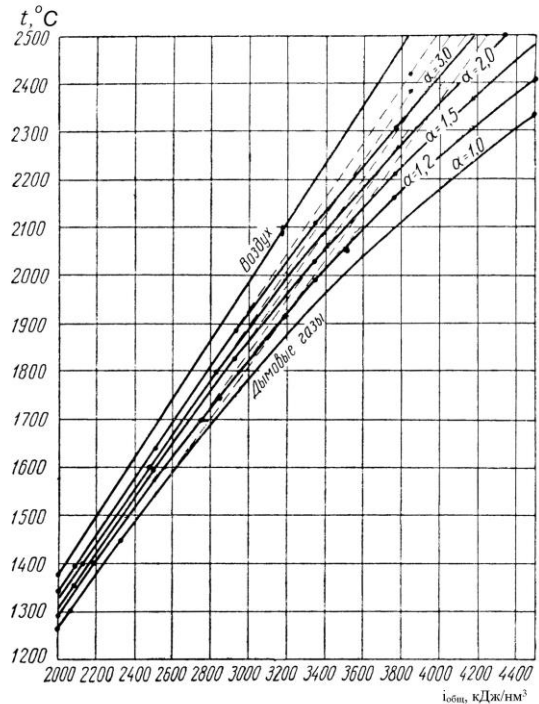


Рис. 2.  $i - t$  - диаграмма высоких температур[4]

Для определения теоретической температуры горения надо рассчитать общую теплоту полного сгорания,  $\text{кДж}/\text{кг}$  с учетом физического тепла топлива и воздуха по формуле:

$$i_{обш} = \frac{Q_H^P}{V_a} + \frac{kL_{дл}^i i_{возд}}{V_a} + \frac{i_{топл}}{V_a} = \frac{36192,687}{12,248} + \frac{2,064 \cdot 130}{12,248} = 2976,9, \quad \text{кДж}/(\text{кг} \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (1.14)$$

где  $i_{топл} = C_{топл} \cdot t_{топл}$  – теплосодержание подогретого топлива; второе слагаемое не учитываем, так как вторичный воздух не подогревается, теплоемкость топлива (мазута,  $\text{кДж}/(\text{кг} \text{ } ^\circ\text{C})$ ) рассчитывают по формуле:

$$C_{топл} = (0,0415 + 0,0006 \cdot t_{топл}) \cdot 4,1868 = (0,0415 + 0,0006 \cdot 130) \cdot 4,1868 = 2,064. \quad (1.15)$$

Рассчитывают действительное теплосодержание продуктов горения топлива с учетом умножения пирометрического коэффициента  $\eta$  на потери тепла от продуктов горения топлива в процессе теплообмена с окружающими их поверхностями:

$$i_{обш\_1} = \eta \cdot i_{обш} = 0,85 \cdot 2976,9 = 2530,4;$$

$$i_{обш\_2} = \eta \cdot i_{обш} = 0,9 \cdot 2976,9 = 2679,2;$$

$$i_{обш\_3} = \eta \cdot i_{обш} = 0,95 \cdot 2976,9 = 2828,1.$$

$$\text{кДж}/(\text{кг} \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (1.16)$$

Значения  $\eta$  зависят от вида топлива и типа печи (определяется  $\eta$  экспериментально).

Далее по рисунку 1 или 2 с учетом пирометрического коэффициента определяем действительную температуру горения мазута. Для автоматизации расчетов аппроксимируем кривую с  $\alpha=1,2$  на рис. 2.

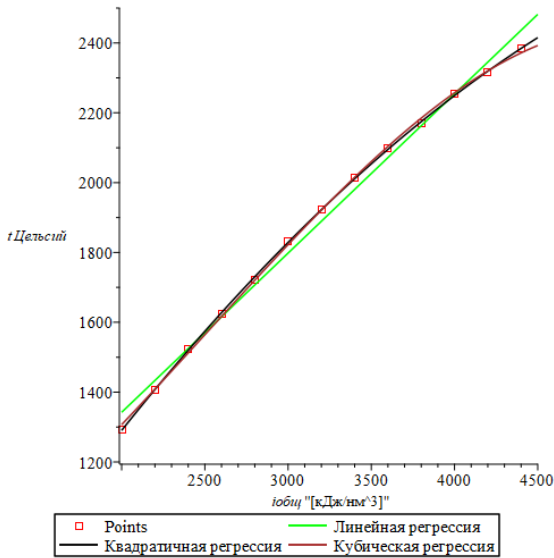


Рис. 3. Аппроксимация зависимости  $t=f(i_{общ})$  для  $\alpha=1,2$

Таким образом получена квадратичная зависимость (°C):

$$t_{теор} = -0,0000589802322677196 \cdot i_{общ}^2 + 0,833400327172745 \cdot i_{общ} - 140,599769230642 = -0,0000589802322677196 \cdot 2976,9^2 + 0,833400327172745 \cdot 22976,9 - 140,599769230642 = 1817,7.$$

(1.17). Коэффициент корреляции  $R^2 = 0,98$ .

По формуле (14) рассчитаем теоретические температуры горения для значений, взятых из формулы (13):

$$t_{реал_1} = -0,0000589802322677196 \cdot 2530,4^2 + 0,833400327172745 \cdot 2530,4 - 140,599769230642 = 1590,6;$$

$$t_{реал_2} = -0,0000589802322677196 \cdot 2679,2^2 + 0,833400327172745 \cdot 2679,2 - 140,599769230642 = 1668,9;$$

$$t_{реал_3} = -0,0000589802322677196 \cdot 2828,1^2 + 0,833400327172745 \cdot 2828,1 - 140,599769230642 = 1744,6;$$

Аналогично рассчитаем процесс горения для разных  $\alpha$ . Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Таблица 1. РАЗЛИЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГОРЕНИЯ ПРИ РАЗНЫХ КОЭФФИЦИЕНТАХ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА

Параметры	Коэффициент избытка воздуха		
	$\alpha=1,2$	$\alpha=1,5$	$\alpha=2$
$t_{реал_1} (\eta=0,85)$	1590,6	1340,4	1055,8
$t_{реал_2} (\eta=0,9)$	1668,9	1413,2	1116,4
$t_{реал_3} (\eta=0,95)$	1744,6	1484,3	1177,1

### III. РАСЧЕТ МАЗУТНОЙ ФОРСУНКИ

Расчет мазутной форсунки с центральным вводом мазута и выхлопной трубой. Распылитель – перегретый пар. Давление пара избыточное – 0.2 МПа, температура –

200°C. Удельный расход распылителя 0.65 кг/кг. Теплота сгорания мазута 40.6 МДж/кг (9700 ккал/кг). Максимальный расход мазута – 0.146 кг/с. [2]

Площадь сечения мазутного сопла:

$$\omega_m = \frac{V_{m \max} * 10^6}{\varphi_c * \rho_m * w_m} = \frac{0,146 * 10^6}{0,5 * 970 * 20} = 15,052 \text{ мм}^2$$

Где  $V_{m \max}$  – максимальный расход мазута, кг/с.  $\varphi_c$  – коэффициент расхода.  $\rho_m$  – плотность мазута, кг/м<sup>3</sup>.  $w_m$  – скорость истечения мазута, м/с.

Диаметр мазутного сопла:

$$d_m = \sqrt{\frac{4 * 15,052}{\pi}} = 4,378 \text{ мм}$$

Скорость истечения перегретого пара из сопла Лавалья определим с помощью i-s диаграммы. При  $P = 0.2$  МПа и  $t = 200^\circ\text{C}$ ,  $h_t = 2850$  кДж/кг,  $h = 2670$  кДж/кг [3].

Скорость истечения пара из сопла Лавалья:

$$w = 44,7 \sqrt{h_t - h} = 44,7 \sqrt{2850 - 2670} = 599,7 \text{ м/с}$$

Расход распылителя

$$G_p = g_p * V_{m \max} = 0,65 * 0,146 = 0,095 \text{ кг/с}$$

Где  $g_p$  – коэффициент расхода распылителя.

Площадь критического сечения сопла Лавалья форсунки:

$$\omega_{кр} = \frac{G \sqrt{T_r}}{k_r * p_r} = \frac{0,095 * \sqrt{473}}{0,0313 * 0,3} = 219,8 \text{ мм}^2$$

Где  $G$  – расход распылителя, кг/с,  $k_r$  – коэффициент перегретого пара.  $p_r$  – давление распылителя, МПа.

Эквивалентный диаметр критического сечения сопла:

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{4 * 95,566}{\pi}} = 16,73 \text{ мм}$$

В выходном сечении сопла Лавалья по h-s диаграмме плотность распылителя  $\rho = 1/v = 0,834$  кг/м<sup>3</sup>. Тогда площадь выходного сечения сопла Лавалья:

$$\omega = \frac{G_p * 100^6}{\rho * w} = \frac{0,095 * 10^6}{0,834 * 599,7} = 189,74 \text{ мм}^2$$

Где  $G_p$  – максимальный расход распылителя, кг/с.  $\rho$  – плотность распылителя, кг/м<sup>3</sup>.  $w$  – скорость истечения распылителя, м/с.

А его эквивалентный диаметр  $d = \sqrt{\frac{4 * 189,74}{\pi}} = 15,543$ .

Скорость распылителя из форсунки  $w_{см} = w \sqrt{\frac{g_p}{g_p + 1}} = 599,71 * \sqrt{\frac{0,65}{0,65 + 1}} = 376,41$  м/с. Тогда площадь сечения выхлопной трубы:

$$\omega_{тр} = \frac{G_p * 10^6}{\rho * w_{см}} = \frac{0,095 * 10^6}{0,834 * 376,41} = 302,3 \text{ мм}^2$$

Где  $G_p$  – максимальный расход распылителя, кг/с.  $\rho$  – плотность распылителя, кг/м<sup>3</sup>.  $w_{см}$  – скорость истечения смеси, м/с.

В этом случае диаметр трубы:

$$D_{тр} = \sqrt{\frac{4 * 302,3}{\pi}} = 19,62 \text{ мм}$$

Отношение  $D_{тр}/d_{кр}=19,62:16,73=1,17$  близко к оптимальному. Площадь сечения мазутного конуса в узком сечении сопла Лавала:

$$\omega_y = \omega_{тр} - \omega_{кр} = 302,3 - 219,8 = 82,5 \text{ мм}^2$$

А его диаметр:

$$d_y = \sqrt{\frac{4 * 82,5}{\pi}} = 10,25 \text{ мм}$$

Площадь сечения мазутного конуса в выходном сечении сопла Лавала:

$$\omega_{ш} = \omega_{тр} - \omega = 302,3 - 189,74 = 112,56 \text{ мм}^2$$

А его диаметр:

$$d_{ш} = \sqrt{\frac{4 * 112,56}{\pi}} = 11,97 \text{ мм}$$

Длина выхлопной трубы:  $l_{тр} = 10D_{тр} = 10 * 19,62 = 196,2 \text{ мм}$

Длина сопла Лавала:  $l_c = \frac{d_{кр}-d_{ш}}{0,122} = \frac{16,73-11,97}{0,122} = 38,99 \text{ мм}$

Стехиометрическую длину факела рассчитываем при  $gr=0$ . При коэффициенте расхода воздуха  $\alpha = 1,2$  и температуре воздуха - 1000 °С, теоретическая температура горения мазута – 2270 °С[2]. Тогда:

$$\psi_{\phi} = \frac{0,6 * (t_{\alpha}^r + 273)}{1000 + 273} = \frac{0,6(2270 + 273)}{1000 + 273} = 1,18$$

$$\theta_{\phi} = \frac{\rho_B}{\rho_{нач}} = \frac{1,293 * 273}{0,834 * 1273} = 0,327$$

$$\frac{c_{нач}}{c_{сх}} = \frac{L_{0м} * \rho_B + g}{g} = \frac{10,4 * 1,293 + 0,65}{0,65} = 21,69$$

$$\frac{l_{сх}}{d_0} = 5,7 \sqrt{\frac{\psi_{\phi}}{\theta_{\phi}}} * \frac{c_{нач}}{c_{сх}} = 5,7 * \sqrt{\frac{1,18}{0,327}} * 21,69 = 234,72$$

Так как  $d_0 = D_{тр} = 19,62 \text{ мм}$ , то  $l_{сх} = 234,72 * 19,62 = 4605 \text{ мм} = 4,605 \text{ м}$

Полная длина факела:  $l_{\phi} = 2l_{сх} = 2 * 4,605 = 9,21 \text{ м}$

#### IV. ВЫВОД

Проведенное исследование демонстрирует эффективность применения аналитического метода для расчета как термодинамических параметров горения мазута, так и для определения основных геометрических размеров мазутной форсунки. Результаты работы могут служить основой для дальнейшего проектирования, оптимизации и модернизации газомазутных горелок. Особое внимание было уделено взаимосвязи параметров горения и характеристик форсунки, что подчеркивает важность комплексного подхода к разработке таких систем. Выполненные расчеты будут служить основой для дальнейшего проектирования, модернизации и оптимизации работы газомазутных горелок в сушильных установках, способствуя повышению их производительности, снижению энергопотребления и минимизации вредных выбросов. Особое внимание к конкретным условиям применения, таким как использование сернистого мазута и пароструйное распыление, позволяет получить практически применимые результаты для оптимизации технологических процессов, например, в производстве минеральных удобрений.

#### Список литературы

- [1] Е. М. Акимова, А. В. Макаров. Тепловые процессы и агрегаты тугоплавких неметаллических и силикатных материалов Методические указания.//Москва – 2014 г. – С.56
- [2] Лисиенко В.Г. Щелоков Я.М. Ладьгичев М.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование. //«Теплотехник» - 2004 г. – Книга 1 – С.604
- [3] Лисиенко В.Г. Щелоков Я.М. Ладьгичев М.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование. //«Теплотехник» - 2004 г. – Книга 2 – С.832
- [4] Расчеты горения топлива. Методические указания к выполнению курсового проекта/ Сост. Е.М. Акимова, С.А. Першиков. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2006. – 28 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДОВОДЯНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ

Газизуллин К.Ф.<sup>1</sup> Менделеев Д.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», <sup>2</sup>АО «Татэнерго»

Казань, Россия

e-mail: Dylankn@ya.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Актуальность вопроса о повышении эффективности парогазовой установки за счет включения в схему водоводяных теплообменников обусловлена необходимостью снижения затрат на производство энергии и уменьшения негативного воздействия на окружающую среду. Внедрение таких теплообменников способствует улучшению общей эффективности работы парогазовой установки, что делает этот вопрос актуальным для исследования и внедрения в практику.

**Материалы и методы:** Анализ технических решений установки водоводяных теплообменников в цикл парогазовой установки и анализ параметров в процессе эксплуатации.

**Результаты:** Проанализировав работу систем водоводяных теплообменников, выявили ключевые эксплуатационные параметры, от которых зависит их эффективность. На основе полученных данных были разработаны рекомендации по использованию этих установок.

**Выводы:** Использование водоводяных теплообменников в цикле парогазовой установки позволяет повысить коэффициент полезного действия котла-утилизатора, а, следовательно, и установки в целом, снизить тепловое воздействие на окружающую среду и более эффективно использовать затраченные ресурсы.

**Ключевые слова:** парогазовая установка, котел-утилизатор, сетевая вода, повышение КПД, теплообменники, теплоэлектростанция.

# INVESTIGATION OF THE IMPACT OF WATER-TO-WATER HEAT EXCHANGERS ON THE ENERGY EFFICIENCY OF A COMBINED CYCLE POWER PLANT

Kamil Gazizullin <sup>1</sup>, Dmitrii Mendeleev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, <sup>2</sup>JSC "TATENERGO"

Kazan, Russian Federation

e-mail: Dylankn@ya.ru

## Abstract

**Background:** The relevance of the issue of increasing the efficiency of a combined cycle plant by including water-to-water heat exchangers in the circuit is due to the need to reduce energy production costs and reduce the negative impact on the environment. The introduction of such heat exchangers helps improve the overall operating efficiency of a combined-cycle plant, which makes this issue relevant for research and implementation in practice.

**Materials and Methods:** Analysis of technical solutions for installing water-to-water heat exchangers in the cycle of a combined-cycle plant and analysis of parameters during operation.

**Results:** Having analyzed the operation of water-to-water heat exchanger systems, we identified key operational parameters on which their efficiency depends. Based on the data obtained, recommendations for the use of these installations were developed.

**Conclusions:** The use of water-to-water heat exchangers in the cycle of a combined-cycle plant makes it possible to increase the efficiency of the waste heat boiler, and, consequently, the installation as a whole, reduce the thermal impact on the environment and use expended resources more efficiently.

**Key words:** combined cycle plant, waste heat boiler, network water, increasing efficiency, heat exchangers, thermal power plant.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире, где вопросы экологии и энергосбережения становятся все более актуальными, поиск новых способов повышения эффективности энергетических установок является важной задачей. Одним из перспективных направлений является включение в схему парогазовых установок (ПГУ) водоводяных теплообменников (ВВТО), которые могут существенно улучшить показатели работы таких установок.

Целью данной статьи является анализ возможностей и преимуществ использования ВВТО в схемах ПГУ, а также определение основных факторов, влияющих на эффективность такого подхода. В ходе исследования будут рассмотрены различные аспекты применения ВВТО, включая их конструкцию, принцип действия, а также потенциальные проблемы и ограничения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Изучить основные принципы работы ПГУ и ВВТО.
- Рассмотреть существующие методы повышения эффективности ПГУ.
- Определить преимущества и недостатки использования ВВТО в схемах ПГУ.
- Оценить влияние ВВТО на экологические и экономические показатели работы ПГУ. [1, 2]

## II. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП РАБОТЫ ВОДОВОДЯНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

ВВТО предназначен для проведения процесса теплообмена между охлаждаемой и нагреваемой водой. Теплообменник используется в качестве подогревателя сетевой воды

ВВТО позволяет обеспечить максимальную утилизацию тепла дымовых газов за счёт подачи части конденсата после ГПК (газовый подогреватель конденсата) котла с помощью насосов рециркуляции конденсата на ВВТО для подогрева сетевой воды теплофикационной установки блока. Охлажденный конденсат после передачи тепла сетевой воды возвращается в контур основного конденсата. Температура конденсата перед ГПК должна поддерживаться не менее 60°C для исключения низкотемпературной коррозии. [3-6]

Для исследования был взят теплообменный аппарат ВВТ-200-1350-1 изготовленный ЗАО «Гидролекс» (ВВТ – тип; 200 - условный диаметр трубного пучка; 1350 – длина трубного пучка; 1 – число ходов по трубному пространству).

Основные технические характеристики котла – утилизатора и водоводяного теплообменника представлены в таблице I и II.

На рис. 1 изображена конструкция установленного теплообменника кожухотрубного типа.

Таблица I. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА Е-114/16-8,1/0,7-535/218-3,8ВВ

№	Наименование	Размерность	Значение
1	Паропроизводительность контура высокого давления	т/ч	114
2	Паропроизводительность контура низкого давления	т/ч	16
3	Давление пара на выходе из контура высокого давления (абс.)	МПа	8,1
4	Давление пара на выходе из контура низкого давления (абс.)	МПа	0,7
5	Температура пара на выходе из контура высокого давления	°С	535
6	Температура пара на выходе из контура низкого давления	°С	218

Таблица II. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДОВОДЯНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ВВТ-200-1350-1

№	Наименование	Размерность	Значение
1	Нагреваемая среда	Вода	
2	Греющая среда	Вода	
3	Теплосъём	Гкал/час	3,97
4	Расход нагреваемой среды, не более	т/ч	162,76
5	Температура нагреваемой среды:		
	- на входе	°С	46,7
	- на выходе	°С	70,1
6	Расход греющей среды, не менее	т/ч	46,91
7	Температура греющей среды:		
	- на входе	°С	159,0
	- на выходе	°С	78
8	Гидродинамическое сопротивление, не более:		
	- по трубной полости	кгс/см <sup>2</sup>	0,77
	- по межтрубной полости	кгс/см <sup>2</sup>	0,06
9	Рабочее давление сред, не более:		
	- греющей	кгс/см <sup>2</sup>	20,0
	- нагреваемой	кгс/см <sup>2</sup>	20,0



Рис. 1. Конструкция теплообменного аппарата ВВТ-200-1350-1

На рис. 2 изображена схема включения ВВТО в схему котла-утилизатора парогазовой установки.

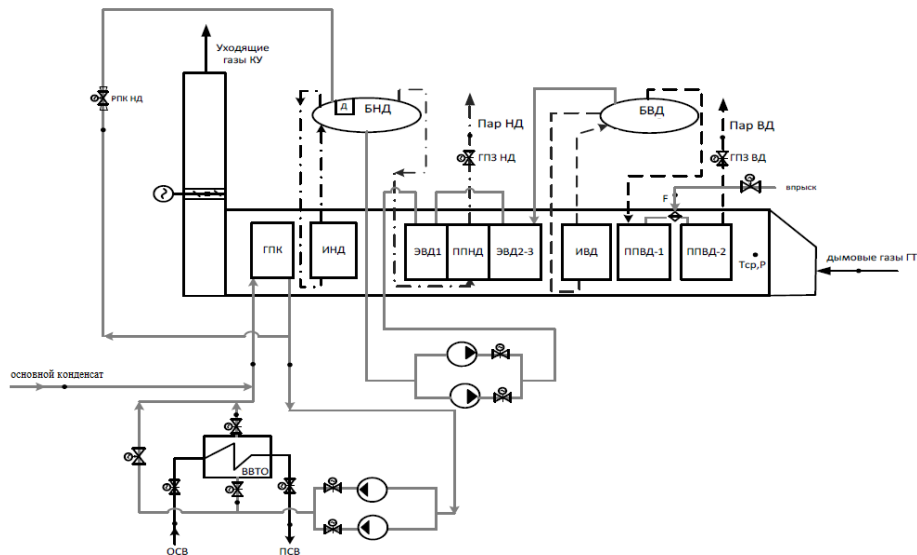


Рис. 2. Схема включения водоводяного теплообменника в схему котла-утилизатора парогазовой установки  
 где БНД – барабан высокого давления; БНД – барабан низкого давления; ГПК – газовый подогреватель конденсата; ИНД – испаритель низкого давления; ЭВД-1,2,3 – экономайзер высокого давления 1,2,3 ступени; ППНД – пароперегреватель низкого давления; ИВД – испаритель высокого давления; ППВД-1,2 – пароперегреватель высокого давления 1,2 ступени; ВВТО – водоводяной теплообменник; ГПЗ – главная паровая задвижка; РПК – регулятор питания котла; ГТ – газовая турбина; КУ – котел-утилизатор

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ В СХЕМУ ВОДОВОДЯНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

При работе ВВТО в режиме утилизации тепла, когда поддерживается заданный недогрев конденсата, изменение нагрузки ВВТО не вызывает изменения генерации пара в контуре низкого давления, но оказывает существенной влияние на температуры уходящих газов котла:

- увеличение нагрузки ВВТО на 1МВт снижает температуру уходящих газов на 4,6 °С при максимальной нагрузке ГТУ и на 7,9 °С при минимальной.

На рис. 3 изображен график зависимости массового расхода дымовых газов, поступающих в котел-утилизатор и их температуры от нагрузки газовой турбины на базовом режиме в диапазоне нагрузок от 80 до 85 МВт

Влияние изменения температуры конденсата ( $\Delta T_k$ , °С) на температуру уходящих газов оценивается через уравнение теплового баланса ГПК с использованием эмпирических коэффициентов (1):

$$\Delta T_{ух} = 0,85 \frac{C_{рк}}{C_{рз}} \frac{D_k}{F_z} \Delta T_k \quad (1)$$

где  $C_{рк}/C_{рз}$  – отношение изобарных теплоемкостей конденсата и дымовых газов, слабо зависящее от режима котла и равное 3,95;

$D_k/F_z$  – отношение расходов конденсата, питающего БНД котла и дымовых газов. На максимальной нагрузке это соотношение равно 5,87, на минимальной нагрузке составляет 5,56.

Отклонение температуры основного конденсата на 10 °С приводит к изменению температуры уходящих газов на 5,4 °С при минимальной нагрузке ГТУ, или на 5,9 °С на максимальной нагрузке.

Влияние изменения тепловой нагрузки ВВТО на температуру уходящих газов так же оценивается

соотношением, полученным из уравнения теплового баланса ГПК (2):

$$\Delta T_{ух}^{ввто} = \frac{-380}{C_{рг} \cdot G_{дг}} \Delta Q_{ввто} \quad (2)$$

где  $\Delta Q_{ввто}$  [МВт] – изменение тепловой мощности ВВТО;

$C_{рг}$  – изобарная теплоемкость уходящих газов, составляющая около 1,06 кДж/(кг·К);

$G_{дг}$  [кг/с] – расход дымовых газов.

В среднем изменение нагрузки ВВТО на 1 МВт тепловой мощности сопровождается изменением температуры уходящих газов на 1,8°С при максимальной нагрузке ГТУ и на 3°С при минимальной нагрузке.

Линейную зависимость имеет относительные потери тепла с уходящими газами ( $q_2$ ) от теплосодержания выхлопа ГТУ. На верхней границе диапазона регулирования газовой турбины значение потерь тепла с уходящими газами составляет 16,8%. С уменьшением нагрузки до нижней границе диапазона регулирования ГТУ потеря тепла с уходящими газами плавно снижается, стремясь к значению 14%.

При теплосодержании потока дымовых газов ГТУ на уровне 140 МВт КПД котла имеет выраженный максимум, составляющий около 82,4%. При наборе максимальной нагрузки КПД снижается до 81%. При выходе на минимальную нагрузку КПД котла понижается до 81,8% (рис. 3, 4).

Дополнительное преимущество ВВТО – увеличение тепловой мощности парогазовой установки – при расходе сетевой воды на уровне 140-160 т/ч и расходе основного конденсата 50-60 т/ч, осуществляется подогрев сетевой воды на 25-30 градусов, что дает снижение удельного расхода топлива на выработку электроэнергии до 2-5 г/кВт·ч [7].

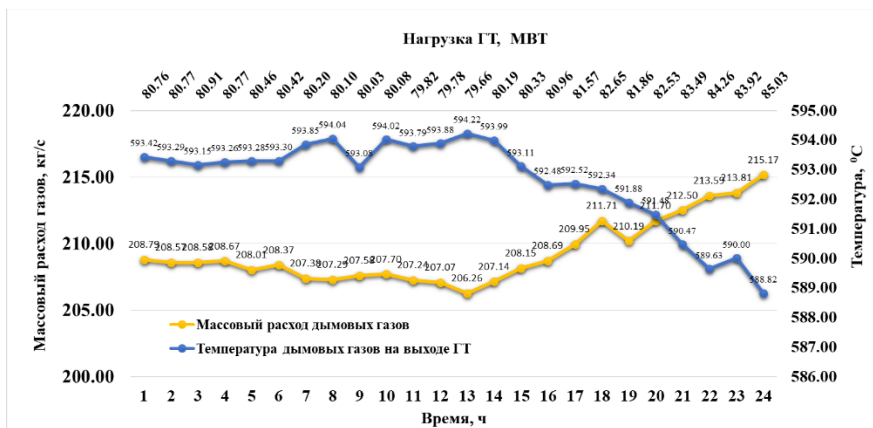


Рис. 3. Зависимость массового расхода дымовых газов и их температуры от нагрузки ГТ в базовом режиме (80-85 Мвт)

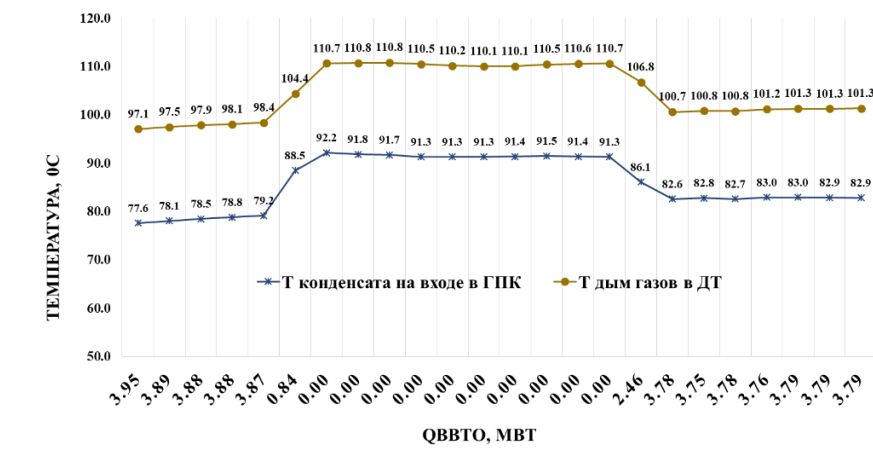


Рис. 4. Зависимость температуры дымовых газов на выходе из дымовой трубы и температуры конденсата на входе ГПК от тепловой мощности ВВТО

#### IV. ВЫВОДЫ

Одним из перспективных направлений повышения эффективности работы парогазовых установок является включение в схему водоводяных теплообменников. Такая модернизация позволяет снизить расходы тепла с уходящими газами (снижение температуры уходящих газов на величину до 10 °С) и дополнительно подогреть сетевую воду (до 4 Гкал/ч), тем самым повысив общий КПД системы.

Кроме того, использование теплообменников способствует снижению выбросов вредных веществ в атмосферу за счет уменьшения потребления топлива. Таким образом, внедрение водоводяных теплообменников в схему ПГУ является перспективным направлением для дальнейшего развития и модернизации энергетических установок

#### Список литературы

[1] Менделеев, Д. И. Экологическая трансформация энергетики: сокращение удельных выбросов и зависимость от внешних условий / Д. И. Менделеев, Д. А. Россихин, Л. А. Галимзянов // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. – 2023. – № 2(140). – С. 121-125. – EDN KQGDIS.

[2] Сайфуллина, Э. И. Теплообменные аппараты высокого давления / Э. И. Сайфуллина // XXVI Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика : материалы докладов : в 3 т., Казань, 06–07 декабря 2022 года. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 203-206. – EDN SPMXPK.

[3] Опыт модернизации кожухотрубных водоводяных теплообменных аппаратов ТЭС / А. Ю. Рябчиков, Ю. М. Бродов, С. И. Хаэт [и др.] //

Энергетические машины и установки. – 2008. – № 1-2. – С. 20-26. – EDN ILAGJP.

[4] Marin, G. E. A study on the operation of a gas turbine unit using hydrogen as fuel / G. E. Marin, D. I. Mendeleev, B. M. Osipov // Journal of Physics: Conference Series, Moscow, 18–21 мая 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 012055. – DOI 10.1088/1742-6596/1891/1/012055. – EDN AUDYUJ.

[5] Менделеев, Д. И. К вопросу экологии в промышленности: влияние окружающей среды на работу оборудования / Д. И. Менделеев // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Тезисы докладов Двадцать девятой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 16–18 марта 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2023. – С. 646. – EDN YJYPVV.

[6] Марьян, Г. Е. Анализ влияния основных параметров паротурбинного цикла на эффективность работы бинарных ПГУ / Г. Е. Марьян, Д. И. Менделеев, Р. Р. Гайнутдинов // Электроэнергетика глазами молодежи-2019 : материалы юбилейной X Международной научно-технической конференции, Иркутск, 16–20 сентября 2019 года. Том 1. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. – С. 276-279. – EDN QMJZDS.

[7] Менделеев, Д. И. Применение и использование ресурсов тепловых электростанций для выработки электроэнергии / Д. И. Менделеев, Г. Е. Марьян // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 21–24 апреля 2020 года. Том 1. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2020. – С. 222-226. – EDN SNJXAT.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО АКТИВНОГО КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ С МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Дарьенков А.Б., Петухов Н.М., Тихонов А.П., Чугров А.А., Храмов А.Е.  
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»  
Нижний Новгород, Россия  
e-mail: petunikolai@gmail.com

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Нелинейный характер большинства устройств, подключаемых к сети, приводит к гармоническим искажениям в сети и ухудшению качества электроэнергии. Это может привести к негативным последствиям: перегрев трансформаторов и нарушение электромагнитной совместимости. Наиболее перспективным решением данной проблемы является применение активных корректирующих устройств.

**Материалы и методы:** Имитационное моделирование активного корректора коэффициента мощности осуществлялось в программном обеспечении *MATLAB Simulink*.

**Результаты:** Результаты моделирования показали высокую эффективность предложенного решения: коэффициент мощности равен 0,99, коэффициент гармонических искажений (*THD*) составил 2,95%, а КПД устройства – 97%. Пульсации выходного напряжения и тока не превысили 3-5%. Эксперименты на макетном образце подтвердили корректную работу алгоритма управления, синусоидальную форму потребляемого тока и допустимый уровень пульсаций выходных параметров (менее 5%).

**Выводы:** Проведенные исследования подтвердили адекватность разработанной имитационной модели и эффективность предложенного синхронного алгоритма управления для активного корректора коэффициента мощности. Устройство демонстрирует высокие показатели качества потребляемой электроэнергии и неизменность выходных параметров, что позволяет рекомендовать его для применения с целью подавления высших гармоник и улучшения электромагнитной совместимости нелинейных нагрузок с сетью.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, микропроцессорная система управления, коэффициент гармонических составляющих.

## RESEARCH OF A SINGLE-PHASE ACTIVE POWER FACTOR CORRECTOR WITH A MICROPROCESSOR CONTROL SYSTEM

Andrey Dar`enkov, Nikolai Petukhov, Artyom Tikhonov, Alexander Chugrov, Anton Khramov  
Nizhniy Novgorod State Technical University  
Nizhniy Novgorod, Russia  
e-mail: petunikolai@gmail.com

## Abstract

**Background:** The non-linear nature of most devices connected to the network leads to harmonic distortion in the network and a deterioration in the quality of electricity. This can lead to negative consequences: overheating of transformers and violation of electromagnetic compatibility. The most promising solution to this problem is the use of active corrective devices.

**Materials and methods:** Simulation of the active power factor corrector was performed in the *MATLAB Simulink* software.

**Results:** The simulation results showed the high efficiency of the proposed solution: the power factor is 0.99, the harmonic distortion coefficient (*THD*) is 2.95%, and the efficiency of the device is 97%. The output voltage and current fluctuations did not exceed 3-5%. Experiments on the mock-up sample confirmed the correct operation of the control algorithm, the sinusoidal shape of the current consumed and the permissible level of output parameter ripples (less than 5%).

**Conclusions:** The conducted studies have confirmed the adequacy of the developed simulation model and the effectiveness of the proposed synchronous control algorithm for the active power factor corrector. The device demonstrates high quality indicators of the consumed electric power and immutability of output parameters, which makes it possible to recommend it for use in order to suppress higher harmonics and improve electromagnetic compatibility of nonlinear loads with the network.

**Key words:** electromagnetic compatibility, microprocessor control system, harmonic coefficient.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных источников электроснабжения для большинства потребителей является электрическая сеть переменного тока. Однако в современных энергосистемах городов и промышленных предприятий наблюдается рост доли нелинейных нагрузок, к которым относятся компьютерная и бытовая техника, промышленное оборудование (сварочные аппараты, системы индукционного нагрева), а также преобразователи зарядных устройств.

Большинство таких устройств подключаются к сети через сетевые выпрямители [1]. Поскольку в качестве входного преобразователя преимущественно используются неуправляемые выпрямители, потребляемый из сети ток имеет несинусоидальную форму. Это явление приводит к существенному искажению питающего напряжения из-за возникновения высших гармоник.

При относительно малой мощности нелинейных потребителей (до 10-15% от общей нагрузки) значительных искажений напряжения не возникает. Однако при превышении этого порога форма напряжения существенно ухудшается, что может повлечь за собой ряд негативных последствий, включая перегрев трансформаторов, обрыв нулевого провода и т.д. [2].

Наиболее перспективным подходом к решению данной проблемы считается внедрение активных корректирующих

устройств [3, 4]. Преобразователи, построенные по данной технологии, обеспечивают подавление высших гармоник, тем самым улучшая электромагнитную совместимость (ЭМС) и минимизируя вредное влияние нелинейных нагрузок на электрическую сеть.

## II. АНАЛИЗ РАБОТЫ ОДНОФАЗНОГО АКТИВНОГО КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Исследуемый авторами вариант построения активного корректора коэффициента мощности (ККМ) построен по топологии повышающего широтно-импульсного преобразователя с дросселем звена постоянного тока. Использование такого схмотехнического решения позволило несколько упростить систему управления преобразователем, которая, в свою очередь, построена по известной двухконтурной системе подчиненного регулирования тока и внешним контуром стабилизации напряжения. Управление осуществляется за счет изменения относительной длительности включения  $D$  силового транзистора  $VT1$  (рис. 1).

Анализ работы однофазного активного ККМ осуществлялся на основе имитационных моделей устройства, разработанных согласно структурной схеме (рис. 1).

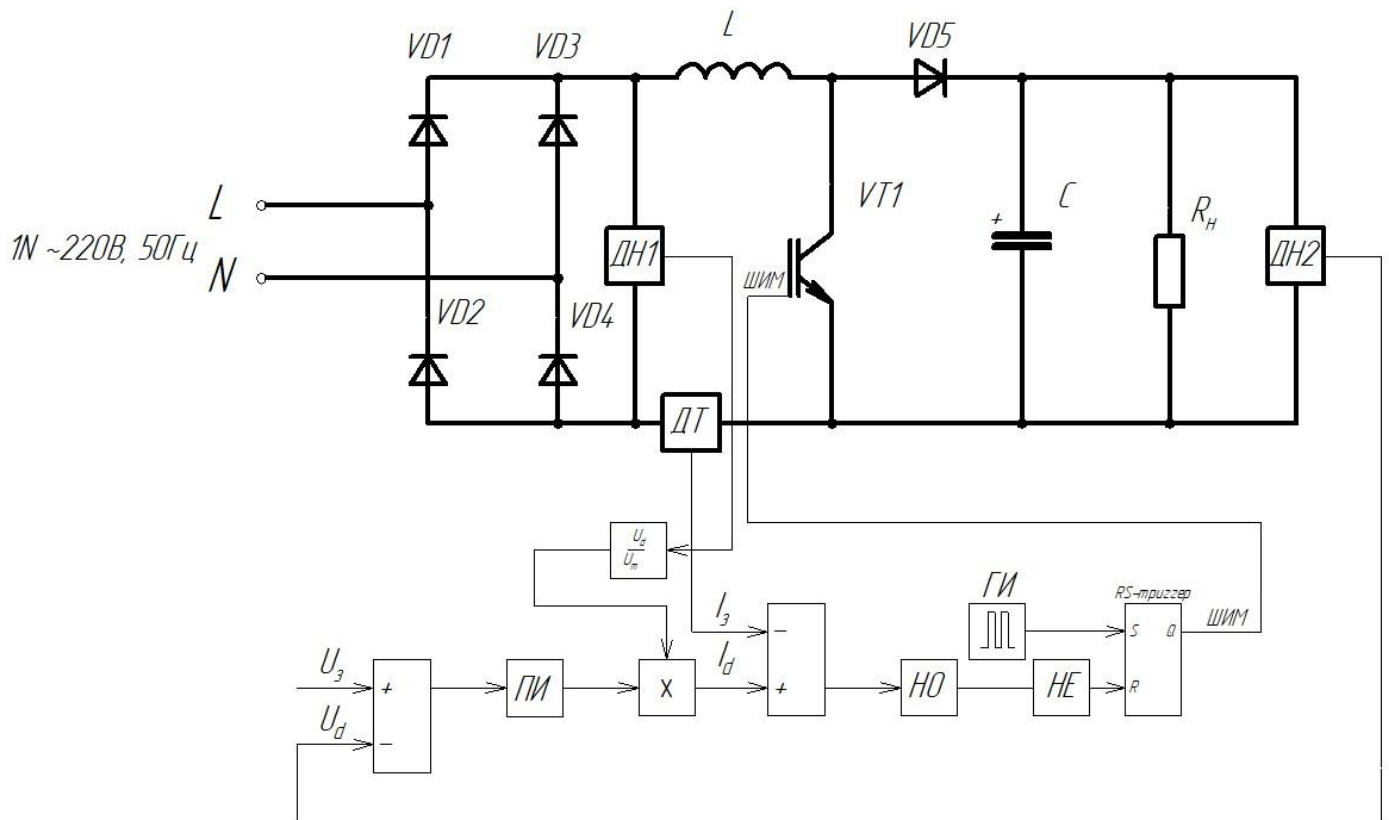


Рис. 1. Структурная схема однофазного активного ККМ: ДН1, ДН2 – датчики напряжения; ДТ – датчик тока;  $\frac{U_d}{U_m}$  – блок задания формы кривой потребляемого тока; ПИ – пропорционально-интегральный регулятор; НО – нуль-орган; ГИ – генератор импульсов; НЕ – блок инверсии

Исходные параметры для имитационного моделирования приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ИССЛЕДУЕМОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Наименование параметра	Значение
Амплитуда переменного питающего напряжения, В	311
Индуктивность проводов, Гн	0,00001
Активное сопротивление проводов, Ом	0,1
Сопротивление токоограничивающего резистора, Ом	10
Индуктивность накопительного дросселя, Гн	0,003
Емкость выходного конденсатора фильтра, Ф	0,001
Сопротивление нагрузки, Ом	300

Исследование проводилось на модели ККМ с частотой ШИМ ( $f_{sw}$ ) 50 кГц. В рамках имитационного моделирования была проанализирована зависимость коэффициента нелинейных искажений от частоты переключения силового ключа. Количественный состав высших гармоник был установлен посредством применения метода спектрального анализа Фурье. Моделирование подтвердило высокую эффективность использования активного ККМ совместно с неуправляемым выпрямителем. При использовании синхронного алгоритма управления в режиме непрерывного тока коэффициент мощности ( $k_m$ ) преобразователя достиг значения 0,99, как показал анализ временных диаграмм, потребляемых из сети тока и напряжения (рис. 2).

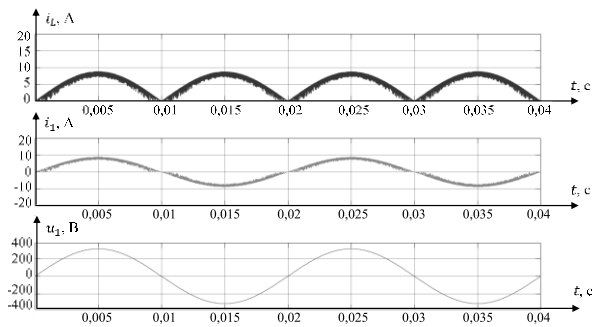


Рис. 2. Временные диаграммы сигналов питающего напряжения, потребляемого тока и тока дросселя при  $f_{sw} = 50$  кГц

Временные диаграммы выходных напряжения и тока (рис. 3) показывают, что пульсации данных величин составляют менее 3%, что демонстрирует устойчивость используемой системы управления активного ККМ.

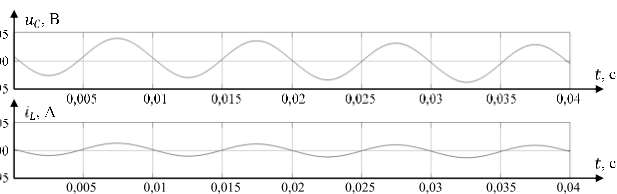


Рис. 3. Временные диаграммы напряжения нагрузки и тока нагрузки при  $f_{sw} = 50$  кГц

Проведенный анализ Фурье потребляемого тока (рис. 4) выявил незначительный уровень высших гармоник ( $THD = 2,95\%$ ), что существенно ниже коэффициента нелинейных искажений классических неуправляемых

выпрямителей. Коэффициент полезного действия схемы при этом составляет 97%.

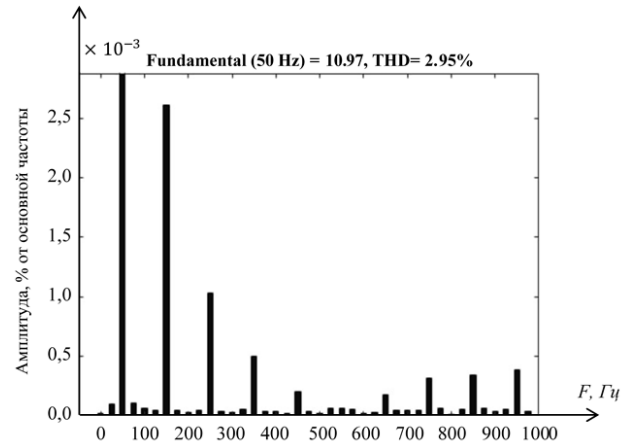


Рис. 4. Спектральный анализ потребляемого из сети тока активным ККМ с синхронным алгоритмом управления при  $f_{sw} = 50$  кГц

### III. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА АКТИВНОГО ККМ

Опираясь на результаты имитационного моделирования разработан макетный образец однофазного активного ККМ пониженного напряжения с цифровой системой управления, построенной на базе микропроцессора *STM32F429* [6]. Программа управления выполнена согласно блок-схеме (рис. 5).

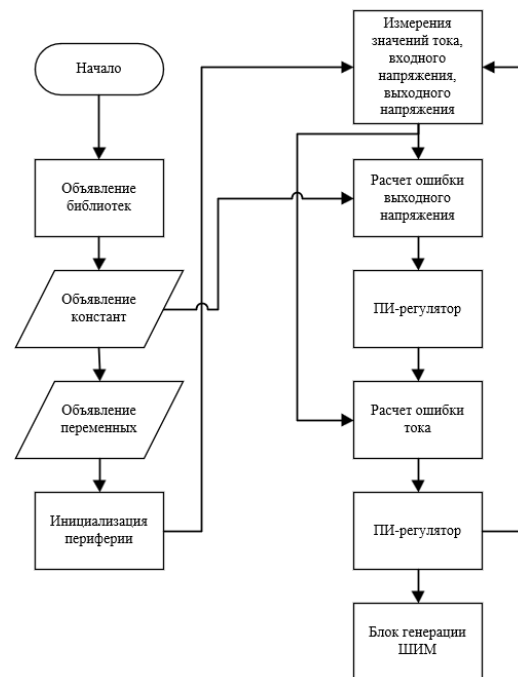


Рис. 5. Блок-схема программы разработанного алгоритма

Корректность имитационного моделирования и разработанного алгоритма управления преобразователем подтверждается осциллограммами, полученными в ходе практических экспериментов (рис. 6, 7).

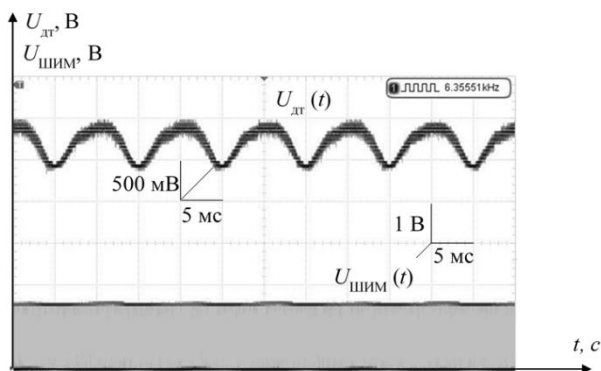


Рис. 6. Осциллограммы с датчика тока дросселя и ШИМ-сигнала управления силовым транзистором ККМ

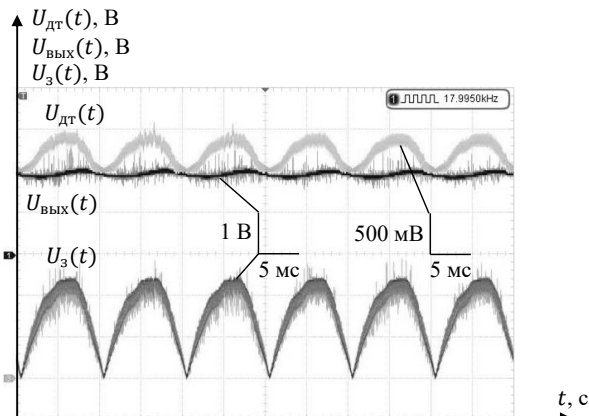


Рис. 7. Осциллограммы сигналов тока дросселя с датчика тока, напряжения нагрузки и напряжения задания

Результаты эксперимента подтвердили корректную работу системы управления ККМ. Ток дросселя имеет однополярную синусоидальную форму, точно соответствующую напряжению задания (рис. 6), а пульсации выходного напряжения не превышают 5%.

При работе на пониженном напряжении выходные параметры составили:

- $P_{\text{вых}} = 1,2 \text{ кВт}$ ;
- $U_{\text{вых}} = 200 \text{ В}$ ;
- $I_{\text{вых}} = 6 \text{ А}$ .

Сравнение данных моделирования и натурального эксперимента (рис. 2, 3 и рис. 6, 7) выявило два ключевых отличия:

1. Размах пульсаций тока дросселя оказался на 3% меньше, чем в модели.
2. На осциллограмме, полученной в ходе исследования макета (рис. 7), наблюдается неидеальная, слегка искаженная синусоидальная форма тока дросселя.

Объяснение этого расхождения заключается в разной степени идеализации источников питания. В модели источник питания идеален и обеспечивает чисто синусоидальное сетевое напряжение независимо от типа нагрузки. В реальном эксперименте форма задающего напряжения, снимаемого с датчика на выходе неуправляемого выпрямителя, уже содержит

незначительные искажения из-за электромагнитных помех в сети, что приводит к деформации синусоиды тока.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное имитационное исследование однофазного активного ККМ, работающего на разработанном авторами, синхронном алгоритме управления, продемонстрировало следующие результаты: коэффициент мощности, стремящийся к единице ( $k_M = 0,99$ ), КПД на уровне 97%, незначительный уровень высших гармоник ( $THD = 2,95\%$ ) и пульсации выходных сигналов ниже 3%.

Верификация этих данных была выполнена на физическом макете. Сопоставление результатов моделирования и натурального эксперимента подтвердило адекватность разработанной цифровой системы управления транзисторным ключом. В ходе испытаний макетного образца была зафиксирована синусоидальная форма потребляемого тока, синфазная напряжению сети, при уровне пульсаций выходных параметров менее 5%.

Работа выполнена в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (тема № FSWE-2025-0002).

#### Список литературы

- [1] Бердников, И.Е. Электромагнитная совместимость частотно-регулируемого электропривода с питающей сетью / И.Е. Бердников, А.Б. Дарьенков, А.А. Лабутина, А.П. Слuzов, В.В. Соколов // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. мат. конф., 2020. – С. 58-67.
- [2] Ваняев, В. В. Преобразовательная техника: учеб. пособие / В.В. Ваняев. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2020. – 135 с.
- [3] Храмов, А.Е. Имитационное моделирование однофазного выпрямителя с корректором коэффициента мощности / А.Е. Храмов, А.Б. Дарьенков, В.В. Соколов, И.Е. Бердников, А.П. Слuzов, Н.М. Петухов // Актуальные проблемы энергетики: сб. мат. конф., 2023. – С. 12-22.
- [4] Чугров, А.А. Имитационное и экспериментальное изучение однофазного активного выпрямителя / А.А. Чугров, Н.М. Петухов // Тинчуринские чтения – 2024 «Электроэнергетика и цифровая трансформация»: Международная молодежная научная конференция. В четырех томах, Казань, 24-26 апреля 2024 г. – Казань: КГЭУ, 2024. – С. 367-370. – EDN LOPRDX.
- [5] Петухов, Н.М. Разработка исследовательского образца активного корректора коэффициента мощности с цифровой системой управления / Н.М. Петухов, А.А. Чугров, А.Е. Храмов // Будущее технической науки: тез. докл. XXIV Всероссийской молодежной науч.-техн. конф. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2025. – С. 117-118.
- [6] Храмов, А.Е. Особенности цифрового управления преобразователей постоянного напряжения / А.Е. Храмов, Н.М. Петухов, А.А. Чугров // Завалишинские чтения: сб. мат. конф., 2025. – С. 429.

# ИМИТАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Дарьенков А.Б., Чугров А.А., Уткин Е.А., Петухов Н.М., Храмов А.Е.  
Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева  
Нижний Новгород, Россия  
e-mail: sanek\_chugrov@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В современной силовой электронике актуальной задачей является создание эффективных и компактных преобразователей, обеспечивающих высококачественное потребление энергии из сети. Одним из ключевых элементов таких систем является активный выпрямитель, функциями которого являются преобразование переменного тока в постоянный, регулирование напряжения звена постоянного тока и минимизация негативного влияния устройства на питающую сеть посредством коррекции коэффициента мощности. В данной работе предлагается метод цифрового управления преобразователем напряжения, главным достоинством которого является простота реализации.

**Материалы и методы:** Имитационное моделирование в ПО *MATLAB Simulink*.

**Результаты:** Математическая модель, позволяющая исследовать принцип работы однофазного активного выпрямителя напряжения.

**Выводы:** Проведено имитационное моделирование работы однофазного активного выпрямителя напряжения с цифровым управлением на базе микроконтроллера. Исследованы функциональные возможности схемы с четырьмя транзисторными ключами, обеспечивающей высокую точность стабилизации выходного напряжения и минимизацию искажений входного тока. Проведён комплексный анализ динамических режимов работы преобразователя, включая переходные процессы и режимы инвертирования с рекуперацией энергии в сеть.

**Ключевые слова:** однофазный активный выпрямитель, микроконтроллер, моделирование.

## SIMULATION OF A SINGLE-PHASE ACTIVE VOLTAGE RECTIFIER

Andrei Dar'enkov, Aleksandr Chugrov, Egor Utkin, Nikolai Petuhov, Anton Khramov  
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia  
e-mail: sanek\_chugrov@mail.ru

## Abstract

**Background:** In modern power electronics, an urgent task is to create efficient and compact converters that ensure high-quality energy consumption from the grid. One of the key elements of such systems is an active rectifier, whose functions are to convert alternating current into direct current, regulate the voltage of the direct current link and minimize the negative impact of the device on the supply network by correcting the power factor. In this paper, we propose a method for digital control of a voltage converter, the main advantage of which is simplicity of implementation.

**Materials and methods:** Simulation modeling in *MATLAB Simulink* software.

**Results:** A mathematical model that allows us to investigate the principle of operation of a single-phase active voltage rectifier.

**Conclusions:** A simulation of the operation of a single-phase active voltage rectifier with digital control based on a microcontroller has been carried out. The functional capabilities of a circuit with four transistor switches, which ensures high accuracy of output voltage stabilization and minimizes input current distortion, are investigated. A comprehensive analysis of the dynamic operating modes of the converter, including transients and inversion modes with energy recovery to the grid, has been carried out.

**Key words:** single-phase active rectifier, microcontroller, simulation.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной силовой электроники неразрывно связано с ужесточением международных стандартов по электромагнитной совместимости и качеству электроэнергии (таких как *IEEE 519*, *IEC 61000-3-2*). Эти нормы, например, для оборудования мощностью до 1 кВт, ограничивают коэффициент гармонических искажений тока (*THDi*) на уровне 5%, что является недостижимым для классических неуправляемых диодных и тиристорных выпрямителей, *THDi* которых может превышать 100-120% [1, 2]. Потребление из сети несинусоидального тока, содержащего значительное количество высших гармоник, приводит к снижению коэффициента мощности до значений 0,6-0,7 и помехам в работе другого оборудования.

Активные выпрямители напряжения (АВН) обеспечивают синусоидальный ток, синфазный напряжению, и стабилизацию выходного напряжения, что позволяет достичь коэффициента мощности, близкого к 1, и низких гармонических искажений (*THDi* < 5%). Однако распространенные системы управления на основе векторного преобразования и ПИ-регуляторов имеют недостатки: сложность настройки, низкое быстродействие, критичность к датчикам и значительные скачки потребляемого тока при скачках нагрузки [5].

В качестве альтернативы для преодоления указанных ограничений в научной литературе рассматриваются различные виды нелинейных и релейных алгоритмов, такие как гистерезисное управление и управление с прогнозом. Однако многие из них требуют большой вычислительной мощности контроллера, что усложняет проектирование силовых фильтров.

Также АВН применяют в составе частотных преобразователей, чтобы снизить уровень высших

гармоник тока и напряжения в питающей сети и обеспечить двусторонний обмен энергией с сетью [3].

АВН может использоваться в энергосберегающих системах электропривода подъема груза. В момент спуска груза образуется избыточная мощность, которая обычно рассеивается на тормозном резисторе в виде тепла. Данный процесс можно усовершенствовать путём введения АВН, который будет возвращать в сеть энергию при спуске. Данное решение не только осуществляет энергосбережение до 60%, но и улучшает параметры системы – повышает *Cosφ* системы до уровня 0,97-0,99% и ограничивает коэффициент нелинейных искажений *THDi* на уровне 4% [4].

В данной работе представлен простой и быстрый цифровой алгоритм управления для однофазного АВН, реализуемый на базе микроконтроллера. Его преимущества — отказ от точного измерения значения сетевого напряжения (снижает стоимость и сложность) и отсутствие необходимости в сложных математических преобразованиях и расчете параметров регуляторов, что упрощает реализацию и настройку.

## II. ПРЕДЛАГАЕМАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ АВН

Схемы АВН обеспечивают коррекцию коэффициента мощности до 0,99 в импульсных источниках питания, позволяя соответствовать стандартам электромагнитной совместимости (ЭМС) [6].

АВН на четырёх транзисторах — это управляемый мостовой преобразователь, формирующий на нагрузке как положительное, так и отрицательное напряжение. Схема обеспечивает высокое быстродействие, минимальные коммутационные потери и точное регулирование выходного напряжения. Её структурная схема с цифровой системой управления представлена на рис. 1.

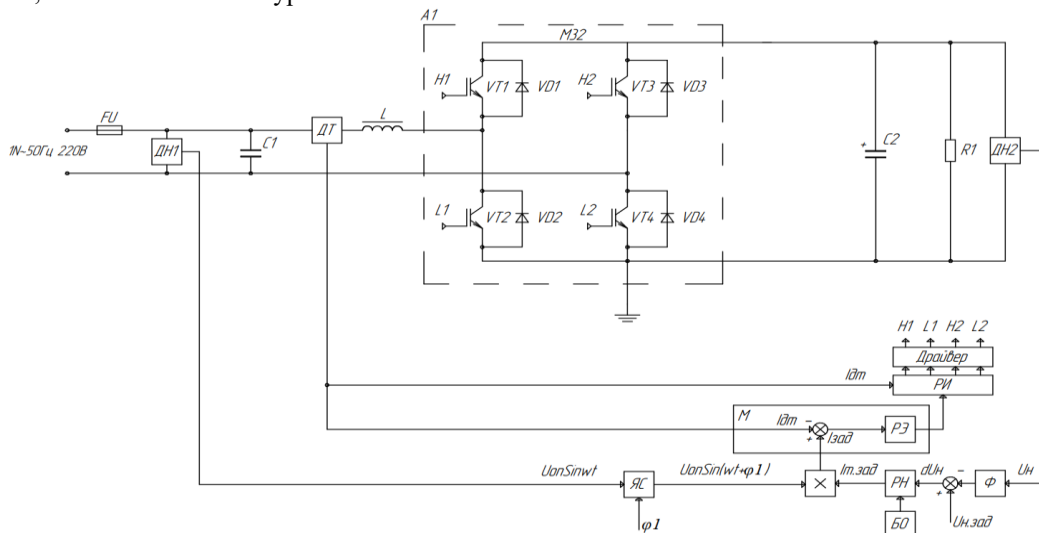


Рис. 1. Структурная схема однофазного активного выпрямителя с цифровой системой управления

Схема построена на мостовом преобразователе из четырёх ключей (*VT1-VT4*) с обратными диодами, что позволяет управлять током в обеих полуволнах синусоиды. Переменное напряжение прикладывается через дроссель к транзисторному мосту, а нагрузка

подключена к цепи постоянного тока через фильтрующий конденсатор.

На каждой полуволне напряжения АВН выполняет функции повышающего преобразователя, аккумулируя энергию в дросселе и передавая её в нагрузку в моменты соответствующих переключений силовых ключей.

Такой режим позволяет формировать заданное напряжение на выходе с минимальными искажениями и высоким коэффициентом полезного действия (КПД).

### III. АСИНХРОННЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ

Асинхронный алгоритм с частотно-широотно-импульсной модуляцией контролирует амплитуду и фазу тока, динамически изменяя частоту коммутации (максимальна на нуле синусоиды, минимальна на амплитуде). Подбор частоты и индуктивности — это компромисс между потерями, массогабаритами и точностью управления.

Асинхронный алгоритм обеспечивает высокую динамику и защиту от перегрузок благодаря быстрой

реакции на возмущения. Однако переменная частота коммутации усложняет проектирование фильтров и тепловые расчёты.

Методика последовательного проектирования в *MATLAB Simulink*, от функциональной схемы к детальной модели, выбрана для поэтапной верификации математического описания системы, что позволяет выявлять проблемы управления заранее и оптимизировать параметры регуляторов до создания аппаратной части.

На втором этапе решения проблемы на базе разработанной функциональной схемы и ее логики работы активного выпрямителя и описанной системы управления была разработана модель в *MATLAB Simulink* с неидеальными элементами, отображённая на рис. 2.

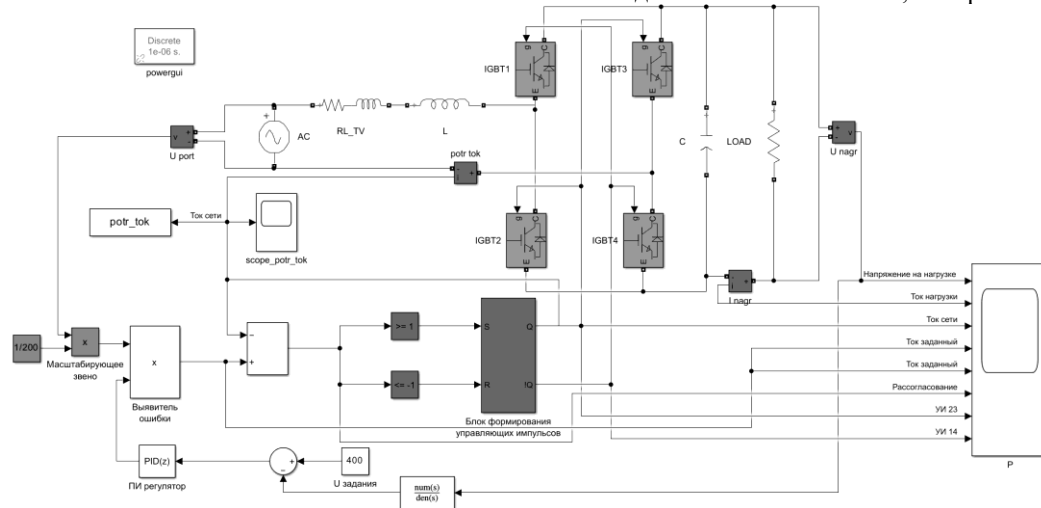


Рис. 2. Модель однофазного активного выпрямителя напряжения с контуром напряжения

В результате расчета определена конфигурация модели номинальной мощностью 1000 Вт: индуктивность входного дросселя — 3 мГн (при  $\Delta I = 1$  А), напряжение звена постоянного тока — 400 В, емкость выходного конденсатора фильтра — 1000 мкФ. Источник переменного напряжения задан параметрами 220 В / 50 Гц с амплитудой 311 В, его активное сопротивление составляет 0,154 Ом, а индуктивностью пренебрегают.

Силовая часть преобразователя собрана на четырёх одинаковых IGBT-транзисторах. Снабберные цепи настроены так, что не влияют на коммутацию. Для обеспечения выходной мощности 1 кВт при напряжении 400 В сопротивление активной нагрузки выбрано равным 150 Ом. Начальное напряжение на конденсаторе фильтра установлено на уровне 300 В.

На третьем этапе были получены осциллограммы работы преобразователя в различных режимах. Система управляется по напряжению: датчик DV1 отслеживает значения синусоидального напряжения (нормализуется до  $\pm 1$  В), а датчик DV2 — напряжение на нагрузке. Сигнал с DV2 фильтруется, сравнивается с опорным значением и поступает на регулятор напряжения, который поддерживает требуемую амплитуду тока нагрузки.

В блоке умножения происходит комбинация синусоидального сигнала с заданной амплитудой тока, формируя управляющий сигнал для релейного узла. Датчик тока DI1 фиксирует потребляемый ток, а система

сравнивает мгновенные значения с заданными параметрами.

Логика управления ключами реализована на компараторах: сигнал рассогласования  $\geq 1$  активирует VT2 и VT3, а  $\leq -1$  — VT1 и VT4. На рис. 4 показаны временные зависимости напряжения  $U_d$  и тока  $I_d$  нагрузки при номинальной мощности 1 кВт.

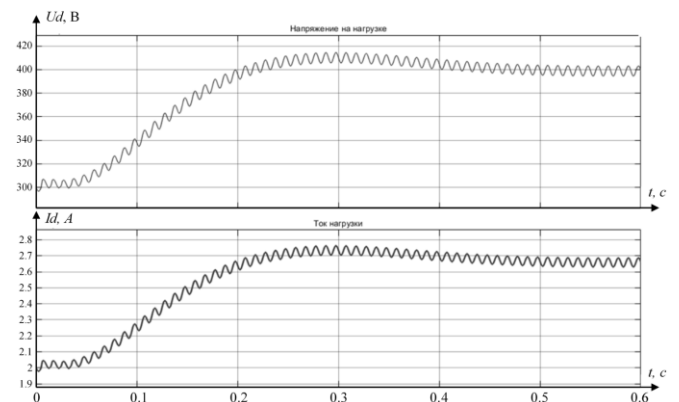


Рис. 3. Графики тока и напряжения на активной нагрузке

Частота переключения максимальна при переходе синусоиды через ноль и минимальна на её амплитуде. На рис. 4-6 представлен анализ работы АВН при синфазном токе и напряжении ( $0^\circ$ ), а также при фазовых сдвигах  $\pm 30^\circ$ , когда ток отстаёт или опережает напряжение на 1,8 мс. Все последующие зависимости представлены

графиками потребляемого тока  $I_L$  и напряжения питающей сети  $U_C$ .

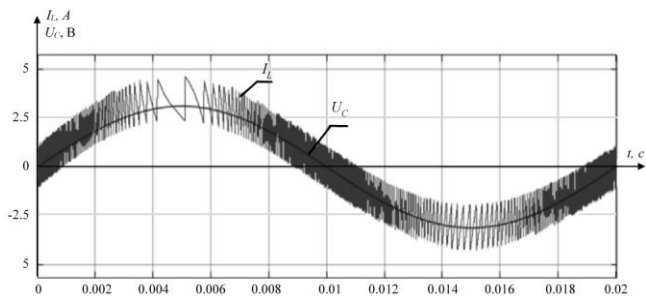


Рис. 4. Осциллограммы динамики потребляемого тока и напряжения

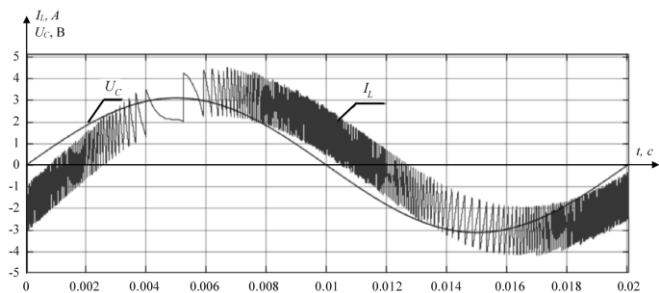


Рис. 5. Осциллограммы динамики потребляемого тока и напряжения при угле сдвига -30 эл. град

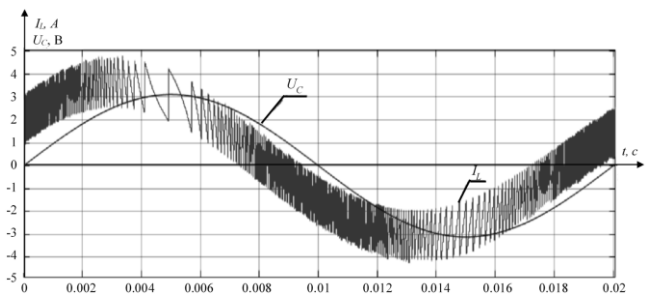


Рис. 6. Осциллограммы динамики потребляемого тока и напряжения при угле сдвига 30 эл. град

При достижении в звене постоянного тока напряжения 500 В система переходит в режим рекуперации энергии в сеть (рис. 7), при этом фазы тока и напряжения разносятся на  $180^\circ$ .

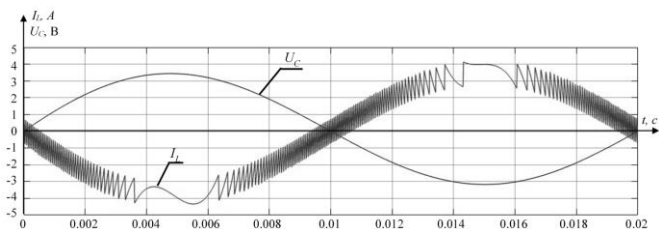


Рис. 7. Осциллограммы, демонстрирующие рекуперацию энергии в питающую сеть

Исследование подтвердило высокую эффективность асинхронного алгоритма для однофазного АВН 1 кВт. Моделирование в *MATLAB Simulink* показало, что система стабильно поддерживает коэффициент мощности  $>0.99$  и напряжение 400 В в звене постоянного тока с минимальными отклонениями.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью моделирования в *MATLAB Simulink* была подтверждена эффективность алгоритма управления преобразователем. Анализ переходных процессов и режима рекуперации показал высокое быстродействие и устойчивость системы к возмущениям нагрузки и изменениям напряжения сети. Также продемонстрирована возможность работы с различными фазовыми сдвигами, что расширяет функциональность системы.

Предложенный подход позволяет значительно повысить качество электроэнергии за счёт снижения коэффициента гармонических искажений тока и увеличения коэффициента мощности до значений, близких к единице. Разработанная модель и алгоритм управления могут быть использованы при инженерном проектировании и оптимизации промышленного преобразовательного оборудования.

#### Список литературы

- [1] IEEE 519-2022 IEEE standard for harmonic control in electric power systems. – New York: IEEE, 2022. – 31 p.
- [2] ГОСТ Р/IEC 61000 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3-2 Нормы. Нормы эмиссии гармонических составляющих тока (оборудование с входным током не более 16 А в одной фазе). – Москва: Стандартинформ, 2020. – 31 с.
- [3] Зайцев, И. И., Сяктерев, В. Н., Сяктерева, В. В. (2017). Разработка модели и исследование макета активного выпрямителя напряжения в составе частотных преобразователей систем энергоснабжения погружных электродвигателей. Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 20(3), 114–117.
- [4] Тимошкин, В. В. Использование активного выпрямителя в энергосберегающих системах электропривода подъема / В. В. Тимошкин, С. Н. Кладиев, Г. А. Клишкин // Современные проблемы машиностроения : Сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, Томск, 22–25 ноября 2022 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – С. 55-57. – EDN VCZCU.
- [5] Чугров, А. А. Однофазный активный выпрямитель / А. А. Чугров, В. В. Соколов // XXVIII Нижегородская сессия молодых ученых (гуманитарные, технические, естественные науки) : Статьи и тезисы молодых ученых, Нижний Новгород, 05–08 декабря 2023 года. – Нижний Новгород: Издательство "Перо", 2023. – С. 371-373. – EDN UNRQKJ.
- [6] Чугров, А. А. Имитационное и экспериментальное изучение однофазного активного выпрямителя / А. А. Чугров, Н. М. Петухов // Тинчуриновские чтения - 2024 "Энергетика и цифровая трансформация": Международная молодежная научная конференция. В четырех томах, Казань, 24–26 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 367-370. – EDN LOPRDX.

# АДАПТИВНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ КООРДИНАТ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Дарьенков А.Б., Храмов А.Е.

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»  
Нижегород, Россия  
e-mail: anthramov2017@gmail.com

## Аннотация

**Состояние вопроса:** При организации бездатчиковых систем векторного управления асинхронным двигателем информацию о неизмеряемых параметрах работы электрического привода (частота вращения, потокосцепление и угол поворота ротора) получают с помощью специализированных математических алгоритмов – наблюдателей состояния. Существует зависимость работы наблюдателя от изменения параметров схемы замещения электродвигателя, которая проявляется в увеличении погрешности оценочных данных до десятков процентов, что является недопустимым. Известные методы и алгоритмы, позволяющие учитывать возможные колебания электрических параметров электродвигателя, не обеспечивают оценку необходимых координат электропривода во всём рабочем диапазоне частот вращения ротора с допустимой погрешностью.

**Материалы и методы:** Имитационное моделирование в обеспечении *Matlab Simulink*, полунатурные испытания.

**Результаты:** Разработан алгоритм и структура наблюдателя состояния адаптивного типа с внутренней подсистемой идентификации параметров асинхронного двигателя, создана математическая и имитационная модель предлагаемой системы, представлены результаты полунатурных исследований предлагаемых алгоритмов наблюдения и идентификации, определены погрешности оценивания неизмеряемых величин: частоты вращения, потокосцепления и угла поворота ротора электродвигателя.

**Выводы:** На основании выполненных имитационных и полунатурных исследований было определено следующее: при применении предлагаемого решения в области организации адаптивного наблюдения погрешность оценки неизмеряемых координат асинхронного электропривода (частоты вращения, потокосцепления и угла поворота ротора двигателя) была индифферентна к изменению активных сопротивлений статора и ротора и не превышала 0,06%, 0,09% и 0,4% соответственно.

**Ключевые слова:** система идентификации, трёхфазный асинхронный двигатель, векторная система управления, наблюдатель состояния.

## ADAPTIVE COORDINATE OBSERVER FOR INDUCTION MOTOR

Andrej Dar`enkov, Anton Khramov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia  
e-mail: anthramov2017@gmail.com

## Abstract

**Background:** When organizing sensorless vector control systems for an induction motor, information about the immeasurable parameters of the electric drive (rotation speed, flow coupling, and rotor rotation angle) is obtained using specialized mathematical algorithms – state observers. There is a dependence of the observer's work on changes in the electric motor's parameters replacement circuit, which is reflected in an increase the error of the estimated data to tens of percent, which is unacceptable. Known methods and algorithms that allow for possible fluctuations in the electrical parameters of an electric motor do not allow for an estimate of the necessary coordinates of the electric drive over the entire operating frequency range of the rotor with an acceptable error.

**Materials and Methods:** Simulation in Matlab Simulink software, hardware in the loop tests.

**Results:** An algorithm and structure of an adaptive state observer with an internal subsystem for identifying induction motor's parameters have been developed, a mathematical and simulation model of the proposed system has been created, the results of hardware in the loop investigations of the proposed observation and identification algorithms have been shown, and errors in

estimating immeasurable quantities have been determined: rotational speed, flow coupling, and rotation angle of the electric motor rotor.

**Conclusions:** Based on the performed simulation and hardware in the loop studies, the following was determined: when applying the proposed solution in the field of adaptive monitoring, the error in estimating the immeasurable coordinates of an induction electric drive – rotation speed, flow coupling and rotation angle of the motor rotor was indifferent to changes in the active resistances of the stator and rotor and did not exceed 0,06%, 0,09% and 0,4%, respectively.

**Key words:** identification system, three-phase induction motor, vector control system, state observer.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

При проектировании современных средств производства, приводов транспорта различного назначения (наземного, водного, воздушного), промышленных роботизированных систем, в которых основным источником движения выступает электрический двигатель, особое внимание уделяется обеспечению широкого диапазона регулирования скорости и момента двигателя, высоких эксплуатационных характеристик создаваемого электропривода в совокупности с относительной простотой управления и возможностью технической реализации с применением распространённых общепромышленных компонентов автоматизации.

Почти до конца XX столетия указанным требованиям удовлетворял только электропривод постоянного тока, поскольку его системы управления строились на аналоговых компонентах, а методы регулирования частоты вращения и момента были многогранно изучены и обеспечивали диапазон 1:10000 и выше.

Известным недостатком всех электроприводов постоянного тока является наличие коллекторно-щёточного узла, который требует периодического технического обслуживания и снижает общий ресурс работы электропривода.

В 50-60 гг. XX столетия широкое распространение получили регулируемые электропривода на основе асинхронного электродвигателя (АД) с короткозамкнутым ротором [1]. Это было связано с развитием полупроводниковой элементной базы, микропроцессорных систем, а также началом серийного изготовления полностью управляемых *IGBT* и *MOSFET*.

Асинхронный двигатель отличается высокой надёжностью, простотой конструкции и технического обслуживания, малой стоимостью и повышенной энергоэффективностью (коэффициент полезного действия современных АД находится в диапазоне 75...97%) [2].

В 1925 г. академик М.П. Костенко сформулировал общий закон регулирования частоты вращения АД: «оптимальный режим работы АД при любых значениях частоты и нагрузки можно обеспечить, если относительное напряжение двигателя изменять пропорционально произведению относительной частоты на корень квадратный из относительного момента» [3]. Примерно с этого времени асинхронный электропривод стал широко применяться на различных газораспределительных, нефтеперекачивающих станциях, в установках вентиляции и кондиционирования воздуха.

Скалярные системы управления обеспечивают диапазон регулирования частоты вращения  $D=1:20$ . Однако для тех областей применения АД, где действуют повышенные требования к диапазону (не менее 1:1000) и точности регулирования (отклонение от заданного значения не более 1%) частоты вращения и электромагнитного момента электродвигателя, применение скалярных систем недопустимо.

Дальнейшим развитием методов управления асинхронными электроприводами стало создание векторных систем, в которых контроль частоты вращения и момента АД осуществлялся отдельно друг от друга. Первая техническая реализация векторной структуры управления АД с датчиком скорости и потокоцепления была осуществлена Феликсом Блашке [4]. Главным недостатком таких систем управления АД является наличие датчиков на валу и внутри двигателя. Это не только увеличивает стоимость, массу и габариты готового электропривода (что может быть критичным для систем с сильно ограниченным пространством), но и снижает помехозащищённость и надёжность оборудования.

Ввиду этого в настоящее время всё большее распространение получают бездатчиковые системы векторного управления АД. Для её организации необходимо знать три параметра: частоту вращения, потокоцепление и угол поворота ротора. Указанные величины рассчитываются математически с помощью наблюдателей состояния по данным с датчиков токов и напряжений фаз статора АД [5].

При построении бездатчикового электропривода существует проблема высокой погрешности (более 20%) оценки наблюдателем неизмеряемых параметров АД. Это связано с температурными изменениями параметров схемы замещения двигателя в период его работы. При этом наибольшее влияние на погрешность оценки наблюдателя оказывает активное сопротивление статора, так как его вариация может достигать 50% и более [6]. Вторым параметром схемы замещения АД по степени влияния на работу наблюдателя является активное сопротивление ротора, вариация которого составляет до 40...45% от номинального значения. Изменение других параметров схемы замещения АД (индуктивности статора, ротора, намагничивания) существенно меньше – порядка 8...10%.

Разработано множество подходов к созданию алгоритмов работы наблюдателей, в числе которых наблюдатель Люенбергера, фильтр Калмана, адаптивная система с эталонной моделью и др. Наименьшую погрешность в 0,5% при оценке частоты вращения обеспечивает фильтр Калмана [7]. Его математическое

описание построено на упрощенном представлении АД. Знание всех параметров АД затруднено. Дополнительное естественное изменение активных сопротивлений статора и ротора АД приводит к высокой погрешности работы фильтра Калмана – свыше 17% [8].

Изложенное показывает необходимость определения активных сопротивлений статора и ротора в период работы электропривода. В исследовании [9] показано, что наличие системы идентификации активного сопротивления статора позволяет обеспечить погрешность оценки частоты вращения ротора менее 1%. Построенный алгоритм идентификации, основанный на вычислении противо-ЭДС АД, работоспособен на частотах свыше 200...300 об/мин. На частотах ниже указанного диапазона погрешность оценки наблюдателем увеличивается до 7...12%.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО АДАПТИВНОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ

Для исключения вышеизложенных недостатков существующих алгоритмов наблюдения и идентификации, авторами данной работы разработан адаптивный наблюдатель состояния АД, который позволяет с учётом изменения активных сопротивлений статора и ротора выполнять оценку неизмеряемых координат электропривода: частоты вращения ротора  $\hat{\omega}_R$ , потокосцепления  $\hat{\Psi}_R$  и угла поворота ротора  $\hat{\theta}_{\Psi R}$ . Структурная схема разработанного адаптивного наблюдателя состояния представлена на рис. 1.

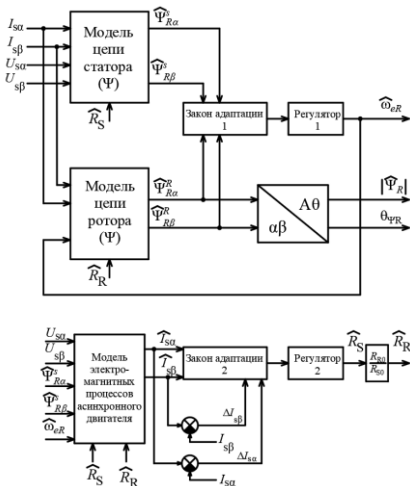


Рис. 1. Структурная схема адаптивного наблюдателя АД

Адаптивный наблюдатель построен на основе математического описания электромагнитных процессов АД, которое в дифференциальной форме имеет вид (1)

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_s}{dt} &= \vec{U}_s - R_s \cdot \vec{I}_s, \\ \frac{d\Psi_r}{dt} &= -R_r \cdot \vec{I}_r + j \cdot Z_p \cdot \omega_m \cdot \vec{\Psi}_r, \\ \vec{I}_s &= \frac{L_r}{w} \cdot \vec{\Psi}_s - \frac{L_m}{w} \cdot \vec{\Psi}_r, \\ \vec{I}_r &= \frac{L_s}{w} \cdot \vec{\Psi}_r - \frac{L_m}{w} \cdot \vec{\Psi}_s, \\ \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot (M_{эм} - M_c), \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $\vec{U}_s = u_{s\alpha} + j u_{s\beta}$  – вектор напряжения статора, В;  $\vec{I}_s = i_{s\alpha} + j i_{s\beta}$  – вектор тока статора, А;  $\vec{I}_r = i_{r\alpha} + j i_{r\beta}$

– вектор тока ротора, А;  $\vec{\Psi}_s = \Psi_{s\alpha} + j \Psi_{s\beta}$  – вектор потокосцепления статора, Вб;  $\vec{\Psi}_r = \Psi_{r\alpha} + j \Psi_{r\beta}$  – вектор потокосцепления ротора, Вб;  $\omega_m$  – механическая частота вращения АД, рад/с;  $Z_p$  – число пар полюсов АД;  $R_s, R_r$  – активные сопротивления статора и ротора, Ом;  $L_s, L_r, L_m$  – индуктивности статора, ротора, намагничивания, Гн;  $w = L_s \cdot L_r - L_m^2$  – индуктивный коэффициент АД, Гн<sup>2</sup>;  $M_{эм}, M_c$  – момент АД и статический, Н·м;  $J$  – момент инерции ротора, кг·м<sup>2</sup>.

Вычисление оценочных значений неизмеряемых координат АД: частоты вращения  $\hat{\omega}_{eR}$ , потокосцепления  $\hat{\Psi}_R$  и угла поворота ротора  $\hat{\theta}_{\Psi R}$  выполняется по следующим равенствам (2-4):

$$|\hat{\Psi}_R| = \sqrt{(\hat{\Psi}_{R\alpha}^R)^2 + (\hat{\Psi}_{R\beta}^R)^2}, \quad (2)$$

$$\hat{\theta}_{\Psi R} = \arctg\left(\frac{\hat{\Psi}_{R\beta}^R}{\hat{\Psi}_{R\alpha}^R}\right), \quad (3)$$

$$\hat{\omega}_{eR} = \left(k_p + \frac{k_i}{p}\right) \cdot (\hat{\Psi}_{R\alpha}^R \cdot \hat{\Psi}_{R\beta}^S - \hat{\Psi}_{R\beta}^R \cdot \hat{\Psi}_{R\alpha}^S), \quad (4)$$

где  $\hat{\Psi}_{R\alpha}^R, \hat{\Psi}_{R\beta}^R, \hat{\Psi}_{R\alpha}^S, \hat{\Psi}_{R\beta}^S$  – оценки составляющих вектора потокосцепления ротора, Вб;  $k_p, k_i$  – коэффициенты пропорциональной и интегральной части регулятора.

Закон вычисления оценки активного сопротивления статора  $\hat{R}_s$  (5), полученный авторами [10], основан на теории устойчивости систем А.М. Ляпунова и позволяет получить адекватные оценочные значения не только при номинальной частоте вращения, но и в области малых частот.

$$\hat{R}_s = \int \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot \frac{G_0}{|\hat{\Psi}_R \cdot \hat{\omega}_{eR}| + 1} \cdot (\hat{I}_{s\alpha} \cdot \Delta I_{s\alpha} + \hat{I}_{s\beta} \cdot \Delta I_{s\beta}) \cdot dt, \quad (5)$$

где  $G_0$  – коэффициент настройки идентификатора;  $\hat{I}_{s\alpha}, \hat{I}_{s\beta}$  – оценки токов статора, А;  $\Delta I_{s\alpha}, \Delta I_{s\beta}$  – ошибки оценки токов статора, А.

## III. РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛУНАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования предлагаемого авторами адаптивного наблюдателя состояния была собрана полуфизическая модель бездатчиковой векторной системы управления АД, структура которой показана на рис. 2.

Согласно рис. 2, в программе *MatLab* была создана имитационная модель системы «Преобразователь частоты-АД» с бездатчиковой системой векторного управления двигателем.

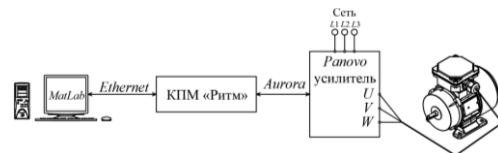


Рис. 2. Структурная схема установки полунатурных испытаний

По локальной сети *Ethernet* компьютер подключался к комплексу полунатурного моделирования «Ритм» отечественного производства, который в режиме реального времени рассчитывал *Simulink*-модель. Задающие напряжения, формируемые преобразователем в модели, передавались по протоколу *Aurora* через оптоволокно в усилитель мощности *Panovo*. К четырёхквadrантному усилителю подключён трёхфазный АД серии АИР63В4У3

мощностью 0,37 кВт с синхронной частотой вращения 1500 об/мин.

Анализ динамических процессов в приводе выполнялся согласно тахограмме, которая показана на рис. 3.

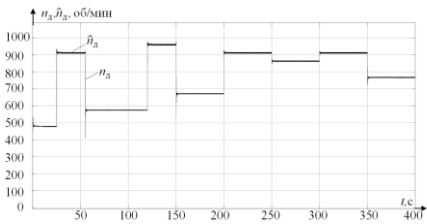


Рис. 3. Диаграммы работы электропривода на основе АД

На рис. 3 выполнено сравнение заданной частоты вращения  $n_d$  и оценочной величины  $\hat{n}_d$ , полученной из *Simulink*-модели. По диаграмме видно, что погрешность оценки частоты вращения адаптивным наблюдателем составляет не более 5% в переходных режимах, а в установившихся 0,3...0,6%.

В процессе полунатурных исследований сравнивалась погрешность работы предлагаемого авторами адаптивного наблюдателя при двух вариантах входных данных: токи и напряжения фаз статора АД получены по *Simulink*-модели привода; токи и напряжения фаз статора АД получены по данным физических датчиков токов и напряжений, установленных в усилителе мощности *Panovo*. Результаты полунатурных исследований адаптивного наблюдателя и идентификатора представлены на рис. 4-5.

Рис. 4 показывает, что отклонение оценочной величины частоты вращения  $\hat{\omega}_{RM}$ , полученной по данным токов/напряжений из модели *Simulink*, от оценки  $\hat{\omega}_R$ , вычисленной по информации с датчиков, возникает лишь в переходных режимах работы электрического привода: при разгоне и изменении задания частоты вращения. В установившемся режиме погрешность оценки неизменяемой координаты  $\hat{\omega}_R$  АД близка к нулю.

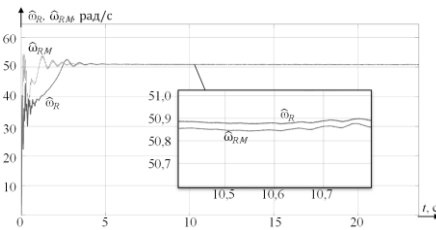


Рис. 4. Диаграммы оценки частоты вращения АД

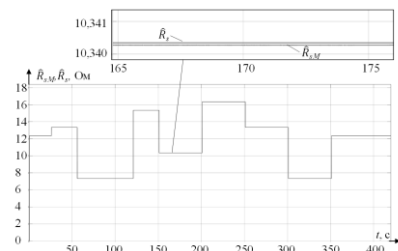


Рис. 5. Диаграммы оценки активного сопротивления статора АД

По рис. 5 видно, что погрешность оценки активного сопротивления статора АД пренебрежимо мала во всём диапазоне частот вращения вала двигателя.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

1. При применении предлагаемого авторами адаптивного наблюдателя состояния АД обеспечивается малая погрешность (не более 5%) оценки частоты вращения ротора в условиях изменения активного сопротивления статора. Это позволяет применять такую систему в управлении электроприводом транспортных систем, металлообрабатывающих станков и комплексов.

2. Погрешность оценки расчётного значения частоты вращения ротора, которая получена от наблюдателя, работающего по информации с датчиков токов/напряжений, не превышает 10,3% в переходном режиме, а в установившемся – менее 0,07%.

3. Погрешность оценки активного сопротивления статора АД, рассчитанного идентификатором по данным датчиков фазных токов/напряжений, составляет не более 0,05% во всём диапазоне частот вращения вала АД.

4. Результаты полунатурных испытаний работы адаптивного наблюдателя допускают возможность технической реализации такой системы, в том числе при других мощностях АД, т.к. входными параметрами наблюдателя являются токи и напряжения статора.

5. В дальнейшем будут проведены полунатурные испытания бездатчиковой векторной системы управления АД в диапазоне мощностей 0,25...3 кВт. В целях физической апробации алгоритмов идентификации будет создан исследовательский образец преобразователя частоты с номинальной мощностью 11 кВт.

#### Список литературы

- [1] Ключников, А.Т. Бездатчиковое векторное управление асинхронным двигателем при расчёте в комплексной форме / А.Т. Ключников, А.М. Турпак // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – №33. – С. 160-176. – DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.10.
- [2] Дарьенков, А.Б. Разработка и исследование адаптивного наблюдателя состояния асинхронного двигателя / А.Б. Дарьенков, А.Е. Храмов // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. – Т. 2. – 2024. – С. 193-196.
- [3] Костенко, М.П. Работа многофазного асинхронного двигателя при переменном числе периодов / М.П. Костенко // Электричество. – 1925. – № 2. – С. 85-95.
- [4] Blaschke, F. Das prinzip der feldorientierung die grundlage fur die transvector / F. Blaschke // Regelung von asynchronmaschinen. – Siemens-Zeitschrift. – Bd.45. – 1971. – № 10. – S. 757-760.
- [5] Калачёв, Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе / Ю.Н. Калачёв. – М.: Гамем, 2015. – 81 с.
- [6] Самосейко, В.Ф. Адаптивный алгоритм векторного управления электроприводами с асинхронными электродвигателями / В.Ф. Самосейко // Вестник ГУМиРФ им. адм. С.О. Макарова. – 2019. – Т.11. – №1. – С. 156-168.
- [7] Bendjedja, B. Comparative study between sensorless vector control of PMSM drives based on MRAS, SMO and EKF observers / B. Bendjedja, S. Chouireb // Int. Conf. on Adv. in Electr., Control and Comm. Sys. (ICAEECS), Algeria. – 2023. – pp. 1-6. – DOI: 10.1109/ICAEECS56710.2023.10104927.
- [8] Jayaramu, M.L. Real-time implementation of extended kalman filter observer with improved speed estimation for sensorless control / M.L. Jayaramu [et al] // IEEE Access. – Vol. 9. – 2021. – pp. 50452-50465. – DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3069676.
- [9] Bednarz, S.A. Estimation of the induction motor stator and rotor resistance using active and reactive power based model reference adaptive system estimator / S.A. Bednarz, M. Dybkowski // Appl. Sci. – Vol. 9. – 2019. – № 5145. – DOI: 10.3390/app9235145.
- [10] Дарьенков А.Б., Храмов А.Е. Способ определения активного сопротивления статора асинхронного двигателя. Евразийский патент № 050193; Заявл. 27.12.24 № 202493165; Опубл. 19.06.2025.

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ РЕКУПЕРАЦИЯ ОТХОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОТУРБИННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

<sup>1</sup>Ившин И. В., <sup>2</sup>Гаделшин И. И.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», <sup>2</sup>ООО «Научно-производственная компания «ЭНВЭКО»  
Казань, Россия

e-mail: <sup>1</sup>ivshin.iv@kgeu.ru, <sup>2</sup>ilgiz-95@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Рассмотрены современные подходы к энергетической рекуперации отходов с использованием микротурбинных технологий как перспективного направления устойчивого развития.

**Материалы и методы:** Проведен анализ литературных данных, нормативно-правовой базы и международного опыта в области утилизации отходов и применения микротурбинных технологий.

**Результаты:** Обоснована целесообразность использования микротурбинных технологий для энергетической утилизации различных видов отходов, выявлены преимущества и факторы, сдерживающие их распространение в России.

**Выводы:** Энергетическая рекуперация отходов с использованием микротурбинных технологий является перспективным направлением развития устойчивой энергетики и экономики замкнутого цикла.

**Ключевые слова:** микротурбинные технологии, энергетическая рекуперация, отходы, устойчивое развитие, газификация.

# WASTE-TO-ENERGY RECOVERY USING MICROTURBINE TECHNOLOGIES: MODERN APPROACHES AND PERSPECTIVES FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT

<sup>1</sup>Igor Ivshin, <sup>2</sup>Ilgiz Gadelshin

<sup>1</sup> FSBEI HE "KSPEU", <sup>2</sup> "Scientific-Production Company "ENVECO" LLC  
Kazan, Russia

e-mail: <sup>1</sup>ivshin.iv@kgeu.ru, <sup>2</sup>ilgiz-95@mail.ru

## Abstract

**State of the issue:** Modern approaches to energy recovery from waste using microturbine technologies as a promising direction for sustainable development are considered.

**Materials and Methods:** An analysis of literature data, regulatory framework, and international experience in the field of waste disposal and the use of microturbine technologies was carried out.

**Results:** The feasibility of using microturbine technologies for energy utilization of various types of waste is substantiated, and the advantages and factors hindering their distribution in Russia are identified.

**Conclusions:** Energy recovery from waste using microturbine technologies is a promising direction for the development of sustainable energy and a circular economy.

**Keywords:** microturbine technologies, energy recovery, waste, sustainable development, gasification.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире проблема утилизации отходов приобретает глобальный характер, стимулируя пересмотр традиционных подходов. Накопление отходов на полигонах и их сжигание обуславливают загрязнение окружающей среды, утрату ценных ресурсов и негативное воздействие на здоровье человека. В связи с этим, эффективное управление отходами рассматривается не только как их обезвреживание, но и как трансформация в ценный ресурс для производства энергии и материалов. В контексте устойчивого развития и принципов экономики замкнутого цикла, энергетическая рекуперация отходов приобретает первостепенное значение как направление, способствующее снижению антропогенной нагрузки на окружающую среду и укреплению энергетической безопасности. Микротурбинные технологии (МТТ) представляют собой перспективное решение для энергетической утилизации отходов, обеспечивая преобразование различных видов отходов в электроэнергию и тепло.

## II. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ: ОБЗОР И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

На текущий момент существует ряд методов утилизации отходов, каждый из которых обладает своими особенностями и степенью эффективности. Наиболее распространенным является захоронение отходов на полигонах, особенно в регионах, где инфраструктура переработки развита недостаточно. Однако, данный метод сопряжен с негативными последствиями, такими как загрязнение почвы и грунтовых вод, выбросы в атмосферу опасных веществ и нерациональное использование природных ресурсов.

Сжигание отходов, хотя и позволяет сократить их объем и получить энергию, вызывает опасения в связи с выбросами токсичных веществ, включая диоксины и фураны. Современные мусоросжигательные заводы, оснащенные системами очистки дымовых газов, минимизируют данное воздействие, однако это увеличивает стоимость процесса.

Компостирование представляет собой эффективный способ переработки органических отходов в удобрения, требующий, однако, предварительной сортировки и строгого контроля процесса. Альтернативным решением является анаэробное сбраживание, при котором из органических отходов получают биогаз, пригодный для производства электроэнергии и тепла.

Более перспективными технологиями термической переработки отходов считаются газификация и пиролиз, позволяющие получать синтез-газ и другие ценные продукты. Газификация, в частности, производит синтез-газ, который может быть использован в микротурбинных установках, повышая общую эффективность энергетической рекуперации.

## III. МИКРОТУРБИННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ РЕКУПЕРАЦИИ ОТХОДОВ: ПРИНЦИП РАБОТЫ И ПРЕИМУЩЕСТВА

Микротурбины (МТ) представляют собой компактные энергетические установки, использующие газовую турбину для генерации электроэнергии и тепла. Уникальность МТ заключается в их способности работать

на различных видах топлива, включая природный газ, биогаз, синтез-газ и другие виды альтернативного топлива, что делает их особенно привлекательными для применения в сфере энергетической рекуперации отходов.

Применение МТТ в данной области обусловлено рядом существенных преимуществ. Во-первых, МТ характеризуются высокой эффективностью, с достижением коэффициента использования топлива до 80-90% при комбинированном производстве тепла и электроэнергии. Во-вторых, они обладают относительно высокой экологической безопасностью, демонстрируя низкий уровень выбросов вредных веществ, особенно при использовании чистого топлива, такого как биогаз.

Компактность и модульность МТ позволяют легко интегрировать их в существующие мусороперерабатывающие комплексы. Надежность и долговечность обеспечивают продолжительный срок службы установок. Кроме того, гибкость в выборе топлива позволяет адаптироваться к местным условиям и доступным ресурсам. Наконец, утилизация тепла, выделяемого в процессе производства электроэнергии, для отопления, горячего водоснабжения или технологических нужд повышает общую экономическую целесообразность проектов.

## IV. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВНЕДРЕНИЯ МИКРОТУРБИННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В рамках рассмотрения экономической составляющей проектов по внедрению МТТ в сфере утилизации отходов, необходимо учитывать ряд ключевых факторов. Важным элементом является стоимость оборудования, зависящая от мощности, комплектации и производителя. Существенное влияние оказывает стоимость топлива, определяемая технологией переработки отходов и доступностью ресурсов. Капитальные затраты, включающие проектирование, строительство, монтаж и пуско-наладку, также влияют на общий бюджет проекта.

Операционные затраты, связанные с техническим обслуживанием, ремонтом, топливом и персоналом, должны быть тщательно проанализированы для оценки долгосрочной прибыльности. Доходы от продажи электроэнергии и тепла, в свою очередь, зависят от установленных тарифов, определяемых государственными или местными органами власти. Не менее важным фактором является возможность получения налоговых льгот и государственной поддержки, способствующих повышению экономической привлекательности проектов.

Несмотря на относительно высокую начальную стоимость оборудования, реализация проектов по внедрению МТТ позволяет получить ряд экономических выгод, включая снижение затрат на утилизацию отходов, производство дешевой электроэнергии и тепла, создание новых рабочих мест и улучшение экологической обстановки.

## V. НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Деятельность в области утилизации отходов и энергетической рекуперации регулируется рядом нормативно-правовых актов, включая Федеральный закон № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления», Постановления Правительства РФ, регулирующие вопросы тарифообразования в сфере электроэнергетики, нормативные акты, устанавливающие требования к

экологической безопасности объектов по утилизации отходов, а также меры государственной поддержки проектов в области возобновляемой энергетики.

Для стимулирования развития энергетической рекуперации отходов требуется дальнейшее совершенствование нормативно-правовой базы, направленное на упрощение процедуры получения разрешений, разработку механизмов государственной поддержки и создание благоприятных условий для привлечения инвестиций в данную сферу.

#### VI. МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ И ЛУЧШИЕ ПРАКТИКИ В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОТУРБИНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Мировой опыт демонстрирует активное использование МТТ для энергетической утилизации отходов в ряде стран, включая государства Европы, такие как Германия, Швеция и Дания. В этих странах применяются эффективные системы управления отходами, стимулирующие использование возобновляемых источников энергии и сокращение выбросов парниковых газов.

В США также реализуется множество проектов по внедрению МТТ в сфере утилизации отходов, в частности, для переработки биогаза, образующегося на полигонах и очистных сооружениях. Анализ международного опыта позволяет выявить лучшие практики и адаптировать их к условиям российской экономики.

#### VII. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИКРОТУРБИНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РОССИИ: ВЫЗОВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ

Несмотря на значительный потенциал, в России МТТ пока не получили широкого распространения в сфере утилизации отходов. Факторами, сдерживающими развитие МТТ, являются высокая стоимость оборудования, недостаточно развитая нормативно-правовая база, отсутствие квалифицированных специалистов и недостаточная осведомленность о преимуществах МТТ.

Преодоление этих барьеров требует оказания государственной поддержки проектам, совершенствования нормативно-правовой базы, развития образовательных программ и повышения квалификации специалистов, а также проведения информационных кампаний. Реализация этих мер позволит создать благоприятные условия для широкого внедрения МТТ в сферу утилизации отходов, что, в свою очередь, будет способствовать повышению энергоэффективности, снижению экологической нагрузки и развитию инновационной экономики в Российской Федерации.

#### VIII. VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Энергетическая рекуперация отходов с использованием микротурбинных технологий представляет собой перспективное направление развития устойчивой энергетики и экономики замкнутого цикла. МТТ предоставляют возможность преобразования отходов в ценный ресурс для производства электроэнергии и тепла, снижая нагрузку на окружающую среду и обеспечивая энергетическую безопасность. Для успешного внедрения МТТ в России необходимо совершенствование нормативно-правовой базы, оказание государственной поддержки проектам и развитие образовательных программ.

#### Список литературы

- [1] Федеральный закон от 24.06.1998 N 89-ФЗ (ред. от 04.08.2023) "Об отходах производства и потребления"
- [2] Распоряжение Правительства РФ от 25 января 2018 г. N 84-р Об утверждении Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года
- [3] World Bank. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.
- [4] European Commission. (2015). Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy.
- [5] Arena, U., Mastellone, M. L., & Perugini, F. (2003). Life cycle assessment of different options for municipal solid waste management. *Waste Management*, 23(9), 877-889.
- [6] Consonni, S., & Viganò, F. (2012). Waste-to-energy plants coupled with carbon capture and storage: A promising technology for CO2 abatement. *Energy*, 40(1), 132-142.
- [7] Williams, P. T. (2013). *Waste treatment and disposal*. John Wiley & Sons.
- [8] Microturbine Technology Review (2023) [https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-06/Microturbine%20Technology%20Review\\_2023.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-06/Microturbine%20Technology%20Review_2023.pdf)

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМИЧЕСКИХ ОПРЕСНИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК С КОНТАКТНЫМ ИСПАРИТЕЛЕМ ЗА СЧЕТ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ РАССОЛА И КОНДЕНСАТА

Козлова М.В., Семьяшкин Р.Д.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Иваново, Россия

e-mail: roman.semyashkin@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Снижение энергопотребления при обессоливании в термических опреснителях является актуальной задачей поскольку в установках данного типа затраты тепловой энергии являются одной из основных статей эксплуатационных затрат. Основными способами повышения энергетической эффективности термических установок являются рекуперация энергии, использование возобновляемых источников энергии, а также включение трансформаторов теплоты в цикл их работы. Перспективным является интеграция парокompрессионных трансформаторов теплоты в тепловые схемы термических опреснительных установок с контактнм испарителем. Однако при высоких соленостях и низких температурах исходной воды количества энергии, отводимого от паровоздушной смеси или рассола в испарителе недостаточно для обеспечения процесса обессоливания. Альтернативным вариантом является совместная утилизация теплоты рассола и пресной воды, покидающих установку.

**Материалы и методы:** Исследование проведено с использованием метода балансовых расчетов процессов теплообмена в технологических энергоустановках, эвристического метода поиска новых технических решений.

**Результаты:** Определены наиболее эффективные режимы работы тепловой схемы опреснительной установки с комбинированным трансформатором теплоты в зависимости от исходных температур и соленостей морской воды. В зависимости от данных параметров определено энергопотребление компрессора для условий утилизации только теплоты рассола или конденсата, а также для их совместного использования.

**Выводы:** Предложена тепловая схема опреснительной установки, в которой источником теплоты, обеспечивающим работу комбинированного парокompрессионного трансформатора теплоты, является как пресная вода, покидающая установку, так и рассол. Использование предложенного технического решения позволяет работать в более широком диапазоне температур и соленостей исходной морской воды. Совместное применение теплоты рассола и пресной воды является более эффективным по сравнению с использованием теплоты паровоздушной смеси.

**Ключевые слова:** парокompрессионный трансформатор теплоты, низкопотенциальный источник теплоты, испаритель, конденсатор, паровоздушная смесь, рабочий агент.

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF THERMAL DESALINATION PLANTS WITH A CONTACT EVAPORATOR BY UTILIZING HEAT BRINE AND CONDENSATE

Maria Kozlova, Roman Semyashkin

Ivanovo State Power Engineering University

Ivanovo, Russia

e-mail: roman.semyashkin@mail.ru

## Abstract

**Background:** Reducing energy consumption during desalination in thermal desalination plants is an urgent task, since in installations of this type the cost of thermal energy is one of the main items of operating costs. The main ways to increase the energy efficiency of thermal installations are energy recovery, the use of renewable energy sources, as well as the inclusion of heat transformers in their operation cycle. The integration of steam compression heat transformers (TT) into the thermal circuits of thermal desalination plants with a contact evaporator is promising. However, at high salinities and low temperatures of the source water, the amount of energy removed from the vapor-air mixture or brine in the TT evaporator is insufficient to ensure the desalination process. An alternative option is to jointly dispose of the heat of brine and fresh water leaving the installation.

**Materials and methods:** The study was conducted using the method of balance calculations of heat and mass transfer processes in technological power plants, a heuristic method for finding new technical solutions.

**Results:** The most effective operating modes of the thermal scheme of a desalination plant with a combined heat transformer are determined, depending on the initial temperatures and salinities of seawater. Depending on these parameters, the energy consumption of the compressor is determined for the conditions of utilization of only brine or condensate heat, as well as for their joint use.

**Conclusions:** A thermal scheme of a desalination plant is proposed in which the heat source that ensures the operation of a combined steam compression heat transformer is both fresh water leaving the plant and brine. The use of the proposed technical solution makes it possible to operate in a wider range of temperatures and salinities of the source seawater. The combined use of brine heat and fresh water is more efficient than using the heat of a vapor-air mixture.

**Key words:** steam compression heat transformer, low-potential heat source, evaporator, condenser, steam-air mixture, working agent.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности термических опреснительных установок может быть обеспечено за счет использования возобновляемых источников энергии, вторичных энергетических ресурсов, рекуперации тепловой энергии отходящих потоков, а также включения ТТ в тепловые схемы процесса обессоливания.

В работе [1] приводится тепловая схема термической опреснительной установки с утилизацией теплоты паровоздушной смеси в парокомпрессионном комбинированном трансформаторе теплоты (ТТ), а также показано, что использование данного технического решения не является универсальным и может использоваться при соленостях исходной воды не превышающих 20 г/л.

В этой связи актуальным является разработка тепловых схем опреснительных установок, позволяющих работать

при более широком диапазоне температур и соленостей исходной воды.

Использование только теплоты покидающего установку дистиллята или только теплоты рассола не позволяет работать опреснителю во всем диапазоне температур и соленостей опресняемой воды. Соответственно, альтернативным вариантом является совместное использование теплоты рассола и конденсата.

## II. ТЕПЛОВАЯ СХЕМА ОПРЕСНИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Авторами разработана тепловая схема опреснительной установки (рис.1), использующей теплоту конденсата и рассола в качестве низкопотенциального источника теплоты ТТ. В рассматриваемой тепловой схеме в зависимости от температуры исходной воды и ее солености нагрузка на испарители изменяется, в связи с этим меняются и режимы работы установки.

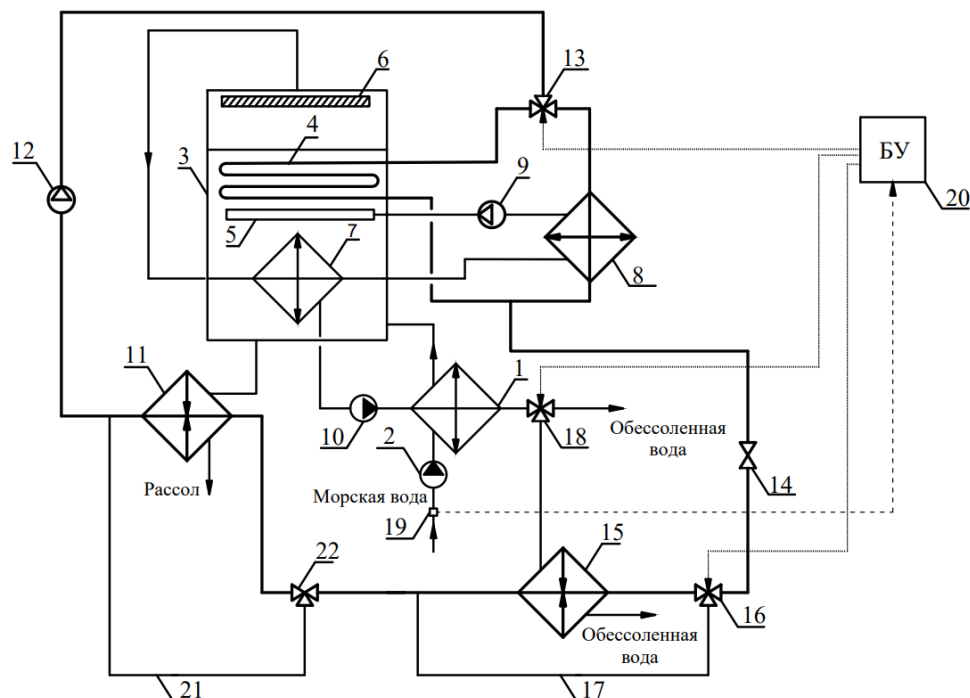


Рис. 1. Тепловая схема термической опреснительной установки с контактным испарителем с интегрированным трансформатором теплоты для утилизации энергии рассола и конденсата: 1 – теплообменник подогрева морской воды; 2,10 – насос; 3 – испарительная колонна; 4,8 – конденсатор; 5 – газораспределительная решетка; 6 – каплеотбойник; 7 – конденсатор-осушитель; 9 – газодувка; 11, 15 – испаритель; 12 – компрессор; 13,16,18,22 – трехходовой клапан; 14 – дроссельное устройство; 17,21 – байпас; 19 – датчик температуры и солености; 20 – блок управления

Предложенная тепловая схема работает следующим образом. Морская вода насосом 2 подается в

теплообменник подогрева морской воды 1, а затем поступает в испарительную колонну 3, в которой в результате теплообмена с насыщенной паровоздушной смесью нагревается, а затем поступает в пространство над газораспределительной решеткой. В данной зоне тепло к морской воде подводится от конденсирующегося рабочего агента, а также осуществляется взаимодействие, с подаваемым через газораспределительную решетку 5 воздухом. В результате данного взаимодействия концентрация водяных паров в паровоздушной смеси (ПВС) возрастает, повышается ее влажность, а также образуется рассол, который отправляется в испаритель ТТ 11. Увлажненная ПВС поступает для осушки в конденсатор-осушитель, в котором разделяется на пресную воду, поступающую для нагрева морской воды в теплообменник 1, а также осушенный воздух, который подогревается в конденсаторе ТТ 8, а затем газодувкой 9 подается в газораспределительную решетку 5. Для повышения качества получаемой пресной воды используется каплеотбойник 6, позволяющий снизить капельный унос морской воды.

Для данной установки возможны различные режимы работы: при низких соленостях утилизации теплоты пресной воды не осуществляется, в таком случае, циркулирующий в контуре трансформатора теплоты рабочий агент движется по байпасной линии 17, в данных обстоятельствах получаемый дистиллят после теплообменника подогрева морской воды отправляется к потребителю. При повышении солености в испаритель ТТ 15 подается весь поток получаемой пресной воды или его часть. Регулирование работы установки осуществляется на основании, поступающих с датчика солености и температуры морской воды 19 данных. Информация о значении данных параметров поступает в блок управления 20, с которого сигналы подаются на регулирующие клапаны 13,16,18 и 22. Кроме этого, возможны режимы, в которых рабочий агент не поступает в испаритель ТТ 11, а проходя через байпас 21 направляется в компрессор ТТ 12.

Основным недостатком предложенного технического решения является необходимость в использовании испарителей, выполненных из материалов стойких к коррозии. Данное обстоятельство обусловлено свойствами рассола [2], представляющего собой концентрат различных солей.

Парокомпрессионный трансформатор теплоты, интегрированный в тепловую схему опреснительной установки, включает в себя 2 испарителя (для утилизации теплоты рассола и дистиллята), а также 2 конденсатора (для обеспечения процесса опреснения и подогрева воздуха перед подачей его в зону барботажа). Предварительный подогрев позволяет интенсифицировать тепломассообменные процессы, протекающие между ПВС и нагретой морской водой.

Уравнения теплового баланса для рассматриваемых контуров выглядят следующим образом.

Для испарителей ТТ:

$$Q_0 = G_{п.в.} \cdot C_{п.в.р.} \cdot (t_{п.в.}' - t_{п.в.}'') + G_p \cdot C_{р.р.} \cdot (t_p' - t_p'') = G_{р.а.} \cdot (h_{п.а.}^{р.а.} - h_{п.а.}^{р.а.}), \quad (1)$$

где  $G_{п.в.}$ ,  $G_p$ ,  $G_{р.а.}$  – расходы пресной, морской воды и рассола, кг/с;  $C_{п.в.р.}$ ,  $C_{р.р.}$  – массовая изобарная теплоемкость пресной воды и рассола, кДж/(кг·К);  $t_{п.в.}'$ ,  $t_p'$  – температура пресной воды и рассола на входе в теплообменные аппараты, °С;  $t_{п.в.}''$ ,  $t_p''$  – температура пресной воды и рассола на выходе из теплообменные

аппараты, °С;  $h_{п.а.}^{р.а.}$ ,  $h_{п.а.}^{р.а.}$  – энтальпия рабочего агента на входе и выходе из испарителя ТТ, кДж/кг.

Для конденсаторов ТТ:

$$Q_k = L \cdot \rho_k \cdot (h_k^{ПВС''} - h_k^{ПВС'}) + L \cdot \rho_{п.} \cdot (h_{п.}^{ПВС''} - h_{п.}^{ПВС'}) + G_{пв} \cdot C_{р.пв} \cdot t_{пв} + G_p \cdot C_{р.р.} \cdot t_p - G_{мв} \cdot C_{р.мв} \cdot t_{мв} + G_{мв} \cdot C_{р.мв} \cdot (t_{мв}'' - t_{мв}') = G_{р.а.} \cdot (h_k^{р.а.}' - h_k^{р.а.}''),$$

где  $L$  – расход сухого воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $\rho_k$ ,  $\rho_{п.}$  – плотность ПВС при средней температуре ПВС в конденсаторе (зона барботажа), воздухоподогревателе, кг/м<sup>3</sup>;  $h_k^{ПВС}$ ,  $h_{п.}^{ПВС}$  – энтальпии ПВС на входе и выходе из конденсатора испарительной колонны, кДж/кг с.в.;  $h_{п.}^{ПВС}$ ,  $h_{п.}^{ПВС}$  – энтальпии ПВС на входе и выходе из воздухоподогревателя, кДж/кг с.в.;  $h_{п.а.}^{р.а.}$ ,  $h_{п.а.}^{р.а.}$  – энтальпии рабочего агента на входе и выходе из конденсатора, кДж/кг,  $t_{мв}$ ,  $t_p$  – температура морской воды и рассола, °С,  $G_{мв}$  – расход морской воды, кг/с.

### III. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для определения энергопотребления установки с утилизацией теплоты рассола и пресной воды в соответствии с методикой, приведенной в [3] выполняется расчет цикла ТТ. При этом температура испарения вычисляется исходя из количества теплоты, необходимого для обеспечения процесса опреснения, а также подогрева воздуха перед газораспределительной решеткой.

Важным этапом выполнения расчетного исследования является выбор рабочего тела ТТ. При использовании выбранного вещества должна обеспечиваться высокая эффективность процесса, а также экологичность работы установки. Данным требованиям соответствует рабочий агент R1234ze.

В данном исследовании расчеты выполняются для изменяющихся температур морской воды и ее солености.

Годовые колебания температуры морской воды на поверхности в тропических районах находятся в пределах 5 °С, в то время как в северных широтах данная величина составляет от 10 до 15 °С. Среднегодовой температурный режим морской воды характеризуется значением порядка 30 °С в южных широтах и около 23 °С в средних широтах [4]. В связи с этим рассматриваемый диапазон температур лежит в пределах от 5 до 35 °С.

Средняя соленость вод Мирового океана составляет около 35 г/л, при этом в открытом океане этот показатель варьируется в диапазоне от 31 до 38 г/л. Солёность морей России значительно ниже и колеблется от 17–18 г/л в Черном море до 20 г/л в Балтийском море и достигает 25 г/л в Белом море. В связи с эти расчеты выполняются для солёностей 10-35 г/л. Соленость исходной воды влияет как на количественные характеристики требуемого расхода морской воды для получения конкретного количества дистиллята в соответствии с уравнением материального баланса, так и на теплофизические свойства [5].

Согласно тепловой схеме, приведенной на рис.1 температура рассола, покидающего установку выше, чем температура пресной воды, соответственно, потенциал утилизируемой теплоты в данном случае больше, однако для характерных соленостей опресняемой воды его количество меньше, чем количество дистиллята. В целом в ряде режимов наиболее эффективным является утилизация только теплоты рассола. В связи с этим был проведен комплекс расчетов и определены затраты энергии для данных обстоятельств.

В результате вычислительного эксперимента было определена мощность, потребляемая компрессором трансформатора теплоты (рис.2).

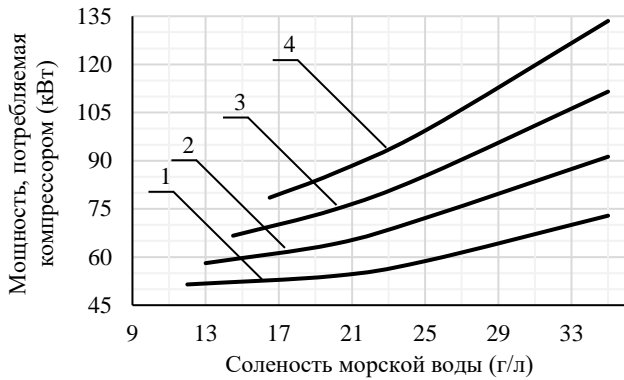


Рис. 2. Зависимость мощности, потребляемой компрессором от температуры морской воды и ее солености при утилизации теплоты рассола: 1 – температура морской воды на входе в установку 35 °С; 2 – температура морской воды на входе в установку 25 °С; 3 – температура морской воды на входе в установку 15 °С; 4 – температура морской воды на входе в установку 5 °С

Согласно полученным результатам для обеспечения работы опреснителя при утилизации теплоты только рассола необходимо, чтобы соленость опресняемой воды при температуре морской воды 35 °С была более 12 г/л, при 25 °С – 13 г/л, при 15 °С – 14,5 г/л, а при 5 °С – 16,5 г/л. То есть для малосоленых вод данное техническое решение не применимо.

Температура пресной воды, покидающей установку, определяется температурой морской воды, поступающей в теплообменник 1 для ее подогрева. Соответственно, чем ниже температура морской воды, тем ниже температура пресной воды, что приводит к увеличению высоты теплоподъема ТТ (разницы между температурой кипения и испарения рабочего агента), что приводит к снижению эффективности работы ТТ в составе тепловой схемы. Наиболее эффективными для утилизации теплоты пресной воды являются режимы с высокой температурой морской воды и низкой соленостью (рис.3).

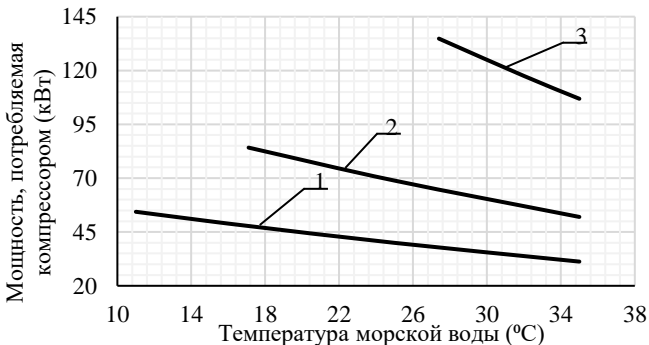


Рис. 3. Зависимость мощности, потребляемой компрессором от температуры морской воды и ее солености при утилизации теплоты пресной воды: 1 – соленость морской воды на входе в установку 10 г/л; 2 – соленость морской воды на входе в установку 20 г/л; 3 – соленость морской воды на входе в установку 35 г/л

Как видно из рисунков 2 и 3 существует ряд режимов, в которых целесообразно рабочий агент пропускать либо только через испаритель, в котором низкопотенциальным источником является рассол, либо только через испаритель, в котором низкопотенциальным источником является пресная вода (например, при температуре морской воды 35 °С и солености пресной воды 20 г/л

энергопотребление компрессора составляет 51,98 кВт, а для установки с утилизацией теплоты рассола данная величина равна 58,73 кВт).

Согласно графикам (рис.2 и рис.3) при использовании теплоты рассола или конденсата существуют ограничения по солености или температуре исходной воды. Для расширения диапазона данных параметров и повышения эффективности может рассматриваться режим совместной утилизации теплоты этих сред. Для этого было выполнено расчет, результаты которого представлены на рис. 4.

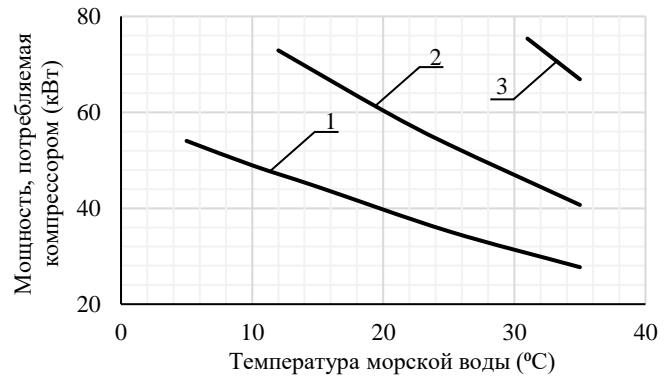


Рис. 4. Зависимость мощности, потребляемой компрессором от температуры морской воды и ее солености при утилизации теплоты пресной воды и рассола: 1 – соленость морской воды на входе в установку 10 г/л; 2 – соленость морской воды на входе в установку 20 г/л; 3 – соленость морской воды на входе в установку 35 г/л

Согласно полученным зависимостям, утилизация теплоты пресной воды и рассола позволяет снизить энергопотребление компрессора, а также расширить диапазон режимных параметров.

#### IV. ВЫВОДЫ

Предложено техническое решение, основанное на интеграции парокompрессионного трансформатора теплоты в тепловую схему термической опреснительной установки с контактным испарителем, рассмотрены режимы его работы: с отдельной утилизацией теплоты рассола и конденсата, а также их совместным использованием. Выбор режима определяется параметрами исходной морской воды. Наиболее эффективным является совместное использование теплоты рассола и конденсата, однако в таком случае область его применения ограничена.

#### Список литературы

- [1] Козлова, М. В. Оценка эффективности интеграции парокompрессионного комбинированного трансформатора теплоты в тепловую схему газоконтактной опреснительной установки / М. В. Козлова, А. В. Банников // Надежность и безопасность энергетики. – 2025. – Т. 18, № 3. – С. 185-193.
- [2] Карпов, В. А. Биокоррозия в морской среде и основы применения защитных покрытий : специальность 05.17.03 "Технология электрохимических процессов и защита от коррозии" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Карпов Валерий Анатольевич. – Москва, 2012. – 47 с.
- [3] Соколов Е.Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения / Е. Я. Соколов, В. М. Бродянский. М. : Энергия, 1968. – 336 с.
- [4] Валле, А. А. Современное состояние банка океанологических данных Института природно-технических систем / А. А. Валле, А. В. Губарев, А. Б. Полонский // Системы контроля окружающей среды. 2024. № 3(57). С. 88-98.
- [5] Слесаренко В.Н. Дистилляционные опреснительные установки/ В.Н. Слесаренко. – М.: Энергия, 1980. – 24

# МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА И НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Кралин Ан.А., Крюков Е.В., Кралин Ал.А., Дарьенков А.Б.  
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»  
Нижегород, Россия  
e-mail: kralin152@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Автономные гибридные электроэнергетические установки (АГЭУ) позволяют осуществлять децентрализованное электроснабжение, объединяя в своем составе различные источники и системы накопления электроэнергии. В подобных системах традиционно используются дизель-генераторы с фиксированной частотой вращения, что при частичных нагрузках приводит к повышенному удельному расходу топлива. АГЭУ, включающая дизель-генератор переменной частоты вращения, обладает возможностью согласования режима работы двигателя с текущей мощностью нагрузки. В свою очередь использование в составе установки накопителя – аккумуляторной батареи – позволяет осуществлять подпитку нагрузки в случае пиковых нагрузок, а также питание нагрузки через дополнительный канал даже в условиях отсутствия питания от основного канала. Актуальной задачей является проведение анализа динамических режимов работы АГЭУ, необходимого для оптимизации алгоритмов управления, благодаря которой поддерживается оптимальный тепловой режим, сокращается расход топлива и износ двигателя.

**Материалы и методы:** Проведено моделирование в программном комплексе *MATLAB Simulink*.

**Результаты:** Разработана имитационная модель АГЭУ с дизель-генератором переменной частоты вращения и накопителем электроэнергии. Проведен анализ динамических режимов работы АГЭУ, включая пуск, скачкообразное изменение нагрузки, переключение между источниками энергии, определены энергетические показатели АГЭУ.

**Выводы:** Модель может быть применена для моделирования динамических режимов работы АГЭУ. Результаты могут использоваться при разработке и отладке алгоритмов управления установкой.

**Ключевые слова:** автономная гибридная электроэнергетическая установка, дизель-генератор с переменной частотой вращения, аккумуляторная батарея.

## SIMULATION OF AN AUTONOMOUS HYBRID ELECTRIC POWER PLANT BASED ON A DIESEL GENERATOR AND AN ELECTRIC POWER STORAGE DEVICE

Andrei Kralin, Evgenii Kryukov, Aleksei Kralin, Andrei Dar'enkov  
Nizhny Novgorod State Technical University  
Nizhny Novgorod, Russia  
e-mail: kralin152@mail.ru

## Abstract

**Background:** Autonomous hybrid electric power plants (AHEPP) allow for decentralized power supply by combining various sources and systems of electricity storage. Diesel generators with a fixed rotation speed are traditionally used in such systems, which leads to increased specific fuel consumption at partial loads. AHEPP, which includes a variable-speed diesel generator, has the ability to match the engine's operating mode with the current load capacity. In turn, the use of a storage battery as part of the plant allows for charging the load in case of peak loads, as well as feeding the load through an additional channel even in the absence of power from the main channel. An actual task is to analyze the dynamic operating modes of the AHEPP, which is necessary to optimize control algorithms, thanks to which optimal thermal conditions are maintained, fuel consumption and engine wear are reduced.

**Materials and methods:** The simulation was performed in the MATLAB Simulink software package.

**Results:** An AHEPP simulation model with a variable-speed diesel generator and an electric power storage device has been developed. The analysis of the dynamic modes of operation of the AHEPP, including start-up, abrupt load changes, switching between energy sources, and the energy parameters of the AHEPP are determined.

**Conclusions:** The model can be used to simulate the dynamic operating modes of AHEPP. The results can be used in the development and debugging of plant control algorithms.

**Key words:** autonomous hybrid electric power plant, diesel generator with variable rotation speed, rechargeable battery.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время общемировой тенденцией является повышение эффективности использования углеводородного топлива. Для электроснабжения удаленных потребителей применяются автономные гибридные электроэнергетические установки (АГЭУ). В таких установках широко применяются дизель-генераторы, работающие при постоянной частоте вращения вала двигателя. При частичных нагрузках это приводит к нерациональному режиму работы ДВС и увеличению удельного расхода топлива.

Применение дизель-генераторов с переменной частотой вращения позволяет адаптировать режим работы двигателя к текущему уровню нагрузки, что является преимуществом по сравнению с асинхронными генераторами. В результате обеспечивается более экономичное использование топлива, увеличивается энергоэффективность установки [1]. Эффективность такого подхода подтверждена результатами исследований, показывающими уменьшение удельного расхода топлива, снижение механических потерь, рост КПД и улучшение экологических характеристик установки [2].

Авторами настоящей статьи предложена АГЭУ с ДППЧВ и буферным накопителем электроэнергии. В работе [3] приводится модель такой установки, предназначенная для анализа переходных процессов в режимах коммутации «пиковых» нагрузок. При этом актуальной остается задача исследования динамических режимов работы АГЭУ при изменении мощности нагрузки.

Разработана модель для исследования динамических режимов работы АГЭУ, что позволяет оптимизировать алгоритмы управления для эффективного распределения мощности, снижения износа оборудования и потребления топлива. Предусмотрено автоматическое регулирование частоты вращения вала ДВС в зависимости от величины нагрузки, что обеспечивает оптимальный тепловой режим и снижает износ двигателя. Накопитель энергии используется

для подпитки нагрузки при ее пиковых значениях и компенсации быстрых изменений мощности, а также может выполнять функцию резервного источника электроэнергии при отсутствии питания от дизель-генератора. Структурно-функциональная схема АГЭУ (рис. 1) выбиралась, принимая во внимание особенности автономного снабжения электроэнергией потребителей с изменяющейся нагрузкой и отсутствием внешней сети, обеспечивающей баланс мощности. При формировании структуры учитывались критерии топливной эффективности первичного источника, динамической устойчивости при переходных процессах, разделения функций между дизель-генератором и накопителем электроэнергии, а также соответствия системы задаче автономного электроснабжения. Накопитель подключен к звену постоянного тока через двунаправленное изолированное зарядно-разрядное устройство (ЗРУ), обеспечивающее управляемый обмен мощностью между шиной постоянного тока и АКБ. В нормальном режиме оно работает в буферном режиме по мощности, а при отключении основного (генераторного) канала – в режиме стабилизации напряжения шины.

## II. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

Имитационное моделирование выполнено на основе структурно-функциональной схемы на рис. 1. В схеме приняты следующие обозначения: ДВС – двигатель внутреннего сгорания; СГ – синхронный генератор; В – трехфазный мостовой выпрямитель; Ф – LC-фильтр; АИН1, АИН2, АИН3 – автономные инверторы напряжения; Т – трансформатор; СУ – система управления; ВТ – высокочастотный трансформатор; АКБ – аккумуляторная батарея; нагрузка. Вспомогательный канал, осуществляющий резервирование основного канала, выделен пунктиром и представляет собой зарядно-разрядное устройство (ЗРУ). Имитационная модель АГЭУ в *MATLAB Simulink* представлена на рис. 2.

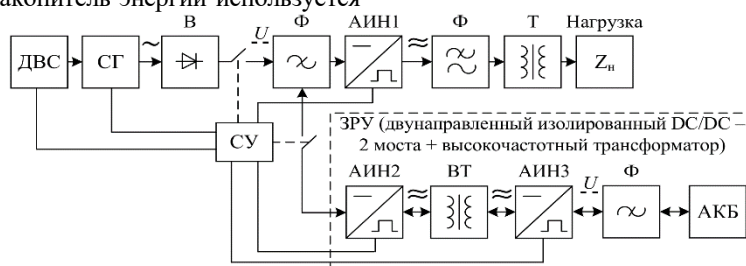


Рис. 1. Структурно-функциональная схема АГЭУ

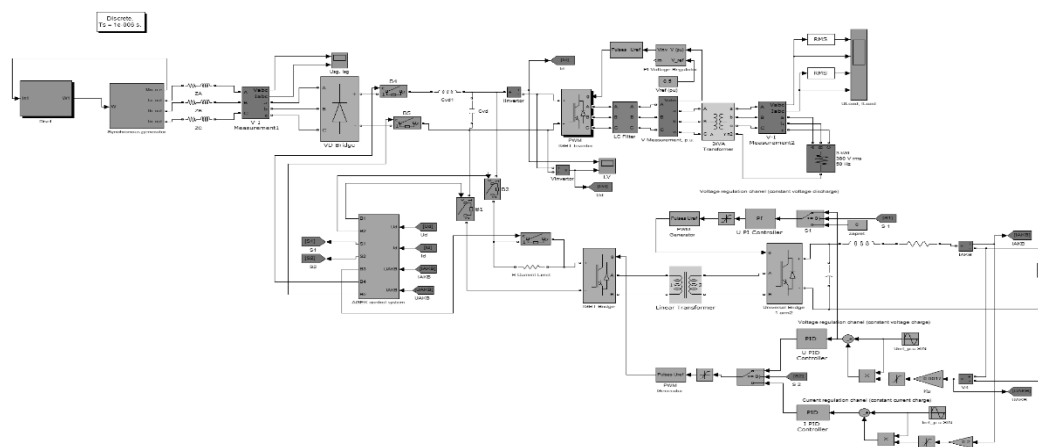


Рис. 2. Имитационная модель АГЭУ в *MATLAB Simulink*

Модель АГЭУ содержит следующие функциональные блоки:

1. Дизельный ДВС. Описывается приведенной ниже системой уравнений [4]:

$$\left. \begin{aligned} (T_{\text{дв}}p + \delta_{\text{дв}})y_0 &= y_H - \mu_0, \\ (T_T p + \delta_T)y_T &= k_T y_0 - y_H, \\ (T_K p + \delta_K)y_H &= y_T - k_K y_0, \\ (T_{\text{дв}}p + \delta_{\text{дв}})y_0 &= \chi_0 + k_D y_H, \\ (T_T p + \delta_T)y_T &= k_h \chi_0 + k_T y_0 - y_H, \\ k_g g_{\text{ц}} &= \chi_0 + \theta_{\phi} y_0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $y_0$ ,  $\mu_0$ ,  $y_T$ , – скорости вращения вала, нагрузки двигателя и ротора турбины соответственно,

$y_H$  – давление нагнетаемого воздуха,

$\chi_0$  – положение рейки топливного насоса,

$g_{\text{ц}}$  – цикловая подача топлива,

$T_{\text{дв}}$ ,  $T_T$ ,  $T_K$ ,  $T_{\text{дв}}$  – постоянные времени дизеля в канале нагрузочного воздействия, турбонагнетателя, впускного коллектора и дизеля в канале регуляторного воздействия соответственно,

$\delta_{\text{дв}}$ ,  $\delta_D$  – коэффициенты самовыравнивания дизеля в канале нагрузочного воздействия и регуляторного воздействия соответственно,

$\delta_T$ ,  $\delta_K$  – коэффициенты турбонагнетателя и впускного коллектора соответственно,

$k_D$ ,  $k_g$  – коэффициенты изменения момента сопротивления на валу дизеля при изменении мощности нагрузки и самовыравнивания дизеля соответственно,

$k_T$ ,  $k_K$ ,  $k_h$  – коэффициенты зависимости расхода воздуха через дизель от скорости его вращения, крутящего момента турбины от ее скорости вращения и крутящего момента турбины от положения рейки топливного насоса соответственно,

$\theta_{\phi}$  – коэффициент усиления топливоподающей аппаратуры дизеля.

2. СГ, модель которого реализована на основе уравнений Парка-Горева в системе  $d$ - $q$  координат [5]. График выходного напряжения СГ представлен на рис. 3. В момент времени  $t = 2$  с скачкообразно изменяется частота вращения вала СГ с 3000 до 1500 оборотов в минуту.

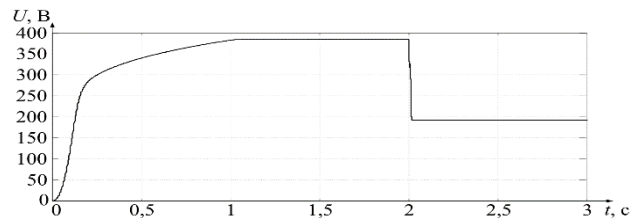


Рис. 3. График выходного напряжения СГ

3. Элементы электрической сети (трансформаторы, выпрямитель, автономные инверторы напряжения), при моделировании которых использовались стандартные блоки библиотеки *SimPowerSystems*. Следует отметить, что представленная схема инверторного звена отражает структуру, используемую в имитационной модели, и не является окончательной компоновкой промышленной установки. В практических системах для повышения надежности возможно применение параллельных инверторных модулей и модульных структур преобразователей, исключающих единую точку отказа.
4. Имитационная модель одной из ячеек АКБ представлена на рис. 4. Модель создана на основе системы дифференциальных уравнений Шеферда [6].

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{разр.бат}} &= E_0 - \frac{K i_{\text{бат}}}{SoC_0 - \frac{Q}{it}} + A \cdot e^{-\frac{B \cdot it}{Q}} - R_0 \cdot i_{\text{бат}}, \\ U_{\text{зар.бат}} &= E_0 + \frac{K i_{\text{бат}}}{1 - SoC_0 + \frac{it}{Q}} - A \cdot e^{-\frac{B \cdot it}{Q}} + R_0 \cdot i_{\text{бат}}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $E_0$  – максимальное напряжение аккумулятора,

$R_0$  – внутреннее сопротивление,

$K$  – поляризационная составляющая,

$A$  – экспоненциальная составляющая,

$B$  – инверсная экспоненциальная составляющая,

$Q$  – полная емкость аккумулятора,

$it = \int i^* dt$ ,  $i^*$  – ток разряда аккумулятора,

$i_{\text{бат}}$  – ток через аккумулятор,

$SoC_0$  – заряд аккумулятора в начальный момент времени.

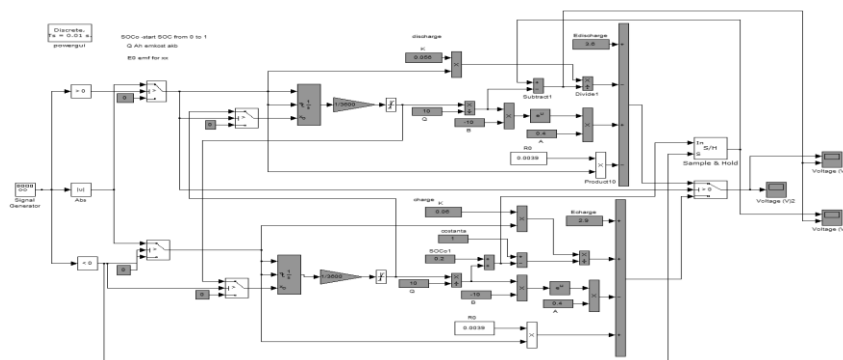


Рис. 4. Модель одной из ячеек АКБ в MATLAB Simulink

5. СУ ДГПЧВ, обеспечивающая функционирование ДВС в режиме максимальной экономии топлива. СУ имеет представленную на рис. 5 структуру.

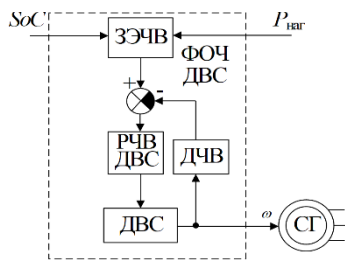


Рис. 5. Структурная схема системы управления ДГПЧВ:

ДВС – двигатель внутреннего сгорания; ФОЧ ДВС – блок формирования оптимальной частоты вращения вала; ЗЭЧВ – блок задания экономичной частоты вращения; СГ – синхронный генератор; РЧВ ДВС – регулятор частоты вращения ДВС; ДЧВ – датчик частоты вращения;  $SoC$  – заряд аккумулятора;  $P_{наг}$  – мощность нагрузки;  $\omega$  – угловая скорость коленчатого вала

6. Для сглаживания пульсаций напряжения используются  $LC$ -фильтры. На рис. 6 приведен график выходного напряжения  $LC$ -фильтра выпрямителя. На рис. 7 представлены временные зависимости выходного напряжения инвертора АИН1 и соответствующего  $LC$ -фильтра.

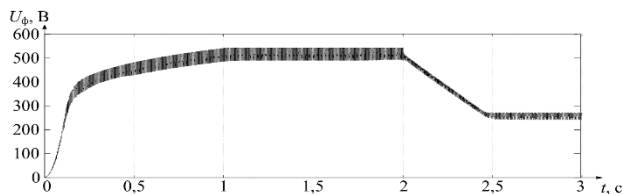


Рис. 6. График выходного напряжения  $LC$ -фильтра выпрямителя

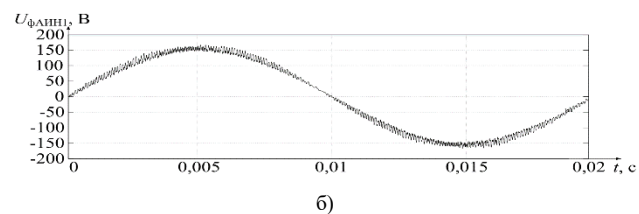
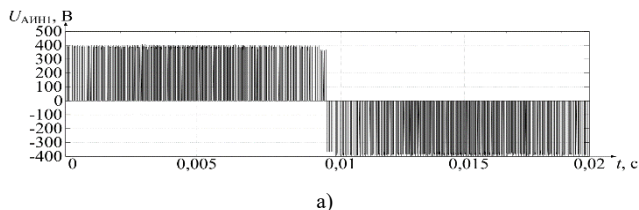


Рис. 7. Временные зависимости выходного напряжения:

а – инвертора АИН1; б –  $LC$ -фильтра АИН1

### III. ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АГЭУ

Проведены исследования динамических режимов работы АГЭУ. В том числе, в состав выполненных исследований входит анализ функционирования АГЭУ при изменении мощности нагрузки (Рис. 8). В момент времени  $t = 2$  с происходит сброс нагрузки от 3 кВт до 1,5 кВт, в момент времени  $t = 3$  с происходит увеличение нагрузки до 3000 Вт. В результате проведенного моделирования установлено, что при номинальной нагрузке 3 кВт фазное

напряжение составляет 218 В. При снижении нагрузки до 1500 Вт напряжение увеличивается до 227 В, что соответствует требованиям к качеству напряжения для сетей низкого напряжения согласно ГОСТ 32144-2013 [7]. Из этого следует, что функционирование системы управления является корректным.

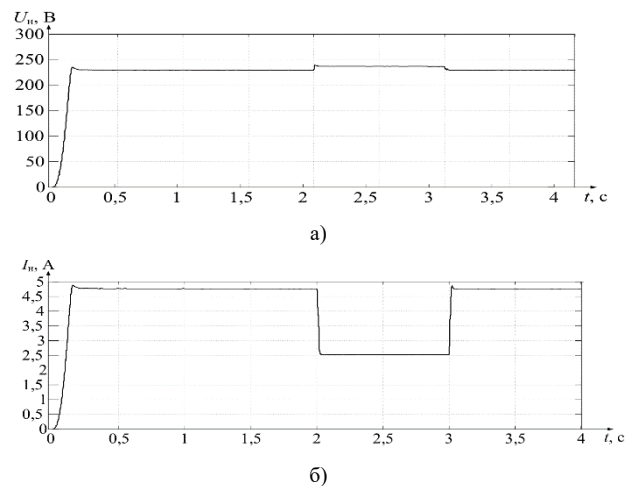


Рис. 8. Осциллограммы на нагрузке: а – тока; б – напряжения

### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

С использованием разработанной модели проведены исследования динамических режимов работы гибридной электроэнергетической установки. В их числе – пусковой режим, режимы изменения нагрузки, переключение между источниками энергии. В статье приведен пример анализа работы АГЭУ при скачкообразном изменении нагрузки. В рамках проведенных исследований также определены энергетические показатели установки, включая удельный расход топлива, КПД и коэффициент нелинейных искажений напряжения.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и отладке алгоритмов управления АГЭУ.

### Список литературы

- [1] Хватов, О. С. Асинхронные дизель-генераторные электростанции переменной частоты вращения / О. С. Хватов, Д. С. Кобяков // Интеллектуальная электротехника. – 2022. – № 3(19). – С. 19-31.
- [2] Обухов, С. Г. Экспериментальные исследования дизель-генераторной установки на переменной частоте вращения / С. Г. Обухов, И. А. Плотников // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, № 6. – С. 95-102.
- [3] Хватов О.С. Моделирование переходных процессов в дизель-генераторной установке переменной частоты вращения с буферным накопителем энергии / О. С. Хватов, А. Б. Дарьенков, Д. С. Кобяков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2019. – № 1(124). – С. 130-137.
- [4] Дарьенков А.Б. Автономные дизель-генераторные установки переменной частоты вращения: монография / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2023. – 283 с.
- [5] Байков, А.И. Имитационное моделирование ветро-дизельной электростанции / А.И. Байков, А.Б. Дарьенков, Е.Н. Соснина // Электротехника. – 2018. – №3, 2018. – С. 26-33.
- [6] Shepherd C. M. Design of Primary and Secondary Cells: II . An Equation Describing Battery Discharge // Journal of the Electrochemical Society. – 1965. – Vol. 112, №7. – P. 657-664.
- [7] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014-07-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАСЧЕТА РАСПОЛОЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ НА ПРЕДПРИЯТИИ

Лукошкин Е.Г.

ООО «Сургутэнергосбыт»  
Сургут, ХМАО-Югра, Россия  
e-mail: lukoshkin\_eg@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Повышение эффективности систем электроснабжения (далее – СЭС) является важной проблемой как для производственных предприятий в целом, так и отдельных цехов на производстве. Эффективность СЭС позволяет снизить расходы на энергию и повысить производительность оборудования. Это особенно важно для предприятий, где оборудование потребляет большое количество электроэнергии.

Важным аспектом эффективности СЭС является повышение энергоэффективности, т.е. использование новых технологий и методов, которые позволяют при меньших потерях электроэнергии увеличивать производственные мощности предприятия или цеха. Такие меры позволяют уменьшить нагрузку на энергосистему и снизить расходы на генерацию, распределение и передачу электроэнергии.

Одним из условий повышения энергоэффективности СЭС можно считать процесс расчета расположения трансформаторных подстанций на предприятии.

**Материалы и методы:** Поиск центров электрических нагрузок (далее – ЦЭН) для установления минимальной длины отрезков, соединяющие крайние точки электроприемников (далее –ЭП) с ЦЭН.

**Результаты:** На базе MS Excel был создан инструмент, позволяющий оптимизировать и автоматизировать процесс принятия решения о размещении комплектной трансформаторной подстанции (далее – КТП) с учетом геометрических размеров самой КТП, электрооборудования предприятия (цеха) и предприятия (цеха) в целом.

**Выводы:** Данная работа позволит снизить трудозатраты на монотонные расчеты и повысить их точность за счет уменьшения влияния возможных ошибок со стороны проектировщиков СЭС.

Также представленная работа позволяет минимизировать длину кабельных трасс, что положительно скажется на аварийности и потерях электроэнергии в кабельных линиях.

**Ключевые слова:** повышение эффективности систем электроснабжения, поиск центров электрических нагрузок, расчет расположения трансформаторных подстанций на предприятии, проектирование СЭС.

## AUTOMATION OF THE PROCESS FOR CALCULATING THE LOCATION OF TRANSFORMER SUBSTATIONS AT THE ENTERPRISE

Evgenii Lukoshkin

ООО «Surgutenergosbyt»  
Surgut, KhMAO-Yugra, Russia  
e-mail: lukoshkin\_eg@mail.ru

## Abstract

**Background:** Improving the efficiency of power supply systems (hereinafter — PSS) is an important issue for both industrial enterprises overall and individual workshops within production facilities. The efficiency of the PSS enables reducing energy costs and increasing equipment productivity. This is particularly crucial for enterprises where equipment consumes a large amount of electricity.

An important aspect of PSS efficiency is enhancing energy efficiency, i.e., using new technologies and methods that allow increasing the enterprises or workshop's production capacity with lower energy losses. Such measures help reduce the load on the power system and lower costs associated with generation, distribution, and transmission of electricity.

One of the conditions for increasing the energy efficiency of the PSS is the process of calculating the placement of transformer substations at the enterprise.

**Materials and methods:** Finding the centers of electrical loads to determine the minimum length of segments connecting the outer points of electrical consumers with the centers of electrical loads.

**Results:** An tool was created in MS Excel that allows optimizing and automating the decision-making process for the placement of a complete transformer substation, considering the geometric dimensions of the substation itself, the electrical equipment of the enterprise (workshop), and the enterprise (workshop) as a whole.

**Conclusions:** This work will help reduce labor costs for monotonous calculations and improve their accuracy by minimizing the impact of potential errors made by power supply system designers.

Additionally, the presented work allows minimizing the length of cable routes, which will positively affect the reduction of accidents and energy losses in cable lines.

**Keywords:** increasing the efficiency of power supply systems, identifying the centers of electrical loads, calculating the placement of transformer substations at the enterprise, and designing power supply systems (PSS).

## I. ВВЕДЕНИЕ

Увеличение эффективности СЭС представляет собой одну из ключевых задач в сфере энергетики.

Увеличившийся интерес к этой проблематике объясняется необходимостью оптимизации потребления электроэнергии, уменьшения потерь и снижения вероятности возникновения аварийных ситуаций на производстве.

Данные аспекты играют критическую роль в условиях современного экономического развития России, поскольку решение этих вопросов напрямую влияет на конкурентоспособность предприятий в условиях рыночной экономики.

В настоящее время существует множество подходов к оптимизации электроснабжения на промышленных объектах.

В данной статье предлагается рассмотреть один из вариантов оптимизации СЭС с внедрением автоматизации процесса при расчете расположений трансформаторных подстанций (далее – ТП) на предприятиях.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Исследование проведено на примере цехового помещения с электропотребителями, равноудаленных от ЦЭН.

Исходными данными для решения поставленной задачи оптимизации выбора места расположения ТП в цехе являются размеры цеха и размеры КТП [3].

В качестве расчетных были приняты условные размеры цеха 60x27 м, КТП – 4x3 м.

Общий вид плана цеха представлен на рис.1.

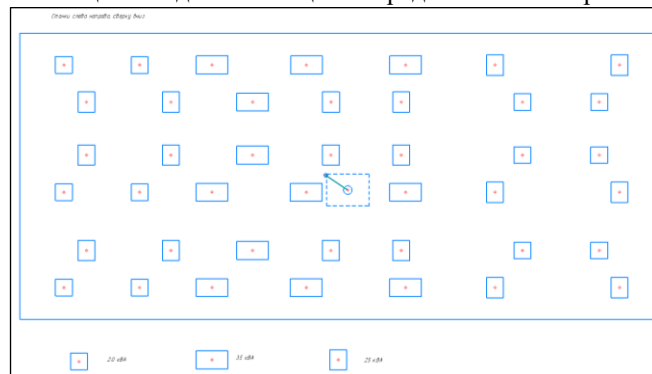


Рис.1. Общий вид плана цеха

На первом этапе расчета требуется осуществить ввод расположения электрооборудования цеха, размеров данного оборудования и установленной мощности.

Данный пункт необходим для геометрической привязки ЭП в создаваемой системе координат цеха. Фактически осуществляется создание центров с электрическими «весами» в рамках двухмерной системы координат, образуемой линейными размерами цеха.

В дальнейшем происходит «усложнение» создаваемой модели для соответствия реальным условиям. Вводится зависимость геометрического характера для созданных центров с электрическими «весами». К центрам добавляются крайние точки ЭП, что позволяет рассматривать данное электрооборудование не как материальные точки, характеризующиеся «весами», а вполне конкретные ЭП, имеющие размеры.

Все данные сведены в таб. 1.

Таблица I. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ

	Координаты центров ЭП		Размеры ЭП		Мощность ЭП, кВт	Координаты "углов" ЭП			
	х, м	у, м				х1, м	х2, м	у1, м	у2, м
Группа 1	4,15	24	1,6	1,6	20	3,4	5,0	23,2	24,8
	11,3	24	1,6	1,6	20	10,5	12,1	23,2	24,8
	18,16	24	3	1,7	35	16,7	19,7	23,2	24,9
	27,08	24	3	1,7	35	25,6	28,6	23,2	24,9
	36,47	24	3	1,7	35	35,0	38,0	23,2	24,9
	44,93	24	1,6	1,93	25	44,1	45,7	23,0	25,0
	56,7	24	1,6	1,93	25	55,9	57,5	23,0	25,0
Группа 2	6,28	20,5	1,6	1,93	25	5,5	7,1	19,5	21,5
	14,27	20,5	1,6	1,93	25	13,5	15,1	19,5	21,5
	22	20,5	3	1,7	35	20,5	23,5	19,7	21,4
	29,42	20,5	1,6	1,93	25	28,6	30,2	19,5	21,5
	36,06	20,5	1,6	1,93	25	35,3	36,9	19,5	21,5
	47,52	20,5	1,6	1,6	20	46,7	48,3	19,7	21,3
	54,78	20,5	1,6	1,6	20	54,0	55,6	19,7	21,3
Группа 3	6,28	15,5	1,6	1,93	25	5,5	7,1	14,5	16,5
	14,27	15,5	1,6	1,93	25	13,5	15,1	14,5	16,5
	22	15,5	3	1,7	35	20,5	23,5	14,7	16,4
	29,42	15,5	1,6	1,93	25	28,6	30,2	14,5	16,5
	36,06	15,5	1,6	1,93	25	35,3	36,9	14,5	16,5
	47,52	15,5	1,6	1,6	20	46,7	48,3	14,7	16,3
	54,78	15,5	1,6	1,6	20	54,0	55,6	14,7	16,3
Группа 4	4,15	12	1,6	1,6	20	3,4	5,0	11,2	12,8
	11,3	12	1,6	1,6	20	10,5	12,1	11,2	12,8
	18,16	12	3	1,7	35	16,7	19,7	11,2	12,9
	27,08	12	3	1,7	35	25,6	28,6	11,2	12,9
	36,47	12	3	1,7	35	35,0	38,0	11,2	12,9
	44,93	12	1,6	1,93	25	44,1	45,7	11,0	13,0
	56,7	12	1,6	1,93	25	55,9	57,5	11,0	13,0
Группа 5	6,28	6,5	1,6	1,93	25	5,5	7,1	5,5	7,5
	14,27	6,5	1,6	1,93	25	13,5	15,1	5,5	7,5
	22	6,5	3	1,7	35	20,5	23,5	5,7	7,4
	29,42	6,5	1,6	1,93	25	28,6	30,2	5,5	7,5
	36,06	6,5	1,6	1,93	25	35,3	36,9	5,5	7,5
	47,52	6,5	1,6	1,6	20	46,7	48,3	5,7	7,3
	54,78	6,5	1,6	1,6	20	54,0	55,6	5,7	7,3

	Координаты центров ЭП		Размеры ЭП		Мощность ЭП, кВА	Координаты "углов" ЭП			
	x, м	y, м				x1, м	x2, м	y1, м	y2, м
Группа 6	4,15	3	1,6	1,6	20	3,4	5,0	2,2	3,8
	11,3	3	1,6	1,6	20	10,5	12,1	2,2	3,8
	18,16	3	3	1,7	35	16,7	19,7	2,2	3,9
	27,08	3	3	1,7	35	25,6	28,6	2,2	3,9
	36,47	3	3	1,7	35	35,0	38,0	2,2	3,9
	44,93	3	1,6	1,93	25	44,1	45,7	2,0	4,0
	56,7	3	1,6	1,93	25	55,9	57,5	2,0	4,0

Описанный этап реализуется путем расчета координат крайних точек («углов») всех ЭП цеха.

Ввиду технологического расположения оборудования (центры ЭП расположены на горизонтальных линиях) для удобства расчетов осуществляется разделение ЭП на группы, имеющие одинаковые ординаты (ось Oy).

Следующий этап – классический метод определения ЦЭН по формулам (1) [1]:

$$X_{\text{ЦЭН}} = \frac{\sum_i P_i x_i}{\sum_i P_i}; Y_{\text{ЦЭН}} = \frac{\sum_i P_i y_i}{\sum_i P_i}, \quad (1)$$

где  $X_{\text{ЦЭН}}$  и  $Y_{\text{ЦЭН}}$  – координаты ЦЭН;  
 $P_i$  – мощность  $i$ -го электроприемника;  
 $x_i$  и  $y_i$  – координаты электроприемников.

Формулы (1) отражают средневзвешенный ЦЭН в зависимости от расчетных мощностей электроприемников, что позволяет опираться не на номинальные значения мощности, а на реальное потребление в течение смены.

Однако, если ЭП различаются по режиму работы, то вместо установленной, пользуются среднесменной мощностью. Если они также различаются и по времени их включения ( $T_{в.i}$ ), то выражение (1) примет вид (2) [1]:

$$X_{\text{ЦЭН}} = \frac{\sum_i P_{\text{см.i}} \cdot T_{в.i}}{\sum_i P_{\text{см.i}}}; Y_{\text{ЦЭН}} = \frac{\sum_i P_{\text{см.i}} \cdot T_{в.i}}{\sum_i P_{\text{см.i}}}, \quad (2)$$

При исследовании, условно принимается, что ЭП не различаются по режиму работы и времени включения, поэтому, пренебрегается выражение (2) и расчеты сводятся к выражению (1).

При подключении ЭП магистральной схемой питания необходимо учитывать, что в выражении (1) вместо координат отдельных станков, будут указываться координаты распределительных пунктов или точек токораздела магистрали.

### III. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАСЧЕТА РАСПОЛОЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Для автоматизации поставленной задачи необходимо применение программного обеспечения, которое позволит инженерам увеличить производительность, улучшить качество разработок, оперативно реагировать на изменения в требованиях и технологиях.

Для автоматизации подбора параметров целесообразно применять специализированное программное обеспечение для визуализации и анализа данных.

После рассмотрения нескольких программных комплексов, для автоматизации процесса выбран продукт «Microsoft Excel» (далее – ПО).

В рамках принимаемого средства решения задачи определения ЦЭН, в ПО прописаны следующие алгоритмы:

$$1) X_{\text{ЦЭН}} = \{=\text{СУММ}(\#\text{ССЫЛКА НА ЛИСТ}'!B3:B44*(\#\text{ССЫЛКА НА ЛИСТ}'!F3:F44)/\text{СУММ}((\#\text{ССЫЛКА НА ЛИСТ}'!F3:F44))\}$$

$$2) Y_{\text{ЦЭН}} = \{=\text{СУММ}((\#\text{ССЫЛКА НА ЛИСТ}'!C3:C44*(\#\text{ССЫЛКА НА ЛИСТ}'!F3:F44)/\text{СУММ}((\#\text{ССЫЛКА НА ЛИСТ}'!F3:F44))\}$$

Данные алгоритмы отражают содержание описанных формул (1), применяемых к ПО.

Последующий расчет базируется на сформированной целевой функции, позволяющей определить оптимальный ЦЭН с учетом геометрических характеристик электрооборудования цеха и КТП (3) [2].

$$L_{\text{min}} = \frac{\sum_i P_i \cdot \sqrt{|X'_{\text{ЦЭН}} - x_i|^2 + |Y'_{\text{ЦЭН}} - y_i|^2}}{\sum_i P_i}, \quad (3)$$

где  $X'_{\text{ЦЭН}}$  и  $Y'_{\text{ЦЭН}}$  – оптимальные координаты центра электрических нагрузок;

$P_i$  – мощность  $i$ -го электроприемника;  
 $x_i$  и  $y_i$  – координаты ЭП («углов» ЭП).

Данная функция отражает поиск минимальной длины отрезков, соединяющих крайние точки ЭП с ЦЭН.

Общий вид листа ПО «Расчеты» представлен на рис.2.

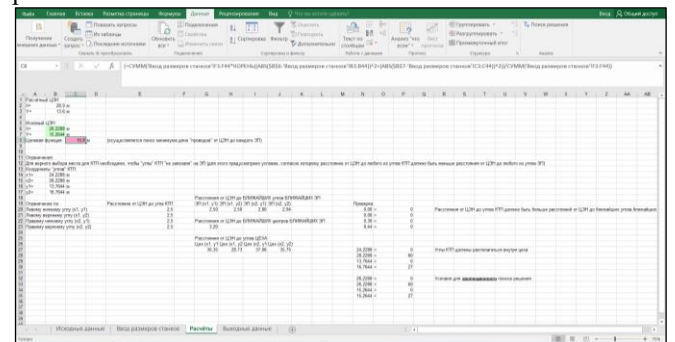


Рис.2. Общий вид листа Excel «Расчеты»

Для реализации данной функции на базе ПО использована формула массива:

$$L_{\text{min}} = \{=\text{СУММ}('Ввод размеров станков'!F3:F44*\text{КОРЕНЬ}((\text{ABS}(\text{Ввод размеров станков'!B3:B44})^2+(\text{ABS}(\text{Ввод размеров станков'!C3:C44}))^2))/\text{СУММ}('Ввод размеров станков'!F3:F44)\}$$

Стоит сделать акцент на содержании самой функции и некоторых ее особенностях.

Формула представляет собой преобразованные выражения (1) с учетом геометрических параметров ЭП и КТП.

При осуществлении поиска минимума данной целевой функции средствами ПО, а именно прибегая к применению надстройки «Поиск решения», входящей в состав вкладки «Анализ данных», определяется оптимальное место расположения КТП при учете всех ЭП цеха.

Формула (3) позволяет найти минимальное значение суммы всех расстояний от «углов» ЭП до ЦЭН.

Для согласования результатов расчета вводятся граничные условия и ограничения, на основании которых осуществляется проверка.

Для верного выбора места расположения КТП необходимо, чтобы «углы» КТП не соприкасались с ЭП (для этого предусмотрено условие, согласно которому расстояние от ЦЭН до любого из углов КТП должно быть меньше расстояния от ЦЭН до любого из углов ЭП).

Под «углами» КТП подразумеваются идеализированные физические граничные точки КТП.

Первым этапом определяются координаты расположения КТП в пространстве цеха («углы» КТП).

На основании полученных данных рассчитываются расстояния от ЦЭН (фактически являющегося центром КТП) до «углов» КТП. После чего определяются расстояния от ЦЭН до ближайших «углов» ближайших ЭП.

Поиск минимальных расстояний реализован при помощи функции:

$$L_{\text{ЦЭН-ЭП}}(x_1; y_1) = \{=\text{НАИМЕНЬШИЙ}(\text{КОРЕНЬ}((\text{B6}'\text{Ввод размеров станков}'\text{I3:I44})^2+(\text{B7}'\text{Ввод размеров станков}'\text{I13:I44})^2);1)\}$$

Данная функция реализует поиск минимального значения длины от уточненного ЦЭН до ближайшего «угла» ближайшего ЭП, соответствующему левому нижнему углу КТП.

Фактически суть проверки сводится к выполнению требований неравенства:

$$L_{\text{ЦЭН-ЭП}}(x_i; y_j) - 2,5 > 0,$$

где  $L_{\text{ЦЭН-ЭП}}(x_i; y_j)$  – расстояние от ЦЭН до ближайших углов ближайших ЭП;  
2,5 – расстояние от ЦЭН до любого из углов КТП.

Второй этап - проверка расстояний от ЦЭН до углов цеха, чтобы убедиться в том, что КТП не была размещена в стене цеха:  $X_{\text{КТПmin}} > 0$ ;  $X_{\text{КТПmax}} < 60$ ;  $Y_{\text{КТПmin}} > 0$ ;  $Y_{\text{КТПmax}} < 27$ .

Нулями обозначены координаты цеха в привязке к левому нижнему углу цеха, а 27 и 60 – размеры и, соответственно, координаты цеха. Граничными условиями является расположение КТП внутри стен цеха.

Реализуемые проверки представляют собой сверку полученных величин с геометрическими параметрами электрооборудования и цеха.

Для решения задачи оптимизации поиска ЦЭН в рамках надстройки «Поиск решения» был применен эволюционный метод решения задачи (рис. 3).

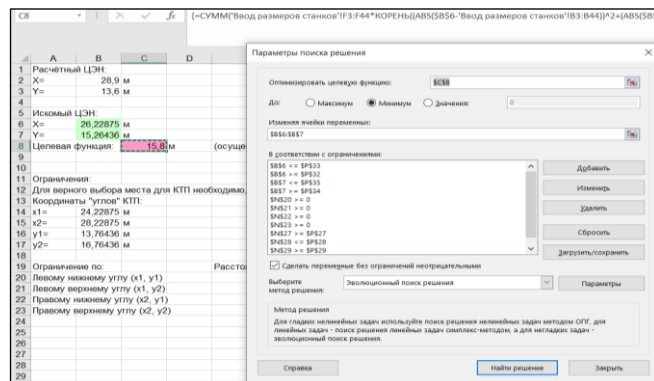


Рис. 3. Надстройка «Поиск решения»

По итогам расчета ЦЭН для объекта на листе «Выходные данные» формируются координаты КТП.

Стоит отметить, что в процессе выполнения работы выявлено недостаточное время поиска оптимума при эволюционном поиске решения поставленной задачи, что позволяло при определенном сочетании исходных данных при первой итерации определять лишь локальный минимум (не самый оптимальный ЦЭН). Для определения глобального минимума приходилось проводить несколько итераций поиска.

Для решения данной проблемы принято решение изменить стандартные параметры для решения задач с помощью эволюционного поиска решения в ущерб скорости работы программы. Было увеличено максимальное время поиска решения без улучшения.

## II. IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Автоматизация процесса расчета расположения КТП на предприятии направлена на улучшение уже существующего метода повышения эффективности СЭС, что позволит исключить ошибки при проектировании, значительно сократить время определения наилучшего места расположения КТП и оперативно менять исходные данные при проектировании.

Данный алгоритм может использоваться как при проектировании новых производственных объектов, так и при реконструкции уже функционирующих предприятий.

При написании и установлении алгоритмов, описанных в работе намечены дальнейшие варианты развития автоматизированного процесса расчета расположения КТП.

При взаимодействии со специализированными организациями возможна реализация данного алгоритма на платформе индивидуального программного комплекса с соответствующим (упрощенным) интерфейсом и искусственным интеллектом.

## Список литературы

- [1] В. В. Ярошевич, А. С. Карпов. «Разработка мероприятий по повышению эффективности работы систем электроснабжения». / Труды Кольского научного центра РАН, «Электротехника, электронная техника, информационные технологии». - г. Апатиты, 2017. С. 36-40.
- [2] В. С. Иванов, В. А. Пономарев. «Методы повышения эффективности систем энергоснабжения промышленных предприятий». / ISSN 1995-4565. Вестник РГРТУ. - 2017. - № 59. - С. 158-169.
- [3] Указания по проектированию электроснабжения промышленных предприятий (СН-174-75). – М.: Стройиздат. - 1975. - (Госстрой СССР).

# ВЫБОР ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Монгуш Ч.П.<sup>1,2</sup>, Гиршин С.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», <sup>2</sup>Филиал ПАО «Россети Сибирь» - «Омскэнерго»  
Омск, Россия  
e-mail: 99mongush99@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Повышение точности расчетов потерь мощности и энергии в электрических сетях представляет собой одно из приоритетных направлений развития электроэнергетики.

**Материалы и методы:** При выполнении работы использовались метод теории вероятности, метод статистического анализа с использованием программы Microsoft Office Excel.

**Результаты:** В данной работе подобрано распределение негауссовского типа, как одно из возможных распределений для тока. Знание закона распределения тока необходимо для проведения расчета потерь мощности при вероятностном задании нагрузки с учетом температурной зависимости сопротивления. Основным преимуществом такого расчета является уточнение потерь в электрических сетях.

**Выводы:** Полученная информация о подчинении тока распределению негауссовского типа может быть использована при расчете потерь электроэнергии с учетом температуры провода. Разрабатываемый метод не уступает в точности методу оперативных расчетов, так как он использует математическое ожидание и дисперсию нагрузок, которые полностью определяют потери энергии и могут быть определены без ограничения точности. Также с большой точностью можно сделать только ретроспективные расчеты. Таким образом, уточненные потери определяют выбор и разработку обоснованных мероприятий по снижению потерь электроэнергии и повышению эффективности энергоснабжения.

**Ключевые слова:** потери мощности, температура провода, график электрических нагрузок, закон распределения.

## SELECTION OF THE LAW OF ELECTRICAL LOAD DISTRIBUTION

Chayana Mongush<sup>1,2</sup>, Stanislav Girshin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Technical University, <sup>2</sup>Public Joint Stock Company Rosseti Sibiria,  
Omsk, Russia  
e-mail: 99mongush99@mail.ru

## Abstract

**Background:** Increasing the accuracy of calculations of power and energy losses in electrical networks is one of the priority areas for the development of the electric power industry.

**Materials and methods:** When performing the work, the method of probability theory and the method of statistical analysis using Microsoft Office Excel were used.

**Results:** In this work, a non-gaussian type distribution was selected as one of the possible distributions for the current. Knowledge of the current distribution law is necessary to calculate power losses with a probabilistic load given, taking into account the temperature dependence of the resistance. The main advantage of this calculation is the clarification of losses in electrical networks.

**Conclusions:** The information obtained about the subordination of the current to a non-gaussian type distribution can be used in calculating electricity losses taking into account the temperature of the wire. The developed method is not inferior in accuracy to the method of operational calculations, since it uses the mathematical expectation and load dispersion, which completely determine energy losses and can be determined without limiting accuracy. Also, only retrospective calculations can be made with great accuracy. Thus, the specified losses determine the selection and development of reasonable measures to reduce electricity losses and increase the efficiency of energy supply.

**Key words:** power losses, wire temperature, electrical load graph, distribution law.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Повышение точности расчетов потерь мощности и энергии в электрических сетях представляет собой одно

из приоритетных направлений развития электроэнергетики, способствующее общему повышению эффективности электроснабжения [1]. Уточнение расчетов потерь мощности может быть

достигнуто на основе вероятностного задания электрических нагрузок при одновременном учете температурной зависимости активных сопротивлений элементов сети.

Вероятностная модель нагрузки позволяет найти закон распределения потерь мощности. Однако практический интерес представляет только математическое ожидание потерь мощности  $M(\Delta P)$ , поскольку именно эта величина определяет потери энергии. Таким образом, потери энергии при вероятностной модели нагрузки равны

$$\Delta W = M(\Delta P)T = 3T \sum_0^{\infty} I^2 R(I) f(I) dI \quad (1)$$

где  $f(I)$  – закон распределения тока нагрузки.

Активное сопротивление зависит от температуры, а температура, зависит от тока, то есть имеет место функциональная зависимость  $R(I)$ . Поэтому при одних и тех же математическом ожидании и дисперсии тока потери энергии могут принимать различные значения. Таким образом, для расчета потерь энергии необходимо знать не только эти числовые характеристики, но и закон распределения тока.

Формула связи мощности и тока в статье не приведена в силу ее общеизвестности. Однако предполагается, что она учитывает и реактивную мощность через коэффициент мощности. Статистические данные по коэффициенту мощности или по реактивной мощности не приведены, так как они отсутствуют. Поэтому предполагается использовать среднее значение коэффициента мощности.

## II. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

В качестве примера рассмотрены нагрузки одного из фидеров подстанции 110/10 кВ «Кировская» г. Омск. Исходные данные для статистического анализа могут быть получены в результате сезонных замеров суточных графиков электрических нагрузок, проводимых два раза в год по регламенту. Для выбранного объекта использованы годовые значения активной мощности по данным АИИС КУЭ. Приняв количество наблюдений равным числу часов работы при определенной нагрузке, получим вариационные ряды в таблице 1.

Таблица 1. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ ПС «КИРОВСКАЯ»

№	P, кВт	X, ч	№	P, кВт	X, ч
1	0...320	46	8	2240...2560	1165
2	320...640	127	9	2560...2880	983
3	640...960	227	10	2880...3200	720
4	960...1280	484	11	3200...3520	479
5	1280...1600	712	12	3520...3840	258
6	1600...1920	1063	13	3840...4160	106
7	1920...2240	1220	14	4160...4475	42

## III. ВЫРАВНИВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Процессы изменения потребляемой мощности, действующее значение тока являются непрерывными и закон распределения тока несимметричен. Это объясняется тем, что действующие значения тока от нуля до номинального значения все довольно вероятны, но ток больше номинального значения гораздо менее вероятен

[2]. Также действующее значение тока не может быть отрицательным. Поэтому при выборе закона распределения необходимо подобрать несимметричную кривую с положительной областью значений. На основе имеющихся значений выборки подвергнем проверке гипотезу о том, что распределение объекта подчиняется распределению негауссовского типа [3].

Распределение негауссовского типа, для которых пик больше или меньше классического значения, описывается плотностью распределения по формуле (2):

$$f = \frac{\sqrt{\ln c}}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left\{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2} \ln c\right\}, c > 1 \quad (2)$$

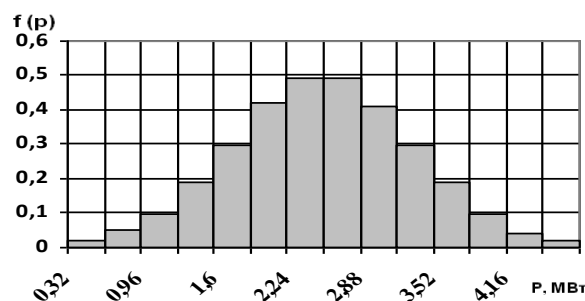


Рис. 1. Эмпирическая и теоретическая интегральные функции распределения активных нагрузок подстанции Кировская

## IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Из полученных расчетов можно сделать вывод о том, что проверка статистических гипотез о принадлежности распределений опытных данных закону негауссовского типа дают положительные результаты. Полученная информация о подчинении тока распределению негауссовского типа может быть использована при расчете потерь электроэнергии с учетом температуры провода. Разрабатываемый метод не уступает в точности методу оперативных расчетов, так как он использует математическое ожидание и дисперсию нагрузок, которые полностью определяют потери энергии (если не учитывать нагрев) и могут быть определены без ограничения точности. Также с большой точностью можно сделать только ретроспективные расчеты. Таким образом, уточненные потери определяют выбор и разработку обоснованных мероприятий по снижению потерь электроэнергии и повышению эффективности энергоснабжения.

## Список литературы

- [1] Плащанский Л.А., Пунцаг Хангал. Формирования электрических нагрузок в условиях золотодобывающих предприятий Монголии. Доклад на симпозиуме «Неделя горняка-2000». Москва. МГТУ. 31 января-4 февраля 2000 г.
- [2] Гиршин С.С., Монгуш Ч.П., Бирюков С.В. Расчет потерь мощности в электрических сетях при вероятностном задании нагрузок. // Омский научный вестник. – 2018. – №1(157). – С. 31-35.
- [3] Ошхунов М.М., Ошхунова З.М., Джанкулаева М.А. Математические методы анализа статистических данных негауссовского типа // Научные ведомости БелГУ. Серия: Математика. Физика. – 2014. - №12(183). – Вып. 35. – С. 221-224.

# ГТУ МАЛОЙ МОЩНОСТИ, РАБОТАЮЩАЯ НА АЛЬТЕРНАТИВНОМ ТОПЛИВЕ

Новоселова М.С., Марьин Г.Е.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»,  
Казань, Россия  
e-mail: nova-mara0607@list.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Альтернативные виды топлива находят все большее распространение в сфере энергетики. Нетрадиционные источники энергии возобновляемы и доступны, недостатком может быть сложный процесс производства (например, для генераторных газов) или низкая эффективность относительно традиционных источников энергии. При низких тепловых характеристиках топлива существует решение с добавлением ~~в него~~ водорода, для снижения эмиссии вредных веществ и повышения теплового потенциала смеси. Однако также возможно рассмотрение смеси других видов топлива, таких как природный газ и биогаз. Такая смесь способствует экономии невозобновляемого ресурса, увеличению используемости альтернативных источников энергии, а также утилизации отходов, которые могут быть использованы для генерации биогаза (твердые бытовые отходы, органические отходы обрабатывающих производств и сельскохозяйственных угодий).

**Материалы и методы:** Использовался метод математического моделирования работы газотурбинной установки путем решения трансцендентных уравнений в автоматизированном комплексе газодинамических расчетов энергетических турбомашин (АС ГРЭТ).

**Результаты:** Определены эксплуатационные характеристики газотурбинной установки (ГТУ) Taurus 60-7901S при работе на природном газе, биогазе, смеси в соотношении 75/25: удельный расход топлива, расход и температура выхлопных газов, а также коэффициент полезного действия в зависимости от изменения электрической нагрузки установки.

**Выводы:** Добавление биогаза в природный газ в соотношении 25/75 позволяет экономить невозобновляемый источник энергии (природный газ), утилизировать отходы, используемые для производства биотоплива, а также повысить тепловую эффективность ГТУ, работающей в составе малой ТЭЦ.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, газотурбинная установка, распределенная энергетика, альтернативные виды топлива.

## LOW-POWER GTU, POWERED BY ALTERNATIVE FUELS

Marina Novoselova, George Marin  
Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russia  
e-mail: nova-mara0607@list.ru

## Abstract

**Background:** Alternative fuels are becoming more widespread in the energy sector. Non-traditional energy sources are renewable and affordable, the disadvantage may be a complicated production process (for example, for generator gases) or low efficiency relative to traditional energy sources. If the thermal characteristics of the fuel are insufficient, there is a solution with the addition of hydrogen to reduce the emission of harmful substances and increase the thermal potential of the mixture. However, it is also possible to consider a mixture of other fuels such as natural gas and biogas. Such a mixture helps to save non-renewable resources, increase the use of alternative energy sources, as well as the disposal of waste that can be used to generate biogas (solid household waste, organic waste from manufacturing and agricultural land).

**Materials and methods:** The method of mathematical modeling of the operation of a gas turbine installation by solving transcendental equations in an automated complex of gas dynamic calculations of energy turbomachines (AC GDCET) was used.

**Results:** The operational characteristics of the Taurus 60-7901S gas turbine unit (GTU) when operating on natural gas, biogas and a mixture in a ratio of 75/25 have been determined: specific fuel consumption, exhaust gas flow and temperature, as well as efficiency depending on changes in the electrical load of the unit.

**Conclusions:** The addition of biogas to natural gas in a ratio of 25/75 makes it possible to save a non-renewable energy source (natural gas), dispose of waste used for biofuel production, and also increase the thermal efficiency of a GTU operating as part of a small thermal power plant.

**Key words:** mathematical modeling, gas turbine unit, distributed energy, alternative fuels.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Наиболее востребованным и используемым топливом в энергетике сейчас являются уголь, мазут и природный газ. В частности, для ГТУ используют газообразное топливо, что связано с его упрощенной подготовкой перед сжиганием, высокими энергетическими характеристиками, а также более легким распылением его в камере сгорания. Однако все перечисленные топлива являются невозобновляемыми источниками энергии, из-за чего возникает проблема ограниченности топливных ресурсов.

Решением этой проблемы могут послужить альтернативные возобновляемые источники энергии: биотопливо, генераторные газы, попутный и производственные газы и проч., которые либо получаются из отходов производств, либо являются этими отходами. Так, их применение не только позволит экономить ограниченный ресурс, но и экономить на производстве энергии, затрачиваемой на собственные нужды производств. Малая распространенность таких решений связана с тем, что либо генерация альтернативного источника энергии, либо его энергетические характеристики не сопоставимы со стоимостью применения и характеристиками природного газа [1-3].

Одним из путей решения является создание смесей природного газа с другими топливами, например

водородом или биогазом. При этом происходит одновременно экономия природного газа, а также снижение стоимости использования альтернативного вида топлива.

Газотурбинная установка может работать в составе малых объектов распределенной генерации, как с подключением к сети, так и в изолированной нагрузке, при этом обеспечивая надежность электроснабжения [4]. Таким образом, можно сократить срок окупаемости этого объекта, а также актуализировать использование местных альтернативных источников энергии.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГТУ

Математическая модель газотурбинной установки Taurus 60-7901S (рис. 1) предполагает расчет характеристик в различных модулях ГТУ: компрессор, камера сгорания, турбина, электрогенератор.

Сама ГТУ обладает следующими техническими характеристиками:

- расход воздуха: 21,6 кг/с;
- температура в камере сгорания: 1242,0°С;
- электрическая мощность: 5,7 мвт;
- коэффициент полезного действия: 32,0 %;
- температура выхлопных газов: 510,0°с.

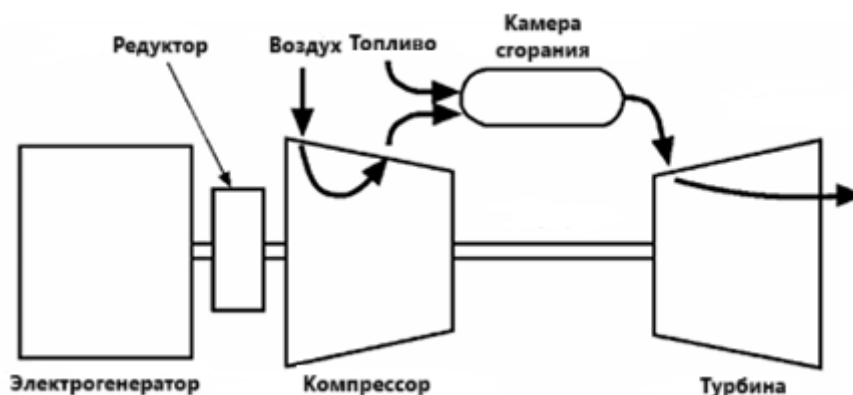


Рис. 1. Принципиальная схема газотурбинной установки Taurus 60-7901S

Определение эксплуатационных характеристик ГТУ предполагается за счет решения системы трансцендентных уравнений [5]:

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = y_1, \\ f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = y_2, \\ \dots \\ f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = y_n. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $f_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) – некоторые функции отличные от нуля на величину невязки  $y_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) вследствие приближенного задания значений независимых переменных (варьируемых параметров)  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

Расчет удельного расхода топлива будет описываться выражением (2), а эффективный коэффициент полезного действия – (3) [6]:

$$q'_m = \frac{H_{вз}^* - H_1^*}{H_u \cdot \eta_{кc} - H_{чсc}^* + H_0} \quad (2),$$

где  $H_{вз}^*$ ,  $H_1^*$  – энтальпии воздуха на входе и выходе из камеры сгорания соответственно, кДж/кг;  $H_u$  – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг;  $\eta_{кc}$  – коэффициент полноты сгорания;  $H_{чсc}^*$  – энтальпия чистых продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания, кДж/кг;  $H_0 = 646,944$  кДж/кг.

$$\eta_{эфф} = \frac{3600 \cdot N_e}{G'_t \cdot H_u} \quad (3)$$

где  $N_e$  – электрическая мощность, вырабатываемая установкой, кВт.

При этом необходимо произвести подготовительные расчеты по выражениям (4) и (5) для дальнейшего использования условных формул рассматриваемых топлив

(Табл. 1, [7]), которые будут использованы для работы ГТУ:

Число атомов  $i$ -го элемента в условной молекуле:

$$b_m = 100 \cdot \frac{g_i}{\mu_i}, \quad (4)$$

где  $g_i$  – массовая доля  $i$ -го химического вещества в компоненте;  $\mu_i$  – молярная масса  $i$ -го элемента.

Количество атомов  $i$ -го вещества в условной молекуле при помощи формулы:

$$b_{ik} = \sum_{n=1}^r b_{in} n_n, \quad (5)$$

где  $n_n$  – количество молей  $n$ -го химического вещества в условном моле компонента.

Таблица II. СОСТАВ ТОПЛИВА

Наименование топлива	Концентрация веществ в топливе, % об.								Нижняя теплота сгорания, Д.Р.
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	
Природный газ	85,310	5,810	5,310	2,068	0,025	0,900	0,440	—	47324,850
Биогаз	55,0	—	—	—	—	—	30,0	15,0	23248,870
Смесь природного газа и биогаза в соотношении 75/25	81,045	5,520	5,045	1,965	0,024	0,855	0,418	5,130	40862,930

После решения уравнений (4) и (5) можно составить условную формулу, показывающую сколько атомов С, Н, N, О содержится в топливе. Для известных составов условные формулы указаны в Табл. 2.

Таблица III. УСЛОВНЫЕ ФОРМУЛЫ ТОПЛИВ

Наименование топлива	С	Н	N	О	Энтальпия топлива, кДж/кг
Природный газ (Уренгойское месторождение)	6,247	22,383	0,091	0,056	-4395,093
Биогаз	3,807	11,197	—	2,687	-5248,9
Смесь природного газа и биогаза в соотношении 75/25	5,730	21,211	0,085	0,884	-4577,309

### III. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГТУ

По результатам расчетов эксплуатационных характеристик ГТУ были получены следующие зависимости:

1. На рис. 2 показана зависимость изменения удельного расхода топлива на выработку единицы энергии при изменении режима работы газотурбинной установки. Важно отметить, что при использовании биогаза удельный расход топлива увеличивается в 2 раза, когда как расход

смеси газов и природного газа приближены по своим значениям (при работе ГТУ на номинальном режиме и использовании природного газа удельный расход топлива составляет 0,1015 кг/(ч·кВт), а при использовании смеси газов – 0,1193 кг/(ч·кВт)), при этом заметно, что расход смеси газов несколько увеличен относительно расхода природного газа.

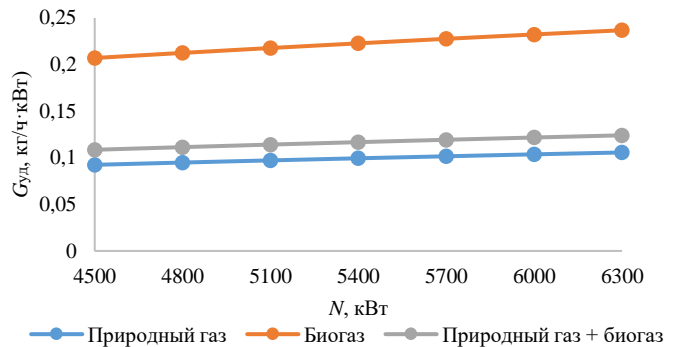


Рис. 2. Изменение удельного расхода топлива в зависимости от режима работы ГТУ

2. При увеличении удельного расхода биогаза и топливной смеси его с природным газом эффективный коэффициент полезного действия установки (рис. 3) повышается, если использовать эту смесь, когда как при сжигании биогаза заметно снижение КПД в среднем на 0,22 % относительно работы газотурбинной установки на традиционном виде топлива. Так, при выработке 5,7 МВт электрической энергии, КПД установки при использовании природного газа составляет 31,04 %, биогаза – 28,78 %, а смеси газов – 31,24 %.

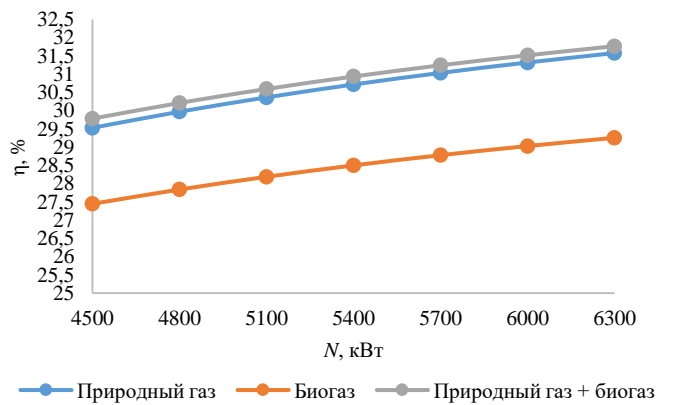


Рис. 3. Изменение эффективного коэффициента действия в зависимости от режима работы ГТУ

3. На рис. 4 показано, что температура выхлопных газов для природного и биогаза практически идентична (разница в среднем 4 °С), в то время как наблюдается прирост примерно на 14 °С при сжигании в камере сгорания ГТУ смеси биогаза и природного газа.

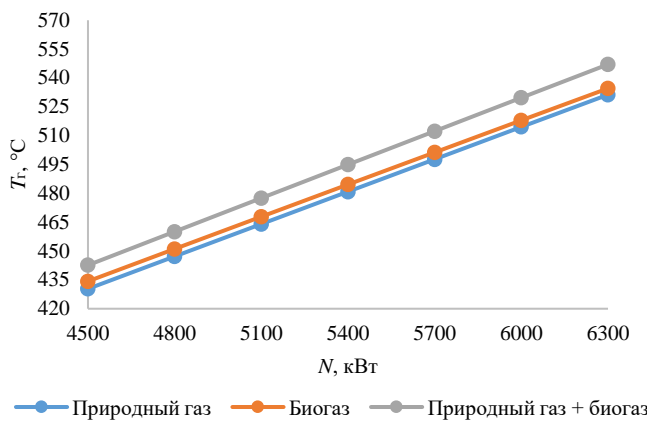


Рис. 4. Изменение температуры выхлопных газов в зависимости от режима работы ГТУ

4. Увеличение теплового потенциала выхлопных газов ГТУ представлено на рис. 5, где описана зависимость расхода выхлопных газов от изменения вида используемого топлива и режима работы ГТУ. Заметно, что наибольший расход выхлопных газов при сжигании в камере сгорания биогаза, когда как разность между расходом выхлопных газов при работе ГТУ на природном и смеси газов равна в среднем 0,016кг/с. Следовательно, при том же объеме газов на выходе из турбины, при работе ГТУ на природном газе и на газовой смеси, их температура выше, значит, и тепловой потенциал будет выше.

Увеличение теплового потенциала выхлопных газов ГТУ рассматривается как положительный эффект, в связи с этим, данную газотурбинную установку эксплуатировать в схеме с теплообменником-утилизатором для максимальной выработки тепловой энергии. Увеличение выработки тепловой энергии совместно с электрической энергией позволяет быстрее окупить проект строительства мини-ТЭЦ.

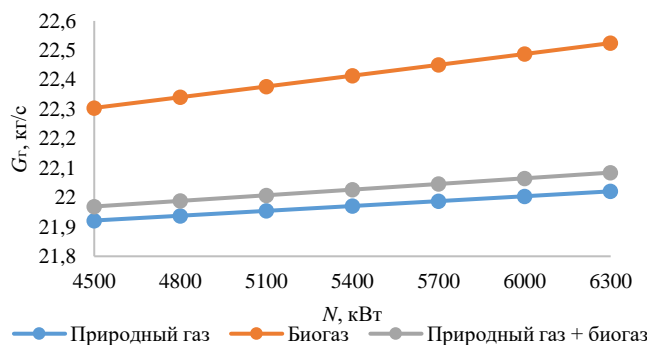


Рис. 5. Изменение расхода выхлопных газов в зависимости от режима работы ГТУ

#### IV. Выводы

Рассмотренные зависимости на рис. 2-5 свидетельствуют о том, что подмес к основному топливу (природный газ) дополнительного (биогаза) в результате дает увеличение расхода топлива, но также и увеличение коэффициента полезного действия и теплового потенциала выхлопных газов ГТУ. Последний факт позитивно сказывается на перспективе работы установке в составе блока малой электростанции, причем как для работы в составе конденсационного блока ПГУ, так и в составе теплотехнической схемы.

#### Список литературы

- [1] Оценка снижения выбросов при использовании альтернативных топлив на мини-ТЭЦ / Р. И. Валиев, Д. Ф. Нугманов, И. С. Соловьев [и др.] // Дальневосточная весна - 2021 : Материалы 19-й Международной научно-практической конференции по проблемам экологии и безопасности, Комсомольск-на-Амуре, 30–31 марта 2021 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. – С. 70-72.
- [2] Simulation of the operation of a gas turbine installation of a thermal power plant with a hydrogen fuel production system / G. E. Marin, B. M. Osipov, A. V. Titov, A. R. Akhmetshin // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Vol. 48, No. 12. – P. 4543-4550. – DOI 10.1016/j.ijhydene.2022.10.075.
- [3] Леонов, Е. С. Комбинированное сжигание биогаза и природного газа / Е. С. Леонов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова : Сборник докладов, Белгород, 16–17 мая 2023 года. Том Часть 14. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 168-172.
- [4] Илюшин П.В., Кучеров Ю.Н. Подходы к оценке возможности обеспечения надежного электроснабжения потребителей за счет строительства объектов распределенной генерации // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2014. № 5. С. 2-7.
- [5] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684153 Российская Федерация. Идентификация термодинамических параметров ГТУ : № 2023683147 : заявл. 03.11.2023 : опубл. 13.11.2023 / А. В. Титов, Г. Е. Марьин, А. Р. Ахметшин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».  
Добавление водородного топлива к синтез-газу для возможности сжигания в газовой турбине / Г. Е. Марьин, Г. Р. Мингалеева, М. С. Новоселова, А. Р. Ахметшин // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2024. – № 9(426). – С. 172-185. – DOI 10.15518/isjaee.2024.09.172-185. – EDN DWOYSA.
- [6] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025614431 Российская Федерация. Аппроксимация термодинамических функций синтез-газа : заявл. 11.02.2025 : опубл. 21.02.2025 / А. В. Титов, Г. Е. Марьин, М. С. Новоселова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».
- [7] Сравнительная оценка параметров работы газовой турбины на биоводороде и биогазе / Г. Е. Марьин, Ю. В. Караева, С. С. Тимофеева [и др.] // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2025. – № 3(432). – С. 10-26. – DOI 10.15518/isjaee.2025.03.010-026

# РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА КОЭФФИЦИЕНТОВ СОВМЕЩЕНИЯ МАКСИМУМОВ НАГРУЗОК В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ С УЧЁТОМ ГАЗИФИКАЦИИ

Пушкарский А.В.  
ПАО «Россети Московский Регион»  
Москва, Россия  
e-mail: Alexpushkarskiy41@gmail.com

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Нормативные документы РД 34.20.185-94 и СП 256.1325800.2016, основанные на устаревших данных XX века, не отражают современные режимы электропотребления. Появление новых типов потребителей, выявленных в 2025 году, и изменение структуры нагрузок требуют актуализации существующих коэффициентов и разработки новых коэффициентов: совмещения, участия, набора мощности и температурной, адаптированных к современным условиям эксплуатации сетей.

**Материалы и методы:** Использовалась методика корреляционного и регрессионного анализа для выявления зависимостей между параметрами нагрузок и оценки степени их совмещения. Для статистической обработки данных использовался квантильный метод с определением 95-го перцентиля распределения мощности, обеспечивающий устойчивость результатов и исключение влияния аномальных значений.

**Результаты:** Проведённый анализ получасовых замеров мощности подтвердил применимость нормального закона распределения вероятностей к максимумам нагрузок потребителей распределительных сетей. Использование 95-й квантиля мощности ( $P_{95}$ ) при расчёте расчётных характеристик. Определены коэффициенты совмещения ( $k_c$ ), участия ( $k_{уч}$ ), набора мощности ( $k_{наб}$ ) и температурной коррекции ( $k_T$ ), описывающие особенности формирования нагрузок различных категорий потребителей.

**Выводы:** Разработанные коэффициенты обеспечивают повышенную точность расчётов электрических нагрузок и позволяют выполнять обоснованный выбор оборудования и параметров распределительных сетей с учётом различий между типами потребителей. Их применение способствует адекватному определению расчётных мощностей, что позволяет предотвращать перегрузку и снижать аварийность сетей, обеспечивая надёжность и устойчивость работы систем электроснабжения.

**Ключевые слова:** распределительная сеть, расчётная нагрузка; коэффициент совмещения; коэффициент участия; коэффициент набора мощности; температурный коэффициент; газификация; квантильный метод ( $P_{95}$ ).

## DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR CALCULATING THE COEFFICIENTS OF COMBINING MAXIMUM LOADS IN DISTRIBUTION NETWORKS, TAKING INTO ACCOUNT GASIFICATION

Aleksandr Pushkarskiy  
Public Joint-Stock Company «Rosseti Moscow Region»  
Moscow, Russia  
e-mail: Alexpushkarskiy41@gmail.com

## Abstract

**Background:** Regulatory documents RD 34.20.185-94 and SP 256.1325800.2016, based on outdated data from the XX century, do not reflect modern modes of power consumption. The emergence of new types of consumers identified in 2025 and a change in the load structure require updating existing coefficients and developing new coefficients: combination, participation, set of power and temperature, adapted to modern network operating conditions.

**Materials and Methods:** The method of correlation and regression analysis was used to identify the dependencies between the load parameters and assess the degree of their combination. For statistical data processing, a quantile method was used to determine the 95th percentile of the power distribution, ensuring the stability of the results and eliminating the influence of abnormal values.

**Results:** The analysis of half-hour power measurements confirmed the applicability of the normal probability distribution law to the maximum loads of consumers of distribution networks. The use of the 95th power quantile ( $P_{95}$ ) in the calculation of design characteristics. The coefficients of combination ( $k_c$ ), participation ( $k_{уч}$ ), power set ( $k_{наб}$ ) and temperature correction ( $k_T$ ) are determined, describing the features of the formation of loads of various categories of consumers V.

**Conclusions:** The developed coefficients provide increased accuracy in calculating electrical loads and allow for an informed choice of equipment and parameters of distribution networks, taking into account differences between types of consumers. Their use contributes to the adequate determination of design capacities, which makes it possible to prevent overloading and reduce network accidents, ensuring the reliability and stability of power supply systems.

**Key words:** distribution networks; design load; alignment coefficient; participation coefficient; power gain coefficient; temperature coefficient; gasification; quantile method ( $P_{95}$ ).

## I. ВВЕДЕНИЕ

В 2025 году отмечено изменение структуры электропотребления распределительных сетей вследствие появления новых типов потребителей [1], характеризующихся отличающимися профилями мощности и режимами энергопотребления. Наиболее существенные изменения наблюдаются в индивидуальном жилищном секторе, где уровень газификации определяет соотношение между электрическими и тепловыми нагрузками. Кроме того, растет спрос на электрические приборы, повышающие уровень комфорта человека, например, различные модификации сплит-систем [2], теплых полов и т.д. В результате трансформации профилей нагрузки происходит смещение и совмещение максимумов, что приводит к локальным перегрузкам оборудования и повышению вероятности аварийных ситуаций в периоды пикового электропотребления.

Дополнительным фактором, оказывающим влияние на формирование нагрузок, является сезонная изменчивость, обусловленная климатическими условиями, что требует учёта температурного коэффициента, обеспечивающего корректировку расчётных мощностей в зависимости от температуры наружного воздуха. Применяемые нормативные документы РД 34.20.185-94 [3] и СП 256.1325800.2016 [4] не учитывают современные условия эксплуатации и изменившиеся характеристики потребителей, что обуславливает необходимость их пересмотра и разработки обновлённых расчётных коэффициентов, отражающих реальную структуру нагрузок распределительных сетей.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ И ОСНОВЫ РАСЧЁТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Максимальные мощности в течение времени не зависят друг от друга и, поэтому случайная величина распределена нормально  $P_{max}^i \sim N(m_p, \sigma_p)$  в соответствии с центральной предельной теоремой [5]. Проверить нормальность распределения возможно с помощью критериев согласия Пирсона или Лилиефорса.

Для начала необходимо рассчитать плотность вероятности нормального распределения (1):

$$f_p(P_{max}^i) = \frac{1}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(P_{max}^i - m_p)^2}{2\sigma_p^2}} \quad (1)$$

Оценить параметры распределения получится с помощью использования методов точечной оценки математического ожидания (2) и среднеквадратического отклонения (3):

$$m_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{max}^i \quad (2)$$

$$\sigma_p = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (P_{max}^i - m_p)^2 \quad (3)$$

Для суммарной нагрузки на шинах используется дисперсионная декомпозиция (4):

$$DP_{\Sigma} = \sum_i DP_i + 2 \sum_{ij} r_{ij} \sigma P_i \sigma P_j \quad (4)$$

где  $r_{ij}$  — коэффициент корреляции между случайными величинами  $i$ -й и  $j$ -й нагрузок. При линейной зависимости случайных величин коэффициент принимает значения от -1 до +1. При отсутствии зависимости принимается равным нулю.

Далее рассматривается распределение суточных максимумов активной мощности  $P_{max}$  на вводе/фидерах. Гипотеза о нормальности проверяется критериям согласия Пирсона и Лилиефорса при уровне значимости  $\alpha=0,05$ ; при выполнении условия  $\chi^2_{выб} < \chi^2_{кр}$  нормальный закон принимается как адекватный для дальнейших расчётов. Для расчётной вероятности превышения 5 % применяется квантиль  $P_{95}$ , определяемый как (5):

$$P_{95} = m_p + 1,65 \sigma_p \quad (5)$$

где  $m_p$  и  $\sigma_p$  — математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение суточных максимумов соответствующей выборки.

На базе подтверждённой нормальности  $P_{max}$  и оценённых параметров ( $m_p$ ,  $\sigma_p$ ) квантиль  $P_{95}$  используется далее для получения расчётных коэффициентов и режимов

## III. МЕТОДИКИ АКТУАЛИЗАЦИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

В рамках настоящей научной статьи разработан коэффициент набора мощности  $K_{наб}$ , с целью оценки загрузки оборудования и использования потребителем заявленной мощности оборудования применяется коэффициент набора мощности 0,4 кВ для категории

потребителей. Коэффициент определяется как отношение расчётной мощности на уровне надёжности 95 % к заявленной мощности (6):

$$k_{\text{наб}} = \frac{P_{95\%}}{P_{\text{АТП}}} \quad (6)$$

где  $P_{95\%}$  - расчётная мощность, оценённой по 95-му квантилю нормального распределения суточных максимумов, рассчитанная по формуле (1);

$P_{\text{АТП}}$  - запрашиваемая мощность потребителя согласно АТП.

Аналогично рассчитывается коэффициент набора мощности на напряжении 6-35 кВ для потребителей на отходящих линиях от шин центров питания 6-35 кВ. Для примера в рамках проверки по критерию Пирсона получена гистограмма дифференциального распределения вероятностей  $f_P(P)$  (рис. 1), а также по итогу расчета по критерию Лиллиефорса получена график интегрального закона распределения вероятностей  $F_P(P)$  (рис. 2).

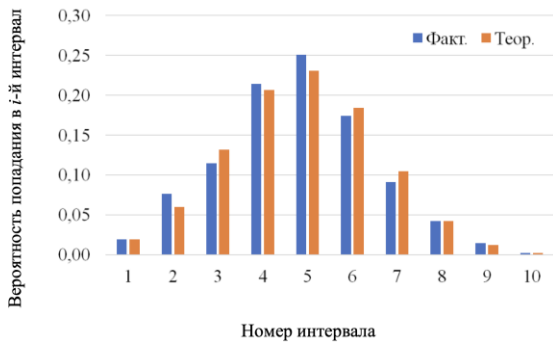


Рис. 1. Дифференциальный закон распределения вероятностей  $f_P(P)$

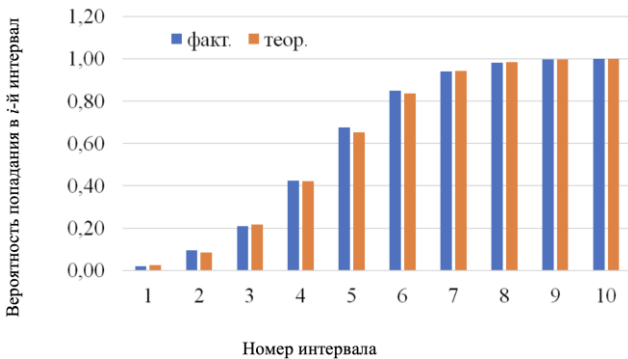


Рис. 2. Интегральный закон распределения вероятностей  $F_P(P)$

Для приведения расчетных (максимальных) нагрузок потребителей 0,4 кВ к расчетной (максимальной) нагрузке на вводном распределительном устройстве (ВРУ), вводно-распределительном щите (ВРЩ) и шинах ТП 0,4 кВ используется в максимуме нагрузки  $j$ -го электроприёмника или потребителя в максимуме  $i$ -го электроприёмника или потребителя (7), при этом  $P_{\text{max } i} > P_{\text{max } j}$ .

$$k_{\text{уч}} = \frac{P_{j|t}}{P_i} \quad (7)$$

где  $P_i$  - максимальная расчётная мощность  $i$ -го электроприёмника или потребителя;

$P_{j|t}$  - нагрузка  $j$ -го электроприёмника или потребителя во время максимума нагрузки  $i$ -го электроприёмника или потребителя.

При этом расчётная нагрузка  $i$ -го электроприёмника или потребителя больше расчётной нагрузки  $j$ -го. Коэффициент участия учитывает несовпадения максимумов нагрузки разных потребителей во времени. Расчет коэффициентов участия  $K_{\text{уч}}$  в максимуме нагрузки оценивался отдельно для каждого типа потребителей и рассчитывался по усредненным графикам нагрузки для зимы и лета с помощью программного комплекса. Суммарно с учетом категорий получено 20 графиков для зимы и лета.

Пример расчета коэффициента участия  $K_{\text{уч}}$  для зимы при совмещении графиков «Многоквартирные дома» и «ИЖС без подключения к системе газоснабжения» изображен на рис.3 в процентах и соответственно  $k_{\text{уч}} = \frac{91,0}{100} = 0,91$ .

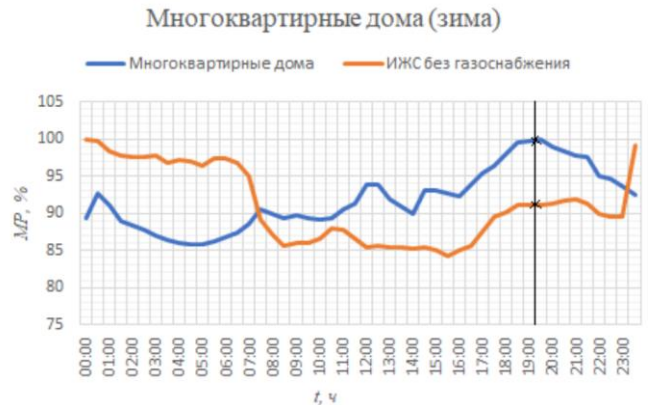


Рис. 3. Коэффициент участия в максимуме нагрузки «Многоквартирные дома» категории «ИЖС без подключения к системе газоснабжения»

Для определения расчетной (максимальной) мощности и загрузки трансформатора и линии электропередач на шинах центра питания определяется коэффициент совмещения максимумов ( $k_{\text{с.м.}}$ ) по формуле (8):

$$k_{\text{с.м.}} = \frac{P_{\text{ввода}}}{\sum_{i=1}^N P_{\text{max } i}} \quad (8)$$

где  $P_{\text{ввода}}$  - максимальная мощность ввода секции центра питания за сутки;

$P_{\text{max } i}$  - максимальная мощность головного участка за сутки;

$N$  - число фидеров.

Для оценки отличия фактических максимумов в зимние и летние дни (наиболее холодный и жаркий дни) необходимо использовать температурный коэффициент. С целью определения необходимого значения коэффициента проводился расчёт по данным контрольных измерений за 2024 год. В 2024 контрольные измерения происходили в наиболее теплый день и в наиболее холодные сутки, а не 15.06 и 20.01, как это было принято ранее. В этом случае температурный коэффициент можно определить как (9):

$$k_T = \frac{P_{\text{max.з.д.2024}}}{P_{\text{max.з.д.2023}}} \quad (9)$$

где  $P_{\text{max.з.д.2023}}$ ,  $P_{\text{max.з.д.2024}}$  - максимальные мощности из щитовых ведомостей за 2023 и 2024 года.

Пользуясь формулой для расчёта квантиля значения температурного коэффициента получаем (10):

$$k_{T95\%} = M_{kT} + 1,65 * SKO_{kT} = 1,15 + 1,65 * 0,1 \approx 1,35 \quad (10)$$

где  $M_{kT}$  – математической ожидание (среднее значение) температурного коэффициента;  
 $SKO_{kT}$  – среднеквадратичное отклонение температурного коэффициента.

Таким образом для лета температурный коэффициент принят равным 1,3, а для зимы 1,35 (рис. 4).

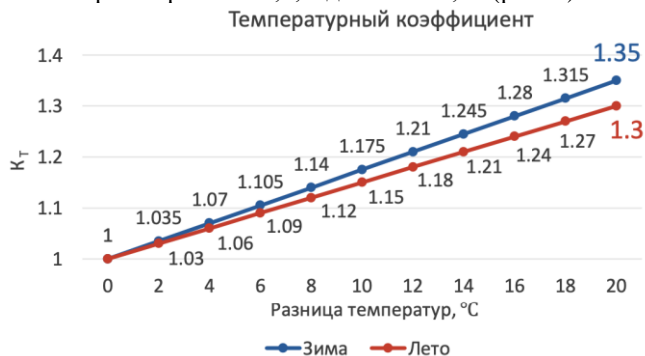


Рис. 4. Зависимость температурного коэффициента от разницы температуры самого холодного/жаркого дня и дней контрольных замеров зимой и летом

#### IV. ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ С УЧЁТОМ ГАЗИФИКАЦИИ

Газификация напрямую меняет форму суточных профилей и локализацию пиков нагрузки в ИЖС: при наличии газа снижается электрическая составляющая отопления/подогрев воды и профиль становится более «плоским» с меньшими вечерними пиками; при отсутствии газа возрастают доли электроплит и электроотопления, формируется выраженный зимний вечерний пик и повышается температурная чувствительность нагрузки. Если не разделять эти группы, суммарные пики узлов систематически завышаются (или занижаются) при простом сложении, искажаются коэффициенты и, как следствие, ошибочно выбирается мощность трансформаторов, КЛ, ВЛ и резервы мощности. В связи с чем, корректный учёт фактора газификации должен быть интегрирован на стадии проектирования исследования — при формировании и стратификации выборок.

С целью подтверждения видимой зависимости коэффициентов от газификации был выполнен расчет квантилей коэффициентов совмещения максимумов

нагрузок бета распределения для жилых групп потребителей (табл.1).

Таблица IV. РАСЧЕТ КВАНТИЛЕЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ СОВМЕЩЕНИЯ МАКСИМУМОВ НАГРУЗОК БЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ЖИЛЫХ ГРУПП ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

№	Квантиль	ИЖС с газом	ИЖС без газа
1	0,95	0,60	0,61
2	0,96	0,61	0,63
3	0,97	0,63	0,65
4	0,98	0,65	0,67
5	0,99	0,69	0,71
6	0,9995	0,80	0,82
7	0,9999	0,84	0,86

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы подстанции 35 кВ и выше и структура электропотребителей; для типового набора категорий получены коэффициенты участия и набора мощности (0,4 кВ) и коэффициенты совмещения максимумов и набора мощности для уровней 6–35 кВ. Введён температурный коэффициент для приведения расчётных мощностей к экстремальным сезонным условиям. При этом все оценки выполнены с учётом наличия и отсутствия газификации (ИЖС с газом/без газа), что исключает смещение значения максимальной мощности из-за различий профилей и синхронности пиков. Совокупность коэффициентов обеспечивает обоснованный выбор параметров оборудования и надёжную оценку расчётных режимов распределительной сети, а также оправданные затраты на необходимое оборудование и реконструкцию сети при необходимости.

#### Список литературы

- [1] Кочетков, А. И. Контроль и учёт электроэнергии по сетям электропитания / А. И. Кочетков // Измерительная техника. – 2004. – № 7. – С. 25-27.
- [2] Орлова, Г.А. Развитие мирового рынка кондиционеров воздуха бытового назначения / Г.А. Орлова, В.П. Медведев, Л.В. Сабельников, В.Н. Воронина // Российский внешнеэкономический вестник. – 2021. – № 4. – С. 13-22.
- [3] Инструкция по проектированию городских электрических сетей РД 34.20.185-94. Утверждена: Министерством топлива и энергетики Российской Федерации 07.07.94.
- [4] Свод правил СП 256.1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа.
- [5] Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. - 12-е изд. - 2015. - 480 с.

# ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРИ АНАЛИЗЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Севостьянов А.А., Серебряков Н.А.

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева»

Нижний Новгород, Россия

e-mail: serebryakov.sere@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Для оценки допустимого уровня искажения напряжения в промышленных системах электроснабжения, предложено использование обобщенного показателя, позволяющего выполнить комплексный анализ параметров напряжения в трехфазной системе электроснабжения при его искажении. Введение обобщенного показателя обеспечивает оценку допустимого уровня помех для контроля качества выпускаемой продукции и решение задач управления качеством электрической энергии в режиме реального времени.

**Материалы и методы:** Использовался метод обобщенного показателя с применением пространственного вектора.

**Результат:** Определена степень искажения формы напряжения без индивидуального анализа показателей качества электрической энергии, определенных ГОСТ 32144-2013 для сокращения времени принятия решения о необходимости реализации мероприятий по нормализации качества электроэнергии в промышленной сети.

**Ключевые слова:** искажающее воздействие, качество электрической энергии, пространственный вектор.

Исследование выполнено в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2025-0001)

## APPLICATION OF A GENERALIZED INDICATOR IN THE ANALYSIS OF THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY IN THE POWER SUPPLY SYSTEMS OF INDUSTRIAL CONSUMERS

Aleksandr Sevostyanov , Nikita Serebryakov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev"

Nizhny Novgorod, Russia

e-mail: serebryakov.sere@yandex.ru

## Abstract

**Background:** To assess the permissible level of voltage distortion in industrial power supply systems, it is proposed to use a generalized indicator that allows for a comprehensive analysis of voltage parameters in a three-phase power supply system when the voltage is distorted. The introduction of a generalized indicator provides an assessment of the permissible level of interference for quality control of manufactured products and solves the problems of managing the quality of electrical energy in real time.

**Materials and methods:** The method of generalized indicator was used with the application of a spatial vector.

**Result:** The degree of voltage waveform distortion is determined without individual analysis of the electric energy quality indicators defined by GOST 32144-2013 to reduce the decision-making time for implementing measures to normalize the quality of electric energy in an industrial network.

**Key words:** distorting effect, electric energy quality, spatial vector.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Перевод электроэнергетики России на цифровые технологии потребует модернизации существующих систем электроснабжения (СЭС) потребителей электроэнергии, и в первую очередь СЭС промышленных предприятий. Это позволит для надежного электроснабжения потребителей, обеспечить координацию действий всех элементов СЭС включая присоединенных к ней электроприемников, средств повышения качества электроэнергии и компенсации реактивной мощности, распределенных источников энергии [1-3]. Большинство СЭС предприятий в полной степени не соответствует данному требованию [1, 2, 4], в связи с чем, основное внимание при модернизации СЭС необходимо уделить повышению качества электроснабжения.

Многочисленные обследования систем электроснабжения промышленных потребителей показывают, что во многих регионах страны у потребителей наблюдается низкое КЭ. Это приводит к большим ущербам из-за брака продукции, расстройствам сложных технологических процессов, нарушениям функционирования важных промышленных объектов. В России такой ущерб оценивается в размере около 25 млрд. долларов в год.

Качество электроснабжения СЭС оценивается следующими показателями [5]: надежностью; качеством электроэнергии (КЭ); качеством обслуживания.

Для решения задачи оценки допустимого уровня искажений напряжения в системе электроснабжения промышленных предприятий предлагается подход, использующий обобщенный показатель, характеризующий искажение питающего напряжения при комплексном воздействии на сеть нескольких видов помех.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассматриваемый в статье метод контроля КЭ нашел широкое применение при исследовании статистической информации и анализе качества выпускаемой промышленностью продукции. Использование рассмотренных ниже методов для оценки КЭ в системах электроснабжения промышленных потребителей позволяет учесть комплексное воздействие помех, влияющих на КЭ, для снижения вероятности нарушения технологического процесса. В связи с чем, применение предлагаемых методов выполнено на основе обработки практических результатов инструментального обследования промышленного предприятия металлургической отрасли [6], упрощенная структурная схема которого приведена на рис. 1.

Измерения показателей качества электрической энергии (ПКЭ) осуществлялись на стороне высокого и низкого напряжения цеховых трансформаторных подстанций в отношении медленных изменений напряжения, суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, коэффициентов гармонических составляющих напряжения, а также форма питающего напряжения. Отметим, что значения ПКЭ, характеризующие рис. 2, превышали требования ГОСТ 32144-2013 применительно к гармоническим искажениям напряжения.



Рис. 1. Упрощенная структурная схема промышленного предприятия (АБК – административно-бытовой корпус; ЭСПЦ – электросталеплавильный цех; БРВ – блок распределения воды)

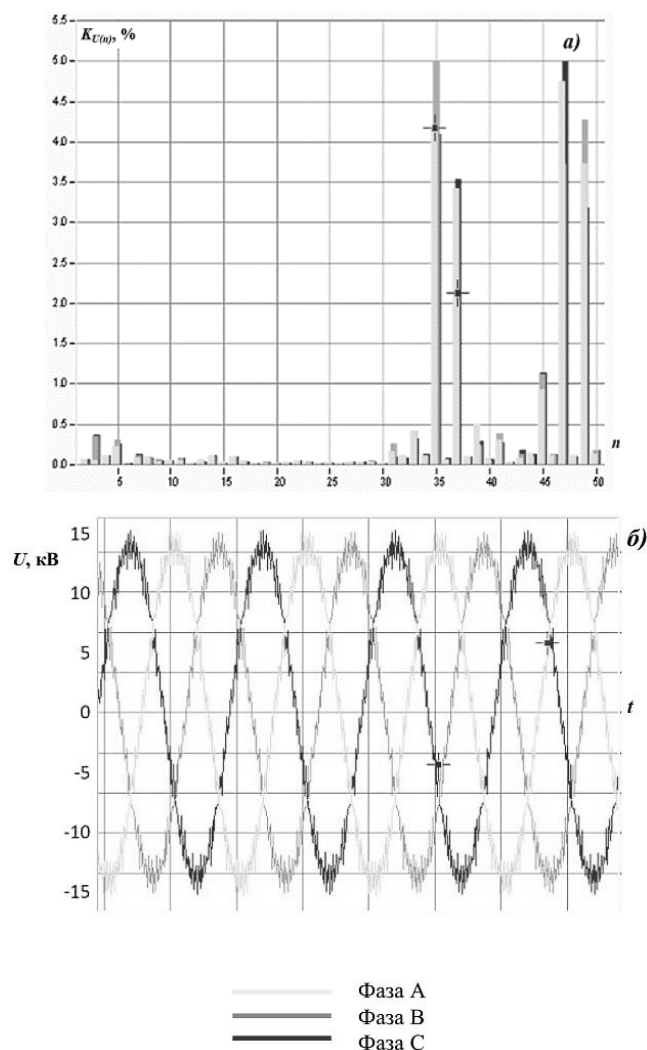


Рис. 2. Результаты измерения ПКЭ при превышении значений нормируемых ГОСТ 32144-2013

### III. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Большинство способов и устройств анализа ПКЭ предназначены для визуальной индикации отклонений ПКЭ, что ограничивает их применение в системах автоматического управления СЭС промышленных потребителей. В таких системах информация о ПКЭ приводится в виде фактических значений показателей с выявлением диапазонов их нарушения в соответствии с нормативными документами. Для исследования комплексного воздействия ПКЭ на системы электроснабжения промышленного предприятия вводится понятие пространственного вектора ПВ.

При использовании ПВ напряжения предполагается, что его математическая модель включает все динамические воздействия на трехфазное напряжение, возникающие как в установившихся режимах, так и в переходных процессах.

ПВ задается для трехфазной системы дискретных напряжений  $u_a(n)$ ,  $u_b(n)$ ,  $u_c(n)$  в виде

$$\underline{u}_s(n) = (2/3) [\underline{u}_a(n) + a \underline{u}_b(n) + a^2 \underline{u}_c(n)], \quad (1)$$

где  $a = \{j2\pi/3\}$ .

Реальная и мнимая составляющие ПВ соответствуют компонентам преобразования Кларк [9]

$$\underline{u}_s(n) = \sqrt{(2/3)} [u_\alpha(n) + j u_\beta(n)], \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} u_\alpha(n) \\ u_\beta(n) \\ u_0(n) \end{bmatrix} = \sqrt{(2/3)} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a(n) \\ u_b(n) \\ u_c(n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

и связаны с квадратурными компонентами  $u_p(n)$ ,  $u_q(n)$  преобразования Парка-Горева [10] векторно-матричным соотношением

$$\begin{bmatrix} u_p(n) \\ u_q(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(2\pi fn) & \sin(2\pi fn) \\ -\sin(2\pi fn) & \cos(2\pi fn) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha(n) \\ u_\beta(n) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Так как ПВ представляет собой преобразование на временном интервале дискретных значений напряжений трех фаз относительно нейтрали, то любые изменения формы напряжения проявляются в комплексных составляющих ПВ. При номинальном и неизменяющемся напряжении конец ПВ описывает окружность, а его модуль имеет постоянное значение. Любые изменения амплитуды напряжения вызывают отклонение модуля ПВ и свидетельствуют о появлении в электрической сети возмущения, влияющего на ПКЭ.

Применение ПВ при комплексном анализе КЭ в трехфазной системе электроснабжения с использованием данных показало области нахождения ПВ для случая ПКЭ, лежащих в нормируемых границах (рис. 3, непрерывная линия), при этом появление искажения формы питающего напряжения в виде гармонических искажений однозначно фиксируется изменением амплитуды вектора (рис. 3, пунктирная линия). Таким образом, если трехфазное напряжение синусоидально и симметрично, то мгновенные значения его ПВ могут выступать в виде базового комплексного сигнала. Относительно него следует оценивать превышение норм ПКЭ у совокупности мгновенных значений ПВ анализируемого напряжения. В качестве базового сигнала в данном случае можно принять форму напряжения, полученную при первичном замере

ПКЭ, где значения ПКЭ находятся в нормируемых пределах.

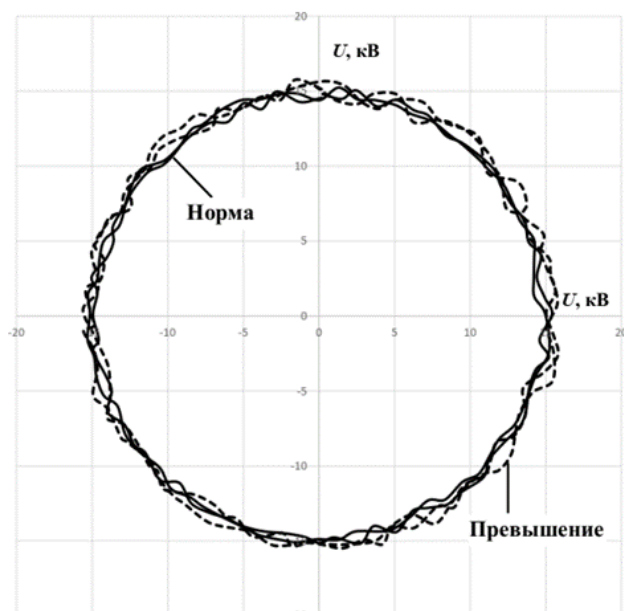


Рис. 3. Диаграмма значений пространственного вектора

В случае построения системы мониторинга и контроля КЭ для промышленных потребителей базовый уровень искажения КЭ может быть определен на этапе моделирования СЭС при оценке надежности функционирования технологического процесса предприятия.

Дополнительно для построения автоматизированных систем управления КЭ в качестве определяющего критерия может быть принят модуль коэффициента взаимной корреляции, характеризующий степень искажение синусоиды напряжения [11]. При этом, модуль коэффициента взаимной корреляции анализируемого и базового напряжения может быть использован в качестве обобщенного показателя при оценке требований к ПКЭ в конкретной точке присоединения электроприемников промышленного потребителя.

Оценку нарушений пространственной когерентности напряжений выполним в соответствии с [12], где значение коэффициента корреляции при практических расчетах для совокупностей мгновенных значений ПВ напряжений  $u'(n)$ ,  $u''(n)$  приобретает вид

$$|\rho[x'(n), x''(n)]| = |R_{x'x''}| / [R_{x'x'} R_{x''x''}]^{1/2}, \quad (5)$$

$$R_{x'x'} = (1/M) \sum_{s=1}^N x'(n) \cdot x'^*(n). \quad (6)$$

На рис. 4 приведены результаты расчета нормированного значения коэффициента корреляции при анализе данных инструментального обследования, представленных на рис. 2.

Анализ искажения кривой напряжения (рис. 4) при нарушении пространственной когерентности показал различные значения порогового уровня коэффициента корреляции, что однозначно выделяет уровень допустимых искажений (пунктирная линия) КЭ при отсутствии нарушений в работе технологического оборудования промышленных предприятий. Использование предельного уровня в виде граничного значения коэффициента взаимной корреляции позволяет провести оценку

допустимости искажения питающего напряжения в автоматическом режиме.

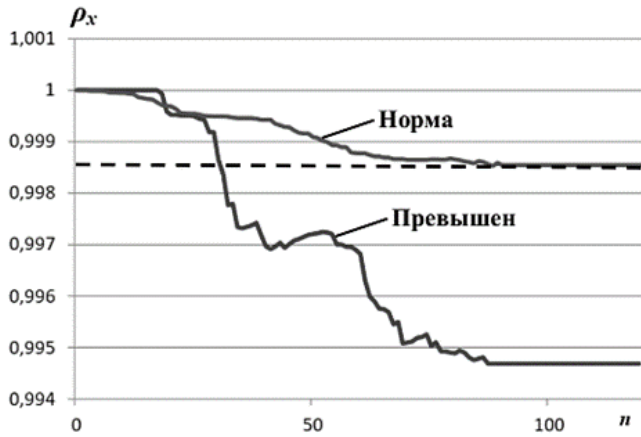


Рис. 4. Значения коэффициента взаимной корреляции

На основе рассмотренных методов предложена структурная схема устройства, реализующая контроль ПКЭ в системах электроснабжения промышленных предприятий, рис. 5. Схема обеспечивает реализацию процедуры автоматической классификации степени искажения КЭ за счет введения обобщенного ПКЭ, в качестве которого предложено использовать модульное значение пространственного вектора и коэффициента взаимной корреляции сигналов, характеризующего когерентность напряжений.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Своевременное выявление превышения норм ПКЭ и реализация управляющих воздействий, направленных на снижение уровня возмущений в системе электроснабжения промышленных предприятий, позволяет предотвратить отключение технологического оборудования и снизить ущербы от низкого качества электроэнергии.

#### Список литературы

[1] Добрусин Л.А. Проблемы качества электроэнергии и электроснабжения в России [Текст] / Л.А. Добрусин // Энергоэксперт. - 2008. - № 4 (9). - С.30-35.

[2] Вагин Г.Я., Куликов А.Л. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля // Электрические станции. 2019. № 6. С. 54 - 59.

[3] Вагин Г.Я., Куликов А.Л., Севостьянов А.А. Требования к качеству электроснабжения промышленных предприятий в связи с переводом электроэнергетики России на технологию SMART GRID // Ин-теллектуальная электротехника. 2022. № 4 (20). С. 43-52.

[4] Электромагнитная совместимость потребителей [Текст]: монография/ И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Гивняк и др. – м.: машиностроение, 2012. – 359с.

[5] Надежность и оценка технического состояния оборудования систем электроснабжения : [учеб. пособие] / А.Н. Назарычев, Д.С. Крупнев ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева, М-во энергетики [и др.]. - Новосибирск : Наука, 2020. - 223 с.

[6] Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению / Л.И. Коверникова, В.В. Судно-ва, Р.Г. Шамонов и др.; отв. ред. Н.И. Воропай. - Новосибирск: Наука, 2017. - 219 с.

[7] ГОСТ Р 51317.2.4 – 2000 Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Уровни электромагнитной совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в системах электроснабжения промышленных предприятий – М.: Стандартинформ, 2020 – 15с.

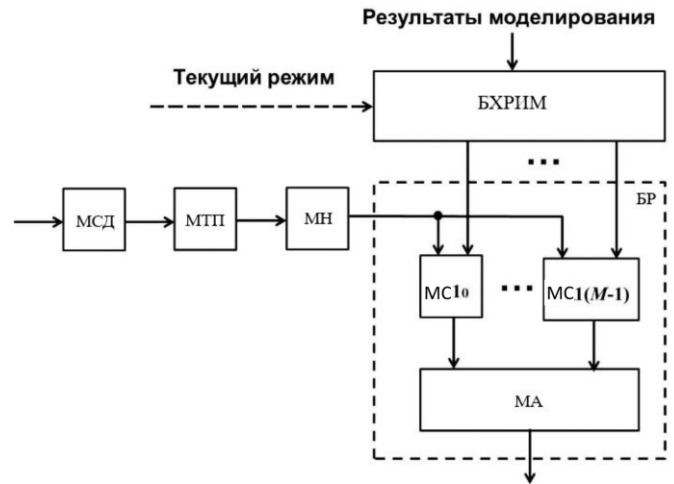


Рис. 5. Структурная схема устройства, реализующего способ контроля ПКЭ в узлах подключения нагрузки: МСД – модуль сбора данных; МТП – модуль трехмерного преобразования; МН – модуль нормировки; БР – блок распознавания; БХРИМ – блока хранения результатов имитационного моделирования; МС – модуль сравнения; МА – модуль анализа

При реализации цифровой обработки сигналов напряжения целесообразно применение пространственного вектора, объединяющего информацию о трех фазах напряжения в одну комплексную величину, изменяющуюся во времени. Введение расчетов пространственного вектора позволяет создать инструмент визуализации изменений показателей качества электроэнергии на комплексной плоскости, а его модуль использовать для фиксации факта появления возмущений в промышленной электрической сети.

[8] ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014 – 15с.

[9] M. Canteli, A. Fernandez, L. Eguiluz, and C. Estebanez, “Three-phase adaptive frequency measurement based on Clarke’s transformation,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 3, pp. 1101–1105, 2006.

[10] Воропай Н.И. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие. – Благовещенск: изд-во АМГУ, 2014.- 100 с.

[11] Куликов А.Л., Илюшин П.В., Лоскутов А.Б., Севостьянов А.А. Выборочный контроль показателей качества электроэнергии в распределительных сетях с большой долей генерации на основе возобновляемых источников энергии // Электричество. 2022. № 7. С. 11-23.

[12] Куликов А.Л., Илюшин П.В., Севостьянов А.А. О необходимости учета пространственной когерентности при совместной цифровой обработке пространственно-разнесенных сигналов токов и напряжений в электрических сетях // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2022. № 3. С. 49-62.

# МОНИТОРИНГ ВКЛЮЧЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПО ОБЩЕМУ ПОТРЕБЛЕНИЮ НА ОСНОВЕ ML МЕТОДОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СПРОСОМ

Сусликов П.К., Жуковский Ю.Л.

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

Санкт-Петербург, Россия

e-mail: suspavel@rambler.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Современные NILM-методы требуют значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает их применение в системе управления спросом в качестве подсистемы мониторинга состояния электроприёмника для целей определения реакции на спрос. Методы мониторинга нагрузок, рассматриваемые в современной литературе имеют своей целью максимизацию успешного решения задачи идентификации состояния нагрузки. И часто данная задача решается без учёта затрачиваемых вычислительных ресурсов. Однако, если речь идёт о мониторинге нагрузок на предприятии, содержащего сотни электродвигателей и аналогичного числа единиц технологического оборудования, решение задачи NILM становится крайне затруднительным. В исследовании предлагается подход, на основе методов машинного обучения для целей декомпозиции задачи NILM с целью её решения для групп нагрузок с использованием технологии edge computing (распределённые вычисления на конечных устройствах). Подход позволяет с высокими показателями метрик производить идентификацию состояний групп нагрузок по агрегированному потреблению электроэнергии.

**Материалы и методы:** Открытый набор данных индивидуального энергопотребления, гистерезисная разметка, GAP-признаки, ансамблевые модели машинного обучения в виде следующих моделей градиентных бустингов: HGB/XGB/LGBM/CatBoost, расчёт событийных метрик качества работы модели.

**Результаты:** Модели градиентного бустинга показали высокие показатели поэлементной точности для мощной нагрузки Sub\_metering\_3 ( $F_1 \approx 0,90$ ; AP > 0,92; ROC-AUC  $\approx 0,97$ ). Для средней (случайной) нагрузки Sub\_metering\_1 метрика  $F_1$  составила 0,56–0,57, что отражает умеренную различимость сигнала. Наиболее слабой оказалась нагрузка Sub\_metering\_2 (примерно 2-5% от максимума потребления):  $F_1 \approx 0,42$ –0,44 и существенное падение событийных метрик ( $\approx 0,28$ –0,32). LightGBM обеспечил наименьшее время обучения и предсказания среди всех моделей.

**Выводы:** Предложенный подход обеспечивает низкую вычислительную сложность и достаточную точность для применения в edge computing инфраструктуре систем управления спросом. Алгоритм был апробирован на наборе данных и был адаптирован для использования с любым набором данных малого разрешения (интервал усреднения 5 с – 120 с). Ключевым направлением дальнейшей работы является повышение событийных метрик для маломощных и кратковременных нагрузок. Перспективы включают расширение номенклатуры электроприёмников путём проведения эксперимента, интеграцию дополнительных легко извлекаемых признаков (локальные спектральные характеристики), а также оценку алгоритма на промышленных профилях с сезонностью и сменностью.

**Ключевые слова:** NILM, управление спросом, машинное обучение, энергетический мониторинг.

## EQUIPMENT ACTIVATION MONITORING (NILM PROBLEM) BASED ON TOTAL CONSUMPTION USING ML METHODS FOR DEMAND SIDE MANAGEMENT SYSTEMS

Pavel Suslikov, Yuriy Zhukovskiy

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

St. Petersburg, Russia

e-mail: suspavel@rambler.ru

## Abstract

**Background:** Modern NILM methods require significant computing resources, which limits their application in demand management systems as a subsystem for monitoring the status of electrical receivers for the purpose of determining demand response. The load monitoring methods discussed in the current literature aim to maximise the successful identification of load status. This task is often solved without taking into account the computational resources expended. However, when it comes to monitoring loads at an enterprise containing hundreds of electric motors and a similar number of pieces of technological equipment,

solving the NILM problem becomes extremely difficult. The study proposes an approach based on machine learning methods for decomposing the NILM task in order to solve it for load groups using edge computing technology (distributed computing on end devices). The approach allows for the identification of load group states based on aggregated electricity consumption with high metric performance.

**Materials and methods:** Open data set of individual energy consumption, hysteresis marking, GAP features, ensemble machine learning models in the form of the following gradient boosting models: HGB/XGB/LGBM/CatBoost, calculation of event metrics for model performance.

**Results:** Gradient boosting models showed high element-wise accuracy for the powerful Sub\_metering\_3 load ( $F_1 \approx 0.90$ ; AP  $> 0.92$ ; ROC-AUC  $\approx 0.97$ ). For the average (random) load Sub\_metering\_1, the  $F_1$  metric was 0.56–0.57, reflecting moderate signal distinguishability. The weakest load was Sub\_metering\_2 (approximately 2–5% of maximum consumption):  $F_1 \approx 0.42$ –0.44 and a significant drop in event metrics ( $\approx 0.28$ –0.32). LightGBM provided the shortest training time among all models.

**Conclusions:** The proposed approach provides low computational complexity and sufficient accuracy for application in edge computing infrastructure for demand management systems. The algorithm has been tested on a data set and adapted for use with any low-resolution data set (averaging interval 5 s – 120 s). A key area for further work is to improve event metrics for low-power and short-term loads. Prospects include expanding the range of electrical appliances through experimentation, integrating additional easily extractable features (local spectral characteristics), and evaluating the algorithm on industrial profiles with seasonality and shift patterns.

**Key words:** NILM, demand response, machine learning, edge computing.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергоэффективности энерготехнических систем в условиях нарастающей доли возобновляемых источников энергии требует внедрения механизмов управления спросом, позволяющих адаптивно регулировать нагрузку и обеспечивать устойчивость электросетевых режимов [1]. Эффективность таких механизмов во многом определяется возможностью получения достоверной информации о состоянии электроприёмников без установки дополнительных измерительных каналов и при минимальных капитальных затратах.

Технологии неинтрузивного мониторинга нагрузки (NILM) позволяют восстанавливать состояние отдельных электроприёмников по совокупному сигналу энергопотребления [2]. Однако большинство современных решений ориентированы либо на бытовой сектор, либо на ресурсоёмкие модели глубокого обучения [3], что затрудняет их применение в промышленности из-за высоких требований к вычислительным ресурсам и задержкам при работе в режиме online. Применение NILM в промышленных условиях дополнительно осложняется шумовой структурой сигналов, неполным охватом измерениями, высокой вариабельностью профилей нагрузки [4].

В настоящей работе рассматривается подход к определению состояния групп электроприёмников (включено/выключено) по агрегированному потреблению активной мощности. Предлагаемая методика основана на использовании ограниченного набора признаков, сформированных исключительно из суммарной активной мощности (GAP – General Active Power), а также на применении классических моделей градиентного бустинга, пригодных для развёртывания на маломощных вычислительных устройствах (edge computing). Кроме того, вводится событийная оценка качества, позволяющая

получить эксплуатационно значимые показатели, что отсутствует во многих текущих NILM-исследованиях.

Цель исследования — разработка вычислительно лёгкого алгоритма двоичной классификации состояний электроприёмников на основе суммарного сигнала энергопотребления с последующим анализом его пригодности для систем управления спросом.

## II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### A. Данные исследования

В работе использован открытый набор Individual Household Electric Power Consumption [5], включающий 2 075 259 синхронизированных минутных наблюдений совокупного потребления и трёх групповых электроприёмников. Доля пропусков составляет 1,25%. Охват измерениями равен 48,8%, что формирует реалистичную шумовую среду, близкую к промышленным системам.

Три группы электроприёмников имеют различный профиль: слабовыраженный и нерегулярный (Sub\_metering\_1), маломощный периодический (Sub\_metering\_2), а также крупный и стабильно циклический (Sub\_metering\_3).

### B. Структура алгоритма

Алгоритм включает девять этапов, формализованных в соответствии со следующим порядком:

1. Загрузка данных и предобработка (масштабирование, интерполяция, восстановление пропусков).
2. Разметка состояний электроприёмников методом гистерезисной сегментации.
3. Формирование признаков: статистик, временных характеристик и контекстных

переменных (время суток, день недели, праздничные дни).

4. Удаление коллинеарных признаков ( $|r| > 0,98$ ).
5. Отбор признаков методом перестановочной важности для модели HGB.
6. Обучение моделей машинного обучения.
7. Подбор порога бинаризации путём максимизации F $\beta$ -метрики.
8. Постобработка (сглаживание) бинарных последовательностей.
9. Оценка качества.

### С. Признаки

Ключевая особенность методики — использование только одного физического источника данных (GAP), что снижает размерность и повышает устойчивость при внедрении в условиях ограниченного телеметрического охвата.

### D. Событийные метрики

Событийные метрики, в отличие от вероятностных и временных, оценивают работоспособность модели не на базе каждой единицы времени (каждую минуту считаем

как отдельный объект, оценивая TP/FP/FN/TN), а на базе интервалов включения и отключения электроприёмника. Такая группа метрик иллюстрирует способность модели к устойчивой работе максимально близко к реальности. Данный подход является критически важным для управления спросом и редко применяется в NILM-исследованиях [6].

По событиям вычисляются следующие метрики: точность ( $P$ ), полнота ( $R$ ) и  $F_1$ , а также количество пропусков и ложных срабатываний.

## III. РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОАННОЙ СИСТЕМЫ

### A. Качество классификации

Поэлементные метрики показали высокий уровень качества для наиболее выраженных нагрузок (Sub\_metering\_3), средний — для Sub\_metering\_1, и ожидаемо низкий — для маломощного Sub\_metering\_2. Событийные метрики продемонстрировали закономерное снижение значений относительно их временных аналогов, особенно для слабых и кратких циклов, что подтверждает необходимость многоуровневой валидации.

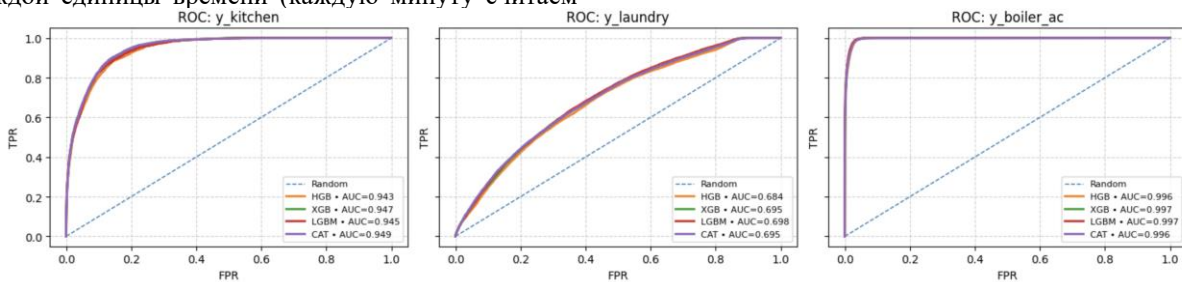


Рис. 1. ROC-кривые для различных моделей. Штрихпунктирная линия показывает случайный классификатор

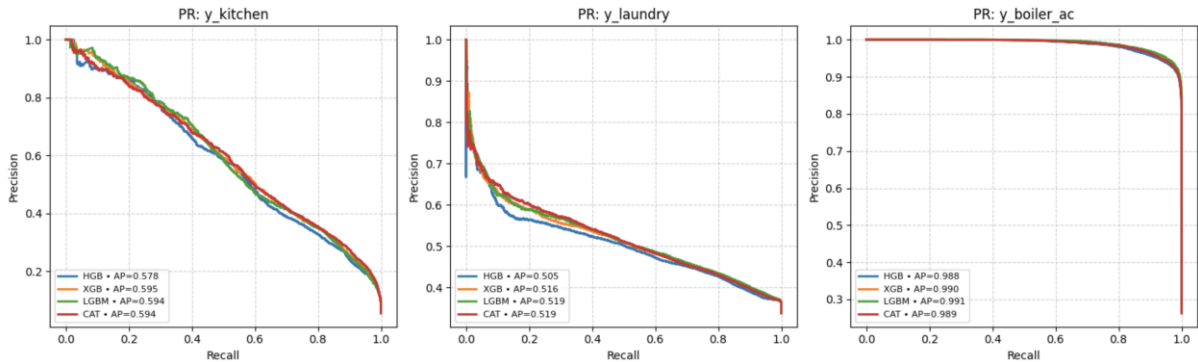


Рис. 1. AP-кривые для различных моделей

Цель	Модель	Базовые метрики				Событийные метрики			
		TP	FP	FN	F1	TP	FP	FN	F1
y_boiler_ac	lgbm	14196	2088	1028	0,901104	254	81	64	0,777948
	xgb	14276	2260	948	0,898992	254	87	64	0,770865
	hgb	14284	2428	940	0,894539	253	99	65	0,755224
	cat	14159	2214	1065	0,896224	253	100	65	0,754098
y_kitchen	cat	2045	1757	1357	0,56774	52	140	54	0,348993
	lgbm	2020	1638	1382	0,572238	49	149	57	0,322368
	hgb	2117	1987	1285	0,564082	44	123	62	0,322344
	xgb	2093	1833	1309	0,571234	48	156	58	0,309677
y_laundry	hgb	6743	15628	2665	0,424368	218	925	178	0,283301
	lgbm	5338	9355	4070	0,442969	201	828	195	0,282105
	xgb	5759	11136	3649	0,437897	212	902	184	0,280795
	cat	5787	11185	3621	0,438741	202	876	194	0,274084

Как видно из таблицы выше, количество базовых значений TP/FP/FN/TN после перехода к событийным метрикам стало кратно меньше. Ровно, как и снизились показатели метрик для слаборазличимых электроприёмников. Отметим, что цифры получены на обучающей выборке в 336 дней при размере валидационного окна в 21 день.

#### Быстродействие моделей

Анализ вычислительных затрат показал последовательность убывания быстродействия:

*LightGBM* → *HGB* → *XGBoost* → *CatBoost*.

Быстродействие оценивалось при помощи отсечки времени на выполнение полного расчётного цикла при фиксированных показателях производительности устройства. *LightGBM* обеспечивает возможность развёртывания на маломощных edge-устройствах без выделенного вычислительного кластера.

#### В. Влияние размера обучающей выборки

Исследование зависимости  $F_1$ -метрики от объёма данных показало отсутствие существенного роста качества с увеличением горизонта обучения. Для отдельных нагрузок наблюдался даже отрицательный эффект, что связано с вариабельностью бытовых профилей.

Это подтверждает вывод о том, что NILM-модели для бинарной классификации могут быть эффективно обучены на ограниченных объёмах данных — важное свойство для промышленных внедрений.

#### IV. ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность мониторинга состояния оборудования на основе только одного агрегированного показателя – активной мощности. Несмотря на невысокие результаты для слабовыраженных нагрузок, применение событийных метрик позволяет выявить наиболее уязвимые сценарии, требующие корректировки модели или дополнительных признаков.

С точки зрения промышленной эксплуатации, ключевым преимуществом подхода является возможность работы в формате edge computing. Использование *LightGBM* обеспечивает низкие задержки расчётов и минимальные требования к аппаратной платформе. Это выгодно отличает разработанный алгоритм от нейронных сетей LSTM, TCN и моделей с механизмами внимания, которые, несмотря на высокое качество, требуют значительных вычислительных ресурсов и не подходят для online-режима на уровне локальных контроллеров.

Перспективное направление – улучшение метрик:

1. Введение ансамблевых схем с последующей событийной калибровкой.
2. Применение гибридных архитектур: быстрая модель на edge-уровне + тяжёлая модель на сервере для дооценки спорных эпизодов.
3. Использование более информативных, но лёгких признаков (локальная спектральная плотность, коэффициенты вариации, оконные энтропии).

4. Расширение базы датасетов и включение профилей с ярко выраженной сезонностью и сменностью

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный алгоритм позволяет определять состояния отдельных электроприёмников по совокупному энергопотреблению с использованием компактного набора признаков и моделей градиентного бустинга. Метод пригоден для развёртывания в системах управления спросом в качестве канала обратной связи, позволяющего верифицировать отклик оборудования на управляющие воздействия при отсутствии датчиков состояния коммутационных аппаратов. При этом, метод обеспечивает приемлемые поэлементные и событийные показатели качества при минимальной вычислительной сложности.

Анализ показал, что *LightGBM* является оптимальным выбором для работы в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Событийная оценка качества подтверждает необходимость дальнейшего совершенствования модели в части маломощных и кратковременных нагрузок.

Работа закладывает основу для промышленных систем бездатчикового мониторинга, интегрируемых в архитектуру edge computing, реализованных на периферийных вычислительных узлах (industrial gateways/PLC) с использованием потоковой обработки данных и лёгковесных протоколов IIoT (OPC UA/MQTT).

#### Список литературы

- [1] Ibrahim C., Mougharbel I., Kanaan H.Y., Daher N.A., Georges S., Saad M. A review on the deployment of demand response programs with multiple aspects coexistence over smart grid platform // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2022. Vol. 162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112446>.
- [2] Holmegaard E., Baun Kjaergaard M. NILM in an Industrial Setting: A Load Characterization and Algorithm Evaluation // 2016 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP). IEEE, 2016. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/SMARTCOMP.2016.7501709>
- [3] Azad M.I., Rajabi R., Estebarsari A. Non-Intrusive Load Monitoring (NILM) using Deep Neural Networks: A Review // 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe. IEEE, 2023. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194770>
- [4] Liu G., Liang G., Zhao H., Zhao J., Liu J., Wu Z. A Temporal Convolutional Neural Network with Attention Mechanism for Industrial Non-Intrusive Load Monitoring // 2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE, 2021. P. 3279–3284. DOI: <https://doi.org/10.1109/EI252483.2021.9713379>
- [5] Hebrail G., Berard A. Individual Household Electric Power Consumption [Dataset] // UCI Mach. Learn. Repos. 2006. DOI: 10.24432/C58K54.
- [6] Cruz-Rangel D., Ocampo-Martinez C., Diaz-Rozo J. Online non-intrusive load monitoring: A review // *Energy Nexus*. 2025. Vol. 17. DOI: 10.1016/j.nexus.2024.100348.

# ПРИМЕНЕНИЕ КЛАСТЕРИЗАЦИОННЫХ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕТЕХНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Шидов А.Г.

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Ставрополь, Россия

e-mail: ashidov@ncfu.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Нетехнические потери электроэнергии являются одной из актуальных проблем электроэнергетики и приводят к значительным экономическим потерям. В условиях внедрения интеллектуальных систем учета возрастает необходимость применения интеллектуальных методов анализа данных электропотребления для выявления хищений электроэнергии.

**Материалы и методы:** В работе использованы реальные почасовые данные потребления электроэнергии, полученные с 133 приборов учета. Для оценки эффективности выявления нетехнических потерь в набор данных были искусственно внедрены шесть типовых сценариев хищения электроэнергии. Анализ выполнен на основе агрегированных суточных, недельных и месячных профилей потребления с применением алгоритмов кластеризации k-means и DBSCAN.

**Результаты:** В ходе исследования было выявлено, что алгоритм k-means наиболее эффективно выявляет длительные и системные хищения при анализе суточных и недельных профилей, тогда как алгоритм DBSCAN демонстрирует наименьшую точность. Кратковременные сценарии хищений выявляются значительно хуже вследствие сглаживания их влияния при агрегации данных.

**Выводы:** Полученные результаты подтверждают целесообразность применения кластеризационных методов машинного обучения в качестве инструмента предварительного анализа данных потребления электроэнергии и формирования перечня приборов учета, требующих дополнительного исследования другими методами машинного обучения.

**Ключевые слова:** интеллектуальный учет, хищение электроэнергии, нетехнические потери, аномалии потребления, машинное обучение, k-means, DBSCAN.

## APPLICATION OF CLUSTERING MACHINE LEARNING METHODS TO IDENTIFY NON-TECHNICAL LOSSES IN ELECTRICITY CONSUMPTION DATA

Arsen Shidov

North Caucasus Federal University

Stavropol, Russia

e-mail: ashidov@ncfu.ru

## Annotation

**Background:** Non-technical losses of electricity are one of the urgent problems of the electric power industry and lead to significant economic losses. With the introduction of intelligent metering systems, there is an increasing need to use intelligent methods of analyzing power consumption data to identify theft of electricity.

**Materials and methods:** The work uses real hourly data on electricity consumption obtained from 133 accounting records. To assess the effectiveness of detecting non-technical losses, six typical scenarios of electricity theft were artificially introduced into the data set. The analysis is based on aggregated daily, weekly, and monthly consumption profiles using k-means and DBSCAN clustering algorithms.

**Results:** Results: The study revealed that the k-means algorithm most effectively detects long-term and systemic theft when analyzing daily and weekly profiles, while the DBSCAN algorithm demonstrates the least accuracy. Short-term theft scenarios are much worse detected due to the smoothing of their impact during data aggregation.

**Conclusions:** The results obtained confirm the expediency of using clusterization methods of machine learning as a tool for preliminary analysis of electricity consumption data and the formation of a list of metering devices that require additional research by other machine learning methods.

**Keywords:** intelligent accounting, theft of electricity, non-technical losses, consumption anomalies, machine learning, k-means, DBSCAN.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Нетехнические потери электроэнергии (НПЭ) являются одной из наиболее значимых проблем современной электроэнергетики. В отличие от технических потерь, обусловленных физическими процессами в электрических сетях, нетехнические включают хищения электроэнергии, вмешательство в работу приборов учета (ПУ), ошибки учета и несанкционированные подключения, что существенно осложняет их выявление и количественную оценку.

По данным Всемирного банка, уровень потерь Российской Федерации по итогам 2023 года составил **8,6 % от общего отпуска электроэнергии**. Данный показатель является сравнительно умеренным в международном контексте и значительно ниже, чем в таких странах как **Бразилия (15,1 %)** и **Индия (14,2 %)**, где существенная доля потерь обусловлена именно нетехническими факторами. В то же время уровень потерь в России остается выше **Италии (6,9 %)** и **Германии (4,9 %)** [1].

Следует отметить, что даже при относительно умеренных значениях потерь объем нетехнических потерь в Российской Федерации остается значительным в стоимостном выражении и оказывает существенное влияние на экономическую эффективность функционирования сетевых и сбытовых компаний. Кроме этого, в электросетевом комплексе России в последние годы активно развивается концепция «Цифровая трансформация 2030» [2]. Это обуславливает актуальность разработки и внедрения интеллектуальных методов анализа данных, направленных на автоматизированное выявление аномальных режимов потребления электроэнергии, потенциально связанных с хищениями электроэнергии.

## II. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе использованы реальные почасовые данные интеллектуальных ПУ, собранных в одном из регионов Северо-Кавказского федерального округа (СКФО).

Таблица I. ИССЛЕДУЕМЫЙ НАБОР ДАННЫХ

<b>Количество ПУ</b>	133
<b>Формат данных</b>	Почасовые значения активной энергии
<b>Характер потребителей</b>	Однофазное подключение
<b>Временной период</b>	01.01.2022-01.04.2024
<b>Количество значений</b>	2 620 765
<b>Количество пропусков</b>	35 163

Набор данных был сформирован на основе выборки из профилей 1770 ПУ электроэнергии в связи с высоким уровнем пропусков (23% от общего количества значений). Отметим, что нулевые значения не учитывались как пропуски, так как по данным электросетевой компании они являются достоверными. Примененный критерий отбора данных с условием сохранения недельной цикличности (7 суток) позволяет обеспечить репрезентативность выборки и корректно применять методы машинного обучения.

Формирование выборки с критерием недельной цикличности позволило отсеять большое количество ПУ с неустойчивой нагрузкой, однако пропуски данных все же имеются. Для их заполнения был использован метод интерполяции, как одна из эффективных способов заполнения данных [3,4].

На следующем этапе исходные почасовые данные потребления электроэнергии были преобразованы в агрегированные профили различного временного масштаба. В работе использовались суточные, недельные и месячные профили потребления, формируемые путём усреднения почасовых значений за соответствующие временные интервалы.

Для обеспечения сопоставимости профилей потребления различных абонентов и исключения влияния абсолютного уровня нагрузки на результаты кластеризации исходные векторы признаков были нормализованы с использованием **L2-нормализации**. Данный метод нормализации позволяет привести каждый профиль потребления к единичной евклидовой норме, сохраняя при этом форму временного ряда и относительные соотношения между его элементами.

Пусть  $x_i = \{x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}\}$  – вектор признаков, соответствующий агрегированному профилю потребления  $i$ -го потребителя, где  $n$  – размерность профиля. Тогда L2-нормализация осуществляется согласно выражению:

$$\tilde{x}_{i,j} = \frac{x_{i,j}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n x_{i,k}^2}}, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

В результате такой нормализации евклидова норма каждого вектора признаков становится равной единице:

$$\|\tilde{x}_i\|_2 = 1 \quad (2)$$

Использование L2-нормализации является принципиально важным для методов кластеризации, основанных на метриках расстояния, поскольку оно предотвращает доминирование потребителей с высоким уровнем потребления над потребителями с меньшей нагрузкой и позволяет алгоритмам фокусироваться на различиях в форме профилей потребления, а не на их абсолютных значениях.

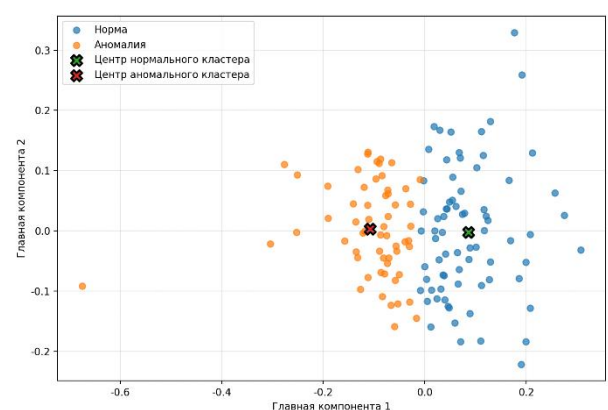
В качестве методов анализа были выбраны алгоритмы k-means и DBSCAN, относящиеся к кластеризационным методам машинного обучения. Использование данных методов позволяет сравнить подходы, основанные на центроидной кластеризации и плотности распределения, и тем самым всесторонне оценить их применимость для выявления нетехнических потерь электроэнергии в данных интеллектуальных систем учета. Так как по информации электросетевой компании в исходном наборе данных отсутствуют зафиксированные случаи хищения электроэнергии, в данные были искусственно внедрены сценарии хищений для 12 ПУ, соответствующие шести типовым методам, описанным в работе [5] на различных интервалах времени.

Таблица II. ПАРАМЕТРЫ ТИПОВЫХ СЦЕНАРИЕВ ХИЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

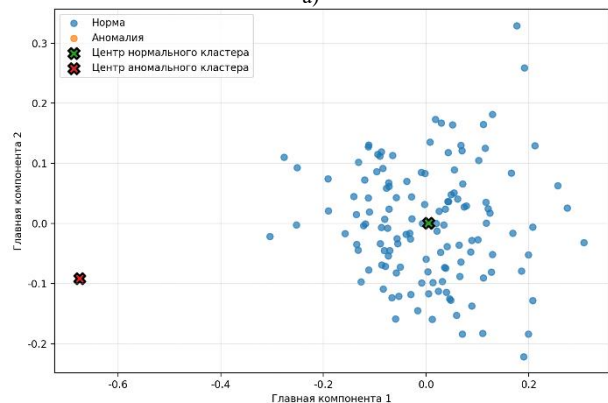
Номер ПУ	Тип хищения	Интервал внедрения, суток
7	Тип 1	7
23	Тип 1	42
2	Тип 2	13
78	Тип 2	49
56	Тип 3	19
117	Тип 3	56
5	Тип 4	24
128	Тип 4	39
34	Тип 5	23
97	Тип 5	51
17	Тип 6	9
69	Тип 6	33

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ

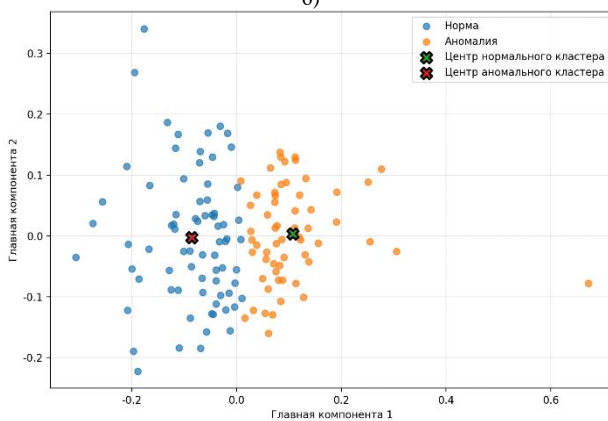
В ходе экспериментального исследования была проведена кластеризация агрегированных профилей



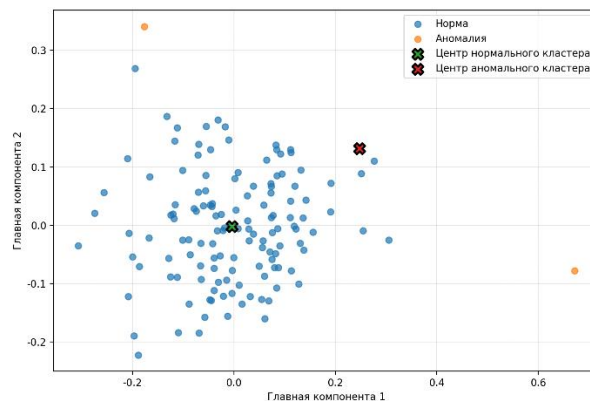
а)



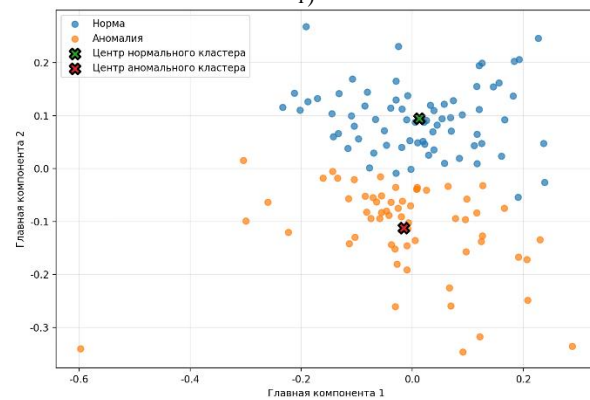
б)



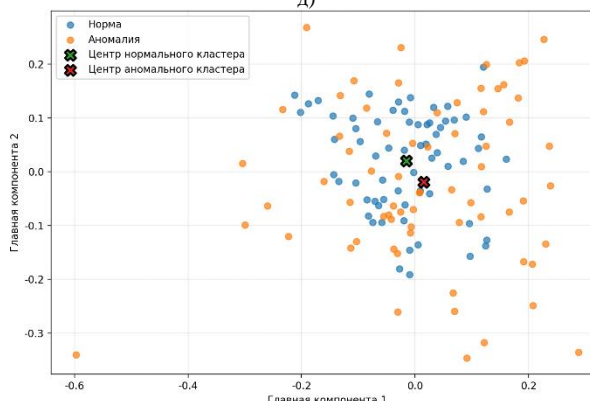
в)



г)



д)



е)

Рис. 1. Результаты кластеризации k-Means: а) суточный профиль; в) недельный профиль; д) месячный профиль и DBSCAN: б) суточный профиль; г) недельный профиль; е) месячный профиль

При визуальном анализе видно, что k-means более четко разделяет нормальный и аномальный кластер. Лучше всего это видно при сравнении месячного профиля. В суточном и недельном временных промежутках DBSCAN выделил всего лишь несколько аномалий (1 и 2 соответственно), в то время как k-means определил аномальными 59 ПУ на обоих интервалах. Для анализа точности выявления внедренных сценариев хищения электроэнергии в таблице 3 приведена оценка качества кластеризации.

Таблица III. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВЫЯВЛЕНИЙ ХИЩЕНИЙ КЛАСТЕРИЗАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Интервал	Метод выявления	Кол-во аномальных ПУ	Кол-во выявленных ПУ	Индексы выявленных ПУ
Суточный	DBSCAN	1	0	–
Суточный	k-means	59	5	117 17 56 69 78
Недельный	DBSCAN	2	0	–
Недельный	k-means	59	5	117 17 56 69 78
Месячный	DBSCAN	68	3	117 128 17
Месячный	k-means	3	2	117 56

Анализ результатов показал, что эффективность выявления нетехнических потерь электроэнергии зависит от того, какой именно характер имеет хищение и на каком временном интервале анализируются данные. При использовании суточных и недельных профилей алгоритм k-means смог корректно выявить ПУ с индексами 17, 56, 69, 78 и 117. Отметим, что ПУ 117, 17, 56 были выделены алгоритмом k-means при суточной и недельной агрегации.

В то же время приборы учета, для которых хищения носили кратковременный характер, не были выявлены. Это объясняется наличием агрегации данных, при которой теряется кратковременное искажение характеристики потребления.

Увеличение количества аномальных ПУ с 2 на недельной агрегации до 68 на месячной говорит о лучшем реагировании алгоритма на длительные хищения, которые проявляются при усреднении данных за более продолжительный период. Однако даже в этом случае DBSCAN не позволяет эффективно обнаружить внедренные сценарии хищений.

Таким образом использование данных методов способствует сокращению объема последующих проверок

и формированию приоритетного перечня приборов учета для применения детальных и аналитических методов выявления нетехнических потерь электроэнергии.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования определено, что с наибольшей точностью выявлялись хищения **типа 3**, связанные с длительным и системным занижением показаний приборов учета, а также **типа 6**, характеризующиеся комбинированным искажением режима потребления. Данные сценарии были корректно обнаружены алгоритмом k-means при анализе суточных и недельных профилей, а также алгоритмом DBSCAN при использовании месячных профилей.

Частично были выявлены хищения **типа 2** и **типа 4**, однако хищения типов 1 и 5 обнаружены не были, что позволяет сделать вывод об их сглаживании при агрегации почасовых данных. В целом полученные результаты подтверждают, что кластеризационные методы целесообразно применять для выявления длительных хищений, однако для увеличения точности и сужения результатов планируется в дальнейших работах применить алгоритм k-means как наиболее эффективный метод вместе с другими современными методами машинного обучения.

#### Список литературы

- [1] Официальный сайт: «Группа Всемирного банка» <https://www.worldbank.org/ext/en/home>.
- [2] Концепция «Цифровая трансформация 2030» ПАО «Россети». 2018 // URL: [https://www.rosseti.ru/upload/iblock/582/rajp59pvuvjsx5ztr38jjz2q98o8rkbd/Kontseptsiya\\_Tsifrovaya\\_transformatsiya\\_2030.pdf](https://www.rosseti.ru/upload/iblock/582/rajp59pvuvjsx5ztr38jjz2q98o8rkbd/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf)
- [3] Chen, Z. Electricity Theft Detection Using Deep Bidirectional Recurrent Neural Network / Z. Chen, D. Meng, Y. Zhang, T. Xin, D. Xiao // 22nd International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). Phoenix Park, Korea (South), 2020. P. 401-406. DOI: 10.23919/ICACT48636.2020.9061565
- [4] Маниковский А. С., Мухопад А. Ю. Методы восстановления пропущенных значений во временных рядах в системе прогнозирования электропотребления // ИВД. 2022. №7 (91). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-vosstanovleniya-propuschennyh-znacheniy-vo-vremennyh-ryadah-v-sisteme-prognozirovaniya-elektropotrebleniya>.
- [5] P. Jokar, N. Arianpoo and V. C. M. Leung, "Electricity Theft Detection in AMI Using Customers' Consumption Patterns," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 1, pp. 216-226, Jan. 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2425222.