

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 621, 620.9

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ И ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

Абдуллазянов¹ Э.Ю., Грачева² Е.И., Альзаккар³ А., Низамиев⁴ М.Ф.,
Шумихина⁵ О.А., Valtchev⁶ S.

^{1,2,3,4,5} Казанский Государственный Энергетический Университет,
г. Казань, Россия

⁶UNINOVA–CTS, Faculty of Sciences and Technology University NOVA of Lisbon
2829-516 Campus Caparica, Portugal
epp.kgeu@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Провести исследование, позволяющее повысить достоверность прогнозирования величины электропотребления и потерь электроэнергии на промышленном предприятии. *МЕТОДЫ.* Используются методы определения и прогнозирования параметров расхода и потерь электроэнергии на промышленных объектах. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Для уточнения величины потерь электроэнергии предлагается использовать коэффициенты - учитывающий вид графиков нагрузки и показывающий соотношение значений суммы квадратов токов (мощностей) переменного графика нагрузки и значений суммы средних токов (мощностей), т.е. соотношение потерь электроэнергии при работе нагрузки по переменному и равномерному графикам ($K_{\text{граф}}$), а также коэффициент, учитывающий топологию схемы ($K_{\text{мон}}$). Проведено исследование радиальных и магистральных схем сетей и определены потери электроэнергии с использованием предлагаемых коэффициентов. Рассчитаны величины эквивалентных сопротивлений цеховых схем сетей различной топологии. Приведены эксплуатационные данные участка цеховой сети. Выявлено, что при постоянном технологическом процессе увеличение эквивалентного сопротивления схемы сети обусловлено ростом сопротивлений контактов коммутационных аппаратов, установленных на линиях. Определена величина расчетного отпуска электроэнергии с использованием параметра среднего значения эквивалентного сопротивления. При этом погрешность вычисления расчетного отпуска по отношению к фактическому годовому отпуску электроэнергии составила 2,63%. По данным ретроспективных значений среднего эквивалентного сопротивления схемы возможно определить прогнозируемое значение данного параметра с помощью среднего значения коэффициента изменения эквивалентного сопротивления. Данные характеристики схемы рекомендуется применять при оценке и прогнозировании потерь и расчетного отпуска электроэнергии, что повысит достоверность прогнозируемых параметров для промышленных объектов.

Ключевые слова: электропотребление; потери электроэнергии; эквивалентное сопротивление; цеховые сети; прогнозирование.

Для цитирования: Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Альзаккар А., Низамиев М.Ф., Шумихина О.А., Valtchev S. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 3-12. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12.

PREDICTION AND ANALYSIS OF POWER CONSUMPTION AND POWER LOSS AT INDUSTRIAL FACILITIES

EY. Abdullazyanov¹, EI. Gracheva², A. Alzakkar³, MF. Nizamiev⁴,
OA. Shumikhina⁵, S. Valtchev⁶

^{1,2,3,4,5} Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

⁶UNINOVA–CTS, Faculty of Sciences and Technology University NOVA of Lisbon 2829-516
Campus Caparica, Portugal
epp.kgeu@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Conduct a study to improve the reliability of forecasting the magnitude of power consumption and power losses at an industrial enterprise. *METHODS.* Methods are used to determine and predict the parameters of consumption and losses of electricity at industrial facilities. *RESULTS.* To clarify the magnitude of electricity losses, it is proposed to use coefficients that take into account the type of load curves and show the ratio of the values of the sum of the squares of currents (powers) of the variable load curve and the values of the sum of average currents (powers), that is. the ratio of power losses during load operation according to variable and uniform schedules (K_{graph}), as well as a coefficient that takes into account the topology of the circuit (K_{top}). The study of radial and main circuits of networks was carried out and the losses of electricity were determined using the proposed coefficients. The values of equivalent resistances of shop circuits of networks of various topologies are calculated. The operational data of the section of the workshop network are given. It was revealed that with a constant technological process, an increase in the equivalent resistance of the network circuit is due to an increase in the resistance of the contacts of switching devices installed on the lines. The value of the estimated supply of electricity was determined using the parameter of the average value of the equivalent resistance. At the same time, the error in calculating the estimated supply in relation to the actual annual supply of electricity amounted to 2,63%. According to the retrospective values of the average equivalent resistance of the circuit, it is possible to determine the predicted value of this parameter using the average value of the coefficient of change in the equivalent resistance. These characteristics of the scheme are recommended to be used in the assessment and forecasting of losses and the estimated supply of electricity, which will increase the reliability of the predicted parameters for industrial facilities.

Keywords: power consumption; power losses; equivalent resistance; workshop networks; forecasting.

For citation: Abdullazyanov EY, Gracheva EI, Alzakkar A, Nizamiev MF, Shumikhina OA, Valtchev S. Prediction and analysis of power consumption and power loss at industrial facilities. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(6):3-12. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12.

Введение

В современных условиях развития России особое внимание уделяется повышению точности процессов прогнозирования электропотребления и выделению, при этом, достоверной величины потерь электроэнергии, чему посвящены работы [1-2] автором Е.И. Грачевой и других. Как показывает отечественный и зарубежный опыт, кризис в экономике и, особенно, энергетических отраслях, отрицательно влияет на эффективность функционирования оборудования промышленных комплексов. При этом характерно, что наблюдается взаимосвязь между таким важнейшим показателем эффективности работы электротехнических систем, как потери электроэнергии и кризисных явлениях во всех странах, независимо от уровня их развития, что исследуется в работе [3] Грачевой Е.И. и другими. Объясняется это процессами ослабления контроля электропотребления в данные периоды нестабильности экономики при, соответственно, требующих совершенствования методов управления энергетическими комплексами и совершенствования технологических процессов проектирования оборудования, что предлагается А.Р. Сафиним и другими [4], а также Т.И. Петровым [5]. Также в данных условиях наблюдается интерес к краткосрочному прогнозированию с использованием нейросетевых методов, предлагаемых Н.А. Серебряковым в работе [6] и управлению электропотреблением с помощью рангового анализа, рассматриваемого в работе [7] О.Р. Кивчуном. Методы прогнозирования электропотребления, предлагаемые А.С.

Маниковским [8] и технологический анализ электропотребления, представленный в работе [9] С.Д. Зубковым позволяют повысить достоверность оценки исследуемых параметров. Также могут быть приняты при имеющейся достаточной исходной информации для повышения точности и анализа параметров электропотребления результаты работы [10] на основе временных рядов, предлагаемой Дж.Х. Худжасаидовым и другими и модели управления спросом на электроэнергию, разработанные в [11] А.П. Дзюбой. В [12] А.В. Ляхомский и А.А. Шадрин используют для прогнозных моделей электропотребления полносвязную нейронную сеть, что предполагает получение быстрых результатов при учете изменения параметров. Авторами [13] Zhaosu Meng, Huike Sun, Xi Wang для прогнозирования энергопотребления на примере Китая используются марковские модели, что позволяет учесть множество состояний рассматриваемой системы. Авторами [14] S. B. Taieb, J. W. Taylor, R. J. Hyndman и [15] T. Ahmad, H. Chen предлагаются интеллектуальные системы при прогнозировании энергопотребления и спроса на электроэнергию, что получает широкое распространение в современных условиях. На актуальность проводимых исследований указывает тот факт, что данными вопросами заинтересован World Bank - [16] и, в настоящее время, существует вероятность снижения платежеспособности части электропотребителей и промышленных объектов.

Одна из главных задач развития и локализации промышленных производств - технологический суверенитет России. При этом необходимо, с одной стороны, увеличивать объемы производства электроэнергии, а с другой – совершенствовать методы прогнозирования электропотребления, в том числе потребителями жилых комплексов, что предлагается Ю.И. Солуяновым и другими в [17-18].

Эффективное внедрение мероприятий по экономии электроэнергии, а также, энергосберегающая политика государства, требуют разработки новых подходов к повышению достоверности прогнозируемых значений электропотребления.

Другим важным аспектом развития систем промышленного электроснабжения является повышение точности оценки потерь электроэнергии. Потери электроэнергии существенно влияют на технические и экономические характеристики большинства элементов электротехнических комплексов, так как их стоимость является частью приведенных затрат и эксплуатационных издержек. Достижение оптимального соотношения в общей структуре электропотребления между величиной электропотребления и уровнем потерь – одна из основных задач эффективного функционирования электрических систем.

Достижение технологической безопасности России требует особых подходов к вопросам выявления непроизводительного расхода электроэнергии. Современное развитие электроэнергетики позволяет повысить информационное обеспечение для разработки новых алгоритмов прогнозирования потребления электроэнергии, основанных на уточнении схемных и режимных параметров систем электроснабжения. Как известно, энергосберегающие технологии и оборудование позволяют снизить уровень электропотребления. С другой стороны, автоматизация технологических процессов и замена в них различных видов топлив на электроэнергию приводят к росту потребления электроэнергии. Такие условия делают особенно актуальной задачу достоверного прогнозирования электропотребления, оптимальное решение которой позволяет найти резервы экономии электроэнергии на основании исследования величины её расходов.

При этом средства от сэкономленной электроэнергии могут быть направлены на модернизацию электрооборудования и технологических процессов, повышение уровня зарплат персонала эксплуатационных служб, а также на увеличение технического перевооружения электрических сетей и систем электроснабжения.

Научной и практической значимостью предлагаемой статьи является совершенствование методов прогнозирования электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах, что позволяет повысить достоверность параметров расходов электроэнергии.

Отличия представленной работы от результатов исследований, проводимых российскими и зарубежными учеными, заключаются в использовании величины эквивалентного сопротивления схемы цеховой сети для уточнения параметров электропотребления и потерь электроэнергии.

Материалы и методы

Для прогнозирования электропотребления предлагается использовать величину эквивалентного сопротивления рассматриваемой схемы. Как правило, схемы подразделяются на 2 типа (рис.1).

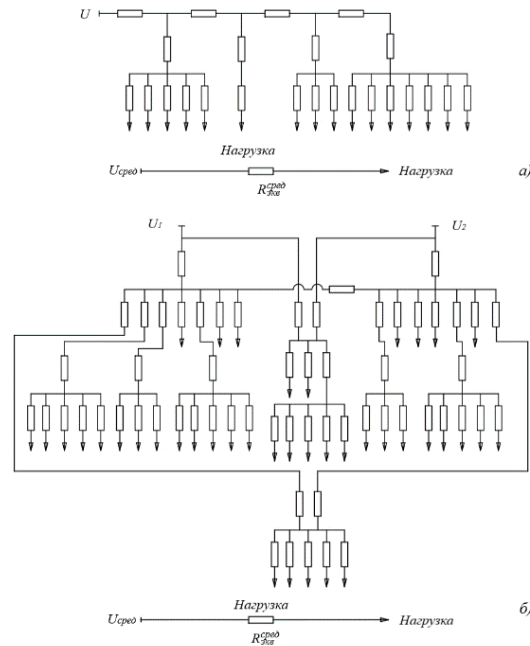


Рис.1. Типы схем внутрицехового электроснабжения потребителей: а) схема в виде одиночной линии с одной точкой присоединения источников питания и точкой присоединения электроприемников б) схема с несколькими точками источников питания и присоединений электроприемников

Fig.1. Types of circuits for intrashop power supply to consumers: a) a circuit in the form of a single line with one point of connection of power sources and a point of connection of power receivers b) a scheme with several points of power sources and connections of electrical receivers

Первый тип – рис.1 а) – одиночная линия с точкой присоединений источников питания и точкой присоединения потребителей. Для такой схемы характерно распределение токов нагрузки по элементам пропорционально величинам их сопротивлений. Данную схему можно представить как простейшую, имеющую один элемент – эквивалентное физическое сопротивление - $R_{\text{экв}}^{\phi}$.

Определим потери электроэнергии для исследуемой схемы

$$W_{\text{сх}} = 3R_{\text{экв}}^{\phi} \sum_{t=1}^{T_p} I_{i \text{ нг}}^2 = 3R_{\text{экв}}^{\phi} \cdot I_{\text{ср.нг}}^2 \cdot K_{\text{граф}} \cdot T_p, \quad (1)$$

где $I_{i \text{ нг}}$ - ток на интервалах графика нагрузки; T_p - интервал времени расчета, ч; t - интервал времени изменения токов графика, ч; $I_{\text{ср.нг}}$ - среднее значение тока, А; $K_{\text{граф}}$ - значение коэффициента графиков, показывающее соотношение значений суммы квадратов токов (мощностей) переменного графика и значений суммы средних токов (мощностей). Или, другими словами, соотношение потерь электроэнергии при работе нагрузки по переменному и равномерному графикам.

$$K_{\text{граф}} = \frac{R_{\text{экв}}}{R_{\text{экв}}^{\phi}} \quad (2)$$

отсюда

$$R_{\text{экв}}^{\text{сред}} = K_{\text{граф}} \cdot R_{\text{экв}}^{\phi} \quad (3)$$

Определим $I_{\text{ср.нг}}^2$ и $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$

$$I_{\text{ср.нг}}^2 = \frac{W^2}{\left(\sqrt{3} \cdot U_{\text{сред}} \cdot \cos \varphi_{\text{сред}} \cdot T_p \right)^2} \quad (4)$$

$$R_{\text{экв}}^{\text{сред}} = \frac{\square W \cdot U_{\text{сред}}^2 \cdot \cos^2 \varphi_{\text{сред}}}{P_{\text{сред}}^2 \cdot T_p}, \quad (5)$$

где W - отпуск электроэнергии в сеть, $МВт\cdot ч$; $P_{ср}$ - величина средней мощности нагрузки, $МВт$; ΔW - потери электроэнергии, $МВт\cdot ч$; $U_{ср}$ - среднее напряжение сети, $кВ$; $\cos\varphi_{ср}$ - среднее значение коэффициента мощности нагрузки.

Второй тип схем – сюда относятся схемы с несколькими точками питания и присоединений нагрузки (рис. 1 б). Для схемы 2 характерным является зависимость токов нагрузок от расположения узлов питания, места присоединений и мощности нагрузки и, в меньшей степени – от сопротивлений участков сети. Для уточнения параметров схем второго типа требуется введение нового параметра – коэффициента топологии - $K_{мон}$, показывающего соотношение потерь активной мощности (электроэнергии) при фиксированном расположении электропотребителей и расположении нагрузок в соответствии с сопротивлением элементов схемы при $K_{мон} = 1$.

Тогда $R_{экв}^{ср}$ в сопротивления по (5) определится

$$R_{экв}^{ср} = R_{экв}^{\phi} \cdot K_{граф} \cdot K_{мон} \quad (6)$$

$K_{мон} = 1$ для схемы 1 (рис.1 а), так как протекающие токи по участкам схемы распределяются в соответствии со значениями их сопротивлений и, при постоянной величине передаваемой электроэнергии (равномерный график нагрузки), справедливы соотношения

$$\begin{aligned} K_{мон} &= K_{граф} = 1 \\ R_{экв}^{ср} &= R_{экв}^{\phi} \end{aligned} \quad (7)$$

Одним из частных случаев второй схемы является распределительный щит с фиксированным узлом питания и несколькими узлами питаемых электроприемников.

Вычислим для фиксированного момента времени значение суммы потерь активной мощности для исследуемых участков второй схемы и разделим полученное значение на величину квадрата тока головного участка $I_{г.уч}^2$ (или, другими словами, на величину квадрата суммы токов участков схемы).

В результате получено значение эквивалентного сопротивления схемы 2 с учетом $K_{мон}$ в фиксированный момент времени без учета $K_{граф}$.

$$R_{экв} = R_{экв}^{\phi} \cdot K_{мон} = \frac{\sum_{i=1}^n I \cdot I_{ip}^2 \cdot R_i}{I_{г.уч}^2} \quad (8)$$

где I_{ip} - рабочий ток i -ого элемента (участка, отпайки); n – число участков схемы; R_i - сопротивление i -ого участка схемы; $I_{г.уч}$ - ток головного участка схемы; $R_{экв}^{\phi}$ определяется по (9) для схем радиальной топологии и (10) – магистральной топологии.

$$R_{экв.р}^{\phi} = \frac{\frac{\sum_{i=0}^n R_{i20} \cdot l_{icx}}{n} \left[1 + \alpha \cdot (\theta_{инров} - 20) \right] + \frac{\sum_{i=1}^m R_{i,an}}{n}}{n}, \quad (9)$$

где R_{i20} - параметр удельного сопротивления одного метра i -ой линии схемы при температуре $20^{\circ}C$, $МОм/м$; l_{icx} – параметр длины i -ой линии схемы, $м$; $\theta_{инров}$ - параметр температуры проводника i -ой линии, $^{\circ}C$; $R_{i,an}$ - параметр сопротивления контактов электрических низковольтных аппаратов на линии, $МОм$; n - число аппаратов i -ой участка схемы; α - параметр температурного коэффициента увеличения сопротивления материала проводника, $1/^{\circ}C$.

Для схемы магистральной топологии, выполненной распределительным шинопроводом с распределенной нагрузкой

$$\begin{aligned} R_{экв.шд}^{\phi} &= \left[R_{0шд20} \cdot l_{шд} \cdot \frac{1}{6} \left(1 + \frac{1}{n} \right) \left(2 + \frac{1}{n} \right) \right] \cdot \left[1 + \alpha_{шд} (\theta_{шд} - 20) \right] + \\ &+ \frac{R_{20} \cdot l_{np.омс}}{n} \cdot \left[1 + \alpha_{np.омс} (\theta_{np.омс} - 20) \right] + \frac{\sum_{i=1}^K R_{i,an}}{n} \end{aligned} \quad (10)$$

где $l_{шд}$ - значение длины распределительного шинопровода, $м$; $R_{0шд20}$ - сопротивление одного метра распределительного шинопровода при температуре $20^{\circ}C$; n - число электроприемников, питающихся от распределительного шинопровода; R_{20} - сопротивление

одного метра провода ответвления от шинпровода при температуре 20°C , мОм/м ; $\theta_{шд}$ - значение температуры шинпровода, $^{\circ}\text{C}$; $\theta_{пр.отв}$ - значение температуры токопроводящей жилы ответвления, $^{\circ}\text{C}$; $l_{пр.отв}$ - параметр длины провода ответвления, м ; $\alpha_{пр.отв}$ - параметр температурного коэффициента увеличения сопротивления материала провода ответвления, $1/^{\circ}\text{C}$; $\alpha_{шд}$ - параметр температурного коэффициента увеличения сопротивления материала распределительного шинпровода, $1/^{\circ}\text{C}$; $\sum_{i=1}^K R_{ian}$ - сумма сопротивлений контактов

коммутационных аппаратов установленных на одном ответвлении, мОм ; K - количество низковольтных коммутационных аппаратов на одном ответвлении.

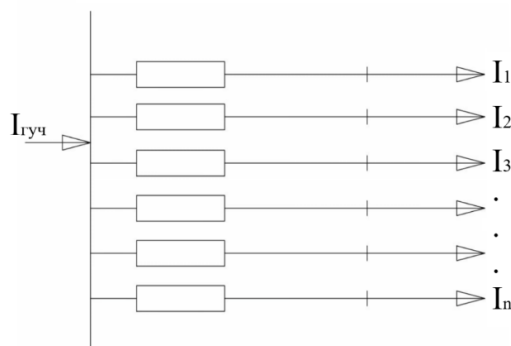


Рис. 2 Обобщенная схема замещения распределительного щита

Fig.2. Generalized switchboard equivalent circuit

Результаты расчета $R_{экв}$ и $R_{экв}^{\phi}$ с учетом компоновок оборудования распределительного щита и технических параметров – числа ответвлений, температуры нагрева токопроводящих жил, температуры окружающей среды даны в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты расчета $R_{экв}$ и $R_{экв}^{\phi}$

Номер опыта №	Средний длительно допустимый ток $I_{дон.сред}$, А	Среднее значение длины провода ответвления $l_{ср.отв}$, м	Число ответвлений n	Среднее значение коэффициента загрузки линий, $K_{зг}$	Температура окружающей среды, $\theta_{о.с.}$, $^{\circ}\text{C}$	$R_{экв}$	$K_{топ}$	$R_{экв}$	$K_{топ}$	$R_{экв}^{\phi}$
1	20,50	16,5	16	0,460	20	22,10	1,10	14,11	0,70	20,00
2	20,60	16,6	14	0,480	20	24,20	1,04	15,62	0,65	23,50
3	20,80	16,3	12	0,500	20	26,40	1,02	17,05	0,64	26,20
4	21,20	15,8	10	0,550	20	30,60	1,08	19,80	0,70	28,70
5	21,8	15,9	8	0,600	20	35,50	1,04	23,10	0,74	31,40

где $K_{топ} = \frac{R_{экв}}{R_{экв}^{\phi}}$

Эквивалентные сопротивления $R_{экв}$ и $R_{экв}^{\phi}$ вычисляются по (5). Для расчета $R_{экв}$ необходимо учитывать нагревание токопроводящих жил ответвлений и сопротивление контактов низковольтных аппаратов, установленных на линиях. При вычислении $R_{экв}$ данные параметры не учитываются. Результаты расчетов показали, что при вычислении $R_{экв}$ - $K_{топ}$ близок к единице.

При этом, использование величины $R_{экв}$ для оценки электропотребления и потерь электроэнергии в элементах оборудования цеховой сети будет вносить значительную погрешность в расчеты. Поэтому целесообразно составлять полиномиальные модели для исследования уровня потерь. Среднее значение эквивалентного сопротивления $R_{экв}^{сред}$ рекомендуется для расчетов активных потерь по средним значениям тока или активной мощности графика нагрузки для схем цеховых сетей различной структуры за интервал времени вычисления $R_{экв}^{сред}$. Например, вычислим значение $R_{экв}^{сред}$ участка схемы

низковольтной сети ОАО «Казанский электромеханический завода», включающего в себя распределительный щит с подключенными электроприемниками. Средняя длина ответвлений к электроприемникам $l_{cp}=16,50$ м, при числе потребителей – 16, длительно допустимый ток (среднее значение) $I_{сред.дон}=20,50$ А, средний коэффициент загрузки линий $K_{зс}=0,45$, температура окружающей среды $\theta_{о.с.}=20^{\circ}\text{C}$, средний коэффициент мощности двигателей электроприемников $\cos\varphi_{сред}=0,60$. При этом известными данными являются - величина годового электропотребления $W_{год}=95,52$ МВт·ч, беспотерный отпуск электроэнергии потребителям $W_{б\text{пот}}=92,94$ МВт·ч, потери электроэнергии $\Delta W=2,58$ МВт·ч.

Определим значение суммы квадратов средней мощности при годовом числе часов работы $T_p=1987$ ч.

$$\sum P_{сред}^2 = P_{сред} \cdot T_p = \frac{\Delta W^2}{T_p^2} \cdot T_p = \frac{\Delta W^2}{T_p} = \frac{2,58^2}{1987} = 3,35 \cdot 10^{-3} \text{ МВт}$$

Тогда по (5)

$$R_{экв}^{сред} = \frac{\square W \cdot U_{сред}^2 \cdot \cos^2 \varphi_{сред}}{P_{сред}^2 \cdot T_p} = \frac{2,58 \cdot 0,38^2 \cdot 0,60^2}{3,35 \cdot 1987 \cdot 10^{-3}} = 22,5 \text{ мОм}$$

Результаты исследования показали, что при постоянном технологическом процессе увеличение значения $R_{экв}^{сред}$ (табл.2) обусловлено ростом сопротивлений контактов коммутационных аппаратов, установленных на линиях схемы. Иначе величина $R_{экв}^{сред}$ оставалась бы постоянной и изменение нагрузочных потерь в низковольтной сети соответствовало бы квадрату пропускаемой электроэнергии (табл.2).

Результаты и обсуждение

Определим потери электроэнергии по данным 2018 г.

$$\Delta W = \frac{R_{экв}^{сред} \cdot P_{сред}^2 \cdot T_p}{U_{сред}^2 \cdot \cos^2 \varphi_{сред}} \quad (11)$$

$$\Delta W = \frac{22,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,35 \cdot 1987}{0,38^2 \cdot 0,6^2} = 2,66 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

То есть, при постоянном технологическом цикле для исследуемой сети потери составили $\Delta W\% = 2,86\%$ от беспотерного отпуска электроэнергии (92,94 МВт·ч).

Определим величину расчетного отпуска электроэнергии

$$W_{расч} = \frac{100}{2,86} \cdot \frac{R_{экв}^{сред} \cdot P_{сред}^2 \cdot T_p}{U_{сред}^2 \cdot \cos^2 \varphi_{сред}} \quad (12)$$

$$W_{расч} = 93,01 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

Тогда погрешность определения $W_{расч}$ по величине эквивалентного сопротивления по отношению к фактическому годовому отпуску электроэнергии за 2018 г. (табл.2) δ , % составит

$$\delta, \% = \frac{W_{год} - W_{расч}}{W_{год}} \cdot 100 = \frac{95,52 - 93,01}{95,52} = 2,63\%$$

В табл.2 приведены эксплуатационные и расчетные данные расхода электроэнергии.

Определим фактическое значение изменения потерь электроэнергии за 2019 г.

$$\Delta W = (R_{экв19}^{сред} - R_{экв18}^{сред}) \sum P_{сред19}^2 \cdot 10^{-3} \cdot T_p = (22,4 - 22,5) \cdot 3,33 \cdot 10^{-3} \cdot 1982 = -0,66 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

Знак «-» показывает, что величина потерь снизилась на 0,66 МВт·ч.

Таблица 2
Электропотребление за 2018-2022 г. и прогноз на 2023 г.

Год	2018	2019	2020	2021	2022	2023 (ожидаемое значение)
Параметры						
Годовое число часов работы, T_p , ч	1987	1982	1987	1971	1971	1972
Годовой отпуск электроэнергии, $W_{год}$, МВт·ч	95,52	95,31	95,55	94,92	94,92	95,00

Беспотерьный отпуск электроэнергии, $W_{\text{пот}}, \text{МВт} \cdot \text{ч}$	92,94	92,74	93,00	92,36	92,36	92,43
Потери электроэнергии, $\Delta W, \text{МВт} \cdot \text{ч}$	2,58	2,57	2,57	2,56	2,56	2,57
$\sum P_{\text{сред}}^2, \text{МВт} \cdot \text{ч} \cdot 10^{-3}$	3,35	3,33	3,35	3,32	3,32	3,34
$R_{\text{экв}}^{\text{сред}}, \text{МОм}$	22,5	22,4	22,3	22,6	22,6	22,6
$\overline{\Delta W}$ при $R_{\text{экв}}^{\text{сред}} = \text{const}, \text{МВт} \cdot \text{ч}$	2,66	2,66	2,66	2,64	2,64	2,64
Изменение $\overline{\Delta W}$ по годам		-0,33	-0,34	0,66	0	0
Коэффициент изменения $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$ по годам K	-	0,996	0,996	1,009	1	1
Среднее значение коэффициента изменения $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$ по годам $K_{\text{ср}}$				1,0002		

По данным ретроспективных значений $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$ возможно определить прогнозируемое значение $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$ с использованием среднего значения коэффициента изменения эквивалентного сопротивления.

Например, определим $R_{\text{экв}24}^{\text{сред}}$ и $R_{\text{экв}25}^{\text{сред}}$.

$$R_{\text{экв}24}^{\text{сред}} = K_{\text{ср}} \cdot R_{\text{экв}23}^{\text{сред}} = 22,605 \text{ МОм}$$

$$R_{\text{экв}25}^{\text{сред}} = 22,61 \text{ МОм}$$

Полученные результаты могут быть рекомендованы для оценки и анализа потерь по выражению (11) и прогнозирования расчетного отпуска электроэнергии по (12).

Заключение

Для повышения достоверности параметров электропотребления на промышленных предприятиях может быть рекомендовано применение величины эквивалентного сопротивления схемы сети. При этом предлагается в качестве корректирующей величины эквивалентного сопротивления использовать коэффициент изменения эквивалентного сопротивления для исследуемой схемы, показывающий динамику $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$ за рассматриваемые интервалы времени. Однако, следует отметить, что значение данного коэффициента для временного интервала прогнозирования может отличаться от ретроспективных значений. Уменьшение величины эквивалентного сопротивления схемы возможно в случаях замены электрооборудования и отработавших ресурсы электрических аппаратов, а также внедрения мероприятий по энергосбережению, направленных на уменьшение уровня потерь электроэнергии.

Предлагаемый алгоритм позволяет повысить эффективность прогнозирования расходов электроэнергии и оценки потерь электроэнергии в среднесрочной перспективе.

Литература

1. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях // Проблемы энергетики. 2019. № 5. С. 87-96
2. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутривозовского электроснабжения // Проблемы энергетики. 2020. № 2. С. 65-74.
3. Грачева Е.И., Наумов О.В., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Алгоритмы и вероятностные модели параметров функционирования внутривозовского электроснабжения // Проблемы энергетики. 2021. № 1. С. 93-104.
4. Сафин А.Р., Хуснутдинов Р.Р., Копылов А.М., Максимов В.В., Цветков А.Н., Гибадуллин Р.Р., Петров Т.И. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма // Вестник КГЭУ. 2018. №4(40). С. 77-85.
5. Петров Т.И. Модификация генетического алгоритма для комплексной топологической оптимизации ротора синхронных двигателей // Проблемы энергетики. 2021. том 23. №3. С. 70-79

6. Серебряков Н.А. Применение адаптивного ансамблевого нейросетевого метода для краткосрочного прогнозирования электропотребления электротехнического комплекса районных электрических сетей // Омский научный вестник. 2021. №1(175). С.39-45.
7. Кивчун О.Р. Методика комплексирования процедур рангового анализа при управлении электропотреблением объектов регионального электротехнического комплекса // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 21. С.200-209.
8. Маниковский А.С. Анализ методов прогнозирования электропотребления // Сборник научных трудов ДОНИЖТ. 2021. №60. С.23-30.
9. Зубков С.Д. Техноэкономический анализ электропотребления предприятия // Инновационная наука. 2020. №2. С.20-22.
10. Худжасаидов Дж.Х., Русина А.Г., Матренин П.В., Дмитриев С.А., Сафаралиев М.Х. Разработка моделей прогнозирования электропотребления на основе временных рядов в изолированных энергосистемах // ЭСиК. 2020. №3(48). С.23-27.
11. Дзюба А.П. Модель управления спросом на электроэнергию промышленных предприятий, подключенных к сетям производителей электроэнергии // Вестник СурГУ. 2021. Вып 1(31). С.12-25.
12. Ляхомский А.В., Шадрин А.А. Прогнозная модель электропотребления на основе полносвязной нейронной сети // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. №1. Вып. 18. С.107-113.
13. Zhaosu Meng, Huike Sun, Xi Wang. Forecasting Energy Consumption Based on SVR and Markov Model: A Case Study of China // Front. Environ. Sci., 06 April 2022 Sec. Environmental Economics and Management.
14. S. B. Taieb, J. W. Taylor, and R. J. Hyndman. Hierarchical probabilistic forecasting of electricity demand with smart meter data. Journal of the American Statistical Association, 2020.
15. T. Ahmad and H. Chen. Deep learning for multi-scale smart energy forecasting. Energy, vol.175, с.98112, 2019.
16. World Bank, Electric Power Consumption, The World Bank Group, Washington, D.C., USA, 2021. <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC>.
17. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Галицкий Ю.Я., Чернова Н.В., Ахметшин А.Р. Актуализация нормативных значений удельной электрической нагрузки многоквартирных домов в Республике Татарстан // Электричество. 2021. № 6. С. 62–71.
18. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Солуянов В.И., Горлов А.Н. Анализ фактических электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Московской области // Промышленная энергетика № 4. 2022. С. 20-28.

Авторы публикации

Абдуллазянов Эдвард Юнусович – канд. техн. наук, доцент, ректор Казанского государственного энергетического университета.

Грачева Елена Ивановна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Ахмад Альзаккар – аспирант КГЭУ.

Низамиев Марат Фирденатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Шумихина Ольга Александровна – студентка, Казанского государственного энергетического университета.

Stanimir Valtchev – Associate Professor of Universidade NOVA of Lisbon, Portugal.

References

1. Gracheva E.I., Shakurova Z.M., Abdullazyanov R.E. Comparative analysis of the most common deterministic methods for determining electricity losses in workshop networks. *Problems of energy*. 2019;5:87-96
2. Gracheva E.I., Gorlov A.N., Shakurova Z.M. Analysis and evaluation of energy savings in internal plant power supply systems. *Problems of energy*. 2020;2:65-74.
3. Gracheva EI, Naumov OV, Gorlov AN, Shakurova Z.M. Algorithms and probabilistic models of the parameters of the functioning of intra-factory power supply. *Problems of energy*. 2021;1:93-104.

4. Safin AR, Khusnutdinov RR, Kopylov AM, Maksimov VV, et al. Development of a method for topological optimization of electrical machines based on a genetic algorithm. *Bulletin of KSEU*. 2018;4 (40):77-85.
5. Petrov TI. Modification of the genetic algorithm for complex topological optimization of the rotor of synchronous motors. *Energy Problems*. 2021;23(3):70-79
6. Serebryakov NA. Application of the adaptive ensemble neural network method for short-term forecasting of power consumption of the electrical complex of district electrical networks. *Omsk Scientific Bulletin*. 2021;1(175):39-45.
7. Kivchun O.R. The method of complexing the procedures of rank analysis in the management of power consumption of objects of the regional electrotechnical complex. *Izvestia of the TulGU. Technical science*. 2021;21:200-209.
8. Manikovskiy A.S. Analysis of methods for forecasting power consumption. *Collected scientific papers DONIZhT*. 2021;60:23-30.
9. Zubkov S.D. Technocenological analysis of the enterprise's power consumption. *Innovative science*. 2020;2:20-22.
10. Khujasaidov JKh, Rusina AG, Matrenin PV, Dmitriev SA, et al. Development of power consumption forecasting models based on time series in isolated power systems. *ESiK*. 2020;3 (48):23-27.
11. Dziuba AP. Model of demand management for electricity of industrial enterprises connected to the networks of electricity producers. *Bulletin of SurGU*. 2021;1(31):12-25.
12. Lyakhomsky AV, Shadrin AA. Predictive model of power consumption based on a fully connected neural network. *Electrotechnical and information complexes and systems*. 2022;1. (18):107-113.
13. Zhaosu Meng, Huike Sun, Xi Wang. Forecasting Energy Consumption Based on SVR and Markov Model: A Case Study of China. *Front. Environ. Sci.*, 06 April 2022 Sec. *Environmental Economics and Management*.
14. S. B. Taieb, J. W. Taylor, and R. J. Hyndman. Hierarchical probabilistic forecasting of electricity demand with smart meter data. *Journal of the American Statistical Association*, 2020.
15. T. Ahmad and H. Chen. Deep learning for multi-scale smart energy forecasting. *Energy*, vol.175. c.98112, 2019.
16. World Bank, Electric Power Consumption, The World Bank Group, Washington, D.C., USA, 2021. <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC>.
17. Soluyanov Yu.I., Fedotov A.I., Galitsky Yu.Ya., Chernova N.V., Akhmetshin A.R. Actualization of the normative values of the specific electrical load of apartment buildings in the Republic of Tatarstan. *Electricity*. 2021;6: 62–71.
18. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, Soluyanov VI, et al. Analysis of the actual electrical loads of multi-apartment residential buildings in the Moscow region. *Industrial Energy*. 2022;4:20-28.

Authors of the publication

Edward Y. Abdullazyanov – Rector of Kazan State Energy University.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University.

Akhmad Alzakkar – postgraduate student of Kazan State Power Engineering University.

Marat F. Nizamiev – Kazan State Power Engineering University.

Olga A. Shumikhina – Kazan State Energy University.

Stanimir Valtchev – Associate Professor of Universidade NOVA of Lisbon, Portugal.

Получено ***21.11.2022г.***

Отредактировано ***28.11.2022г.***

Принято ***29.11.2022г.***