

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ВНУТРИЗАВОДСКОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Е.И. Грачева¹, А.Н. Горлов², З.М. Шакурова¹

¹Казанский Государственный Энергетический Университет, г. Казань, Россия

²Юго-Западный Государственный университет, г. Курск, Россия

Резюме: В статье исследуются основные особенности компоновки электрооборудования цеховых сетей внутризаводского электроснабжения с определением показателей группы цеховых потребителей, присоединенных к одному центру питания, влияющие на выбор структуры схем участков цеховых сетей. Выявлены параметры, характеризующие топологию схем. Представлено исследование влияния коэффициента загрузки цеховых трансформаторов на их коэффициент реактивной мощности, доказана расчетным путем по технико-экономическим критериям целесообразность замены цехового трансформатора на два с меньшей суммарной мощностью. Проведен расчет экономии электроэнергии во внутризаводских системах электроснабжения. Установлен вид зависимостей $\tan\phi$ трансформаторов ТМ и ТСЗ с различными номинальными мощностями в функции загрузки трансформаторов. Представлены наиболее значительные факторы роста потерь мощности холостого хода в процессе эксплуатации. С определением потерь активной и реактивной мощности и электроэнергии в трансформаторах и потерь активной мощности в распределительной сети высокого напряжения.

Проведено технико-экономическое сопоставление вариантов схем внутризаводского электроснабжения при установленных двух трансформаторах меньшей мощности вместо одного и расчетным путем доказана целесообразность такой замены для повышения эффективности функционирования оборудования и определен расчетный срок окупаемости капитала вложений. Проведен сравнительный анализ исследуемых схем электроснабжения промышленных предприятий с выделением их достоинств и недостатков.

Ключевые слова: трансформатор, экономия электроэнергии, коэффициент загрузки, эффективность эксплуатации, раздельное питание, технико-экономические параметры.

Для цитирования: Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 65-74. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-65-74.

CALCULATION OF THE ECONOMY OF ELECTRIC ENERGY IN INDUSTRIAL ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS

EI. Gracheva¹, AN. Gorlov², ZM. Shakurova¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Southwestern State University, Kursk, Russia

Abstract: The article examines the main features of the layout of electrical equipment for shop networks of internal power supply with the definition of indicators for a group of shop customers connected to a single power center, affecting the choice of the structure of schemes for shop network sites. The parameters characterizing the circuit topology are revealed. A study is presented of the influence of the load factor of workshop transformers on their reactive power factor, it is proved by calculation by technical and economic criteria the feasibility of replacing a workshop transformer with two with a lower total power. The calculation of energy savings in the in-plant power supply systems. The type of dependences $\tan\phi$ of transformers TM and TC3 with various rated powers in the function of loading transformers is established. The most significant factors of the growth of idle power losses during operation are presented. With determination of losses of active and reactive power and electricity in transformers and losses of active power in a high voltage distribution

network

A feasibility study was carried out on the options for internal power supply schemes with two transformers of lower power installed instead of one, and the feasibility of such a replacement to increase the efficiency of the equipment was proved and the estimated payback period for the investment capital was determined. A comparative analysis of the studied power supply schemes of industrial enterprises with the identification of their advantages and disadvantages.

Key words: transformer, energy saving, load factor, operating efficiency, separate power, technical and economic parameters.

For citation: Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. Calculation of the economy of electric energy in industrial electrical supply systems // *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(2):65-74. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-65-74.

Введение

В современных условиях развития объектов электроэнергетики и промышленности наблюдается тенденция построения оптимальной топологии электрических сетей и систем электроснабжения всех уровней, а также внедрения систем «умных сетей» или «интеллектуальных сетей» [1-4].

Во внутризаводском электроснабжении низковольтные электрические сети имеют наиболее сложную структуру и протяженную длину. Низковольтные системы внутрицехового электроснабжения предназначены для распределения электрической энергии внутри производственных подразделений и электропитания потребителей напряжением до 1 кВ [5-7].

Как известно, системы внутризаводского и внутрицехового электроснабжения должны обеспечивать потребителей электроэнергией в соответствии с ГОСТ на качество электроэнергии при соблюдении надежности электроснабжения согласно с категории потребителей [8-10].

В производственных цехах предприятий металлообработки, черной и цветной металлургии, электронной промышленности преобладают потребители электроэнергии первой и второй категории. Производственные цеха и участки электротехнической и электронной промышленности предприятий являются, как правило, двухменными. Потребители данных предприятий относятся ко второй и частично к первой и третьей категориям.

В системах внутрицехового электроснабжения применяются конструктивные решения с использованием радиальной, магистральной или смешанной топологии схем.

Параметры, характеризующие топологию схемы даны в табл. 1

Таблица 1

Параметры, характеризующие топологию схемы

Параметр	Критерий рациональности	
	Рациональная топология	Магистральная топология
1. Количество электроприемников 2. Токи нормальных режимов электроприемников 3. $\frac{P_{\text{расч.рез.}}}{\sum_{i=1}^n P_{\text{расч.}i}}$, ($P_{\text{расч.рез.}}$ - результирующая активная расчетная нагрузка группы электроприемников; $P_{\text{расч.}i}$ - расчетная активная мощность электроприемника; $i=1,2$; n - число электроприемников в группе) 4. Интервал варьирования расчетных активных мощностей отдельных электроприемников 5. Отношение $r_{\text{ц}} / \Delta r$ ($r_{\text{ц}}$ - расстояние от центра потребления нагрузок до источника питания; Δr - расстояние между крайними электропотребителями в направлении r)	Менее 9 Более 10 А Более 0,8 Любой Менее 1,0	Более 3 Менее 10 А Менее 0,8 3 : 1 Более 0,5

Материалы методы

Трансформаторы 6-10/0,4 кВ потребляют значительную долю реактивной мощности в системах промышленного электроснабжения, состоящей из мощности намагничивания Q_0 и мощности рассеяния $Q_{\text{рас}}$ (1).

$$Q = Q_0 + Q_{\text{рас}} = S_{\text{номТ}} \cdot \left(\frac{I_{\text{XX}}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right), \quad (1)$$

где Q_0 – мощность намагничивания; $Q_{\text{рас}}$ – мощность рассеяния; $S_{\text{номТ}}$ – номинальная мощность трансформатора; I_{XX} – ток холостого хода; U_K – напряжение короткого замыкания; k_3 – коэффициент загрузки.

$$k_3 = \frac{S_{\text{нагр}}}{S_{\text{номТ}}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{нагр}}$ – мощность нагрузки.

Преобразуем выражения для расчета коэффициента мощности присоединенных потребителей с помощью математических преобразований (3), (4) и определим коэффициент реактивной мощности $\text{tg}\phi$:

$$S_{\text{нагр}} = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad P = \sqrt{S_{\text{нагр}}^2 - Q^2}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} S_{\text{нагр}} &= S_{\text{номТ}} \cdot k_3 \\ \text{tg}\phi &= \frac{Q}{P} = \frac{S_{\text{номТ}} \cdot \left(\frac{I_{\text{XX}}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right)}{\sqrt{S_{\text{нагр}}^2 - Q^2}} = \\ &= \frac{S_{\text{номТ}} \cdot \left(\frac{I_{\text{XX}}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right)}{\sqrt{S_{\text{номТ}}^2 \cdot k_3^2 - S_{\text{номТ}}^2 \cdot \left(\frac{I_{\text{XX}}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right)^2}} = \\ &= \frac{S_{\text{номТ}} \cdot \left(\frac{I_{\text{XX}}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right)}{\sqrt{S_{\text{номТ}}^2 \cdot \left(k_3^2 - \left(\frac{I_{\text{XX}}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right)^2 \right)}} = \\ &= \frac{S_{\text{номТ}} \cdot \left(\frac{I_{\text{XX}}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right)}{S_{\text{номТ}} \cdot \sqrt{\left(k_3^2 - \left(\frac{I_{\text{XX}}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right)^2 \right)}} \end{aligned} \quad (4)$$

Из (4) определим:

$$\text{tg}\phi = \frac{\frac{I_{\text{XX}}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2}{\sqrt{k_3^2 - \left(\frac{I_{\text{XX}}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right)^2}}, \quad (5)$$

Известно, что величина реактивной мощности, потребляемая цеховыми трансформаторами, зависит от их загрузки (1,2). Для анализа потребления реактивной мощности трансформаторами в зависимости от их загрузки по (2) определим значения $\text{tg}\phi$ для ТМ и ТСЗ-10/0,4 кВ.

По расчетным данным получены графики $\text{tg}\phi = f(k_3)$ (рис.1).

Характер изменения $\text{tg}\phi$ от загрузки подчиняется похожим законам в выделенных диапазонах вариации номинальной мощности трансформаторов. При этом графики кривых $\text{tg}\phi = f(k_3)$ хорошо аппроксимируются степенной функцией. На рис. 1 приведены графики зависимости $\text{tg}\phi = f(k_3)$ трансформаторов ТМ и ТСЗ-10/0,4 кВ.

Зависимости (рис.1) иллюстрируют, что $\operatorname{tg} \varphi$ уменьшается при увеличении загрузки трансформаторов.

Графики показывают, что при изменении загрузки от 0,4 до 1 величина $\operatorname{tg} \varphi$ остается практически постоянной. При уменьшении загрузки ниже 0,3, величина коэффициента мощности существенно увеличивается, что характеризует увеличение потребляемой реактивной мощности, основная доля которой соответствует мощности намагничивания.

Кривые зависимостей $\operatorname{tg} \varphi = f(k_3)$ иллюстрируют, что потребляемая цеховыми трансформаторами реактивная мощность определяется величиной их номинальной мощности, $S_{\text{ном}T}$ при снижении $S_{\text{ном}T}$ возрастает относительная величина расходуемой реактивной мощности.

В настоящее время приобретает важное значение постановка задачи незначительной загрузки электроустановок внутриводского электроснабжения [2-3]. Снижение загрузки цеховых трансформаторов ведет к увеличению потребления реактивной мощности, следовательно, энергетическому персоналу требуется контролировать эксплуатационные характеристики трансформаторов с рациональной загрузкой- с целью снижения требуемой реактивной мощности, а также для уменьшения потерь активной мощности холостого хода[2].

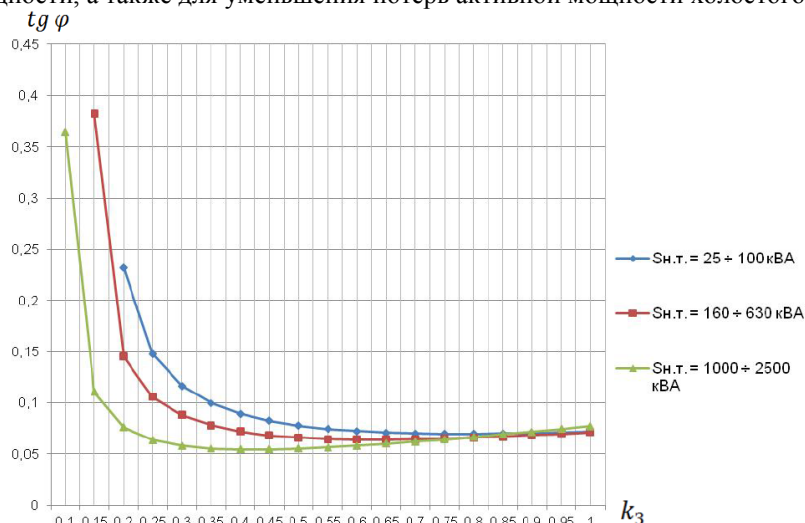


Рис.1 Зависимости коэффициента мощности($\operatorname{tg} \varphi$) от загрузки(k_3) трансформаторов ТМ и ТСЗ для $S_{\text{ном}T}=25\div 2500\text{кВ}\cdot\text{А}$

Как известно, потери электроэнергии в трансформаторах подразделяются на условно-постоянные и переменные.

Условно-постоянные потери рассчитываются по паспортным данным и определяются продолжительностью рабочего периода. Данный вид потерь учитывается при определении тарифов за передачу электроэнергии потребителям.

Величина переменных потерь рассчитывается в натуральном измерении, а также в процентах по отношению к отпуску электроэнергии в сеть и учитывается при определении платы за передачу электроэнергии потребителям.

Поскольку оценочные методы определения нормативов потерь не учитывают существенные факторы и характеристики оборудования, возможно применение уточненных схемно-технических методов при наличии требуемых исходных данных.

В настоящее время существует тенденция увеличения потерь мощности холостого хода в трансформаторах, находящихся длительное время в эксплуатации по сравнению с их номинальными паспортными данными.

По утверждению же конструкторов, разрабатывающих трансформаторы, величина потерь холостого хода в период работы возрастает приблизительно на 4-6 % в течение времени эксплуатации 20-30 лет.

Наиболее значительными факторами роста потерь мощности холостого хода трансформаторов принято считать следующие:

- старение стальных конструкций вследствие нагревания магнитопроводов;
- механические причины воздействий на стальные конструкции (вибрационные и другие);

- старение магнитопровода, вследствие чего межлистовая изоляция нарушается и повреждается;
- нарушение изоляционных материалов шпилек;
- усадка стальных конструкций в магнитопроводе, ввиду чего ослабляется его прессовка, а также ослабляется опрессовка стыковых конструкций.
- старение и нарушение целостности материалов стыковых прокладок.

В случаях несоблюдения условий эксплуатации и нарушения температурных режимов возникает перегрев отдельных элементов трансформатора. При этом, если температура перегрева существенно превышает допустимые значения, то происходит значительное ухудшение магнитных параметров стальных элементов сердечника и растут потери мощности холостого хода.

В современных условиях при наблюдающемся росте электропотребления на промышленных предприятиях, значительное число трансформаторов работают с перегрузкой, при этом увеличивается износ изоляции.

При длительных эксплуатационных периодах происходит ухудшение диэлектрических изоляционных характеристик обмоток. В случае возникновения вибрации, характеристики износа резко ухудшаются для практически каждого элемента конструкции трансформаторов.

В системах электроснабжения с несимметричными приемниками электроэнергии, присоединенными к силовым трансформаторам, велика вероятность появления магнитных потоков нулевой последовательности, и, как следствие, возникновение дополнительных потерь мощности холостого хода. При этом происходит рост суммарных потерь мощности холостого хода.

При работе трансформаторов необходимо контролировать их технические характеристики и соблюдать регламент осмотров и технического обслуживания. Нерациональные и неэффективные ремонтные работы приводят к необоснованным затратам и ухудшению качества функционирования.

В настоящее время в системах электроснабжения существует тенденция увеличения уровня потерь электроэнергии, поэтому уменьшение потерь в трансформаторах даже на несколько процентов даст значительный экономический эффект.

Для получения рациональных режимов эксплуатации трансформаторов недогруженные цеховые трансформаторы заменяют на трансформаторы, рассчитанные на меньшую номинальную мощность, переключают потребителей, питающихся от малозагруженных трансформаторов на установленные рядом с нагрузкой трансформаторы, а также отключают трансформаторы на период эксплуатации в режиме холостого хода. Вышеперечисленные способы повышения эффективности эксплуатации трансформаторов, оптимизируют их загрузку и обеспечивают рациональные и технические параметры внутризаводских электрических систем [11-15].

Вид графиков (рис.1) иллюстрирует нерациональное применение неоптимально загруженных трансформаторов.

Проведенные исследования показывают, что трансформаторы ТМ и ТСЗ-10/0,4 кВ имеют оптимальные загрузки по критерию минимума потребляемой реактивной мощности в зависимости от номинальной мощности трансформаторов (табл. 2).

Проведем технико-экономическое сопоставление вариантов схем электроснабжения при установленных двух трансформаторах меньшей мощности вместо одного для определения целесообразности такой замены.

Таблица 2

Оптимальные загрузки по критерию минимума потребляемой реактивной мощности в зависимости от номинальной мощности трансформаторов

Диапазон изменения номинальной мощности трансформаторов	Коэффициент загрузки трансформатора
$S_{номТ.}=25\div160 \text{ кВ}\cdot\text{А}$	более 0,6
$S_{номТ.}=250\div1000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$	более 0,5
$S_{номТ.}=1600\div2500 \text{ кВ}\cdot\text{А}$	более 0,3

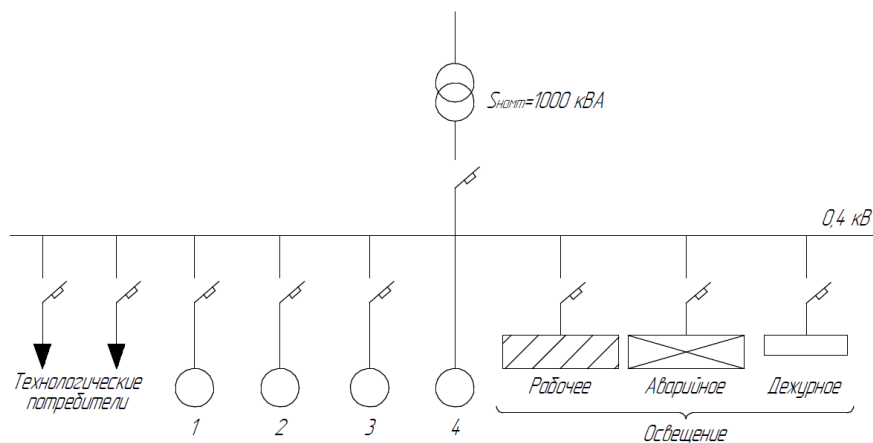


Рис.2 Схема электроснабжения при установке одного трансформатора с $S_{номТ}=1000$ кВ·А, 1 - вентиляторы, 2 - компрессоры, 3 – насосы, 4 – сварочное электрооборудование

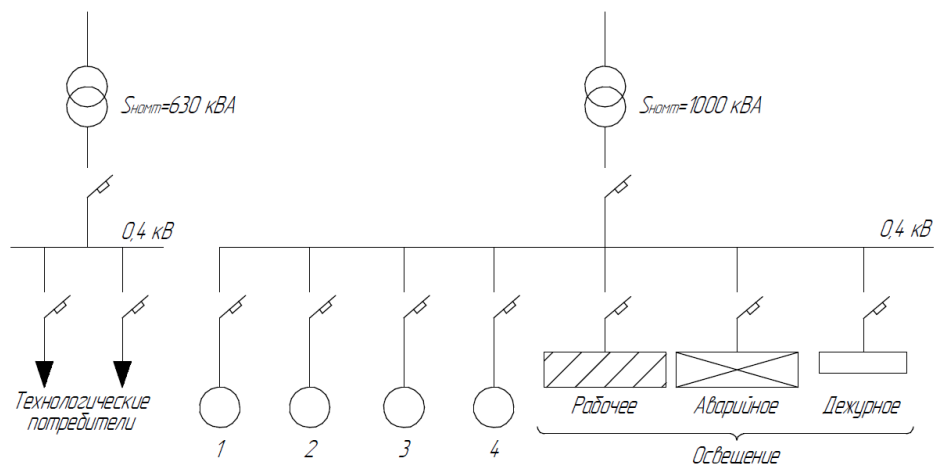


Рис.3. Схема электроснабжения при установке двух трансформаторов с $S_{номТ} = 630$ кВ·А и $S_{номТ} = 250$ кВ·А

Режим работы рассматриваемого производственного участка – в одну смену. Мощность потребителей подстанции имеющих круглосуточный режим питания составляет 20-25% от общей нагрузки участка. Номинальная мощность цеховых трансформаторов составляет: в схеме (рис.2) $S_{номТ} = 1000$ кВ·А, в схеме (рис.3) $S_{номТ} = 630$ кВ·А и $S_{номТ} = 250$ кВ·А (паспортные данные исследуемых трансформаторов представлены в табл. 3).

Для вычислений используем: расчетный период недельного цикла – 168 ч., интервал расчетного периода рабочих суток – 9 ч., рабочий период $T_{рабоч} = 45$ ч., нерабочий период $T_{нерабоч} = 123$ ч., расчетная мощность нагрузки потребителей $P_p = k_3 \cdot S_{номТ}$, потери активной мощности в распределительной сети высокого напряжения $\Delta P_C = \Delta P_a + \Delta P_p = (I_a + I_p)^2 \cdot R_{ПР} = (3 \div 4)\%$ от P_p (статистические данные [2, 3]), где I_a , ΔP_a – активные величины тока и потерь мощности трансформатора; I_p , ΔP_p – реактивные величины тока и потерь мощности трансформатора.

Таблица 3

Параметры трансформаторов				
$S_{номТ}, \text{кВ} \cdot \text{А}$	$U_1/U_2, \text{кВ}$	Потери, кВт		$I, \%$
		ΔP_x	ΔP_k	
1000	10/0,4	3,3	11,6	3
630	10/0,4	2,27	7,6	2
250	10/0,4	1,05	3,7	2,3

Определим потери электроэнергии в цеховых трансформаторах для схем (рис. 2 и 3).
Рассчитаем потери мощности в трансформаторах

$$\Delta P_T = \Delta P_X + \Delta P_K \cdot k_3^2, \quad (6)$$

Суммарная величина потерь мощности определяется суммой потерь рабочего и нерабочего интервала времени.

$$\Delta P_{\text{рабоч}} = \Delta P_T + \Delta P_C, \quad (7)$$

$$\Delta P_{\text{нерабоч}} = \Delta P_T' + \Delta P_C', \quad (8)$$

$$\Delta Q_{\text{рабоч}} = S_{\text{номТ}} \cdot \left(\frac{I_{XX}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right) \quad (9)$$

$$\Delta Q_{\text{нерабоч}} = S_{\text{номТ}} \cdot \left(\frac{I_{XX}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_{3,\text{нерабоч}}^2 \right), \quad (10)$$

где $\Delta P_{\text{рабоч}}$, $\Delta P_{\text{нерабоч}}$ – потери активной мощности за рабочие и нерабочие интервалы времени; $\Delta Q_{\text{рабоч}}$, $\Delta Q_{\text{нерабоч}}$ – потери реактивной мощности за рабочие и нерабочие интервалы времени;

$$\Delta P_C' = 0,03 \cdot \left(\frac{S_{\text{номТ}}}{U_2} \right)^2 \cdot R_{\text{П.П}} \cdot \Delta P_T' = \Delta P_X + \Delta P_K \cdot k_{3,\text{нерабоч}}^2;$$

$k_{3,\text{нерабоч}}^2$ – коэффициент загрузки трансформатора в нерабочие интервалы времени.

$$\Delta W = \Delta P_{\text{рабоч}} \cdot T_{\text{рабоч}} + \Delta P_{\text{нерабоч}} \cdot T_{\text{нерабоч}}, \quad (11)$$

$$\Delta V = \Delta Q_{\text{рабоч}} \cdot T_{\text{рабоч}} + \Delta Q_{\text{нерабоч}} \cdot T_{\text{нерабоч}}, \quad (12)$$

где ΔW – суммарные потери активной электроэнергии, ΔV – суммарные реактивные потери электроэнергии.

Результаты расчетов приведены в табл. 4. Общая величина суммарных потерь электроэнергии в трансформаторе для схемы на рис. 2 составили $\Delta W=1987,2\text{кВт}\cdot\text{ч}$, $\Delta V=6439,7\text{кВар}\cdot\text{ч}$, а для схемы на рис. 3 составили $\Delta W=1606,4\text{кВт}\cdot\text{ч}$, $\Delta V=2909,04\text{кВар}\cdot\text{ч}$.

Результаты исследований показали, что для схемы раздельного питания потребителей от двух трансформаторов, экономия электроэнергии за рабочий интервал времени в одну неделю составит $380,8\text{ кВт}\cdot\text{ч}$ и $3530,7\text{кВ}\cdot\text{Ар}\cdot\text{ч}$.

Таблица 4

Общие потери электроэнергии в трансформаторах

Вариант	$S_{\text{номТ}}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$S_p, \text{кВ}\cdot\text{А}$	k_3^2	$I_m, \text{А}$	$\Delta P_{\text{рабоч}}, \text{кВт}$	$\Delta P_{\text{нерабоч}}, \text{кВт}$	$\Delta Q_{\text{рабоч}}, \text{кВар}$	$\Delta Q_{\text{нерабоч}}, \text{кВар}$	$\Delta W, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	$\Delta V, \text{кВар}\cdot\text{ч}$	tgφ
1	1000	700	0,5	1843	30	5	56,95	31,43	1987,2	6439,7	0,09
2	630	539	0,7	1419	24	-	37,89	-	1076,50	1705,06	0,07
	250	160	0,4	432	7	1	10,3	5,99	529,90	1203,98	0,07

Результаты и обсуждения

Рассчитав экономию, при известной стоимости электроэнергии и электроустановок проведем технико-экономическое сравнение и покажем целесообразность переключения питания потребителей на два трансформатора.

Рассматриваемые схемы внутризаводского электроснабжения рекомендуются на односменных предприятиях, но эффективность эксплуатации модернизируемой электрической системы внутризаводского электроснабжения рассчитывается при помощи технико-экономического сопоставления.

Для исследуемой схемы величина стоимости экономии электроэнергии за годовой период эксплуатации составляет:

$$C = \Delta W \cdot N \cdot C_{0a} + \Delta V \cdot N \cdot C_{0p} = 380,8 \cdot 52 \cdot 3,9 + 3530,7 \cdot 52 \cdot 4,9 = 1053,29 \text{ тыс.руб.},$$

где $N=52$ – количество недель в годовом интервале времени; $C_{0a}=3,9\text{руб.}/\text{кВт}\cdot\text{ч}$ – стоимость $1\text{ кВт}\cdot\text{ч}$ электроэнергии; $C_{0p}=4,9\text{руб.}/\text{кВ}\cdot\text{Ар}\cdot\text{ч}$ – стоимость $1\text{ кВ}\cdot\text{Ар}\cdot\text{ч}$ электроэнергии.

Общая стоимость подключения трансформаторов к электрической сети с учетом стоимости монтажных и пуско-наладочных работ составит:

$$C_{T630} + C_{T250} = 348000 + 177000 = 525 \text{ тыс.руб.}$$

Величина возможной прибыли от реализации трансформатора $S_{\text{ном.}}=1000$ кВ·А составит 196500 руб.

Капиталовложения определяются:

$$K = (C_{T630} + C_{T250}) - C_{T1000} = 525000 - 196500 = 328,5 \text{ тыс. руб.}$$

Таблица 5

Сравнение схем внутриводского электроснабжения	
Схемы электроснабжения промышленных предприятий	
Достоинства	Недостатки
Питание технологических и круглосуточных потребителей от одного цехового трансформатора	
1. Снижение количества трансформаторов и, следовательно, снижение общих суммарных затрат на сооружение подстанции.	1. Увеличение потерь электроэнергии в трансформаторе в нерабочий период.
2. Не требуется частое включение и отключение работающих трансформаторов.	2. Ухудшение показателей качества электроэнергии в электрической сети освещения из-за влияния технологических электропотребителей.
3. Относительная простота электрической схемы и относительно низкая стоимость при строительстве и проведении монтажа и пусконаладочных работ.	3. Снижение параметров надежности схемы вследствие питания технологических потребителей и вспомогательных приемников электроэнергии (систем освещения, вентиляции и т.д.) от одного трансформатора, выход из строя которого, может привести к нарушению электроснабжения потребителей.
Питание силовой и вспомогательной нагрузки от разных трансформаторов, имеющих меньшую номинальную мощность	
1. Отсутствуют дополнительные потери электроэнергии в системе электроснабжения в течение нерабочих интервалов времени.	1. Увеличивается количество трансформаторов, что несколько усложняет схему электроснабжения.
2. Увеличение показателей качества электроэнергии в сетях освещения.	2. Возрастает количество включения и отключения трансформаторов.
3. Увеличение надежности питания вспомогательных потребителей.	

Расчетный срок окупаемости капиталовложений определяется:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{C} = \frac{328,5}{1053,29} \approx 0,31 \text{ года.}, \text{ даже по сравнению с «..года»}$$

Заключение

Проведенные исследования показали, что для повышения эффективности эксплуатации систем внутриводского электроснабжения целесообразно производить замену одного трансформатора, питающего цеховую технологическую и круглосуточную нагрузку потребителей на два трансформатора с меньшей суммарной номинальной мощностью с учетом их оптимальной загрузки. Предлагаемые мероприятия позволяют снизить суммарные потери электроэнергии и уменьшить эксплуатационные издержки.

При этом срок окупаемости разработанных мероприятий по экономии электроэнергии для рассматриваемого примера составил 3,7 месяца. Также выделение технологической нагрузки и присоединение ее к отдельному трансформатору позволит улучшить показатели качества электроэнергии при эксплуатации как технологической, так и круглосуточной нагрузки потребителей внутриводского электроснабжения.

Литература

1. Грачева Е.И., Наумов О.В. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей. Монография. М.: РУСАЙНС, 2017.168 с.
2. Скоморохов П.И., Зацепина В.И.. Проблемы оптимизации качества электроэнергии в распределительных электрических сетях // Сборник статей 18 международной научно-практической конференции «Advances in science and technology» 31.01.19.. М.: Научно-издательский центр «Актуальность. РФ», Ч. 1. 2019. С.102-103.
3. Скоморохов П.И. Анализ воздействия негативных сетевых возмущений резкопеременного

характера на эффективность функционирования систем электроснабжения // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2019. Т.25. № 4. Тамбов: Из-во ТГТУ. С.559-565.

4. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. № 5. С.87-96.

5. Powering. Reliable. Future. Yesterday, today and tomorrow. RWE Annual Report (2017). Essen, Germany: RWE Aktiengesellschaft.

6. Kabalci Y. A survey on smart metering and smart grid communication // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. V. 57. pp. 302-318

7. Busom N, et al. Efficient smart metering based on homomorphi c encryption // Computer Communications. 2016. V. 82. pp.95-101.

8. Конюхова Е.А. Проектирование систем электроснабжения промышленных предприятий (теория и примеры). Издательство «Кнорус», 2016.

9. Скоморохов П.И. Оценка безотказности систем электроснабжения с продолжительным режимом работы. Молодежь и 21 век: Материалы 5 Международной молодежной научной конференции 26-27.02.15. Т. 3. 2015. Курск: Юго-Зап. Государственный университет, ЗАО «Университетская книга», с. 237-240.

10. Конюхова Е.А. Экономико-математическая модель рабочей части системы электроснабжения объекта на среднем и низком напряжении. Электричество. 2018, № 9.

11. William H. Kersting Distribution System Modeling and Analysis. Secon Edition. CRC Press, 2007.

12. Инновации и развитие. Россети // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017.

13. Lasso, H., Ascanio, C., Guglia, M. A model for calculating technical losses in the secondary energy distribution network // IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America. 2006. p.1-6.

14. Сайт Барнаульского трансформаторного завода [Электронный ресурс]. Доступно по: <http://www.aem22.ru>, свободный.

15. Скоморохов П.И., Зацепина В.И. Анализ функционирования систем электроснабжения резкоременным характером нагрузок // Энергетика. Проблемы и перспективы развития: Материалы 4 Всероссийской молодежной научной конференции. 2019. Тамбов: Из-во ТГТУ, с. 148-149.

Авторы публикации

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Горлов Алексей Николаевич – канд. ехн. наук, доцент, зав. кафедрой «Электроснабжение», Юго-Западный государственный университет, г. Курск.

Шакурова Зумейра Мунировна – канд. пед. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Gracheva EI, Naumov OV. *Loss of electricity and the effectiveness of the operation of equipment workshop networks*. Monograph. M : RUSAINS, 2017. 168 p.

2. Skomorokhov PI, Zatsepina VI. Problems of optimizing the quality of electricity in distribution electric networks. *Collection of articles of the 18 th International Scientific and Practical Conference Advances in science and technology* 01.31.19. Pt 1. 2019. M.: Scientific and Publishing Center "Actuality. RF ", pp.102-103.

3. Skomorokhov PI. Analysis of the impact of negative network disturbances of a rapidly changing nature on the efficiency of the functioning of power supply systems. *Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2019;25(4):559-565.

4. Gracheva EI, Shakurova ZM, Abdullazyanov RE. Comparative analysis of the most common deterministic methods for determining energy losses in workshop networks. *Problems of Energy*. 2019;5:87-96.

5. Powering. Reliable. Future. Yesterday, today and tomorrow. RWE Annual Report (2017). Essen, Germany: RWE Aktiengesellschaft.

6. Kabalci YA. Survey on smart metering and smart grid communication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;57:302-318

7. Busom N, et al. Efficient smart metering based on homo morphic encryption. *Computer Communications*. 2016;82:95-101.

8. Konyukhova EA. *Design of power supply systems for industrial enterprises* (theory and examples). Knorus Publishing House, 2016.

9. Skomorokhov PI. Reliability assessment of power supply systems with a long operating mode. Youth and the 21st Century: *Proceedings of the V International Youth Scientific Conference* 26-27.02.15. Kursk: South-West. Gos. Un-t., University Book CJSC. 2015;32:37-240.
10. Konyukhova EA. Economic-mathematical model of the working part of the power supply system of an object at medium and low voltage. *Electricity*. 2018;9.
11. William H. Kersting Distribution System Modeling and Analysis. Second Edition. CRC Press, 2007.
12. Innovation and development. Rosseti. Electricity. *Transmission and distribution*. 2017.
13. Lasso H, Ascanio C, Guglia MA. Model for calculating technical losses in the secondary energy distribution network. *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*. 2006. pp.1-6.
14. Site of Barnaul Transformer Plant [Electronic resource]. Accessed to: <http://www.aem22.ru>.
15. Skomorokhov PI, Zatsepina VI, Skomorokhov PI. Analysis of the functioning of power supply systems with a sharply changing nature of loads. Energy. *Problems and development prospects: materials of the IV All-Russian Youth Scientific Conference*. Tambov: From TSTU. 2019pp. 148-149.

Authors of the publication

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email :grachieva.i@bk.ru.

Alexey N. Gorlov – Southwestern State University, Kursk, Russia.

Zumeira M. Shakurova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

14.02.2020г.