

## ОЦЕНКА И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ

Н.В. Грунтович, А.А. Капанский

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого (Беларусь)

*Аннотация.* В работе представлен комплексный подход к оценке энергетической эффективности работы трансформаторных подстанций, а также практические способы снижения затрат электрической энергии на примере предприятий производства газового оборудования. Отраженный в статье подход основывается на определении вероятностной расчетной нагрузки в результате обработки статистических данных, накопленных информационно-измерительной системой в течение характерного года. Для проверки гипотезы о нормальности распределения электрической нагрузки и оценки степени согласованности теоретического и статистического распределений использован критерий Колмогорова-Смирнова на уровне значимости 0,05 %.

В статье установлено, что снижение мощности трансформаторов для обеспечения нормативного коэффициента загрузки не всегда приводит к наиболее эффективному режиму за счет худшего соотношения потерь в стали и меди трансформатора, а при анализе включения одного или двух трансформаторов для предотвращения систематических перегрузок за счет большой дисперсии нагрузок в течение суток необходимо учитывать величину расчетной нагрузки.

Результаты исследований могут быть использованы промышленными предприятиями при определении оптимальной нагрузки трансформаторов и количества включенных трансформаторов в горячем резерве для минимизации потерь активной мощности и энергии.

*Ключевые слова:* трансформаторные подстанции, расчетная нагрузка, статистический метод, потери электроэнергии, оптимальная нагрузка.

**Введение.** В практических условиях комплексная оценка потенциала энергосбережения на промышленных предприятиях

осуществляется в результате проведения энергетического обследования (энергоаудита), основная задача которого состоит в формировании программы по энергосбережению, способствующей в перспективе минимизировать затраты топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в процессе производства товарной продукции. На сегодняшний день очевидные и легко реализуемые мероприятия, не требующие детальной проработки, практически исчерпаны. В связи с чем, возникает необходимость более обстоятельного анализа возможности повышения энергоэффективности работы элементов систем энергоснабжения, как в целом, так и по отдельности. К одним из наиболее важных элементов внутризаводского электроснабжения следует отнести трансформаторные подстанции, которые формируют условно-постоянные и переменные (нагрузочные) потери электроэнергии [1, 2]. Авторами статьи отмечено, что при проведении энергетического обследования промышленных предприятий и организаций не уделяется должное внимание вопросам повышения энергетической эффективности трансформаторов, в связи с чем, актуальным является разработка способа оценки потенциала энергосбережения, определяющего порядок действий для достижения максимального эффекта от регулирования режимов работы трансформаторов.

**Общий подход.** По мнению авторов, порядок оценки потенциала энергосбережения при анализе режимов работы трансформаторных подстанций должен включать следующие этапы (рисунок 1):

- определение среднегодового коэффициента загрузки и расчетной мощности подстанции;
- определение оптимальной нагрузки трансформаторов при которой затраты электроэнергии минимальны;
- определение оптимального количества трансформаторов при существующей среднегодовой электрической нагрузке;
- определение затрат электроэнергии в существующих и альтернативных силовых трансформаторах.

В общем случае приведенный алгоритм устанавливает порядок действий энергетических служб для достижения предельного энергосбережения, т.е. позволяет определить какое направление наиболее эффективно, к примеру, замена трансформаторов, перевод нагрузки или дозагрузка существующих.

Для более точного анализа электрических нагрузок, при наличии информационного измерительных систем, целесообразно использовать 30-и минутные значения активной и реактивной мощности, охватывающие годовой интервал времени, что в общей сложности составляет 365 суток. При отсутствии автоматизированного

сбора статистических данных необходимо использовать результаты системных измерений по подстанциям за характерные летние и зимние сутки с выделением максимальных режимов.



Рисунок 1 – Этапы комплексной оценки потенциала энергосбережения при работе силовых трансформаторах

В дальнейшем в статье рассмотрен пример для одной из трансформаторных подстанций предприятия по производству газового оборудования, основными потребителями которой являются энергоемкие литейные комплексы и плавильно-раздаточные печи. На подстанции установлены два трансформатора серии ТМЗ-1000/10 с номинальной мощностью  $S_{\text{ном.тр}}=1000$  кВА. Один трансформатор работает на общую нагрузку, второй находится в холодном резерве. Основные технические характеристики: потери холостого хода  $\Delta P_{\text{хх}}=1,4$  кВт; потери короткого замыкания  $\Delta P_{\text{кз}}=10,8$  кВт; номинальное напряжение высокой стороны  $U_{\text{вн}}=10$  кВ; напряжение короткого замыкания  $U_{\text{к}}=5,5$  %.

### Определение расчетной электрической нагрузки

Для определения величины расчетной нагрузки подстанции предложен статистический метод, согласно которому групповая нагрузка подчиняется нормальному закону распределения с плотностью вероятности [3]:

$$f(S) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(S-S_c)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

где  $S$  – значение 30-и минутной электрической нагрузки, кВА;  $S_c$  – среднее значение электрической нагрузки, кВА;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение электрической нагрузки, кВА [4, 5]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (S_i - S_c)^2}. \quad (2)$$

где  $n$  – объем выборки статистических данных.

Для проверки гипотезы о нормальности распределения электрической нагрузки и оценки степени согласованности теоретического (нормального) и статистического распределений использован критерий Колмогорова-Смирнова в соответствии с которым:

1. Определяется эмпирическая функция распределения  $F_n(x)$  и предполагаемая теоретическая функция распределения  $F(x)$  [3].

2. Определяется мера расхождения между теоретическим и эмпирическим распределением  $D$  [3]:

$$D = \max_{-\infty \leq x \leq \infty} |F_n(x) - F(x)|. \quad (3)$$

На рисунке 2 приведены результаты построения функций распределения  $F(x)$  и теоретической плотности вероятности  $f(x)$ .

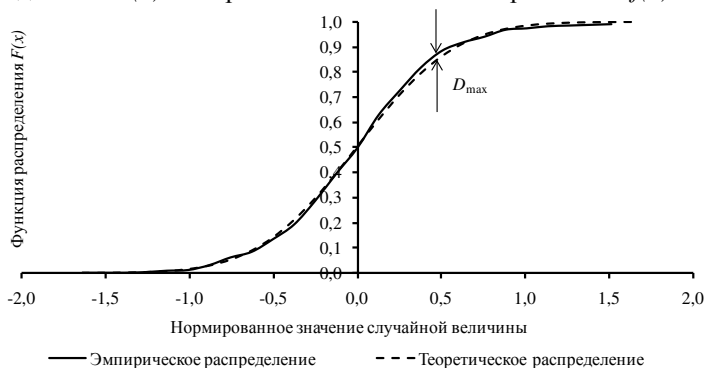


Рисунок 2 – Проверка на нормальность статистической выборки.

Определение меры расхождения эмпирической и теоретической функции распределения

3. Определяется статистика критерия Колмогорова-Смирнова [3]:

$$\lambda = D \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}}, \quad (4)$$

где  $n_1, n_2$  – объем теоретической и экспериментальной выборки.

В случае если  $\lambda$  окажется больше критического  $\lambda_\alpha$ , определенного на уровне значимости  $\alpha$ , то нулевая гипотеза  $H_0$  о том, что случайная величина электрической нагрузки  $S$  имеет заданный

закон распределения, отвергается. Если  $\lambda \leq \lambda_\alpha$ , то гипотеза о схожести теоретической и эмпирической выборке  $H_0$  принимается.

Максимальное значение меры расхождения в исследованной выборке составило  $D_{\max} = 0,026$ , а критическое значение  $\lambda_\alpha$  при уровне значимости 0,05% не превышала 1,36, что больше расчетного  $\lambda = 0,34$ . Условие нормальности распределения погрешности моделирования выполняется.

Таким образом, можно считать, что случайная величина  $S_i$  в  $i$ -м наблюдении, распределенная по нормальному закону, будет находиться в интервале [6]:

$$[S_c - \beta \cdot \sigma; S_c + \beta \cdot \sigma] \quad (5)$$

где  $\beta$  – кратность меры рассеяния ( $\beta = -3 \dots +3$ ).

Если в качестве верхнего предела принята кратность меры рассеяния величина  $\beta = 2,5$ , то вероятность превышения фактической нагрузки расчетное значение составляет 0,5 %, что определяет достаточно высокий тепловой запас при работе трансформаторов. На рисунке 3 превышение случайной величины  $S_i$  расчетное значение  $S_p = S_c + 2,5\sigma$  обусловлено изменением случайных факторов и не является характерным для нагрузок данного производства.

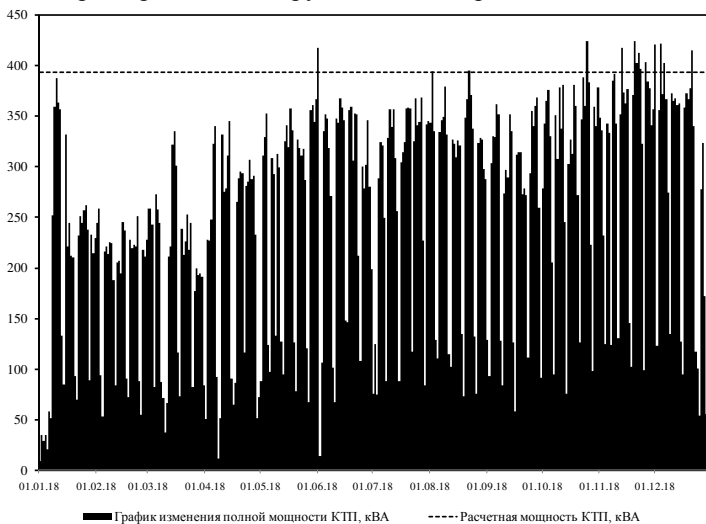


Рисунок 3 – Годовой график электрической нагрузки подстанции

Если в результате накопления статистических данных электрической нагрузок произошла потеря информация, то для

заполнения пропуска временных рядов используется процедура восстановления данных по предыстории входных параметров, изложенная в работе [7].

Для исследованной подстанции расчетная полная нагрузка, определенная статистическим методом составила  $S_p = 393$  кВА. Средняя полная мощность на основании графиков нагрузок составила  $S_c = 130$  кВА. Средний коэффициент загрузки исследуемых трансформаторов не превышал 0,13.

#### **Определение оптимальной нагрузки подстанции**

Значение оптимальной нагрузки характеризуется минимальными потерями мощности в силовых трансформаторах и, соответственно, максимальным коэффициентом полезного действия [8]:

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\text{опт}}}{P_{\text{опт}} + \Delta P_{\text{тр}}}, \quad (6)$$

где  $P_{\text{опт}}$  – оптимальная активная мощность, кВт:

$$P_{\text{опт}} = S_{\text{опт}} \cdot \cos \varphi, \quad (7)$$

где  $S_{\text{опт}}$  – оптимальное значение полной мощности подстанции, кВА;  $\cos \varphi$  – коэффициент активной мощности;  $\Delta P_{\text{тр}}$  – суммарные потери мощности в трансформаторе, кВт [9]:

$$\Delta P_{\text{тр}} = n \cdot \Delta P_{\text{xx}} + \frac{1}{n} \left( \frac{S_{\text{опт}}}{S_{\text{ном.тр}}} \right)^2 \Delta P_{\text{кз}}. \quad (8)$$

Максимальный коэффициент полезного действия достигается при равенстве потерь мощности в обмотках трансформатора и в магнитопроводе [10]:

$$\frac{1}{n} \left( \frac{S_{\text{опт}}}{S_{\text{ном.тр}}} \right)^2 \Delta P_{\text{кз}} = n \cdot \Delta P_{\text{xx}}, \quad (9)$$

Оптимальная нагрузка трансформатора определяется в результате решения уравнения (9):

$$\frac{1}{n} \left( \frac{S_{\text{опт}}}{S_{\text{ном.тр}}} \right)^2 \Delta P_{\text{кз}} = n \cdot \Delta P_{\text{xx}}. \quad (10)$$

При определении оптимальной нагрузки исследованной подстанции учтено, что один из двух трансформаторов полностью отключен от сети (работает в холодном резерве). Тогда при известных технических характеристиках оптимальная нагрузка трансформаторов, определенная по формуле (10), составила 360 кВА. При перераспределении нагрузки подстанции с увеличением средней

мощности со 130 кВА до 360 кВА коэффициент полезного действия увеличится с 98,8% до 99,2%, что приведет к снижению потерь мощности в трансформаторах на 1,22 кВт.

### **Определение оптимального количества трансформаторов**

Граница электрической нагрузки, при которой суммарные потери мощности для одного и двух трансформаторов совпадают, определяется исходя из равенства [8]:

$$\Delta P_{xx} + \left( \frac{S_c}{S_{ном.тр}} \right)^2 \Delta P_{кз} = n \cdot \Delta P_{xx} + \frac{1}{n} \left( \frac{S_c}{S_{ном.тр}} \right)^2 \Delta P_{кз}, \quad (11)$$

Тогда для двухтрансформаторной подстанции, решая уравнение (11), среднее значение электрической нагрузки на границе равенства потерь мощности [8]:

$$S_r = S_{ном.тр} \sqrt{\frac{\Delta P_{xx}}{0,5 \cdot \Delta P_{кз}}}. \quad (12)$$

Величина  $S_r$  определяет границы включения одного или двух трансформаторов в зависимости от средней нагрузки. Если средняя нагрузка потребителя меньше мощности  $S_r$  целесообразна работа одного трансформатора с выводом в холодный резерв другого. При нагрузке потребителя более  $S_r$  целесообразна работа двух трансформаторов. Стоит также отметить, что при анализе включения одного или двух трансформаторов кроме вышесказанного необходимо учитывать величину расчетной нагрузки  $S_p$ . К примеру, может возникнуть случай, когда средняя нагрузка окажется меньше граничной  $S_r$  в таком случае оптимальным является эксплуатация на одном трансформаторе, однако, за счет большой дисперсии нагрузок в течение суток величина  $S_p$  может оказаться существенно выше номинальной мощности трансформатора  $S_{ном.тр}$ , что приведет к систематическим перегрузкам. Обобщая вышесказанное условие оптимального выбора:

$$N = 1 \text{ при } \begin{cases} S_c < S_r \\ S_p < S_{ном.тр} \end{cases}, \quad (13)$$

$$N = 2 \text{ при } S_{опт} > S_r. \quad (14)$$

Для исследуемой подстанции граничная мощность составила  $S_r = 509,2$  кВт, следовательно существующий режим работы с включенным одним трансформатором является оптимальным. На рисунке 4 приведено изменение годовых потерь электроэнергии от загрузки подстанции и количества включенных трансформаторов. Пересечение характеристик определяет граничную мощность нагрузки.

Стоит отметить, что эксплуатация трансформатора в холодном резерве с учетом требований к надежности системы электроснабжения потребителей I, II категории допустима при наличии автоматического ввода резерва (АВР). При продолжительном отключении трансформатора от питающей сети возрастает вероятность появления конденсата в масле, что существенно снижает его диэлектрические свойства. Реализация данного мероприятия возможна при включении каждого из трансформаторов попеременно.

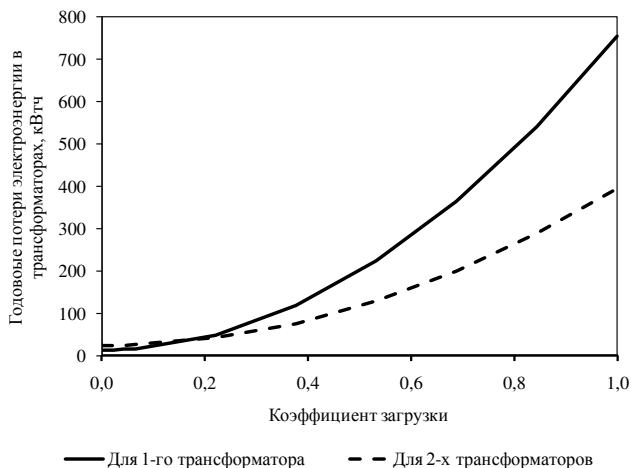


Рисунок 4 – Изменение годовых потерь электроэнергии от загрузки подстанции и количества включенных трансформаторов

### Определение затрат электроэнергии

Одним из самых распространенных способов снизить потери в распределительных сетях является использование энергосберегающих трансформаторов, к примеру, новых энергоэффективных трансформаторов серии ТМГ-15. Существующее производство трансформаторов данной серии начинается с номинала мощности 250 кВА. В связи с высоким сроком окупаемости мероприятий по замене трансформаторов необходимо учитывать возмещение денежных средств за счет продажи старых трансформаторов или сдачи на металлолом, а также учитывать снижения не только электроэнергии, но и мощности при наличии двухставочного или двухставочно-дифференцированного тарифа за оплату электроэнергии.

Условно-постоянные затрат электроэнергии в двухобмоточном трансформаторе определяются по формуле, тыс. кВт·ч [8]:

$$\Delta W_{xx} = n \cdot \Delta P_{xx} \cdot \quad (15)$$

Нагрузочные затраты электроэнергии в двухобмоточном



трансформаторе определяются по формуле, тыс. кВт·ч [11]:

$$\Delta W_{\text{кз}} = \frac{P_c^2 + Q_c^2}{U_{\text{ном.т}}^2} R_T \cdot d \cdot T \cdot 10^{-6} \quad (16)$$

где  $P_c, Q_c$  – среднее значение активной, кВт, и реактивной мощности, кВар;  $U_{\text{ном.т}}$  – номинальное напряжение трансформатора высокой стороны, кВ;  $R_T$  – сопротивление трансформатора, приведенное к высокой стороне, Ом;  $T$  – время работы трансформатора, ч;  $d$  – дисперсионный коэффициент, зависящий от показателя формы графика активной и реактивной мощности, который определяется в зависимости от величины  $\lambda_a$  [11]:

$$\lambda_a = \frac{P_c - P_0}{P_2 - P_0}, \quad (17)$$

где  $P_2, P_0$  – величина, максимальной и минимальной нагрузки соответственно, учитывающая при наличии реверс потока мощности, кВт.

$$d(P) = \begin{cases} \frac{(P_2 - P_0)(P_1 - P_0)^2}{P_2 + P_1 - 2P_0} & \text{при } \lambda_a \geq 1 \\ \frac{(P_2 - P_1)^2(P_1 - P_0)}{2P_2 - P_1 - P_0} & \text{при } \lambda_a < 1. \end{cases} \quad (18)$$

Величины  $P_2$  и  $P_0$  определяется исходя из следующих соображений:

– при наличии реверса активной мощности:

$$P_2 = P_{\text{max}}, \quad (19)$$

$$P_0 = -P_{\text{max}}^{\text{от}} \quad (20)$$

где  $P_{\text{max}}$  – максимальная нагрузка, кВт;  $P_{\text{max}}^{\text{от}}$  – максимальная нагрузка реверса, кВт.

– при отсутствии реверса активной мощности:

$$P_2 = P_{\text{max}}, \quad (21)$$

$$P_0 = P_{\text{min}}. \quad (22)$$

где  $P_{\text{min}}$  – минимальная нагрузка, кВт.

Дисперсия реактивной мощности  $d(Q)$  определяется аналогично дисперсии активной  $d(P)$ .

Представление результатов расчета предлагается выполнять по форме, приведенной в таблице 1.

Таблица 1 – Представление результатов расчета

Этап	Наименование показателя	Значение
Определение коэффициента загрузки трансформатора и выбор расчетной мощности	Наименование КТП	КТПН-8
	Количество и марка существующих трансформаторов	2хТМЗ-1000/10
	Общее количество трансформаторов, шт.	2
	Количество включенных трансформаторов, в том числе с учетом горячего резерва (без учета холодного), шт.	1
	Номинальная мощность существующего трансформатора, $S_{ном.тр}$ , ВА	1000
	Потери холостого хода, $P_{хх}$ , кВт	1,4
	Потери короткого замыкания, $P_{кз}$ , кВт	10,8
	Номинальное напряжение высокой стороны, $U_{вн}$ , кВ	10
	Напряжение короткого замыкания, $U_{к}$ %	5,5
	Среднеквадратичное отклонение, $\sigma$ , кВА	105
	Кратность меры рассеяния, $\beta$	2,5
	Максимальная полная мощность, $S_{м}$ , кВА	433
	Расчетная нагрузка, $S_{р}$ , кВА	393
	Ближайшая большая мощность трансформатора, кВА	400
	Годовой расход электроэнергии на основании ГЭН, $W_{год}$ , кВт·ч	1119915
	Определение оптимального количества трансформаторов	Число часов использования максимума нагрузки, $T_{м}$ , ч
Средний коэффициент мощности, $\cos\phi$		0,99
Средний коэффициент загрузки, $k_z$		0,13
Мощность нагрузки при равенстве потерь активной мощности для работы на одном и двух трансформаторах, $S_{г}$ , кВт		509,2
Рекомендованное количество трансформаторов к включению, $N$ , шт.		1
Примечание		Существующий режим работы ТП(КТП) с включенным одним трансформатором является оптимальным

Продолжение таблицы 1

Этап	Наименование показателя	Значение
Определение затрат электроэнергии в существующих трансформаторах	Среднее сальдо активной мощности за расчетный период, $P_c$ , кВт	128
	Максимальное сальдо активной мощности, $P_2$ , кВт	422
	Минимальное сальдо активной мощности, $P_0$ , кВт	0,0
	Показатель формы графика по активной мощности, $\lambda_a$	0,4
	Дисперсия активной мощности за расчетный период, $d(P)$	31803
	Среднее сальдо реактивной мощности, $Q_c$ , кВар	22
	Максимальное сальдо реактивной мощности, $Q_2$ , кВар	96
	Минимальное сальдо реактивной мощности, $Q_0$ , кВар	0,0
	Показатель формы графика по реактивной мощности, $\lambda_p$	0,3
	Дисперсия реактивной мощности за расчетный период, $d(Q)$	1191
	Среднее сальдо полной мощности за расчетный период, $S_1$ , кВт	130
	Максимальное сальдо полной мощности, $S_2$ , кВт	433
	Минимальное сальдо полной мощности, $S_0$ , кВт	0
	Дисперсионный коэффициент, $d$	1,96
	Активное сопротивление трансформатора, приведенное к высокой стороне, $R_T$ , Ом	1,08
	Определение затрат электроэнергии в при замене трансформаторов	Переменные технические потери в трансформаторах, $\Delta W_{кз}$ , тыс. кВт·ч
Постоянные технические потери в трансформаторах, $\Delta W_{xx}$ , тыс. кВт·ч		12,26
Итого годовые потери электроэнергии в существующих трансформаторах, $W_1$ , тыс. кВт·ч		15,39
Марка предлагаемого трансформатора		ТМГ-15/630
Мощность предлагаемого трансформатора, $S_{ном.тр}$ , кВА		630
Потери холостого хода, $P_{xx}$ , кВт		0,73
Потери короткого замыкания, $P_{кз}$ , кВт		6,75
Активное сопротивление трансформатора, приведенное к высокой стороне, $R_T$ , Ом		1,70
Переменные технические потери в трансформаторах, $\Delta W_{кз}$ , тыс. кВт·ч		4,92
Постоянные технические потери в трансформаторах, $\Delta W_{xx}$ , тыс. кВт·ч		6,39
Итого годовые потери электроэнергии в предлагаемых трансформаторах, $W_2$ , тыс. кВт·ч	11,31	
Экономия электроэнергии, $\Delta W$ , тыс. кВт·ч	4,08	

Продолжение таблицы 1

Этап	Наименование показателя	Значение
Определение оптимального режима работы трансформаторов	Оптимальная нагрузка потребителя (при работе с наименьшими потерями), $S_{\text{опт}}$ , кВА	360
	Оптимальный среднегодовой коэффициент загрузки трансформатора, $k_{з, \text{опт}}$	0,36
	Потери мощности в оптимальном режиме, $\Delta P$ , кВт	2,80
	Фактические потери мощности, $\Delta P_{\text{факт}}$ , кВт	1,58
	Максимальный КПД трансформатора, $\eta_{\text{max}}$ , %	99,2%
	Фактический КПД трансформатора, $\eta_{\text{факт}}$ , %	98,8%

В результате оценки эффективности работы трансформаторной подстанции установлено, что существующая нагрузка позволяет снизить мощность трансформаторов с 1000 кВА до 400 кВА. При сохранении номинальной мощности и замены трансформаторов на энергоэффективные экономический эффект составит 4,12 тыс. кВт·ч, а срок окупаемости 13,9 лет. При снижении номинальной мощности трансформатора до 400 кВА экономический эффект составляет 2,72 тыс. кВт·ч при сроке окупаемости 9,3 года. При установке трансформаторов с номинальной мощностью 630 кВА экономический эффект составит 4,08 тыс. кВт·ч при сроке 8,8 лет, что связано с более оптимальным соотношением потерь в стали и меди трансформатора по сравнению с номиналом мощности в 400 кВА.

### Выводы

1. Выполнение комплексного подхода оценки режимов работы трансформаторов необходимо для четкого предоставления о наиболее эффективных направлениях (замена трансформаторов, перевод нагрузки или дозагрузка существующих) для достижения предельного энергосбережения.

2. При анализе включения одного или двух трансформаторов необходимо учитывать величину расчетной нагрузки для предотвращения систематических перегрузок за счет большой дисперсии нагрузок в течение суток.

3. Установлено, что снижение мощности трансформаторов для обеспечения нормативного коэффициента загрузки не всегда приводит к наиболее эффективному режиму за счет худшего соотношения потерь в стали и меди трансформатора.

4. В ряде случаев эксплуатация одного из двух трансформаторов в холодном резерве является наиболее оптимальным режимом, однако при продолжительном отключении трансформатора от питающей сети

возрастает вероятность появления конденсата в масле, что существенно снижает его диэлектрические свойства и, соответственно, надежность системы электроснабжения.

### **Список использованных источников:**

1. Фёдоров, О.В. Некоторые особенности структуры систем внутрицехового электроснабжения / О.В. Фёдоров // Надежность и безопасность энергетики. – 2015. – № 3 (30). – С. 30–33.

2. Шпиганович, А.А. Особенности функционирования систем электроснабжения предприятий черной металлургии / А.А. Шпиганович, К.А.Пушница, Е.В.,Чуркина О.В. Федоров // Черные металлы. –2017. –№ 5. – С. 56–61.

3. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров // 4-е изд. стер. М: Высш. шк., 2007. – 491 с.

4. Aguinis, H. Regression analysis for categorical moderators. – Guilford Press, 2004. – 202 p.

5. Айвазян, С. А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. – М. : Юнити, 1998. – 1006 с.

6. Статистика. Показатели и методы анализа : справ. пособие / Н. Н. Бондаренко [и др.] ; под ред. М. М. Новикова. – Минск : Современ. шк., 2005. – 628 с.

7. Капанский, А. А. Особенности сбора и обработки данных для построения вероятностно-статистических моделей энергопотребления / А. А. Капанский, Е. Л. Шенец // Агротехника и энергообеспечение. – 2017. – № 1 (14). – С. 12–22.

8. Радкевич, В. Н. Проектирование систем электроснабжения : учеб. пособие / В. Н Радкевич.– М. : НПООО «ПИОН», 2001. – 292 с.

9. Грачева, Е. И. Энергоэффективность в системах внутрицехового электроснабжения путем замены силовых трансформаторов // Е.И.Грачева, А. Н. Алимova // Актуальные проблемы электроэнергетики. – 2018. – С. 245-252.

10. Ус, А. Г. Электроснабжение промышленных предприятий : практикум / А. Г. Ус [и др.] ; М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – 410 с.

11. Порядок расчета величины технологического расхода электрической энергии на ее передачу по электрическим сетям, учитываемой при финансовых расчетах за электроэнергию между энергоснабжающей организацией и потребителем (абонентом)». ТКП 460-2017– Минск, 2017. – 66 с.

*Грунтович Надежда Владимировна, доктор технических наук, профессор, Беларусь, Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, [gruntovich@tut.by](mailto:gruntovich@tut.by).*

*Капанский Алексей Александрович, старший преподаватель, Беларусь, Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, [kapanski@mail.ru](mailto:kapanski@mail.ru).*

## ASSESSMENT AND IMPROVEMENT OF ENERGY EFFICIENCY WORKS OF TRANSFORMERS WORK DURING AN ENERGY SURVEY

N.V Gruntovich, A.A Kapansky

Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi (Belarus)

Abstract. The article presents a comprehensive approach to assessing the energy efficiency of transformer substations, as well as practical ways to reduce the electrical energy on the example of enterprises producing gas equipment. The approach reflected in the article is based on the determination of the probabilistic design load as a result of processing statistical data accumulated by the information-measuring system during the characteristic year. To test the hypothesis of the normal distribution of the electrical load and assess the degree of consistency of the theoretical and statistical distributions, the Kolmogorov-Smirnov criterion was used at a significance level of 0.05%. The article establishes that reducing the power of transformers to ensure a standard load factor does not always lead to the most efficient mode due to the worst ratio of losses in steel and copper of the transformer. When analyzing the inclusion of one or two transformers to prevent systematic overload due to the large dispersion of loads during the day, it is necessary to take into account the magnitude of the calculated load. The research results can be used by industrial enterprises in determining the optimal load of transformers and the number of switched on transformers in a high reserve to minimize the loss of active power and energy.

Keywords: transformer substations, design load, statistical method, electric power loss, optimal load.

*Gruntovich N.V., PhD, Belarus, Gomel State Technical University. P.O. Sukhoi,, [gruntovich@tut.by](mailto:gruntovich@tut.by).*

*Kapansky A.A, MA, Belarus, Gomel State Technical University. P.O. Sukhoi, [kapanski@mail.ru](mailto:kapanski@mail.ru).*