

УДК 621.316.72

**Кирисов Игорь Геннадьевич**, ассистент кафедры электроэнергетики. Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков, Украина. Ул. Университетская 16, г. Харьков, Украина, 61003, E-mail: kirisovuiipa1980@mail.ru

### СОКРАЩЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*В статье рассматриваются вопросы сокращения технологического расхода электроэнергии в элементах системы электроснабжения промышленных предприятий: трансформаторах и двигателях. Предложены способы снижения технологического расхода электроэнергии в трансформаторах и двигателях с целью экономии электроэнергии.*

**Ключевые слова:** система электроснабжения предприятий, трансформатор, асинхронный электродвигатель, потери электроэнергии, снижение потерь электроэнергии.

**Кірісов Ігор Геннадійович** асистент кафедри електроенергетики. Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків, Україна. вул. Університетська 16, м. Харків, Україна, 61003, E-mail: kirisovuiipa1980@mail.ru

### СКОРОЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕМЕНТАХ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

*У статті розглядаються питання скорочення технологічних витрат електроенергії в елементах системи електропостачання промислових підприємств: трансформаторах та двигунах. Запропоновано способи зниження технологічної витрат електроенергії в трансформаторах і двигунах з метою економії електроенергії.*

**Ключові слова:** система електропостачання підприємств, трансформатор, асинхронний електродвигун, втрати електроенергії, зниження витрат електроенергії.

**Kirisov Igor Gennadievich**, assistant of department of electroenergy. Ukrainian engineer-pedagogical academy, Kharkov, Ukraine. Str. Universitetskaya 16, Kharkov, Ukraine, 61003, E-mail: kirisovuiipa1980@mail.ru

### THE REDUCTION OF THE TECHNOLOGICAL CONSUMPTION TO ELECTRIC POWERS IN SYSTEM ELEMENT OF SUPPLY

*In article are considered questions of the reduction of the technological consumption to electric powers in system element of supply industrial enterprise: transformer and engine. The Offered ways of the reduction of the technological consumption to electric powers in transformer and engine for the reason spare elektroenergii.*

**Keywords:** system of supply enterprise, transformer, anisochronous electric motor, loss to electric powers, reduction of the losses elektroenergii.

#### Введение

На сегодняшний день актуальной задачей современной отечественной электроэнергетики является экономное расходование электроэнергии, при передаче которой от источника к потребителю происходят потери в трансформаторах, ЛЭП, электроприводах технологического оборудования и др.

Основным способом достижения наиболее эффективных результатов в решении этой задачи является разработка и широкое внедрение энергосберегающих технологий в промышленном производстве.

#### Основная часть

Технологический расход электроэнергии (потери электроэнергии) в настоящее время составляет в пределах 13 % суммарного поступления электроэнергии в сеть. Снижение этой величины всего на 1 % дает в масштабах страны экономию миллионов кВт·ч. Получение этой экономии – вполне реальная задача, но для этого в каждом узле энергосистем, от источников до потребителей, необходима реализация уже имеющихся теоретических и практических наработок по снижению технологического расхода электроэнергии (ТРЭ).

#### Расчет технологического расхода мощности и электроэнергии в трансформаторах

Передача мощности в трансформаторах сопровождается потерями в активном и реактивном сопротивлениях обмоток, а также потерями, связанными с гистерезисом, вихревыми токами и намагничиванием стали.

Активная составляющая суммарных потерь мощности в трансформаторе, кВт:

$$\Delta P_T = (P_2^2 + Q_2^2) \cdot R_T / U_{2np}^2 \cdot g_T = \Delta P + \Delta P_x, \quad (1)$$

где  $R_T$  – активное сопротивление трансформатора, Ом;

$P_2$  – активная составляющая суммарной мощности, отдаваемой трансформатором в сеть, кВт;

$Q_2$  – индуктивная составляющая мощности, отдаваемая трансформатором в сеть, квар;

$\Delta P$  – потери активной мощности на нагревание обмоток трансформаторов, кВт;

$g_T$  и  $\epsilon_T$  – проводимости, определяющие активную и реактивную слагающие намагничивающего тока трансформатора ( $I_x$ ), кСм;

$\Delta P_x$  – потери активной мощности в стали трансформатора, кВт;

$U_{2np} = U_2 / K_T$  – приведенная величина вторичного напряжения, кВ;

$K_T$  – коэффициент трансформации.

Реактивная составляющая суммарных потерь мощности в трансформаторах, квар:

$$\Delta Q_T = (P_2^2 + Q_2^2) \cdot X_T / U_{2np}^2 + U_{2np}^2 \cdot \epsilon_T = \Delta Q + \Delta Q_{XX}, \quad (2)$$

где  $X_T$  – сумма индуктивного сопротивления рассеяния первичной обмотки и приведенного к ней индуктивного сопротивления вторичной обмотки, Ом.

$$X_T = X_{1T} + X_{2T} (U_1 / U_2)^2$$

$\Delta Q_{XX}$  – потери реактивной мощности на намагничивание, квар.

При отсутствии значений действительных напряжений на зажимах трансформаторов, в расчетах принимают номинальные напряжения и паспортные данные трансформаторов. При номинальных нагрузках трансформаторов:

$$\Delta P_{к.з.} = 3 I_{ном}^2 \cdot R_m,$$

Откуда

$$R_m = \Delta P_{к.з.} / 3 I_{ном}^2 = \Delta P_{к.з.} \cdot U_{ном}^2 / S_{ном}^2$$

При любой другой нагрузке:

$$\Delta P = 3 I^2 R_T; \text{ тогда } \Delta P / \Delta P_{к.з.} = 3 I^2 / 3 I_{ном}^2 = S^2 / S_{ном}^2.$$

Отсюда:  $\Delta P = \Delta P_{к.з.} (S / S_{ном.})^2$ .

Суммарные потери активной мощности:

$$\Delta P_T = \Delta P_{к.з.} (S / S_{ном.})^2 + \Delta P_{XX}. \quad (3)$$

Реактивное сопротивление  $X_T$  трансформатора с использованием паспортных данных определяют:

$$X_T = U_{к.з.} \cdot U_{ном}^2 / 100 S_{ном}, \quad (4)$$

$$\text{а } \Delta Q_T = U_{к.з.} \cdot S^2 / 100 S_{ном} + \Delta Q_{XX}, \quad (5)$$

или  $\Delta Q_T = U_{к.з.} / 100 (S / S_{ном.})^2 S_{ном} + \Delta Q_{XX}$ ,

а при номинальной нагрузке:

$$\Delta Q_{T.ном.} = U_{к.з.} \cdot S_{ном.} / 100 + \Delta Q_{XX}, \quad (6)$$

а при произвольной нагрузке:

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{T.ном.} (S / S_{ном.})^2 + \Delta Q_{XX}. \quad (7)$$

При параллельной работе трансформаторов их эквивалентное сопротивление уменьшается, а потери в стали и потери на намагничивание (потери х.х.) увеличиваются. При параллельной работе  $n$  одинаковых трансформаторов, нагрузка каждого трансформатора составит  $S/n$ , а потери во всех трансформаторах будут в  $n$  раз больше:

$$\Delta P_{\Sigma T} = n[\Delta P_{к.з}(S/nS_{ном.})^2 + \Delta P_{хх}],$$

$$\text{или } \Delta P_{\Sigma T} = \Delta P_{к.з}(S/S_{ном.})^2/n + n\Delta P_{хх} \quad (8)$$

$$\text{и } \Delta Q_{\Sigma T} = U_{к.з.}(S/S_{ном.})^2 \cdot S_{ном.}/100n + n\Delta Q_{хх}. \quad (9)$$

При изменении нагрузки трансформаторов изменяется напряжение на зажимах трансформаторов. При повышении напряжения (сбросе нагрузки) на  $\Delta U$  потери мощности в сопротивлениях трансформаторов снижается, а в их магнитопроводах – увеличиваются пропорционально квадрату напряжения.

Потери х.х. в трансформаторах зависят от подводимого напряжения, а нагрузочные потери  $\Delta P$  определяются коэффициентом нагрузки  $K_3$  и пропорциональны потерям мощности при к.з.  $\Delta P_{к.з.}$

### Технологический расход мощности и электроэнергии в электрических сетях 0,4–10кВ и электродвигателях

Протяженность распределительных сетей напряжением 0,4–10 кВ составляет примерно 60 % протяженности всех электросетей страны. Устойчивая неравномерность суточного графика электрических нагрузок приводит к ущербу от нестабильности напряжений в узлах нагрузки, от возникающих при этом отклонений напряжения, достигающих в отдельных случаях таких размеров, что исключение их может окупить любые средства, затрачиваемые на регулирование напряжения.

Поэтому реализации мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях 0,4–10 кВ необходимо уделять особое внимание.

Снизить потери в токоведущих частях (ТВЧ) возможно путем изменения топологии сети – переходом на систему глубокого ввода (ГВ) с дроблением ПС 10/0,4 кВ в целях снижения протяженности сетей 0,38 кВ; преимущественным использованием блочных схем (БТМ) и бесшинных ПС магистральных схем питания группы цеховых трансформаторов; перспективным переводом внутризаводских и внутрицеховых сетей на более высокие уровни напряжения.

Наиболее низкого уровня потерь можно достичь за счет внедрения (в процессе реконструкций СЭС ПП) самонесущих изолированных проводов (СНП). Зарубежный опыт (Финляндия) свидетельствует о чрезвычайной эффективности использования СНП (более 80 % низковольтных сетей) – потери в этих сетях составляют примерно 4 % отпущенной электроэнергии.

Общие потери в кабельных линиях напряжением 0,4 кВ при рабочей температуре 65 °С определяют по выражению:

$$\Delta P_{кл} = 3 K_{\phi}^2 \cdot I_{\text{ср}}^2 R_{\text{эк}} (1 + 0,18 \cdot I_{\text{ср}}^2 / I_{\text{дл.мах}}^2), \text{ кВт} \quad (10)$$

где  $K_{\phi}$  – коэффициент формы графика потребления активной энергии, рассчитываемый в зависимости от неравномерности графика:

при  $K_{\text{неравн.}} = 0,8-0,9$ ,  $K_{\phi} = 1,01$ ;

при  $K_{\text{неравн.}} = 0,6-0,7$ ,  $K_{\phi} = 1,03$ ;

$I_{\text{ср.}}$  – среднегодовое значение токовой нагрузки;

$I_{\text{мах.}}$  – максимальная токовая нагрузка годового графика по продолжительности;

$R_{\Sigma}$  – эквивалентное сопротивление всех отходящих линий от шин ТП, определяемое по выражению:

$$R_2 = \frac{1}{\sum_1^n Y_{10}}$$

где  $\sum Y_{1(i)}$  – сумма проводимостей всех отходящих линий от ТП.

Потери в электрических сетях внутриводского электроснабжения могут быть рассчитаны по формуле:

$$\Delta P_{л.} = 1,1 \cdot n \cdot \rho \cdot I_{cp}^2 \cdot L / q \cdot 10^{-3}, \text{кВт} \quad (11)$$

где 1,1 – коэффициент, учитывающий сопротивление переходных контактов;

n – число фаз линии;

$\rho$  – удельное сопротивление материала провода Ом·мм<sup>2</sup>/м;

$I_{cp}$  – среднее значение тока нагрузки, А;

L – длина линии, м;

$q_l$  – сечение провода, мм<sup>2</sup>

Анализ формулы (11) дает возможность убедиться в эффективности мероприятий по внедрению принципа глубоко ввода и дробления ПС, повышению напряжения во внутриводской сети, а также увеличению сечений ТВЧ (мировая практика по снижению плотности нагрузки в ТВЧ).

Перевод внутриводской сети на повышенные напряжения обеспечивает экономию электроэнергии, рассчитываемую по выражению:

$$\Delta W_{эк} = 0,003 \cdot \rho \cdot L \cdot t \cdot (l_1^2 / q_1 - l_2^2 / q_2), \quad (12)$$

где t – расчетный период времени, ч.

Наибольшие затруднения при расчете потерь возникают при оценке потерь в электродвигателях из-за многообразия их установленных мощностей, технологического предназначения, отсутствия режимной информации в процессе их эксплуатации.

Потери мощности в асинхронных (АД) и синхронных двигателях (СД) напряжением 6-10 кВ определяют по выражению:

$$\Delta P_{об} = P_{ном.} \cdot [K_1(K_{з.дв.}^2 - 1) + 1] \cdot (1 - \eta_n) / \eta_n, \text{ кВт} \quad (13)$$

где  $P_{ном.}, \eta_n$  – соответственно номинальные значения мощности и КПД двигателя, применяемые по каталожным данным;

$K_{з(дв)}$  – среднегодовой коэффициент загрузки двигателя по активной мощности,

$$K_{з.дв.} = P_{сг} / P_{ном.}$$

$K_1$  – коэффициент разделения потерь двигателя (разделение переменных и постоянных потерь в электродвигателях, учитывающих долю переменных потерь, пользуясь графиком зависимости [2],  $K_1 = f(P_H)$ , рис.1.

Аналогично рассчитывают потери активной мощности в электродвигателях напряжением до 1 кВ. Однако отсутствие метрологического обеспечения, не позволяющего оценить среднегодовой коэффициент загрузки каждого двигателя, допускает принимать в практических расчетах в качестве коэффициента загрузки всех низковольтных двигателей, питающихся от одного трансформатора, коэффициент загрузки этого трансформатора. Тогда потери активной мощности в i-ом двигателе определяют по выражению:

$$\Delta P_{об} = P_{н(i)} \cdot [K_{1(i)}(K_{з.тр.}^2 - 1) + 1] \cdot (1 - \eta_n) / \eta_n \text{ кВт}, \quad (14)$$

где  $K_{1(i)}$  – коэффициент разделения потерь, определяемый в зависимости от номинальной мощности двигателя по графикам 2-2<sup>1</sup>, рис.1

$$K_{з.(TP)} = S_{сг(TP)} / S_{ном.(TP)}.$$

Так как нагрузка в сети до 1кВ формируется некоторым ( $m$ ) числом двигателей различной установленной мощности и с различными КПД, то при расчетах потерь активной мощности в низковольтных двигателях вводится понятие эквивалентной средней номинальной мощности электродвигателей, питающихся от одного трансформатора. Мощность эквивалентного двигателя:

$$P_{н(э)} = \sum_1^m P_{н(i)} / n_{эф}$$

где  $\sum P_{н(i)}$  – сумма номинальных мощностей электродвигателей, питающихся от одного трансформатора, кВт;

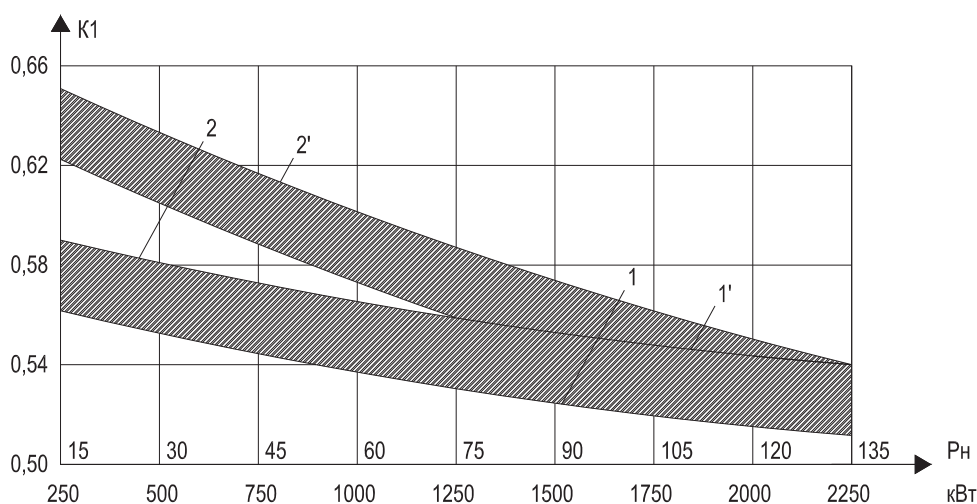


Рис. 1 Зона замещения переменной составляющей потерь для асинхронных и синхронных двигателей

$n_{эф}$  – приведенное (эффективное) число электродвигателей, определяемое по выражению:

$$n_{эф} = \left( \sum_1^m P_{н(i)} \right)^2 / \sum_1^m P_{н(i)}^2, \text{ шт}$$

по номинальной мощности эквивалентного двигателя определяют его КПД (в каталоге). Тогда потери активной мощности всех  $m$  двигателей, подключенных к одному трансформатору, определяют по выражению:

$$\Delta P_{\text{ов(ТР)}} = (1 - \eta_n) / \eta_n [K_{1i} (K_{з(Т)}^2 - 1) + 1] \cdot P_{н(э)} \cdot n_{эф}, \text{ кВт}, \quad (15)$$

где  $K_1$  – коэффициент разделения потерь, определяемый по графику (рис. 1) для эквивалентного двигателя.

Снижение потерь активной мощности в электродвигателях обеспечивается: оптимальной загрузкой двигателей ( $K_з = 0,7-0,8$ ); ограничением работы двигателей на х.х. (при продолжительности паузы в работе двигателя  $t_n \geq 10с$  предусматривают автоматическое отключение двигателя на х. х.); снижением напряжения на зажимах двигателя (переключением обмоток статора с  $\Delta$  в  $Y$  – для двигателей 660/380 В, работающих с недогрузом в сетях 0,38); заменой малозагруженных двигателей на двигатели меньшей мощности (при загрузке двигателей меньше 40 % его номинальной мощности). Если загрузка двигателя составляет 45%-65 % его номинальной мощности, то замену двигателя на меньшую мощность необходимо обосновать снижением суммарных потерь активной мощности в заменяемом двигателе по приведенной ниже методике: рассматривают два варианта определения суммарных потерь активной мощности в двигателе при реальной его загрузке (первый вариант) и второй вариант – определении суммарных активных потерь

мощности при замене двигателя меньшей мощности. Сравнение величин этих потерь даст возможность определить целесообразность такой замены.

Суммарные потери активной мощности в двигателе:

$$\Delta P = [Q_{xx}(1-K_3^2) + K_3^2 Q_n] K_3 + \Delta P_{xx} + K_3^2 \Delta P_{a.n.}, \text{ кВт}, \quad (16)$$

где  $Q_{xx} = \sqrt{3} \cdot I_{xx} \cdot U_n$ ;  $Q_n = P_n \cdot \text{tg} \varphi / \eta_n$ ;  $K_3 = P_{\text{факт}} / P_n$ .

Исходные данные:

$P_n$ ;  $U_n$ ;  $\eta_n$ ;  $\cos \varphi_{\text{дв}}$ ;  $I_{xx}$ ;  $\Delta P_{xx}$ ;  $P_{\text{факт}}$

Прирост потерь активной мощности в электродвигателе при исходной номинальной мощности:

$$\Delta P_a = P_n [(1-\eta_n) / \eta_n] \cdot [1 / (1+j)] \text{ кВт}, \quad (17)$$

где  $j = \Delta P_{xx} / [(100-\eta_n) - \Delta P_{xx}]$ ;

потери активной мощности на х.х. двигателя:

$$\Delta P_{xx} = P_n [(1-\eta_n) / \eta_n] \cdot [j / (1+j)] \text{ кВт},$$

где  $\Delta P_{xx}$  - исходные данные.

Таким образом, рассчитывают потери активной мощности по исходным данным для двигателей двух сравниваемых мощностей и убеждаются в целесообразности предлагаемых замен.

### Выводы

Снижение потерь электроэнергии во внутризаводских сетях достигается мероприятиями, компенсирующими нарушение технологии распределения и потребления электроэнергии, которые вызывают сверхнормативные потери.

### Список использованной литературы:

1. Поспелов Г. Е. Потери мощности и энергии в электрических сетях Г. Е. Поспелов, Н. М. Сыч; под ред Г. И. Поспелова. – М.: Энергоиздат. – 1981. – С.20–29.
2. Синьков В. М. Снижение технологического расхода электроэнергии в трансформаторных подстанциях В. М. Синьков, И. П. Притока, А. А. Омельчук и др. – К.: Техника. 1987. – С.14–15.
3. Жежеленко И. В. Технические и организационные вопросы повышения качества электроэнергии в промышленных сетях / И. В. Жежеленко, А. М. Липский, Г. Л. Багиев // Промышленная энергетика, № 9, 1983. – С. 12–15.
4. Кочкин В. Статические компенсирующие устройства / В. Кочкин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, № 1, 2012. – С. 26–27.
5. Журавлев Д. В. Экономическая эффективность трансформаторно-реакторного устройства при повышении качества электрической энергии / Д. В. Журавлев // Энергетика та електрифікація, № 8. – 2013. – С. 20–21.

### References

1. Pospelov G. E. Power and energy losses in electric networks [Poteri moshchnosti i energii v elektricheskikh setyakh] G. E. Pospelov, N. M. Sych; ed G. I. Pospelova. – M.: Energoizdat. 1981. – P. 20–29.
2. Sinkov V. M. Snizhenie technological power consumption in the transformer substations [Snizheniye tekhnologicheskogo raskhoda elektroenergii v transformatornykh podstantsiyakh] V. M. Sinkov, I. P. Inflow, A. A. Omelchuk. – K. et al: Tehnika. 1987. – P. 14–15.
3. Zhezhenko I. V. Technical and organizational issues to improve the quality of electricity in industrial networks [Tekhnicheskkiye i organizatsionnyye voprosy povysheniya kachestva elektroenergii v promyshlennykh setyakh] / I. V. Zhezhenko, A. M. Lipsky, G. L. Bagiev // Industrial Energy, № 9, 1983. – P. 12–15.
4. Kochkin V. Static compensating devices [Staticheskkiye kompensiruyushchiye ustroystva] / V. Kochkin // East European Journal of advanced technologies, № 1, 2012. – P. 26–27.
5. D. V. Zhuravlev. Economic efficiency transformer and reactor unit at improving the quality of electrical energy [Ekonomicheskaya effektivnost' transformatorno-reaktornogo ustroystva pri povyshenii kachestva elektricheskoy energii]. / D. V. Zhuravlev // Energetics that elektrifikatsiya, № 8, 2013. – P. 20–21.

Поступила в редакцию 22.04 2015 г.