

Глава 8. Энергоаудит систем электроснабжения

8.1. Потери электроэнергии в электрических сетях

Потери электроэнергии в сетях (включая трансформаторы) составляют в среднем 4-7% от общего объема потребления электроэнергии предприятием и зависят от многих факторов, в частности:

- величины электрической нагрузки предприятия;
- конфигурации и разграничения общезаводских и внутрицеховых сетей, их сечения и длины;
- режима работы трансформаторов;
- значения средневзвешенного коэффициента мощности предприятия;
- места установки компенсационных устройств.

8.1.1. Потери электроэнергии в линиях электропередач

Потери электроэнергии в электрических сетях предприятий (ΔE_c) складываются из потерь электроэнергии в цеховых ($\Delta E_{ц}$) и общезаводских ($\Delta E_з$) сетях, трансформаторных подстанций ($\Delta E_т$):

$$\Delta E_c = \Delta E_{ц} + \Delta E_з + \Delta E_т; \quad (8.1)$$

Для определения потерь можно применять следующее выражение:

$$\Delta E_c = 3 \times I_{\max}^2 \times R \times \tau_n \times 10^{-3}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (8.2)$$

где I_{\max} - максимальный ток нагрузки, А; R- активное сопротивление линии или кабеля, Ом; τ_n - время работы линии в год, час.

Можно воспользоваться выражением

$$\Delta E_c = \frac{P_{cp}^2 \times R}{U^2 \times \cos^2 \varphi} \times K^2 \times \tau \times 10^{-3}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (8.3)$$

где $P_{cp} = \frac{W_a}{t}$ - средняя фактическая активная мощность линии за отрезок времени t, кВт.; $R = \rho \frac{L}{q_l}$ - активное сопротивление линии или кабеля,

Ом.; ρ - удельное сопротивление, $\frac{\text{Ом} \times \text{мм}^2}{\text{м}}$; L- длина линии, м.; q_l - сечение линии; U^2 - напряжение в начале линии, кВ.; $\cos \varphi$ - средневзвешенный коэффициент мощности за время τ , которое соответствует средней нагрузке; $K=1,05 \div 1,1$ - коэффициент запаса; τ - время работы линии под напряжением за промежуток времени, час.

Один из возможных вариантов экономии электроэнергии – перевод сети на более высокое напряжение. Экономия электроэнергии в этом случае определится выражением:

$$\Delta \mathcal{E} = 0,003 \times \rho \times L \times t \times \left(\frac{I_1^2}{q_1} - \frac{I_2^2}{q_2} \right), \text{кВт}\cdot\text{ч}, \quad (8.4)$$

где I_1 и I_2 - среднее значение тока при низшем и высшем напряжении, А; q_1 и q_2 – удельное сопротивление материала провода при температуре 20°C (для алюминия - 0,026÷0,029, для меди 0,0175÷0,018, для стали - 0,01÷0,14), (Ом×мм²)/м.

При замене проводов на другое сечение (реконструкция без замены материала) экономию электроэнергии можно рассчитать как

$$\Delta \mathcal{E} = 0,003 \times I^2 \times \left(\frac{\rho_1 L_1}{q_1} - \frac{\rho_2 L_2}{q_2} \right) \times t, \text{кВт}\cdot\text{ч} \quad (8.5)$$

Включение под нагрузку резервных линий снижает потери в два раза при одинаковых параметрах основной и резервной линии.

Потери электроэнергии в сетях за счет низкого коэффициента мощности от $\cos \varphi_1$ до $\cos \varphi_2$ определяются выражением:

$$\Delta E = K_e \times A \times \left[1 - \left(\frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \right)^2 \right], \quad (8.6)$$

где A – потребление активной энергии за расчетный период кВт·ч год; K_e - экономический эквивалент реактивной мощности , определяющий сколько киловатт необходимо для выработки и распределения 1 кВар. Его ориентировочно принимают: при питании через три трансформатора – 0,12; при питании через два трансформатора – 0,08; при питании через один трансформатор – 0,05; при питании генераторной нагрузкой – 0,02; $\text{tg}\varphi = Q/P$.

8.2. Потери электроэнергии в силовых трансформаторах

Работа силовых трансформаторов характеризуется наличием потерь, которые увеличиваются в периоды нерабочего времени, в основном, из-за роста потерь холостого хода (активные потери мощности трансформатора в стали, кВт), а также снижении нагрузки относительно номинальной, за счет увеличения потребления реактивной энергии (активные потери в меди обмотки трансформатора).

Для расчета потерь электроэнергии в трансформаторах необходимо получить следующие исходные данные:

- номинальную мощность трансформатора, S_n , кВт;
- потери холостого хода (х.х.) при номинальном напряжении, $\Delta P_{\text{хх}}$,

кВт;

- потери короткого замыкания (кз) при номинальной нагрузке $\Delta P_{к.з.}$, кВт;
- количество электроэнергии (\mathcal{E}_a , кВт•ч; \mathcal{E}_p , кВар•ч), учтенной за расчетный период по счетчикам, которые устанавливаются на стороне высокого напряжения понижающего трансформатора;
- полное число часов работы трансформатора τ_n , которое принимается за: апрель, июнь, сентябрь, ноябрь – 720 часов в месяц; февраль – 672 часов в месяц (696 часов в високосный год), в остальные месяцы – 744 часов в месяц;
- число часов работы трансформатора на номинальной нагрузке $\tau_{раб}$, которое принимается: при односменном режиме работы – 200 часов, при двухсменном – 450 часов, при трехсменном – 700 часов в месяц.

На основании этих данных определяются: средневзвешенный коэффициент мощности, $\cos \varphi$ из соотношения $\text{tg} \varphi = \mathcal{E}_p / \mathcal{E}_a$.

В тех случаях, когда отсутствуют счетчики реактивной энергии, взамен $\cos \varphi$ принимают фактический коэффициент степени компенсации реактивной мощности, используемый для расчетов за компенсацию реактивной мощности: $\text{tg} \varphi = Q_M / P_M$, который переводится в $\cos \varphi_n \approx \cos \varphi_{cp}$

Коэффициент нагрузки трансформатора:

$$K_n = \frac{\mathcal{E}_a}{S_n \times \tau_n \times \cos \varphi_{cp}}; \quad (8.7)$$

Потери электроэнергии в трансформаторах

$$\Delta E = \Delta P_{XX} \times \tau_n + \Delta P_{к.з.} \times K_n^2 \times \tau_{раб}. \quad (8.8)$$

Данный расчет относится к двухобмоточным трансформаторам.

В трехобмоточных трансформаторах дополнительно необходимо изучить следующие паспортные данные:

- номинальную мощность обмоток высшего, среднего и низшего напряжений: $S_{сн} = S_n \cdot S_{сн} \cdot S_{нн}$ (даются в процентах от номинальной мощности), кВА;
- потери короткого замыкания обмоток высокого, среднего, и низкого напряжений при полной нагрузке обмоток: $\Delta P_{вн}$; $\Delta P_{сн}$; $\Delta P_{нн}$, кВт.

Фактическое количество электроэнергии, прошедшей через обмотки будет равно

$$\mathcal{E}_{вн} = \mathcal{E}_{сн} + \mathcal{E}_{нн}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Коэффициент нагрузки каждой из обмоток трансформатора определяется из выражений:

$$K_{BH} = \frac{\mathcal{E}_{a,BH}}{S_{BH} \times \tau_n \times \cos \varphi_{cp,BH}}, K_{CH} = \frac{\mathcal{E}_{a,CH}}{S_{CH} \times \tau_n \times \cos \varphi_{cp,CH}}, K_{HH} = \frac{\mathcal{E}_{a,HH}}{S_{HH} \times \tau_n \times \cos \varphi_{cp,HH}},$$

а потери электроэнергии – из выражения:

$$\Delta E = \Delta P_{XX} \times \tau_n \times (\Delta P_{BH}^{K.3} \times K_{BH}^2 + \Delta P_{CH}^{K.3} \times K_{CH}^2 + \Delta P_{HH}^{K.3} \times K_{HH}^2) \times \tau_{раб} \quad (8.9)$$

8.2.1. Экономичный режим работы трансформатора

Экономичный режим работы трансформаторов включает в себя оценку числа одновременно работающих трансформаторов, обеспечивающих минимум потерь электроэнергии в них.

В случае если подстанции оборудованы однотипными трансформаторами одинаковой мощности, число одновременно включенных трансформаторов определяется следующими условиями:

- при росте нагрузки подключение (n+1)-го трансформатора экономически целесообразно, когда коэффициент нагрузки работающих трансформаторов достигает значения

$$K_n \geq \sqrt{\frac{n+1}{n}} \times \sqrt{\frac{\Delta P_{XX} + K_{\mathcal{E}} \times \Delta Q_{XX}}{\Delta P_{K.3.} + K_{\mathcal{E}} \times \Delta P_{K.3.}}}; \quad (8.10)$$

- при снижении нагрузки экономически целесообразно отключать один из трансформаторов, когда коэффициент нагрузки достигает значения

$$K_n \leq \sqrt{\frac{n-1}{n}} \times \sqrt{\frac{\Delta P_{XX} + K_{\mathcal{E}} \times \Delta Q_{XX}}{\Delta P_{K.3.} + K_{\mathcal{E}} \times \Delta P_{K.3.}}}, \quad (8.11)$$

где n - число одновременно включенных трансформаторов; ΔP_{XX} – потери холостого хода трансформатора по паспорту, кВт; $\Delta P_{K.3.}$ – потери короткого замыкания трансформатора по паспорту, кВт; $\Delta Q_{X.X.} = S_n \times I_{X.X.}/100$ – реактивные потери холостого хода трансформатора, кВар; $\Delta Q_{K.3.} = S_n \times U_{K.3.}/100$ – реактивные потери короткого замыкания трансформатора, кВар; S_n - номинальная мощность трансформатора, кВА; $I_{X.X.}$ - ток холостого хода трансформатора (по паспорту), %; $U_{K.3.}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора (по паспорту), %; $K_{\mathcal{E}}$ – коэффициент потерь, кВт/кВар

Таблица 8.1 – Коэффициент изменения потерь в трансформаторах [1]

Характеристика трансформатора и системы электроснабжения	Коэффициент изменения потерь K_3 , кВт/кВар	
	K_3 в часы максимума энергосистемы	K_3 в часы минимума энергосистемы
Трансформаторы, питающиеся непосредственно от шин электростанций	0,02	0,02
Сетевые трансформаторы, питающиеся от электростанций на генераторном напряжении	0,07	0,04
Понижающие трансформаторы 110/35/10 кВ, питающиеся от районных сетей	0,1	0,06
Понижающие трансформаторы 10 – 6/0,4кВ, питающиеся от районных сетей 0,15	0,15	0,1

При наличии на подстанции двух и более трансформаторов различной мощности целесообразно строить кривые зависимости потерь от нагрузки. Приведенные потери мощности для построения этих кривых определяются выражением

$$\sum \Delta P = n (\Delta P_{x.x.} + K_3 \Delta Q_{x.x.}) + (\Delta P_{к.з.} + K_3 \Delta Q_{к.з.}) K_3^2 / n \quad (8.12)$$

По построенным кривым в зависимости от нагрузки подстанции определяется режим работы трансформаторов, а также необходимость подключения дополнительного или отключение одного из имеющихся.

8.3. Потери в электродвигателях

Потери в электродвигателях включают:

- потери в стали, которые зависят от напряжения и являются постоянными для любого конкретного электродвигателя независимо от его загрузки;
- потери в меди, пропорциональные сопротивлению и квадрату тока нагрузки;
- потери на трение и охлаждение, не зависящие от нагрузки;
- добавочные потери, зависящие от нагрузки.

Величина нагрузки на рабочую машину влияет на ее КПД, а так же на все элементы привода.

На рис.8.1 представлен график изменения КПД рабочей машины, электродвигателя и суммарного КПД системы [1].

Как видно из графика снижение коэффициента нагрузки на рабочей машине приводит к снижению ее К.П.Д. и является причиной перерасхода электроэнергии.

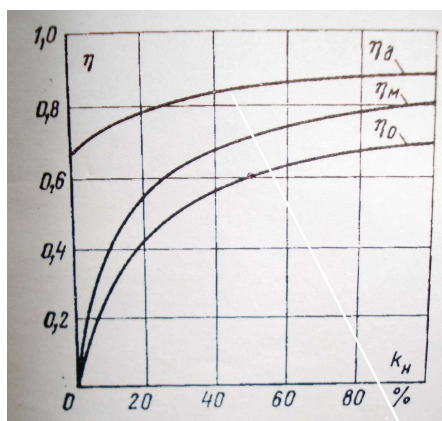


Рис.8.1 – Зависимость к.п.д. рабочей машины η_m , электродвигателя η_d и всего агрегата η_0 от коэффициента нагрузки k_n

8.3.1. Замена незагруженных электродвигателей

Если при анализе эффективности использования средняя нагрузка электродвигателей составляет менее 45% от номинальной мощности, то они подлежат замене на электродвигатели меньшей мощности. В интервале между 45% и 70% необходимо произвести расчет, подтверждающий целесообразность замены электродвигателя. При нагрузке на электродвигатель 70% и более производить замену такого электродвигателя нецелесообразно.

Суммарные потери активной мощности могут быть определены, согласно выражения:

$$\Delta P_{\text{сум}} = [Q_{\text{х.х.}} (1 - k_n^2) + k_n^2 Q_n] k_3 + \Delta P_{\text{х.х.}} + k_n^2 \Delta P_{\text{а.н.}}, \text{ кВт} \quad (8.13)$$

где $Q_{\text{х.х.}} = \sqrt{3} U_n I_{\text{хх}}$ – реактивная мощность, потребляемая из сети при холостом ходе, кВар; U_n – номинальное напряжение, В; $I_{\text{х.х.}}$ – ток холостого хода электродвигателя, А; $k_n = P/P_n$ – коэффициент нагрузки электродвигателя; P и P_n – средняя нагрузка и номинальная мощность электродвигателя, кВт; $Q_n = P_n \text{tg}\varphi_n / \eta_d$ – реактивная мощность электродвигателя при номинальной нагрузке, кВар, η_d – к.п.д. двигателя при полной нагрузке; $\text{tg}\varphi_n$ – производная от номинального коэффициента мощности электродвигателя; k_3 – коэффициент повышения потерь (можно принимать по таблице (8.1)); $\Delta P_{\text{х.х.}}$ – потери активной мощности при холостом ходе электродвигателя, кВт; $\Delta P_{\text{а.н.}}$ – прирост потерь активной мощности в электродвигателе при нагрузке 100%, кВт и (или) аналогично при нагрузке действительной определяется выражением:

$$\Delta P_{\text{а.н.}} = P_n \left(\frac{1 - \eta_d}{\eta_d} \right) \left(\frac{1}{1 + \gamma} \right), \quad (8.14)$$

где
$$\gamma = \frac{\Delta P_{x.x}}{(1 - \eta_d) - \Delta P_{x.x}} \quad (8.15)$$

Значение η подставляется в выражение (8.15) для условий 100% нагрузки и фактической, соответственно.

При принятии решения о замене (установке электродвигателя меньшей мощности) необходимо тщательно анализировать ситуации, связанные с возможным увеличением нагрузки в дальнейшем.

8.3.2. Ограничение холостого хода рабочих машин

Холостой ход оборудования с приводом от электродвигателя является также источником потерь электроэнергии. С целью снижения потерь при условии, что холостой ход составляет 10с и более, установка автоматических регуляторов холостого хода всегда приводит к экономии электроэнергии.

На рис 8.2 представлена диаграмма, с помощью которой можно оценить размер экономии электроэнергии, т.е. определить экономическую целесообразность данного мероприятия [1].

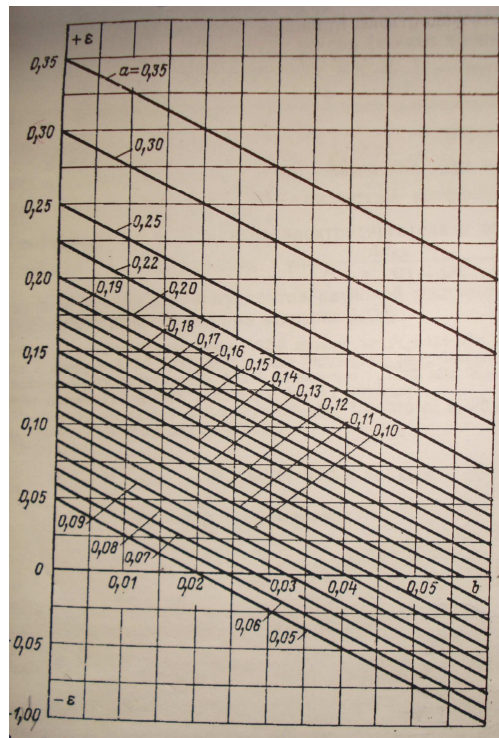


Рис.8.2 – Диаграмма определения эффективности применения ограничителя холостого хода

Пример.

Электродвигатель мощностью 125 кВт работает с нагрузкой 70 кВт; его характеристика: $P_n = 125$ кВт, $U_n = 380$ В, $\eta_n = 0,92$, $\cos\varphi_n = 0,92$, $I_{xx} = 71$ А, $\Delta P_{x,x} = 4,4$ кВт.

Проверить целесообразность замены данного электродвигателя на двигатель меньшей мощности $P_n = 75$ кВт.

Принимаем коэффициент повышения потерь $k_3 = 0,1$ (по табл.8.1); его характеристики: $P_n = 75$ кВт, $U_n = 380$ В, $\eta_n = 0,91$, $\cos\varphi_n = 0,92$, $I_{xx} = 42,6$ А, $\Delta P_{x,x} = 3,2$ кВт.

Определим потери в базовом варианте:

$$Q_{x,x} = \sqrt{3} \times 380 \times 71 \times 10^{-3} = 46,6 \text{ кВар};$$

$$Q_n = (125 \times 0,426) : 0,92 = 58 \text{ кВар};$$

$$K_n = 70/125 = 0,7$$

$$\gamma = 4,4 / (100 - 92) - 4,4 = 1,22;$$

$$\Delta P_{a,n} = 125 \times (1 - 0,92) / 0,92 (1 + 1,22) = 4,9 \text{ кВт};$$

$$\Delta P'_{\text{сум}} = [46,6 (1 - 0,7^2) + 0,7^2 \times 58] \times 0,1 + 4,4 + 0,7^2 \times 4,9 = 11,99 \text{ кВт};$$

Для предполагаемого на замену электродвигателя:

$$Q_{x,x} = \sqrt{3} \times 380 \times 42,6 = 27,9 \text{ кВар};$$

$$Q_n = (125 \times 0,426) : 0,91 = 35 \text{ кВар};$$

$$K_n = 70/75 = 0,93;$$

$$\gamma = 3,2 / (100 - 91) - 3,2 = 0,57;$$

$$\Delta P_{a,n} = 75 \times (1 - 0,91) / 0,91 (1 + 0,57) = 4,36 \text{ кВт};$$

$$\Delta P''_{\text{сум}} = [27,9 (1 - 0,93^2) + 0,93^2 \times 35] \times 0,1 + 3,2 + 0,93^2 \times 4,36 = 10,4 \text{ кВт};$$

$$\Delta P = \Delta P'_{\text{сум}} - \Delta P''_{\text{сум}} = 11,99 - 10,4 = 1,59 \text{ кВт}.$$

В результате замены электродвигателя получим снижение потерь активной мощности в электродвигателе и сетях 1,59 кВт

Контрольные вопросы к главе 8

1. От чего зависят потери энергии в системах электроснабжения?
2. Как определить потери электроэнергии в электрических сетях?
3. Как осуществляется расчет потерь электроэнергии и выбор экономичного режима работы силового трансформатора?
4. Изложите определение потерь в электродвигателях и выбор их мощности в зависимости от их нагрузки.

Список литературы к главе 8

1. В.Копытов, Б.А.Цуланов, Экономия электроэнергии в промышленности. Справочник., М. Энергия, 1982, 115с.
2. Методи визначення неефективного використання паливно-енергетичних ресурсів.— Київ. Держкоменергозбереження: — 2001р.