



К вопросу об эффективности компенсации реактивной мощности

Олег КУХТА, ООО «ТРИОС ГРУП»

Евгения СИМОНОВА, Национальный горный университет

В данной статье представлено определение зависимости между уровнем компенсации реактивной мощности и стоимостью электроэнергии. Также оценено влияние на эффективность компенсации таких факторов, как величина экономического эквивалента реактивной мощности, вид компенсирующего устройства и профиль нагрузки предприятия

Промышленные предприятия оплачивают 2 составляющие электроэнергии — активную и реактивную. В отличие от активной составляющей реактивная энергия может быть получена непосредственно в местах ее потребления. Поэтому для минимизации общих потерь экономически целесообразно большую часть необходимой реактивной составляющей вырабатывать на шинах (присоединениях) соответствующих энергопотребляющих установок. Практика такого производства реактивной энергии широко распространена во всем мире и известна как компенсация реактивной мощности [1].

При определении эффективности компенсации реактивной мощности в

расчет обычно принимается только величина снижения затрат на оплату реактивной энергии. А на том факте, что для выработки реактивной энергии необходима активная энергия, обычно внимание не акцентируют.

Величина затрат активной энергии на выработку реактивной зависит от типа компенсирующего устройства. Так, **удельные затраты активной энергии на выработку реактивной составляют:**

- для синхронных электродвигателей $K_{\text{комп}} = 0,011 \div 0,049$ кВт/кВАр;
- для батарей статических конденсаторов $K_{\text{комп}} = 0,003 \div 0,004$ кВт/кВАр [2].

Для предприятий, рассчитывающихся за потребленную электроэнергию по тарифам, дифференцирован-

ным по зонам суток, стоимость активной энергии неодинакова для разного времени суток. Например, если на выработку реактивной энергии в ночной зоне (тарифный коэффициент — 0,3) необходимо затратить активной энергии на сумму 500 грн. (тарифный коэффициент — 0,3), то стоимость такого же количества активной энергии в пиковой зоне (тарифный коэффициент — 1,8) составит $500 \cdot 1,8 / 0,3 = 3000$ грн. В связи с этим эффективность компенсации для данных предприятий в разные зоны суток так же отличается. Для предприятий, работающих по одноставочному тарифу, эффективность компенсации близка к эффективности компенсации в полупиковой та-

рифной зоне суток, имеющей тарифный коэффициент 1,02.

Таким образом, величина суммарной стоимости электроэнергии (активной и реактивной составляющих) находится в прямой зависимости от уровня компенсации реактивной мощности. Определим зависимость между этими величинами. Для этого **произведем расчет исходя из условий, удовлетворяющих требованиям нормативных документов [3], [4], [5], [6] и минимизирующих потери от перетока реактивной энергии, такими как:**

- приборы учета активной и реактивной энергии расположены на границе балансовой принадлежности;
- компенсирующие устройства и потребители реактивной энергии расположены на одних шинах;
- дополнительные потери, вызванные перетоком электроэнергии, отсутствуют;
- генерация реактивной мощности отсутствует.

В соответствии с Методикой расчета платы за перетекание реактивной электроэнергии [3], **плата за потребление и генерацию реактивной электроэнергии определяется 3-мя составляющими величинами, а именно:**

- основная плата за потребление и генерацию реактивной электроэнергии;
- надбавка за недостаточное оснащение электрической сети потребителя средствами компенсации реактивной мощности (КРМ);
- скидка (фактически не применяется).

Основная плата за потребленную и генерированную реактивную электроэнергию в каждой точке учета определяется как:

$$\Pi_1 = \left(\sum_{i=1}^n WQ_{\text{ПОТР},i} + K \cdot WQ_{\text{ГЕН}} \right) \cdot D \cdot T \text{ (грн.)}, \quad (1)$$

где i — номер зоны суточного графика ($i = \text{п}$ — пик; п/п — полупик; н — ночь);

$WQ_{\text{ПОТР},i}$ — потребление реактивной электроэнергии в точке учета в i -й зоне расчетного периода, кВАрч;

$WQ_{\text{ГЕН}}$ — генерация реактивной энергии в точке учета в ночных провалах суточных графиков расчетного периода, кВАрч;

$K = 3$ — нормативный коэффициент учета убытков энергосистемы от гене-

рации реактивной электроэнергии от сети потребителя [3];

T — фактическая средняя закупочная цена на электроэнергию, сложившаяся на расчетный период;

D — экономический эквивалент реактивной мощности (кВт/кВАр), означающий, сколько кВт активной энергии равны по цене 1 кВАр реактивной энергии.

С учетом допущения $Q_{\text{ГЕН}} = 0$ выражение (1) примет вид:

$$\Pi_1 = \sum_{i=1}^n WQ_{\text{ПОТР},i} \cdot D \cdot T. \quad (2)$$

Выполним расчет для произвольной зоны суток:

$$\Pi_1 = WQ_{\text{ПОТР},i} \cdot D \cdot T. \quad (3)$$

Надбавка за недостаточное оснащение электрической сети потребителя средствами компенсации реактивной мощности определяется формулой:

$$\Pi_2 = \Pi_1 \cdot C_{\text{баз}} \cdot (K_j - 1) \text{ (грн.)}, \quad (4)$$

где Π_1 — основная плата;
 $C_{\text{баз}} = 1$ — нормативное базовое значение коэффициента стимулирования капитальных вложений в средства КРМ в электрических сетях потребителя [3];

K_j — коэффициент, определяемый Методикой в зависимости от фактического коэффициента мощности потребителя tgj в среднем за расчетный период.

При этом зона нечувствительности надбавки Π_2 к потреблению реактивной энергии лимитирована значением граничного коэффициента мощности — $\cos j_{\text{ГР}} = 0,97$ ($\text{tgj}_{\text{ГР}} = 0,25$).

Суммарная плата за потребление реактивной электроэнергии составит:

$$\Pi_p = \Pi_1 + \Pi_2. \quad (5)$$

Суммарная плата за потребление активной энергии определяется по формуле:

$$\Pi_a = \sum_{i=1}^n WP_{\text{ПОТР},i} \cdot T_{a,i} \text{ (грн.)}, \quad (6)$$

где $WP_{\text{ПОТР},i}$ — потребление активной электроэнергии в точке учета в i -й зоне расчетного периода;

$T_{a,i}$ — тариф за потребление активной энергии, зависящий от среднего тарифа T и текущей зоны суток.

Для произвольной зоны суток:

$$\Pi_a = WP_{\text{ПОТР},i} \cdot T_{a,i}. \quad (7)$$

На сегодняшний день в Украине приняты следующие соотношения между стоимостью активной электроэнергии в разное время суток:

$$\begin{aligned} \text{пик: } T_{a,\text{п}} &= 1,8 \cdot T; \\ \text{полупик: } T_{a,\text{п/п}} &= 1,02 \cdot T; \\ \text{ночь: } T_{a,\text{н}} &= 0,3 \cdot T. \end{aligned}$$

Фактический коэффициент мощности потребителя в среднем за расчетный период определяется формулой:

$$\text{tgj} = \frac{WQ_{\text{ПОТР},\text{п}} + WQ_{\text{ПОТР},\text{п/п}} + WQ_{\text{ПОТР},\text{н}}}{WP_{\text{ПОТР},\text{п}} + WP_{\text{ПОТР},\text{п/п}} + WP_{\text{ПОТР},\text{н}}}. \quad (8)$$

В случае получения значения $\text{tgj} > 2$ для выбора K_j берется $\text{tgj} = 2$.

Суммарная плата за электроэнергию до компенсации равна сумме плат за активную и реактивную электроэнергию в базовом периоде:

$$\begin{aligned} \Pi &= \Pi_a + \Pi_p. \\ \Pi_p &= \Pi_1 + \Pi_2 = \Pi_1 + \Pi_1 \cdot C_{\text{баз}} \cdot (K_j - 1) = \\ &= \Pi_1 \cdot (1 + C_{\text{баз}} \cdot (K_j - 1)) \end{aligned}$$

Так как $C_{\text{баз}} = 1$, то

$$\Pi_p = \Pi_1 \cdot (1 + K_j - 1) = \Pi_1 \cdot K_j = WQ_{\text{ПОТР},i} \cdot D \cdot T \cdot K_j.$$

Тогда

$$\Pi = WP_{\text{ПОТР},i} \cdot T_{a,i} + WQ_{\text{ПОТР},i} \cdot D \cdot K_j \cdot T. \quad (9)$$

Систему определения коэффициента K_j по tgj Методики расчета платы за перетекание реактивной электроэнергии можно представить в виде:

$$K_j = \begin{cases} \text{при } \text{tgj} \leq 0,25 & 1,0, \\ \text{при } 0,25 < \text{tgj} < 2,0 & (\text{tgj} - 0,25)^2 + 1, \\ \text{при } \text{tgj} > 2,0 & 4,0625. \end{cases} \quad (10)$$

Введем следующие обозначения:
 п — величина компенсации реактивной мощности, в % от базового значения;

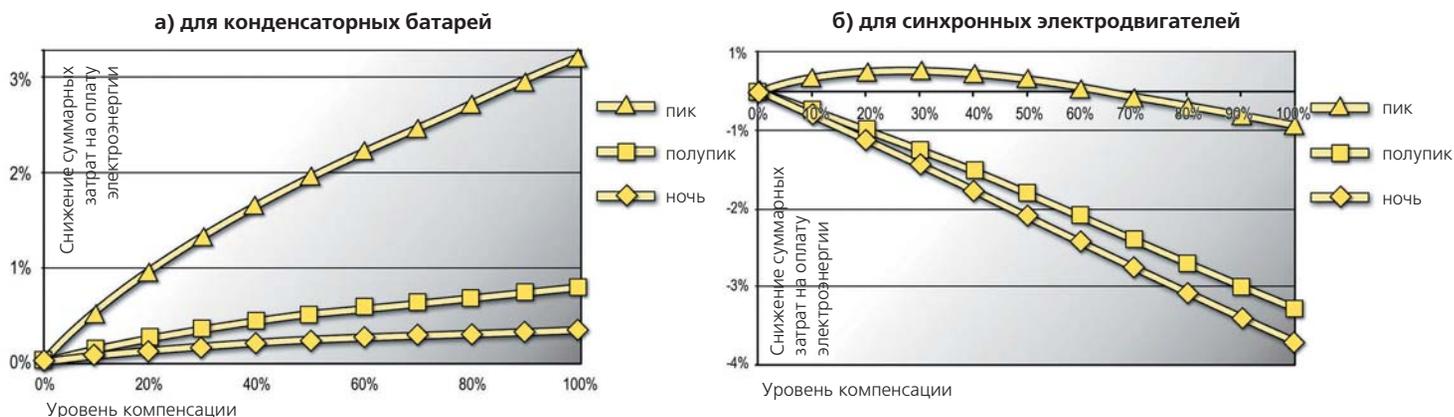
tgj' — значение коэффициента мощности после компенсации;

$WP'_{\text{ПОТР},i}$ — потребление активной энергии после компенсации, кВтч;

$\Delta WP_{\text{ПОТР},i}$ — расход активной энергии на компенсацию реактивной, кВтч;

$WQ'_{\text{ПОТР},i}$ — потребление реактивной энергии после компенсации, кВАрч;

График 1. Зависимость снижения суммарных затрат на оплату электроэнергии от уровня компенсации реактивной мощности для различных зон суток



$\Delta WQ_{\text{ПОТР},i}$ — величина скомпенсированной реактивной энергии, кВАрч.
В результате компенсации потребление реактивной энергии снизится на такую величину:

$$\Delta WQ_{\text{ПОТР},i} = WQ_{\text{ПОТР},i} \cdot n \quad (11)$$

и составит:

$$WQ'_{\text{ПОТР},i} = WQ_{\text{ПОТР},i} \cdot (1-n). \quad (12)$$

При этом затраты активной энергии на компенсацию реактивной таковы:

$$\begin{aligned} \Delta WP_{\text{ПОТР},i} &= \Delta WQ_{\text{ПОТР},i} \cdot K_{\text{КОМП}} = \\ &= WQ_{\text{ПОТР},i} \cdot n \cdot K_{\text{КОМП}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, суммарный расход активной энергии составит:

$$\begin{aligned} WP'_{\text{ПОТР},i} &= WP_{\text{ПОТР},i} + \Delta WP_{\text{ПОТР},i} = \\ &= WP_{\text{ПОТР},i} + WQ_{\text{ПОТР},i} \cdot n \cdot K_{\text{КОМП}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Определим значение коэффициента мощности после компенсации:

$$t_{gj}' = \frac{\sum_{i=1}^v WQ_{\text{ПОТР},i} - WQ_{\text{ПОТР},i} \cdot n}{\sum_{i=1}^v WP_{\text{ПОТР},i} - WQ_{\text{ПОТР},i} \cdot n \cdot K_{\text{КОМП}}}. \quad (15)$$

Полная стоимость электроэнергии после компенсации образуется в результате замены в формуле (9) базовых значений потребления активной и реактивной энергии на полученные:

$$П = WP'_{\text{ПОТР},i} \cdot T_{a,i} + WQ'_{\text{ПОТР},i} \cdot D \cdot K_i \cdot T, \quad (16)$$

или:

$$П = (WP_{\text{ПОТР},i} + WQ_{\text{ПОТР},i} \cdot n \cdot K_{\text{КОМП}}) \cdot T_{a,i} + WQ_{\text{ПОТР},i} \cdot (1-n) \cdot D \cdot K_i \cdot T. \quad (17)$$

На основе данной зависимости (17) определим влияние на полную стоимость электроэнергии:

- 1) ожидаемого профиля нагрузки предприятия;
- 2) типа компенсирующих устройств;
- 3) величины экономического эквивалента реактивной мощности D в точке потребления.

Расчеты проведем для промышленных предприятий с нормативным коэффициентом мощности $t_{gj} = 0,8$ [3].

Зависимость суммарных затрат на оплату электроэнергии от профиля нагрузки предприятия

Из полученных зависимостей (График 1 а, б) очевидно, что для предприятий, производящих расчеты за активную энергию по тарифам, дифференцированным по зонам суток, эффективность компенсации реактивной мощности зависит от зоны суток. Самой благоприятной для компенсации является ночная зона с наиболее низкой стоимостью активной энергии, тогда как в пиковой зоне эффективность практически отсутствует. Поэтому для предприятий, работающих по одно- и двухсменному графику, снижение суммарной оплаты за электроэнергию относительно невелико, что делает нецелесообразными затраты на организацию выработки реактивной энергии, особенно при малом потреблении активной энергии. Наиболее высокая эффективность от компенсации достигается предприятиями, работающими по непрерывному графику, при возможности выработки большей части реактивной энергии в зоне ночного провала графика системы.

Зависимость суммарных затрат на оплату электроэнергии от типа компенсирующего устройства

Выбор компенсирующего устройства является едва ли не основополагающим фактором, определяющим целесообразность затрат на компенсацию.

Зависимость суммарной стоимости электроэнергии от удельных затрат активной энергии на выработку реактивной представлена на Графике 2.

Наиболее эффективно использование установок статической компенсации (График 1а), характеризующихся малым значением удельного расхода активной энергии. Использование же синхронных двигателей в качестве компенсирующих устройств может привести к отрицательному эффекту: затраты активной энергии на компенсацию могут превысить экономию от снижения затрат на реактивную энергию (График 1б).

Зависимость суммарных затрат на оплату электроэнергии от экономического эквивалента реактивной мощности D

Выбор мест установки компенсирующих устройств во многом зависит от значения экономического эквивалента реактивной мощности D , определяющего степень влияния нагрузки на режим работы источника электропитания.

Наибольший экономический эффект от компенсации достигается в точках с наибольшим значением коэффициента D .

График 2. Зависимость снижения суммарных затрат на оплату электроэнергии от удельного расхода активной энергии на компенсацию реактивной при различных уровнях компенсации (для полупиковой зоны суток)

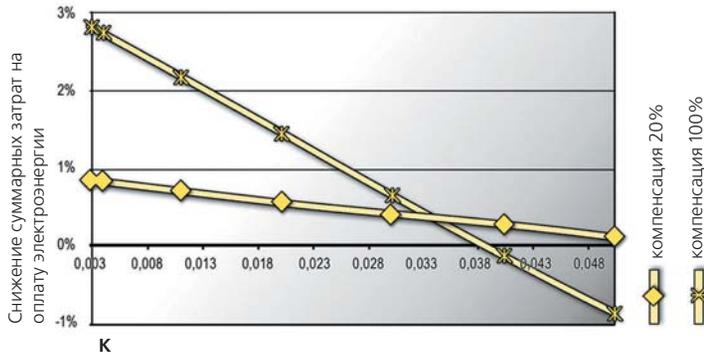
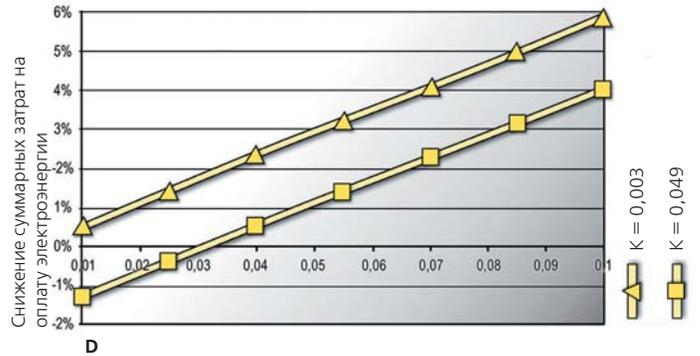


График 3. Зависимость снижения суммарных затрат на оплату электроэнергии от экономического эквивалента реактивной мощности D (для полупиковой зоны суток)



Выводы

1 При оценке эффективности капитальных затрат на организацию собственной выработки реактивной энергии необходимо учитывать влияние факторов, определяющих величину суммарных затрат на оплату электроэнергии.

2 Целесообразность компенсации реактивной мощности должна определяться для каждой расчетной точки индивидуально, с учетом экономи-

ческого эквивалента реактивной мощности D для данной точки учета.

Литература:

1. Железко Ю.С. О совершенствовании нормативных документов, определяющих отношения энергоснабжающих организаций и потребителей в части качества электроэнергии и условий потребления реактивной мощности // Промышленная энергетика. — 2002. — №6. — С. 23-27.
2. Морозов В.П., Яковлев А.Е., Каменский П.П. Справочник по электроснабжению угольных шахт. — М.: Недра. — 1975. — 576 с.: табл. 594, ил. 246.

3. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами. — К.: 2002. — 18с.

4. Правила устройства электроустановок. — М.: Энергоатомиздат. — 1986. — 646с.

5. Правила користування електричною енергією (у редакції постанови НКРЕ №928 від 22 серпня 2002р.).

6. Інструкція про порядок комерційного обліку електричної енергії (Додаток №10 до Договору між членами оптового ринку електричної енергії. Затверджено постановою НКРЕ №1349 від 19 жовтня 1998р.).