



ВОЛОГОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

# Энергоэффективность и энергосбережение в системах электроснабжения

к.т.н., доцент кафедры электроснабжения  
А.Н. Алюнов



---

## Лекция 2

Основные потребители реактивной мощности на промышленных предприятиях. Основные принципы размещения компенсирующих устройств.

# Компенсация реактивной энергии. Цели

Проявление реактивной мощности и энергии свидетельствует о наличии в цепях переменного тока реактивных элементов, преобразующих электрическую энергию в энергию электромагнитного поля. В таблице приведены основные потребители и источники реактивной энергии.

Таблица

№ п.п.	Потребители	Источники
1	Синхронные генераторы, компенсаторы, двигатели в режиме <b>недовозбуждения</b>	Синхронные генераторы, компенсаторы, двигатели в режиме <b>перевозбуждения</b>
2	Реактивное сопротивление <b>ЛЭП</b>	Зарядная мощность <b>ЛЭП</b>
3	Асинхронные двигатели	Батареи статических конденсаторов
4	Трансформаторы, реакторы	Статические источники реактивной мощности
5	Преобразователи, прочие электроприемники	

Установка средств компенсации (СК) может преследовать следующие цели:

- снижение потерь электроэнергии, напряжения;
- снижение оплаты за передачу реактивной энергии;
- разгрузка сетевого оборудования: ЛЭП, автотрансформаторов, трансформаторов;
- регулирование напряжения.

# Потребление реактивной мощности силовыми трансформаторами

---

Определяется двумя составляющими:

- Потери холостого хода
- Нагрузочные потери

$$\Delta Q = \Delta Q_{\text{оо}} + \Delta Q_i \cdot \hat{E}_\zeta^2$$

$$\Delta Q_{\text{оо}} = \frac{I_{\text{оо}}}{100} \cdot S_{\text{н.т.}}$$

$$\Delta Q_i = \frac{U_{\hat{e}}}{100} \cdot S_{\text{н.т.}}$$

$$\hat{E}_\zeta = \frac{S}{S_{\text{н.т.}}}$$

В среднем для цеховых трансформаторов:

При  $K_3=1 \Rightarrow \Delta Q=7\%S_{\text{НОМ.Т}}$

При  $K_3=0$  (незагружен)  $\Rightarrow \Delta Q=1,5\%S_{\text{НОМ.Т}}$

# Потребление реактивной мощности асинхронными электродвигателями

Реактивная мощность, потребляемая электродвигателем, состоит из двух составляющих: холостого хода и нагрузочного состояния.

$$\Delta Q = \Delta Q_{\text{оо}} + \Delta Q_{i \text{ аао}} \cdot \hat{E}_{\zeta}^2$$

$\Delta Q_{\text{оо}}$  - потери холостого хода

$\Delta Q_{\text{нагр}}$  - нагрузочные потери  $\Delta Q_{i \text{ аао}} = Q_{i \text{ ии}} - \Delta Q_{\text{оо}} = \frac{D_{\text{ии}} \text{tg}\phi}{\eta_{\text{ии}}} - \Delta Q_{\text{оо}}$

$K_3 = \frac{P}{P_{\text{ном}}}$  - коэффициент загрузки

$$\text{tg}\phi = \frac{Q}{D} = \frac{\Delta Q_{\text{оо}} + \Delta Q_{i \text{ аао}} \hat{E}_{\zeta}^2}{D_{\text{ии}} \cdot \hat{E}_{\zeta}} = \frac{\Delta Q_{\text{оо}}}{D_{\text{ии}} \cdot \hat{E}_{\zeta}} + \frac{\Delta Q_{i \text{ аао}} \cdot \hat{E}_{\zeta}}{D_{\text{ии}}}$$

## Компенсация реактивной энергии. Нормативы

В 2007 году вышел приказ Минпромэнерго от 22.02.2007 № 49 «О ПОРЯДКЕ РАСЧЕТА ЗНАЧЕНИЙ СООТНОШЕНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОПРИНИМАЮЩИХ УСТРОЙСТВ (ГРУПП ЭНЕРГОПРИНИМАЮЩИХ УСТРОЙСТВ) ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЯЗАТЕЛЬСТВ СТОРОН В ДОГОВОРАХ ОБ ОКАЗАНИИ УСЛУГ ПО ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ (ДОГОВОРАХ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ)».

В этом документе определен нормативный коэффициент мощности ( $Tg\varphi_{\text{норм}}$ ) для потребителей, подключенных к шинам напряжением 0,4÷110 кВ, приведенный в таблице.

Таблица

Номинальное напряжение сети, кВ	Нормативный коэффициент мощности
<b>0,4</b>	<b>0,35</b>
<b>6÷35</b>	<b>0,4</b>
<b>110</b>	<b>0,5</b>

# Средства компенсации, размещение компенсирующих устройств

Сравнительная характеристика средств компенсации реактивной мощности приведена в таблице.

Таблица

№ п/п	Показатель	КУ	СД	СК
1	Стоимость (относительная) руб/квар (до перестройки)	НН-12 руб/кВАр; ВН-4 руб/кВАр;		7... 15 руб/кВАр
2	<b>Потери активной мощности <math>\Delta P</math></b>	<b>2÷3,5 Вт/кВАр</b>	<b>(2÷10) %</b>	<b>1,4% от выработки</b>
3	Возможность плавного регулирования Q	$Q=3U^2\omega C$ , ступенчатое	Возбуждением плавное	Возбуждением плавное
4	Зависимость от напряжения	$Q \propto U^2$ , нет	$Q \propto U$ , да	$Q \propto U$ , да
5	Простота эксплуатации	да	нет	нет
6	Недефицитность материалов	да	нет	нет
7	Отсутствие шума и подвижных частей	да	нет	нет
8	Ремонтопригодность	нет	да	да
9	Остаточное напряжение после отключения	да	нет	нет

# Средства компенсации, размещение компенсирующих устройств

Основным принципом, определяющим место установки средств компенсации, является установка их в точке потребления реактивной энергии, чтобы исключить переток и потери. По месту установки СК компенсацию разделяют на виды:

1. централизованная компенсация на стороне низшего напряжения;
2. централизованная компенсация на стороне высшего напряжения;

## **Централизованная компенсация на стороне высшего напряжения.**

1. хорошее использование конденсаторов;
2. их требуется меньше;
3. меньше стоимость 1 кВАр установленной мощности;

**Но:** -разгружаются от  $Q_p$  только расположенные выше звенья системы электроснабжения;

- остаются потери в трансформаторах и увеличены мощности трансформаторов и сети.

## **Централизованная компенсация на стороне низшего напряжения.**

1. разгружаются от  $Q_p$  сеть и трансформаторы;

**Но:** - требуется больше конденсаторов;

- выше стоимость 1 кВАр ;

- не разгружается сеть напряжением 0,4 кВ.



## Расчет мощности компенсирующего устройства

---

Расчетную реактивную мощность КУ можно определить из соотношения:

$$Q_{\hat{E}D} = \alpha P_D (tg\varphi - tg\varphi_{\hat{E}})$$

где  $Q_{\text{кр}}$  – расчетная мощность КУ, кВар;

$P_D$  – расчетная активная мощность, кВт;

$\alpha$  – коэффициент, учитывающий повышение  $\cos \varphi$  естественным способом, принимается  $\alpha = 0,9$ ;

## Расчет мощности компенсирующего устройства

Параметр	Ед. изм.	Значение
Исходные данные		
Расчетная активная мощность ( $P_p$ )	кВт	180
Расчетная реактивная мощность до компенсации ( $Q_p$ )	кВар	183,64
Расчетный коэффициент мощности ( $\cos\phi$ )	-	0,7
Требуемый коэффициент мощности ( $\cos\phi'$ )	-	0,94
Результаты расчета		
Расчетная реактивная мощность КУ ( $Q_{ку}$ )	кВар	106,47
Количество узлов компенсации	шт.	2
Рекомендуемый набор стандартных мощностей для каждого узла компенсации	кВар	50; например: УК-0,38-50
Фактическая мощность КУ ( $Q_{ку.ф}$ )	кВар	100
Расчетная активная мощность ( $P_p$ )	кВт	180
Расчетная реактивная мощность после компенсации ( $Q_p$ )	кВар	72,53
Фактическое значение коэффициента мощности ( $\cos\phi_K$ )	-	0,93

# Экономия от применения компенсирующих устройств

---

Срок окупаемости, а следовательно и экономический эффект от внедрения конденсаторной установки (КУ) складывается из следующих составляющих:

- 1) Для действующих объектов **уменьшение потерь энергии** в силовых трансформаторах, кабелях и проводах за счет уменьшения фазных токов.
- 2) Для проектируемых объектов экономия на стоимости **силовых трансформаторов** за счет **снижения номинальной мощности**, а также **кабелей и проводов** за счет **уменьшения их сечения**.
- 3) **Экономия на оплате реактивной энергии**. Оплата за реактивную энергию составляет от 12% до 50% от активной энергии в различных регионах России.

# Экономия от применения компенсирующих устройств

---

Срок  $T_{\text{ок}}$  окупаемости батареи конденсаторов определяется по формуле:

$$T_{\text{ie}} = \frac{C_{\text{EO}}}{Y_{\text{AIA}}}$$

где  $Z_{\text{ку}}$  – затраты на приобретение и монтаж КУ, руб.;  $\text{Э}_{\text{год}}$  – годовое экономическое воздействие от внедрения КУ, руб./год.

Общие затраты на покупку и монтаж КУ могут быть определены по формуле:

$$C_{\text{EO}} = E_{\text{EO}} + C_{\text{I}}$$

где  $K_{\text{ку}}$  – стоимость КУ, руб.;  $Z_{\text{м}}$  – затраты на монтаж КУ, принимаемые равными 10% от стоимости КУ.

# Экономия от применения компенсирующих устройств

Параметры	Обозначение	Един. изм.	Значение
Напряжение	$U$	кВ	<b>110</b>
Потребление активной электроэнергии месячное	$W_{\text{мес}}$	млн. кВт*ч	<b>400</b>
Коэффициент мощности естественный	$Tg\phi_{\text{ест}}$	отн.ед	<b>0,7</b>
Коэффициент мощности нормированный	$Tg\phi_{\text{норм}}$	отн.ед	<b>0,5</b>
Тариф на оплату за активную электроэнергию	$b$	руб/кВт*ч	<b>1,36</b>

Параметры	Обозначение	Един. изм.	Формула	Результат
Составляющая повышения тарифа	$P_b$	отн.ед	$0,2*(Tg\phi_{\text{ест}}-Tg\phi_{\text{норм}})$	<b>0,04</b>
Стоимость оплаты за активную электроэнергию	$C_{\text{акт}}$	млн.руб	$W_{\text{мес}}*b$	<b>544</b>
Стоимость оплаты за реактивную электроэнергию	$C_{\text{реакт}}$	млн.руб	$C_{\text{акт}}*P_b$	<b>21,76</b>

# Экономия от применения компенсирующих устройств

Потребление реактивной электроэнергии месячное	$V_{\text{мес}}$	МЛН. квар*ч	$W_{\text{мес}} * Tg\phi_{\text{ест}}$	<b>280</b>
Нормативное потребление реактивной электроэнергии	$V_{\text{норм}}$	МЛН. квар*ч	$W_{\text{мес}} * Tg\phi_{\text{норм}}$	<b>200</b>
Объем месячной компенсации реактивной энергии	$V_{\text{комп}}$	МЛН. квар*ч	$V_{\text{мес}} - V_{\text{норм}}$	<b>80</b>
Суммарная мощность компенсирующих устройств	$\Sigma Q_{\text{комп}}$	Мвар	$V_{\text{комп}} * 1000 / T_{\text{мес}}$	<b>107,5</b>
Мощность одной конденсаторной батареи	$Q_{\text{кб}}$	Мвар	<b>Выбор</b>	<b>10</b>
Количество конденсаторных батарей	$N_{\text{кб}}$	шт	$\Sigma Q_{\text{комп}} / Q_{\text{кб}}$	<b>11</b>
Стоимость одной КБ	$C_{\text{кб}}$	млн. руб	<b>Прайс-лист</b>	<b>1,84</b>
Суммарная стоимость КБ	$\Sigma C_{\text{кб}}$	млн. руб	$C_{\text{кб}} * N_{\text{кб}}$	<b>19,8</b>
Затраты на компенсацию	$Z_{\text{комп}}$	млн. руб	$\Sigma C_{\text{кб}} * 1,5$	<b>29,68</b>
Срок окупаемости	$T_{\text{ок}}$	мес.	$Z_{\text{комп}} / C_{\text{реакт}}$	<b>1,36</b>

# СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

---

1. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов, - М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.- 280 .: ил.
2. Методика ФЭК, утвержденная Постановлением ФЭК РФ 17.03.2000 № **14/10** «Об утверждении нормативов технологического расхода электрической энергии (мощности) на ее передачу (потерь), принимаемую для целей расчета и регулирования тарифов».
3. Методика расчета нормативов потерь электрической энергии в электрических сетях (утверждена приказом Минпромэнерго РФ от 03.02.2005 №**21**)
4. Методика расчета нормативных технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям в базовом периоде (утверждена приказом Минпромэнерго РФ от 04.10.2005 №**267**)
5. Методика расчета нормативных технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям в базовом периоде (утверждена приказом Минэнерго РФ от 30.12.2008 №**326**)
6. Промышленная энергетика, № 4, 2006.: Некоторые аспекты экономичной работы силовых трансформаторов./ Заугольников В. Ф., канд. техн. наук, Балабин А. А., Савинков А. А., инженеры РСК ОАО "Орелэнерго"
7. Новости электротехники, №1(31), 2005: Симметрирующее устройство для трансформаторов. Средство стабилизации напряжения и снижения потерь в сетях 0,4 кВ. / Анатолий Сердешнов, к.т.н., Иван Протосовицкий, к.т.н., Юрий Леус, Петр Шумра, БАТУ, г. Минск, Беларусь.

# Список источников

---

8. Приказ Минпромэнерго РФ от 22.02.2007 № 49.: «О ПОРЯДКЕ РАСЧЕТА ЗНАЧЕНИЙ СООТНОШЕНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОПРИНИМАЮЩИХ УСТРОЙСТВ (ГРУПП ЭНЕРГОПРИНИМАЮЩИХ УСТРОЙСТВ) ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЯЗАТЕЛЬСТВ СТОРОН В ДОГОВОРАХ ОБ ОКАЗАНИИ УСЛУГ ПО ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ (ДОГОВОРАХ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ)»
9. Проект «Методические указания по расчету повышающих (понижающих) коэффициентов к тарифам на услуги по передаче электрической энергии в зависимости от соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах энергоснабжения или купли-продажи (поставки) электрической энергии) », ФСТ, 2008 г.
10. Прайс-лист на изделия для энергосбережения ООО «ЭЛПРИ», г. Чебоксары, 1.06.2007.
11. ПРАЙС ЛИСТ от 12.04.2006 г. ЗАО "МАТИК ЭЛЕКТРО" 125190 г. Москва. а/я 53. Походный проезд, дом 4, корп. 1 оф. 7 тел. (495) 223-66-79 - многоканальный, факс (495) 223-66-14, моб. (495) 740-06-90 sales@matic.ru, [www.matic.ru](http://www.matic.ru).
12. Экономия энергоресурсов в промышленных технологиях. Справочно-методическое пособие / Авторы-составители: Г.Я. Вагин, Л.В. Дудникова, Е.А. Зенютич, А.Б. Лоскутов, Е.Б. Солнцев; под ред. С.К. Сергеева; НГТУ, НИЦЭ – Новгород, 2001. -296 с.
13. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012.- 376 с.: ил.
14. Онлайн Электрик: Интерактивные расчеты систем электроснабжения. – 2008 [Электронный ресурс]. Доступ для зарегистрированных пользователей. – URL: <http://www.online-electric.ru> (дата обращения: 24.12.2013).