

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Курганский государственный университет»

Кафедра «Энергетика и технология металлов»

**КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Методические указания  
к курсовому проектированию  
для студентов направления 13.03.02  
«Электроэнергетика и электротехника»

Курган 2016

Кафедра: «Энергетика и технология металлов»

Дисциплина: «Системы электроснабжения городов и промышленных предприятий»  
(направление 13.03.02)

Составил: доцент Н.С. Деркач

Утверждены на заседании кафедры «24» марта 2015 г.

Рекомендованы методическим советом университета  
«17» декабря 2015 г.

## ВВЕДЕНИЕ

В целях снижения потерь мощности и электроэнергии в электрических сетях рекомендуется рассматривать целесообразность установки дополнительных компенсирующих устройств реактивной мощности, главным образом непосредственно у потребителей на напряжение  $0,4 \div 10$  кВ.

Основными источниками реактивной мощности в электрических сетях промышленного предприятия (в целях компенсации) являются конденсаторные установки, которые значительно снижают потребление реактивной мощности и регулируют коэффициент реактивной мощности ( $tg\varphi$ ).

В соответствии с действующими Правилами технологического присоединения энергопринимающих устройств (энергетических установок), юридических и физических лиц к электрическим сетям установлены требования к расчету значений соотношения потребления активной и реактивной мощности, определенных при заключении договоров об оказании услуг по передаче электрической энергии (договоры энергоснабжения) в отношении потреблений электрической энергии, присоединенная мощность энергопринимающих устройств которых более 150 кВт (за исключением бытовых и приравненных к ним потребителей).

Согласно приказу Минпромэнерго России от 22.02.2007 №49 для потребителей, присоединенных к сетям напряжением ниже 220 кВ, значения  $tg\varphi$  определяются в виде предельных значений коэффициента реактивной мощности, потребляемой в часы наибольших суточных нагрузок.

Значения  $tg\varphi$  определяется отдельно для каждой точки присоединения к электрической сети в отношении всех потребителей, за исключением потребителей, получающих электрическую энергию по нескольким линиям напряжением 6–10 кВ от одной подстанции, для которых эти значения рассчитываются в виде суммарных величин.

При проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий расчет и выбор компенсирующих устройств (батарей статических конденсаторов) необходимо проводить с соблюдением установленных предельных величин коэффициента реактивной мощности в точках присоединения к электрической сети напряжением 0,4 и 6–20 кВ.

Снижение или увеличение уровня компенсации реактивной мощности ( $tg\varphi$ ) относительно установленных предельных величин по уровням напряжения (низкое, среднее, высокое) приводит к изменению наиболее экономически выгодного соотношения между затратами на компенсирующие устройства и установленного тарифа на электроэнергию.

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий расчёт компенсации реактивной мощности (КРМ) и выбор компенсирующих устройств является одной из основных задач.

Компенсация реактивной мощности снижает потери и улучшает качество электрической энергии.

Большинство электроприемников промышленных предприятий в процессе работы потребляют из сети помимо активной мощности (P) реактивную мощность (Q). Основными потребителями реактивной мощности являются асинхронные двигатели, трансформаторы, вентильные преобразователи, воздушные электрические сети, реакторы и другие установки.

В зависимости от структуры электроприемников и режима их загрузки потребления реактивной мощности может достигать до 130% активной. Для экономического режима работы системы электроснабжения промышленного предприятия необходимо стремиться к уменьшению передаваемой мощности как путем улучшения режима работы электроприемников, так и путем установки компенсирующих устройств.

Компенсировать реактивную мощность возможно синхронными компенсаторами, синхронными двигателями (в режиме нагрузки меньше номинальной) и конденсаторными установками (источники реактивной мощности).

Наиболее выгодный способ КРМ на промышленном предприятии – это установка статических конденсаторов (КУ) в распределительных сетях напряжением 0,22-10кВ в непосредственной близости к месту потребления реактивной мощности.

При этом можно или полностью отказаться от регулирования напряжения под нагрузкой трансформаторов или значительно уменьшить их диапазон регулирования, что приводит к снижению затрат на установку регулирующих устройств и снижению потерь активной мощности от источников до места установки батарей конденсаторов.

Основные достоинства конденсаторных установок:

- малые удельные потери активной мощности;
- простота монтажа и эксплуатации (нет вращающихся частей);
- возможность постепенного увеличения мощности батарей конденсаторов.

Недостатки:

- зависимость генерации КУ от величины напряжения;
- недостаточная механическая прочность, особенно при к.з. и перенапряжениях;
- пожароопасность;
- сложность регулирования (мощность регулируется ступенчато);
- влияние высших гармоник.

В большинстве случаев для компенсации реактивной мощности и регулирования уровня напряжения применяют параллельные включения конденсаторных батарей, в которых конденсаторы, как правило, соединяют в «треугольник» (реже в «звезду»), т.к. мощность трехфазной КУ в три раза больше, нежели при соединении в «звезду»

$$Q_{КБ} = 3\omega C_{\phi} U^2, \quad (1)$$

где  $\omega = 2\pi f_0$ ;

$C_{\phi}$  – суммарная емкость конденсаторов одной фазы;

$U$  – линейное напряжение.

Силовые конденсаторы на напряжение до 1 кВ выпускаются в однофазном и трехфазном исполнении, а на напряжение выше 1 кВ (1,05; 3,15; 6,3; 10,5 кВ) – в трехфазном исполнении.

Конденсаторные установки присоединяются параллельно индуктивным элементам электрических систем переменного тока частотой 50 Гц.

Конденсаторы могут быть масляного или синтетического наполнения на напряжение от 0,22 кВ до 10,5 кВ для наружной и внутренней установки. Единичная мощность конденсаторов от 10 до 125 квар. Из отдельных конденсаторов собирают батареи (БК) требуемой мощности. Для снижения затрат на отключающую, измерительную и другую аппаратуру не рекомендуется установка БК – 6-10 кВ мощностью менее 400 квар при присоединении конденсаторов через отдельный выключатель и менее 100 квар при присоединении через общий выключатель с силовым трансформатором, асинхронным двигателем и другими электроприемниками.

Конденсаторные батареи, укомплектованные коммутационными аппаратами, средствами контроля, приборами учета, предназначенные для установки на промышленном предприятии в сети напряжением 6–10 кВ и 0,4 кВ, называются комплектными конденсаторными установками (ККУ), они могут быть нерегулируемыми и регулируемыми.

На промышленном предприятии в режиме минимальных нагрузок (с 23-00 до 7-00) возможна перекомпенсация реактивной мощности, которая вызовет повышение напряжения и дополнительные потери в сети. Поэтому есть необходимость установки регулируемой ККУ, в которой в зависимости от режима параметра сети происходит отключение или включение количества банок конденсаторов автоматически или вручную (одно- и многоступенчатое регулирование). Схема регулируемой ККУ до 1 кВ приведена на рисунке 3.

Пример условного обозначения ККУ до 1 кВ представлен на рисунке 1.

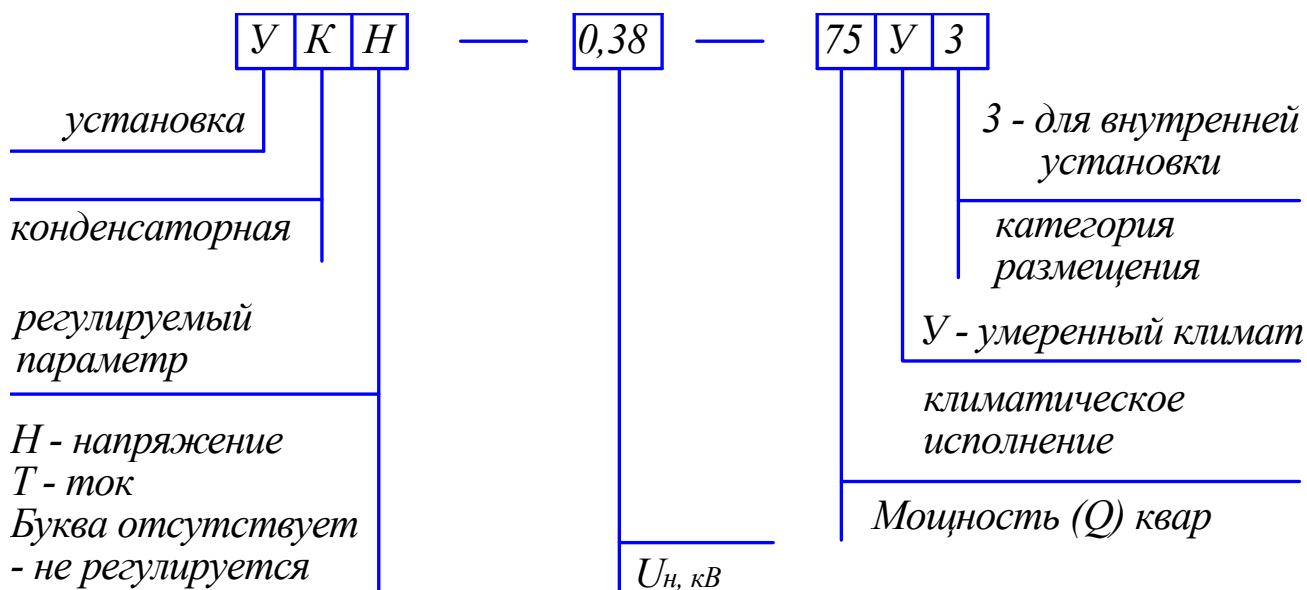


Рисунок 1 – Структура условного обозначения регулируемой ККУ

Пример: УKM-58-0,4-20-10У3 – установка конденсаторная регулируемая по мощности, напряжением 0,4 кВ, общей мощностью 20 квар ( $2 \times 10$ квар), две ступени регулирования, климат умеренный, внутренней установки.

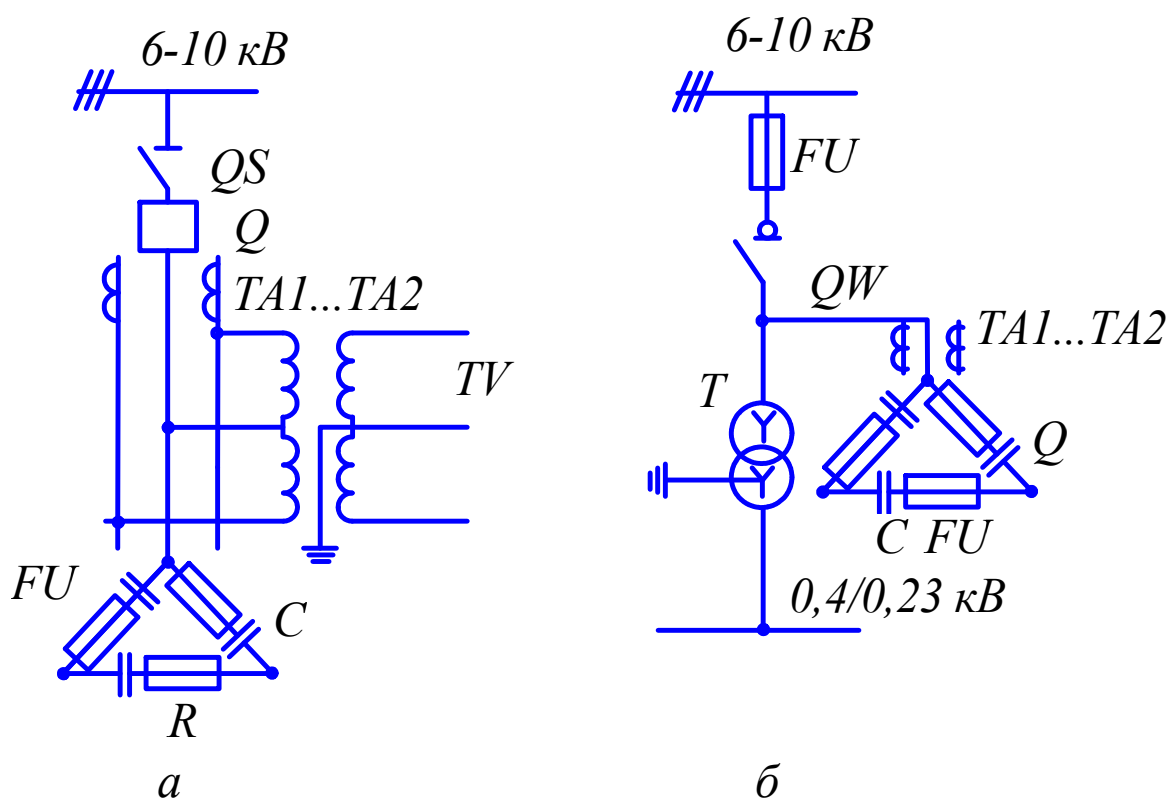
КУ должны иметь разрядные устройства (для безопасности обслуживания после их отключения).

В качестве разрядных устройств могут применяться:

- трансформаторы напряжения или устройства с активно-индуктивным сопротивлением – для КУ выше 1 кВ;
- устройства с активным или активно-индуктивным сопротивлением для КУ до 1 кВ.

Варианты подключения КУ выше 1 кВ показаны на рисунке 2.

Централизованная схема включения КУ на шинах 0,4 кВ цеховой ТП изображена на рисунке 3.



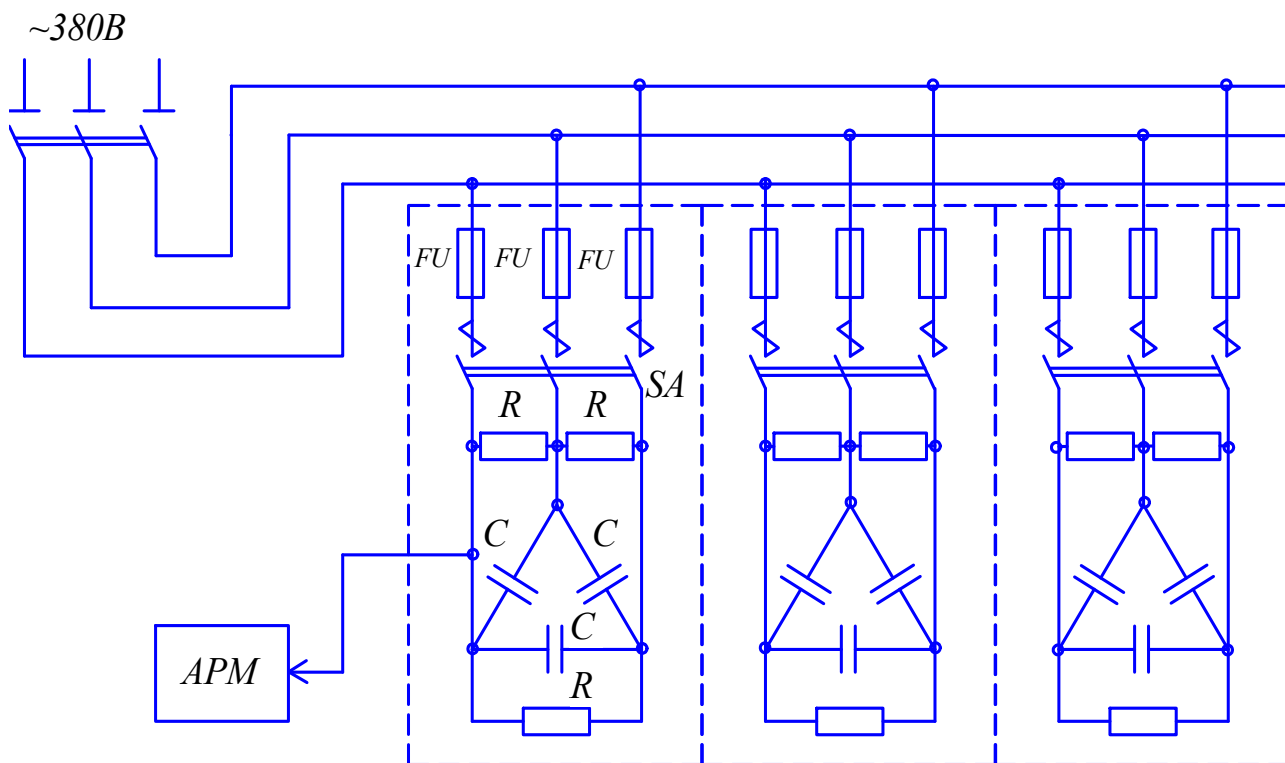
а) с отдельным выключателем; б) с выключателем нагрузки

Рисунок 2 – Однолинейная схема включением КУ на шинах 6-10 кВ ГПП (РП)

Компенсация реактивной мощности с помощью конденсаторных батарей может быть индивидуальная, групповая и централизованная.

При централизованной компенсации КУ присоединяются непосредственно на шины 0,4 кВ цеховой ТП или на шины 6-10 кВ ГПП. В этом случае от реактивной мощности разгружаются трансформаторы ГПП и питающая сеть.

Использование установленной мощности конденсаторов при этом получается наиболее высоким.



*APM – блок автоматического управления: C – конденсатор, R – резистор, FU – предохранитель*

*Рисунок 3 – Схема включения КУ на шинах 0,4 кВ цеховой ТП*

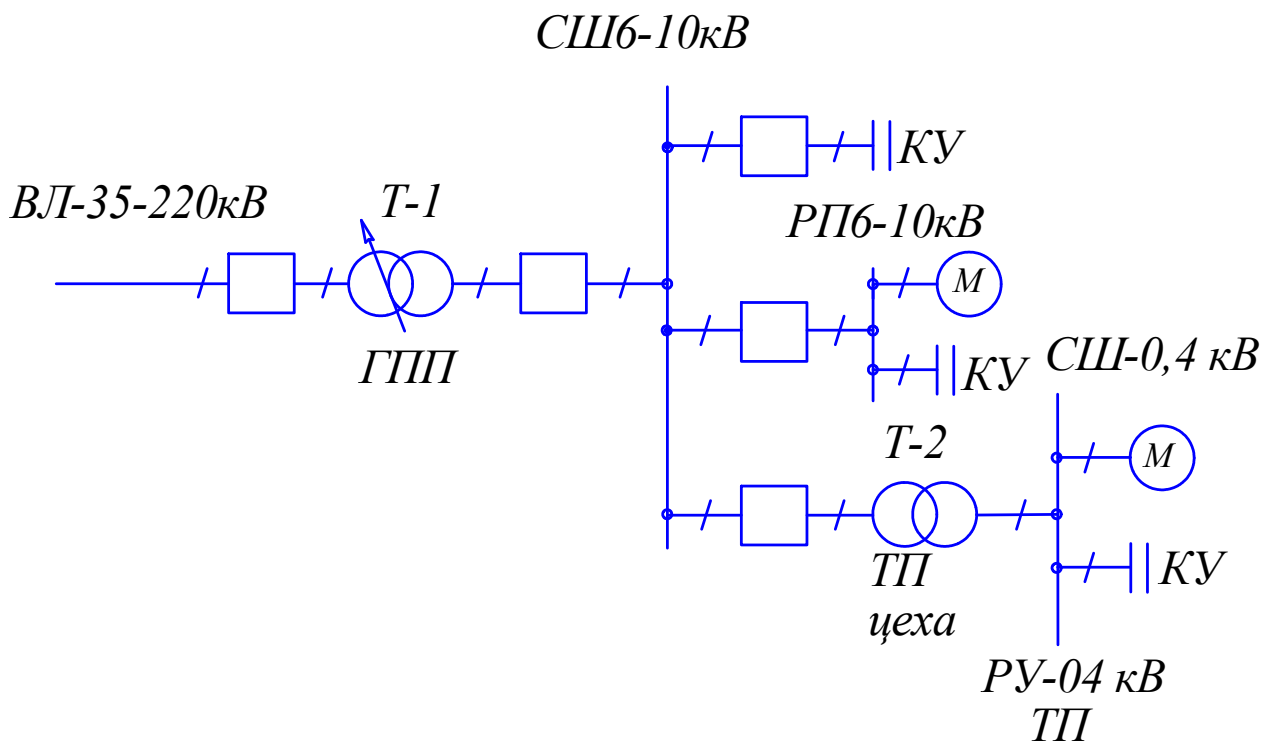
Для расчета предлагается два варианта централизованной компенсации реактивной мощности:

- на шинах 0,4 кВ цеховых ТП (что дает снижение реактивной мощности в распределительных электрических сетях 6–10 кВ, включая разгрузку трансформатора в ТП);
- на шинах 6–10 кВ ГПП (РП) (достигается применение наименьшего количества КУ и низкая стоимость 1 квар установленной мощности конденсаторов).

КУ установки напряжением выше 1 кВ целесообразно устанавливать на вторичном напряжении ГПП (РП) в системе электроснабжения предприятия. Не рекомендуется устанавливать КУ напряжением выше 1 кВ безшинных цеховых ТП, на которых трансформаторы присоединены наглухо через разъединитель, выключатель нагрузки и предохранитель, т.к. это вызовет их усложнение и удорожание.

При установке КУ на шинах 0,4 кВ цеховых ТП или на шинах 6÷10 кВ ГПП дает наибольший эффект по использованию установленной мощности конденсаторных батарей в сравнении с индивидуальной или групповой компенсацией.

Схема централизованной компенсации реактивной мощности по всем уровням напряжения системы электроснабжения промышленного предприятия показана на рисунке 4.



*Рисунок 4 – Схема централизованной компенсации реактивной мощности*

Целесообразным является такое размещение КУ, при котором обеспечиваются минимальные годовые затраты и одновременно снижение тарифа на электрическую энергию по трем уровням напряжения (высокое, среднее, низкое).

Порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах энергоснабжения), определен приказом Министерства промышленности и энергетики от 22.02.2007 №49 [2].

Предельные значения коэффициента реактивной мощности, потребляемой в часы больших суточных нагрузок электрической сети для потребителей, присоединенных к сетям напряжением ниже 220 кВ, приведены в приложении к указанному приказу.

*Таблица 1 – Предельные значения коэффициента реактивной мощности*

Положение точки присоединения потребителя к электрической сети	tgφ
напряжением 110 кВ (154 кВ)	0,5
напряжением 35 кВ (60 кВ)	0,4
напряжением 6 – 20 кВ	0,4
напряжением 0,4 кВ	0,35

Компенсация реактивной мощности ниже предельных значений, указанных в таблице 1, приводит к затратам на компенсирующие устройства, большим, чем снижение тарифа за счет снижения потерь, а потребление реактивной



мощности сверх указанных предельных значений приводит к большому увеличению тарифа, чем экономия на компенсирующих устройствах.

Расчет и выбор КУ (при централизованной КРМ) для промышленного предприятия, электроснабжение которого осуществляется от ГПП с первичным напряжением 35–220 кВ (или РП-6-10 кВ), имеющей сборные шины вторичного напряжения 6–10 кВ, производится по двум уровням напряжения: 0,4 кВ и 6–10 кВ, с учетом установленных предельных значений коэффициента реактивной мощности ( $tg\varphi$ ) в точках присоединения потребителей к электрической сети и расчетных нагрузок предприятия.

В качестве заданного энергоснабжающей организацией (в договорах энергоснабжения) принимаются предельно допустимые значения  $tg\varphi_{np}$ , указанные в таблице 1.

До расчета  $tg\varphi$  производится проверка всех трансформаторов 6–10 кВ на возможность пропуска реактивной мощности в сеть 0,4 кВ и определяется необходимость установки конденсаторных батарей на шинах 0,4 кВ.

В случае, когда  $Q_p > Q_{max\tau}$ , реактивная мощность конденсаторных установок ( $Q_{ку}$ ), необходимая для пропуска через трансформаторы, находится по формуле:

$$Q_{ку} = Q_p - Q_{max\tau}, \quad (2)$$

где  $Q_p$  – расчетная реактивная мощность на напряжение 0,4 кВ;

$Q_{max\tau}$  – наибольшая реактивная мощность, которую целесообразно передать через трансформаторы в сеть напряжением 0,4 кВ:

$$Q_{max\tau} = \sqrt{(N \cdot K_3 \cdot S_n)^2 - P_p^2}, \quad (3)$$

где  $N$  – число трансформаторов в ТП.

$K_3$  – рекомендуемый коэффициент загрузки трансформатора;

$S_n$  – номинальная мощность трансформатора;

$P_p$  – расчетная активная мощность на напряжение 0,4 кВ.

Расчет коэффициента реактивной мощности ( $tg\varphi$ ) производится поэтапно, начиная с точки присоединения потребителей на напряжение 0,4 кВ – по каждому цеховому трансформатору или ТП:

$$tg\varphi = \frac{Q'_p}{P_p}, \quad (4)$$

где  $Q'$  – реактивная мощность, которая была определена с учётом компенсации:

$$Q'_p = Q_p - Q_{ку}. \quad (5)$$

Полученные данные расчетного  $tg\varphi$  по каждому трансформатору или ТП сравниваются с предельным значением в точке присоединения потребителей напряжением 0,4 кВ ( $tg\varphi_{np} = 0,35$ ). В случае  $tg\varphi_p > tg\varphi_{np}$  необходимо выполнить расчет и выбор дополнительных батарей статических конденсаторов с учетом реактивной мощности конденсаторных установок, выбранных по условию пропуска через трансформаторы (формула 2) для установки на шинах 0,4 кВ ТП.

$$Q_g = P_p (tg \varphi_p - tg \varphi_{np}) \cdot a + Q_{ky}, \quad (6)$$

где  $P_p$  – расчетная активная мощность на напряжение 0,4 кВ;

$tg \varphi_p$  – расчетная величина по каждому трансформатору или ТП;

$tg \varphi_{np}$  – предельная величина;

$Q_{ky}$  – реактивная мощность КУ, необходимая для пропуска через трансформаторы;

$a$  – коэффициент, учитывающий КРМ естественным путем ( $a=0,8 \div 0,9$ ).

По расчетной величине  $Q_g$  (формула 6) производится окончательный выбор типа и мощности КУ для установки на шинах 0,4 кВ.

Пример расчета и выбора компенсирующих устройств на шинах 0,4 кВ двухтрансформаторной ТП.

Исходные данные:

$$Q_p = 750 \text{ квар}, \quad P_p = 600 \text{ кВт},$$

$$S_n = 630 \text{ кВА}, \quad K_3 = 0,7,$$

$$a = 0,8.$$

1 Проверяем трансформаторы 10 кВ на возможность пропуска реактивной мощности в сеть 0,4 кВ и определяем необходимость установки компенсирующих устройств (КУ).

$$Q_{\max \tau} = \sqrt{(N \cdot K_3 \cdot S_n)^2 - P_p^2} = \sqrt{(2 \cdot 0,7 \cdot 630)^2 - 600^2} = 646 \text{ (квар)},$$

$$Q_{ky} = Q_p - Q_{\max \tau} = 750 - 646 = 104 \text{ квар}.$$

2 Производим расчет  $tg \varphi_p$  и определяем необходимость установки конденсаторных батарей

$$tg \varphi = \frac{Q'_p}{P_p} = \frac{646}{600} = 1,07,$$

$$Q'_p = Q_p - Q_{ky} = 750 - 104 = 646 \text{ (квар)}.$$

Получилось  $tg \varphi_p > tg \varphi_{np}$  ( $1,07 > 0,35$ ).

3 Для компенсации определяем дополнительную реактивную мощность с учетом соблюдения  $tg \varphi_{np}$  и пропускной способностью трансформатора ( $Q_{ky}$ ) по формуле:

$$Q_g = P_p (tg \varphi_p - tg \varphi_{np}) \cdot a + Q_{ky} = 600(1,07 - 0,35)0,8 + 104 = 449,6 \text{ (квар)}.$$

4 По справочнику выбираем две регулируемые установки конденсаторных батарей (ККУ)

УКМ-58-0,4-225-37,5 УЗ на каждую секцию шин трансформаторов.

Расчет  $tg \varphi_p$  на шинах 6–10 кВ ГПП (РП) производится с учетом проведенной компенсации реактивной мощности на стороне 0,4 кВ цеховых ТП и установки статических конденсаторов.

$$tg \varphi_p = \frac{\sum Q_p \text{ (квар)}}{\sum P_p \text{ (кВт)}}, \quad (7)$$

$\Sigma Q_p$  – суммарная расчетная реактивная мощность электроприемников предприятия на шинах 6–10 кВ ГПП(РП):

$$\Sigma Q_p = \Sigma Q_{p.n.в} + \Sigma Q_{p.в.в} + \Sigma \Delta Q_T; \quad (8)$$

$\Sigma Q_{p.n.в}$  – суммарная расчетная низковольтная реактивная мощность электроприемников предприятия, сниженная на величину реактивной мощности при проведении компенсации на стороне 0,4 кВ цеховых ТП (формула 6);

$\Sigma Q_{p.в.в}$  – суммарная расчетная реактивная мощность высоковольтных электроприемников предприятия, из которой вычитается реактивная мощность синхронных двигателей (если они установлены), работающих в режиме генерации реактивной мощности (т.е. с опережающим током);

$\Sigma \Delta Q_T$  – суммарные потери реактивной мощности в трансформаторах цеховых ТП (определяются по формуле из справочника  $\Sigma \Delta Q_T \approx 0,1 S_n$ , где  $S_n$  – номинальная мощность трансформатора, установленного в ТП цеха);

$\Sigma P_p$  – суммарная расчетная активная мощность электроприемников предприятия на шинах 6–10 ГПП (РП).

$$\Sigma P_p = \Sigma P_{p.n.в} + \Sigma P_{p.в.в} + \Sigma \Delta P_T; \quad (9)$$

$\Sigma P_{p.n.в}$  – суммарная расчетная низковольтная активная мощность электроприемников предприятия с учетом освещения;

$\Sigma P_{p.в.в}$  – суммарная расчетная активная мощность высоковольтных электроприемников предприятия;

$\Sigma \Delta P_T$  – суммарные потери активной мощности в трансформаторах цеховых ТП (определяются по формуле из справочника  $\Sigma \Delta P_T \approx 0,02 S_n$ , где  $S_n$  – номинальная мощность трансформатора, установленного в ТП цеха).

Примечание: потери мощности в линиях электропередач напряжением 6–10 кВ в расчетах  $tg \varphi_p$  из-за малой величины не учитываются.

Полученная величина расчетного  $tg \varphi_p$  на шинах 6–10 кВ ГПП предприятия сравнивается с величиной предельного коэффициента реактивной мощности (таблица 1) в точке присоединения потребителей напряжением 6–10 кВ ( $tg \varphi_{np} = 0,4$ ).

При  $tg \varphi_p > tg \varphi_{np}$  необходимо произвести расчет и выбор дополнительных компенсирующих устройств по формуле

$$Q_{дон} = \Sigma P_p (tg \varphi_p - tg \varphi_{np}) \cdot a, \quad (10)$$

где  $\Sigma P_p$  – суммарная расчетная активная мощности электроприемников на шинах 6–10 кВ предприятия;

$tg \varphi_p$  и  $tg \varphi_{np}$  – расчетная и предельная величина на шинах 6–10 кВ;

$a$  – коэффициент, учитывающий КРМ естественным путем.

По справочнику выбирается тип и мощность КУ для подключения на шинах 6–10 кВ ГПП (РП). При наличии нескольких секций шин 6–10 кВ КУ устанавливаются на каждую секцию шин с учетом пропорционального деления об-

шей реактивной мощности. Когда расчетный коэффициент реактивной мощности в точках присоединения напряжением 0,4 и 6–10 кВ не превышает предельную величину 0,35 и 0,4 соответственно, дополнительной компенсации реактивной мощности не требуется.

Пример расчета и выбора компенсирующих устройств на шинах 10кВ ГПП.

Исходные данные:

$$\Sigma Q_{pн.е} = 6,0 \text{ мвар}; \quad \Sigma Q_{сд} = -0,6 \text{ мвар};$$

$$\Sigma Q_{pвв} = 1,8 \text{ мвар или } (2,4 \text{ мвар} - 0,6 \text{ мвар});$$

$$\Sigma Q_{pт} = 0,8 \text{ мвар};$$

$$\Sigma P_{pн.е} = 10 \text{ мВт}; \quad \Sigma P_{вв} = 2,6 \text{ мВт};$$

$$\Sigma P_{pт} = 0,2 \text{ мВт}.$$

Расчет:

$$1 \quad \Sigma Q_{p10} = 6 \text{ мвар} + (2,4 \text{ мвар} - 0,6 \text{ мвар}) + 0,8 \text{ мвар} = 8,6 \text{ мвар};$$

$$2 \quad \Sigma P_{p10} = 10 \text{ мВт} + 2,5 \text{ мВт} + 0,2 \text{ мВт} = 12,8 \text{ мВт},$$

$$\text{tg} \varphi_p = \frac{\Sigma Q_{p10}}{\Sigma P_{p10}} = \frac{8,6}{12,8} = 0,67;$$

3 В результате  $\text{tg} \varphi_p > \text{tg} \varphi_{np}$ ,  $0,67 > 0,4$ . Определяем  $Q_{дон}$  для компенсации реактивной мощности до предельной величины  $\text{tg} \varphi_{np}$ :

$$\Sigma Q_{дон} = 12,8(0,67 - 0,4) \cdot 0,8 = 2,77 \text{ мвар или } 2770 \text{ квар}.$$

4 Выбираем по справочнику две конденсаторные установки УКЛ-57-10,5-1350-УЗ для установки на шинах 10 кВ.

## Список литературы

- 1 Гамазин С. И., Кудрин Б.И., Цырук С. А. Справочник по энергоснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий. – М. : Издательский дом МЭИ, 2010. – 745 с.
- 2 Приказ Министерства промышленности и энергетики Р.Ф. от 22.02.2007. № 49.
- 3 Конюхова Е. А. Электроснабжение : учебник для вузов. – М. : Издательский дом МЭИ. – 2014, 510 с.
- 4 Шеховцов В. П. Расчет и проектирование схем электроснабжения: методическое пособие для курсового проектирования. – М. : Форум: ИНФРА-М, 2005. – 214 с.
- 5 Правила устройства электроустановок. – Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. – Красноярск, 1998. – 656 с.
- 6 Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий : учебник для студентов высших учебных заведений. – М. : Интернет Инженеринг, 2007. – 672 с.

Держач Николай Семенович

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Методические указания  
к курсовому проектированию  
для студентов направления 13.03.02  
«Электроэнергетика и электротехника»

Редактор Н.М. Быкова

---

Подписано к печати	Формат 60x84 1/16	Бумага 65 г/м <sup>2</sup>
Печать цифровая	Усл. печ.л. 1,0	Уч.-изд.л. 1,0
Заказ	Тираж 15	Не для продажи

---

РИЦ Курганского государственного университета.  
640000, г. Курган, ул. Советская, 63/4.  
Курганский государственный университет.