Электрические сети предприятий и их выбор

1) Местные электрические сети рассчитывают по упрощенным схемам с сосредоточенными индуктивными и активными сопротивлениями: проводимостями пренебрегают.

2) В кабельных сетях с малым сечением жил пренебрегают индуктивным сопротивлением и расчеты выполняют только с учетом активных сопротивлений.

3) Нагрузку в местных сетях задают в виде расчетного тока $I_{расч}$ и расчетной мощности $S_{расч}$ считают, что напряжение в сети неизменно - это равнозначно условию

. $\Delta P_{сети} = 0$

4) При расчетах не учитывают поперечную составляющую потери напряжения.

Активное сопротивление линий

Различают сопротивление проводников омическое постоянному току и активное переменному току.

Активное сопротивление проводников $R = r_o l$

$$r_o = \frac{\rho}{S}, \text{ Ом/км} \quad \text{или} \quad r_o = \frac{1000}{\gamma S}, \text{ Ом/км.}$$

$$\gamma = \frac{1000}{S} \quad \text{- проводимость} \quad \left[\frac{\text{м}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}\right]$$

Медный провод

$$\rho = 18{,}8 \left[\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{км}} \right] \qquad \gamma = 53 \left[\frac{\text{м}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2} \right]$$

.

Алюминиевый провод

$$\rho = 31{,}5 \left[\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{км}} \right] \qquad \gamma = 31{,}7 \left[\frac{\text{м}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2} \right]$$

У стальных проводников активное сопротивление больше омического.

Индуктивное сопротивление линий

Индуктивное сопротивление линии зависит от расстояния между проводниками $D_{ср}$ и диаметра проводников:

$$D_{ср} = \sqrt[3]{D_{1-2} D_{2-3} D_{1-3}}\ , \text{ м.}$$

$$x_o = \omega\left(4{,}61 \lg \frac{2D_{ср}}{d} + 0{,}5\mu\right), \text{ Ом/км.}$$

При равностороннем треугольнике $D_{ср} = D$

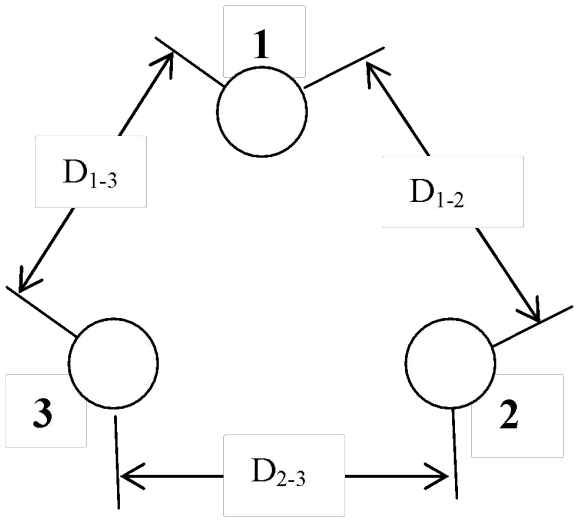


Рис. 4.1. Расположение проводников трехфазной сети

При расположении проводников на одинаковом расстоянии в линию

$$D_{ср} = \sqrt[3]{DD2D} = D\sqrt[3]{2} = 1{,}26D$$

Для линий из цветных металлов при $\mu = 1$

$$x_o = 0{,}144 \lg \frac{2D_{ср}}{d} + 0{,}16 \quad , \text{ Ом/км.}$$

Для стальных проводников

$$x_o = 0{,}144 \lg \frac{2D_{ср}}{d} + 0{,}16 = x_o' + x_o''$$

В упрощенных расчетах принимают для ЛЭП напряжением более 1000 В:

воздушные линии $x_o = 0{,}4$ Ом/км;

кабельные линии $x_o = 0{,}08$ Ом/км.

Выбор сечений проводников и жил кабелей по нагреву током нагрузки

При прохождении тока по проводнику он нагревается. Количество теплоты, выделяющееся в проводнике согласно закону Джоуля-Ленца

$$Q = I^2rt$$

Допустимая температура нагрева жил кабелей зависит от типа изоляции и величины напряжения:

Кабели с бумажной изоляцией для напряжения, кВ:	
до 3	80
6	65
10	60
20-35	50
Кабели с поливинил-хлоридной изоляцией для напряжения, кВ:	
6	65
10	65
Кабели с полиэтиленовой изоляцией для напряжения, кВ	
6	65
10	65

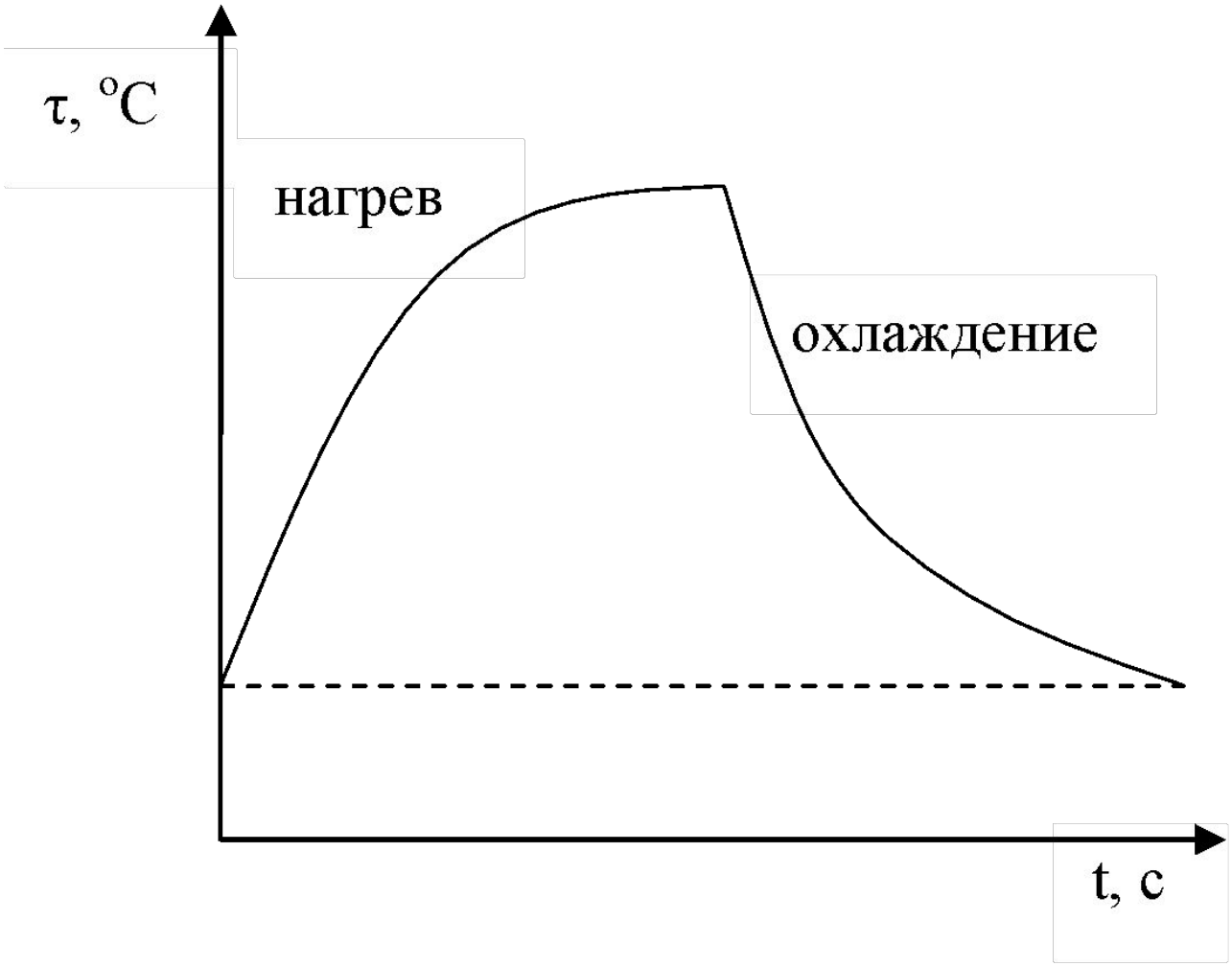


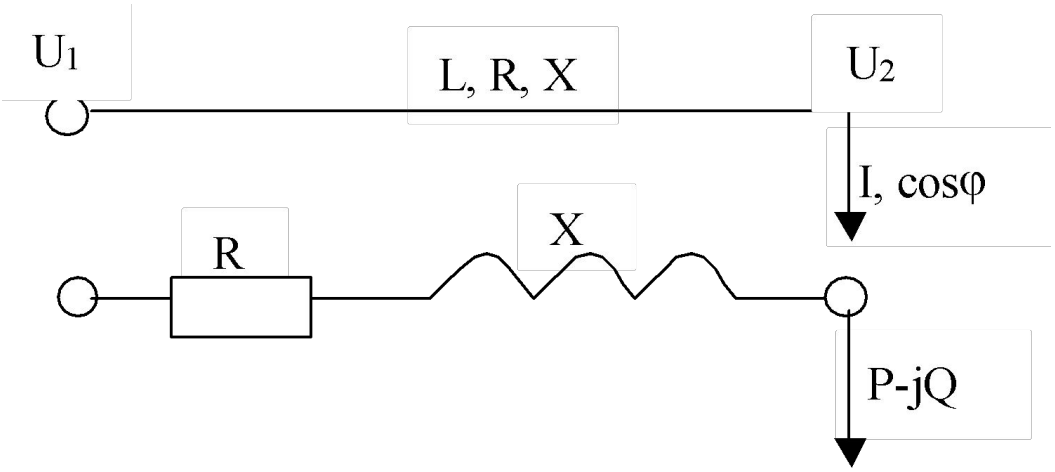
Рис. 4.2. Нагрев и охлаждение проводников

В справочной температуре приводятся данные для допустимых токов в проводниках для температуры окружающей среды:

$$\tau_{\text{ос.воздуха}} = +25^{\circ}\text{C}$$

$$\tau_{\text{ос.почвы}} = +25^{\circ}\text{C}$$

Расчет линий (разомкнутых сетей) трехфазного тока по потере напряжения



По трехфазной линии передается нагрузка:

$$S = P - jQ \qquad P = \sqrt{3}UI\cos\varphi \qquad Q = \sqrt{3}UI\sin\varphi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{\left(\sqrt{3}UI\cos\varphi\right)^2 + \left(\sqrt{3}UI\sin\varphi\right)^2} = \sqrt{3}UI$$

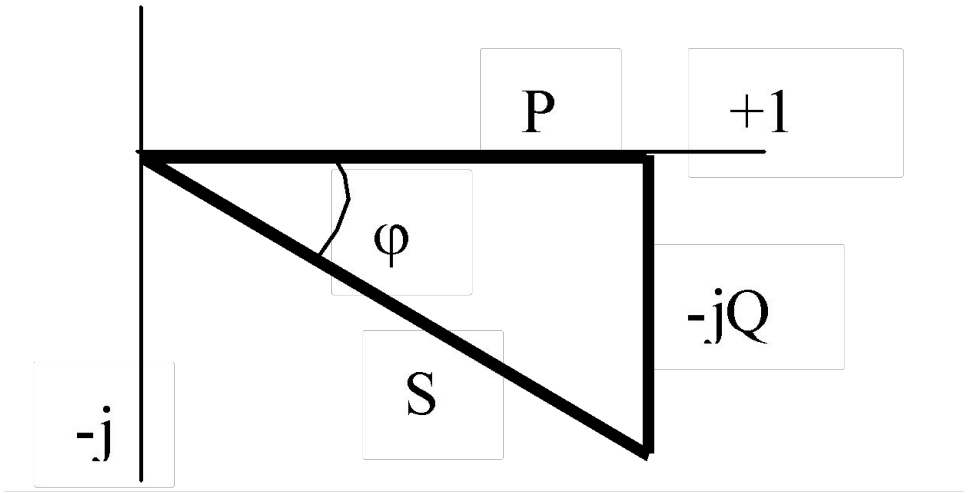


Рис. * Треугольник мощностей

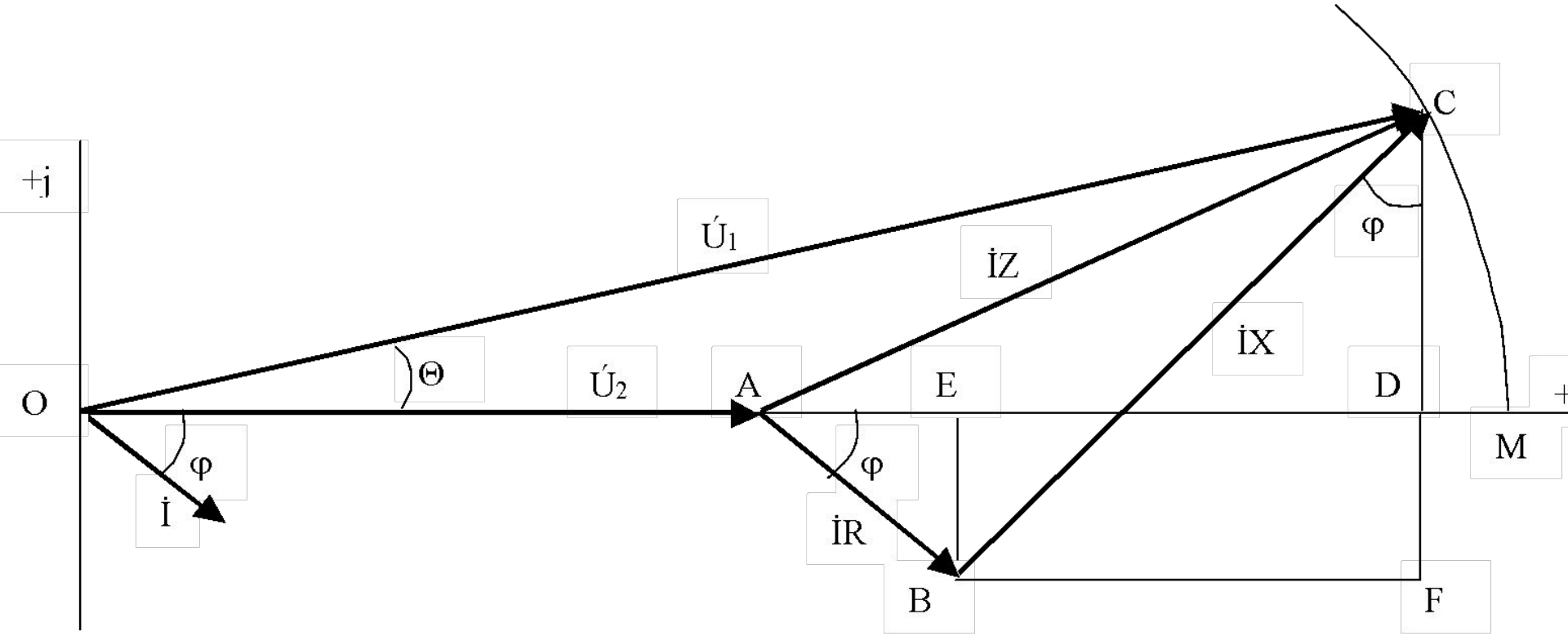


Рис. * Векторная диаграмма тока и напряжения

AC – падение напряжения в линии.

AM – потеря напряжения в линии.

$\Theta \rightarrow 0$. В местных сетях этот угол мал и DM мал.

$AM \approx AD = \Delta U_ф$ – продольная составляющая потери напряжения.

$DC = \delta U_ф$ – поперечная составляющая потери напряжения.

$U_2 = U_ф$ – напряжение в конце линии.

Полное падение напряжения составляет:

$$\dot{Z} = \Delta\dot{U}_{ф} + j\delta\dot{U}_{ф}$$

Продольная составляющая потери напряжения:

$\Delta U_{ф} = AD = AE + ED = IR\cos\varphi + IX\sin\varphi = I_a R + I_p X.$

Поперечная составляющая потери напряжения:

$\delta U_{ф} = DC = CF - FD = IX\cos\varphi - IR\sin\varphi = I_a X - I_p R.$

Напряжение в начале линии:

$$U_1 = U_{ф} + \Delta U_{ф} - j\delta U_{ф} = U_{ф} + I_a R + I_p X - j(I_a X - I_p R)$$

или абсолютная величина

$$U_1 = \sqrt{\left(U_{ф} + I_a R + I_p X\right)^2 + \left(I_a X - I_p R\right)^2}$$

Потеря напряжения в линии:

$$U_1 - U_ф = AM = OM - OA.$$

$$AD \approx AM = \Delta U_ф = IR\cos\varphi + IX\sin\varphi.$$

Для трехфазных электрических сетей

$$\Delta U_л = \sqrt{3}\Delta U_ф = \sqrt{3}I(R\cos\varphi + X\sin\varphi)$$

$$U_л = U_н$$

При пользовании мощностями:

$$S = P - jQ$$

$$I_a = I\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3}U_н}$$

$$I_p = I\sin\varphi = \frac{Q}{\sqrt{3}U_н}$$

Тогда

$$\Delta U_н = \sqrt{3}(IR\cos\varphi + IX\sin\varphi) = \sqrt{3}\left(\frac{P}{\sqrt{3}U_л}R + \frac{Q}{\sqrt{3}U_л}X\right) = \frac{PR + QX}{U_л}$$

Так как $R = r_0 l$, $X = x_0 l$, то $\Delta U_н = \frac{Pr_0 + Qx_0}{U_н} l$

где r_0 и x_0 – удельные активное и индуктивное сопротивления линии, Ом/км.

Потеря напряжения в процентах:

$$\Delta U_н\% = \frac{\Delta U_н}{U_н} \cdot 100\% = \frac{PR + QX}{U_н^2} 100\%$$

Потеря напряжения в магистральной линии от её начала до самого удаленного электроприемника

$$\Delta U_{н} = \sqrt{3}\sum_{i=1}^{n}\left(I_i R_i \cos\varphi + I_i X_i \sin\varphi\right)$$

или

$$\Delta U_{н} = \sum_{i=1}^{n}\frac{P_i R_i + Q_i X_i}{U_{н}} = \sum_{i=1}^{n}\frac{P_i r_0 + Q_i x_0}{U_{н}} l_i$$

Выбор высоковольтных кабелей

Передача электроэнергии высокого напряжения от распределительных цеховых подстанций к высоковольтным электроприемникам и трансформаторным цеховым подстанциям в основном осуществляется по кабельным линиям.

Выбор сечений по нагреву осуществляется по расчетному току, определяемому по полной расчетной мощности, передаваемой по кабелю. За расчетную мощность S_p одиночного электроприемника принимается его полная номинальная мощность. Расчетная мощность группы высоковольтных электроприемников определяется по суммарной средней мощности группы электроприемников и коэффициенту расчетной нагрузки K_p.

На первом этапе сечения кабелей $s_н$ выбираются по допустимому нагреву расчетным током по условию $I_{дл} \le I_{доп}$

В таблицах справочной литературы допустимые длительные токовые нагрузки указываются для определенной температуры окружающей среды, конкретных условий и способа прокладки. Длительно допустимые токовые нагрузки пересчитываются по формуле:

$$I_{доп}' = I_{доп} \cdot K_1 K_2 K_3, \quad A$$

где $I_{доп}$ - длительно допустимый ток одиночного кабеля, А; K_1 - коэффициент, учитывающий температуру среды, отличную от расчетной; K_2 - коэффициент, учитывающий количество кабелей в траншее, в параллельно проложенных трубах или коробах; K_3 - коэффициент, учитывающий особенности выбора кабелей, прокладываемых в блоках.

Длительные допустимые токи для кабелей с резиновой или пластмассовой изоляцией приняты для температур: жил +65, окружающего воздуха +25 и земли +15 ^{o}C. Допустимые длительные токи для проводов и кабелей, прокладываемых в коробах, лотках и кабельных каналах принимаются как для одиночных кабелей, проложенных в воздухе, с учетом коэффициентов K_2.

Нормированных значений для потери напряжения в цеховых сетях высокого напряжения не устанавливается. Однако, зная напряжение на шинах источника питания и подсчитав потери напряжения в сети, определяют напряжение у потребителей. При необходимости поддержания напряжения у потребителей в узких пределах решается вопрос о способах регулирования напряжения.

Выбор низковольтных кабелей

Определяется $I_{расч}$, А:

- при одном электроприемнике n=1

$$I_{расч} = I_{н} = \frac{P_{н}}{\sqrt{3} U_{н} \eta_{н} \cos\varphi_{н}}$$

;

- при числе электроприемников $n \leq 3$

$$I_{расч} = \frac{\sqrt{(P_{нi})^2 + (Q_{нi})^2}}{\sqrt{3} U_{н}}$$

;

- при числе электроприемников $n > 3$

$$I_{расч} = \frac{к_{с} \sqrt{(P_{нi})^2 + (Q_{нi})^2}}{\sqrt{3} U_{н}}$$

1) Выбираются коммутационные аппараты и ток срабатывания защиты.
Плавкий предохранитель:

$$I_{н.в} \geq I_{расч} ; \qquad I_{с.з.} = I_{н.в} .$$

Автоматический выключатель:

$$I_{н.расч} \geq I_{расч} \qquad I_{расч} \leq I_{с.з} \leq 1{,}25 I_{с.з}$$

2) Вычисляется расчетный ток проводника по условию срабатывания защиты:

$$I_{пр.защ} = K_з I_{с.з}$$

где $K_з$ – коэффициент защиты.

Компенсация реактивной мощности

Большая часть приемников электроэнергии в процессе работы потребляет из сети помимо активной мощности P реактивную мощность Q. Основными потребителями реактивной мощности являются: асинхронные двигатели (60-65% общего потребления реактивной мощности), трансформаторы (20-25%), воздушные ЛЭП, реакторы, преобразователи и другие установки(10%).

Передача значительного количества реактивной мощности по линиям и через трансформаторы системы электроснабжения невыгодна по следующим причинам.

Увеличивается полная установленная мощность генераторов на электростанциях и трансформаторов на подстанциях.

Возникают дополнительные потери активной мощности и электроэнергии во всех элементах системы электроснабжения, обусловленные загрузкой их реактивной мощностью. Так, при передаче активной P и реактивной Q мощностей через элемент с сопротивлением R потери активной мощности составят

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R = \Delta Pa + \Delta Pp.$$

Таким образом, дополнительные потери активной мощности ΔPp, вызванные протеканием реактивной мощности Q пропорциональны квадрату ее величины.

Появляются дополнительные потери напряжения, которые особенно существенны в сетях, питающих системы электроснабжения промышленных предприятий. При передаче мощностей P и Q через элемент сети с активным сопротивлением R и индуктивным X потери напряжения составят

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} = \frac{PR}{U} + \frac{QX}{U} = \Delta Ua + \Delta Up,$$

где ΔUa и ΔUp – потери напряжения, обусловленные, соответственно, активной и реактивной мощностью.

Дополнительные потери напряжения ΔUp увеличивают отклонение напряжения на зажимах приемников от номинального значения при изменениях нагрузок и режимов электрической сети. Это требует увеличения мощности и стоимости средств регулирования напряжения.

Совокупность мероприятий, направленных на снижение потребления реактивной мощности, называется **компенсацией реактивной мощности** в сетях промышленных предприятий.

Согласно действующим в настоящее время «Указаниям по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях» мощность компенсирующего устройства $Q_к$ должна определяться как разность между реактивной мощностью предприятия $Q_р$ и предельной реактивной мощностью $Q_э$, предоставляемой предприятию энергосистемой по условиям режима ее работы:

$$Q_к = Q_р – Q_э = P_р(tg\phi_р - tg\phi_э),$$

где $Q_р = P_р tg\phi_р$ – расчетная мощность реактивной нагрузки предприятия в пункте присоединения к питающей энергосистеме; $Q_э$ – мощность, соответствующая установленным предприятию условиям получения электроэнергии от энергосистемы (оптимальная реактивная мощность); $P_р$ – расчетная мощность активной нагрузки предприятия в том же пункте; $tg\phi_р = Q_р/P_р$ – тангенс угла, соответствующий расчетному коэффициенту мощности нагрузки предприятия; $tg\phi_э = Q_э/P_э$ – тангенс угла, отвечающий установленным предприятию условиям получения мощности $Q_э$, который указывается в технических условиях на присоединение и соответствует оптимальному **коэффициенту мощности**.

Мероприятия по снижению потребления (компенсации) реактивной мощности можно разделить на три группы:

не требующие применения компенсирующих устройств;

связанные с применением компенсирующих устройств;

допускаемые в виде исключения.

Мероприятия, не требующие применения компенсирующих устройств (естественные), включают:

упорядочение технологического процесса, ведущее к улучшению энергетического режима оборудования, а следовательно, и к повышению коэффициента мощности;

переключение статорных обмоток асинхронных двигателей напряжением до 1000 В с треугольника на звезду, если их загрузка составляет менее 40%;

устранение режима работы асинхронных двигателей без нагрузки (холостого хода) путем установки ограничителей холостого хода, когда продолжительность межоперационного периода превышает 10 мин;

замену, перестановку и отключение трансформаторов, загружаемых в среднем менее чем на 30% от их номинальной мощности;

замену малонагруженных двигателей двигателями меньшей мощности при условии, что изъятие избыточной мощности влечет за собой уменьшение суммарных потерь активной энергии в двигателе и электросистеме;

замену асинхронных двигателей синхронными той же мощности, где это возможно по технико-экономическим соображениям;

регулирование напряжения, подводимого к электродвигателю при тиристорном управлении;

повышение качества ремонта двигателей с сохранением их номинальных данных.

Мероприятия, связанные с применением компенсирующих устройств (искусственные), содержат:

установку компенсирующих устройств – батарей статических конденсаторов, синхронных компенсаторов, тиристорных компенсаторов реактивной мощности;

использование синхронных двигателей в качестве синхронных компенсаторов.

Мероприятия, допускаемые в виде исключения, включают:

использование имеющихся на предприятиях синхронных компенсаторов;

синхронизацию асинхронных двигателей с фазным ротором.

Рассмотрим характеристики основных компенсирующих устройств.

Синхронные двигатели. Компенсирующая способность синхронного двигателя (СД) определяется нагрузкой на его валу, напряжением, подведенным к зажимам двигателя, и током возбуждения. С уменьшением тока возбуждения ниже номинального компенсирующая способность двигателя снижается.

Обычно в практических условиях нагрузка СД на валу составляет 50-100% от номинальной. При такой нагрузке, а также при регулировании напряжения, подводимого к электродвигателю, можно использовать электроприводы с синхронными двигателями в качестве компенсаторов реактивной мощности при работе их с опережающим коэффициентом мощности.

Синхронные компенсаторы. Синхронный компенсатор – это синхронный двигатель, работающий в режиме холостого хода, т.е. без нагрузки на валу. Это позволяет специально изготовлять СК с меньшим воздушным зазором и облегченным валом по сравнению с обычным СД.
При перевозбуждении СК генерирует опережающую реактивную мощность, а при недовозбуждении потребляет отстающую реактивную мощность. Это свойство СК используют как для повышения коэффициента мощности, так и для регулирования напряжения в электрических сетях. Преимуществом СК является возможность автоматического плавного регулирования отдаваемой реактивной мощности в широком диапазоне.

Недостатками СК являются:

относительно высокая стоимость, высокие удельные капитальные затраты на компенсацию;

значительно большие потери активной мощности при компенсации (0,027 кВт/кВАр) по сравнению со статическими конденсаторами (0,003 кВт/кВАр);

большая занимаемая производственная площадь и шум при работе.

Указанные особенности СК, а также возможность их пуска только от источников питания большой мощности ограничивают их применение подстанциями энергосистемы.

Батареи статических конденсаторов. Конденсаторные батареи (БСК) изготавливают из определенного числа секций, которые в зависимости от рабочего напряжения и расчетной величины реактивной мощности соединяют между собой параллельно, последовательно или параллельно-последовательно.

Компенсацию реактивной мощности осуществляют с помощью БСК, включаемых обычно параллельно электроприемникам (поперечная компенсация).

Конденсаторы БСК соединяют обычно в треугольник, поскольку при одной и той же емкости конденсаторов на фазу отдаваемая в сеть реактивная мощность в этом случае в три раза больше, чем при соединении их звездой.

Размещение БСК в сетях должно удовлетворять условию наибольшего снижения потерь активной мощности от реактивных нагрузок.

При этом возможны следующие виды компенсации:

и н д и в и д у а л ь н а я - с размещением конденсаторов непосредственно у приемников. В этом случае от реактивных токов разгружается вся сеть системы электроснабжения (сети внешнего и внутреннего электроснабжения и распределительные сети до приемников);

г р у п о в а я - с размещением конденсаторов на распределительных пунктах. В этом случае распределительная сеть до приемников не разгружается от реактивных токов, но значительно увеличивается время использования БСК по сравнению с индивидуальной компенсацией;

ц е н т р а л и з о в а н н а я - с подключением БСК на шины 6-10 кВ ГПП или ЦРП. В этом случае от реактивных токов разгружаются трансформаторы ГПП и СЕТИ энергосистемы, но не питающая и распределительная сети 6-10 кВ.
При установке конденсаторов 6-10 кВ мощность БСК не должна быть менее 400 квар при присоединении конденсаторов через отдельный выключатель и не менее 100 квар при присоединении конденсаторов через общий с приемниками выключатель. Мощность БСК при групповой компенсации принимать не менее 30 квар.

Конденсаторы на напряжение 6-10 кВ изготавливают только однофазными. БСК напряжением 6-10 кВ подключают к шинам обычно через отдельный выключатель. Для защиты конденсаторов от коротких замыканий в каждой фазе БСК устанавливают высоковольтные предохранители.

Наибольшее применение находят комплектные конденсаторные установки (ККУ). В ККУ используют конденсаторы из бумаги, пропитанной минеральным маслом, соволом или другим жидким диэлектриком. Эти конденсаторы различаются по напряжению, числу фаз, роду установки и виду пропитки.

На напряжение 380 В выпускают конденсаторные установки серии ККУ-0,38 мощностью 80-280 квар, а также серии УК-0,38 мощностью 110-900 квар.
На напряжение 6-10 кВ выпускают ККУ серии УК-6/10 мощностью 450-1800 квар для внутренней и наружной установки с устройством для автоматического регулирования мощности батарей по напряжению (УК-6/10Н).