

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Электроснабжение»

В.Н. Радкевич

РАСЧЕТ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Учебно-методическое пособие  
по курсовому и дипломному проектированию

М и н с к 2 0 0 4

УДК 658.26:311.1016.25(075.8)

ББК 31.19 я 7

Р 15

Рецензенты:

М.И.Фурсанов, В.Н. Мазуркевич

**Радкевич В.Н.**

Р 15 Расчет компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий: Учебно-метод. пособие по курсовому и дипломному проектированию. /В.Н. Радкевич. – Мн.: БНТУ, 2004. – 40 с.

ISBN 985-479-093-2.

В пособии содержатся основные положения и рекомендации по расчету компенсации реактивной мощности в электрических сетях общего назначения промышленных предприятий. Излагаемый материал базируется на действующей нормативно-технической документации и иллюстрируется поясняющими примерами. Приводится необходимая справочная информация.

Издание предусмотрено для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» (по отраслям). Оно может быть полезно и студентам других специальностей, изучающим вопросы компенсации реактивной мощности в электроустановках.

**УДК 658.26:311.1.016.25(075.8)**

**ББК 31.19 я 7**

ISBN 985-479-093-2

© Радкевич В.Н., 2004

## Содержание

Введение. . . . .	4
1. Общие положения по расчету компенсации реактивной мощности. . . . .	5
2. Определение мощности батарей конденсаторов, устанавливаемых в сети до 1 кВ. . . . .	7
3. Определение реактивной мощности, генерируемой синхронными двигателями. . . . .	11
4. Расчет экономического значения реактивной мощности, потребляемой из сети энергосистемы. . . . .	19
5. Анализ баланса реактивной мощности на границе балансовой принадлежности электрической сети. . . . .	21
6. Определение целесообразности более полного использования реактивной мощности синхронных двигателей. . . . .	22
7. Определение целесообразности дополнительной установки батарей низковольтных конденсаторов. . . . .	27
8. Определение целесообразности установки батарей высоковольтных конденсаторов. . . . .	36
9. Размещение конденсаторных установок и управление ими. . .	37
Список использованных источников. . . . .	38

## Введение

Элементы систем электроснабжения и электроприемники переменного тока, обладающие индуктивностью, наряду с активной мощностью потребляют и реактивную мощность (РМ). Активная мощность, генерируемая электростанциями, способна совершать работу и преобразовываться в механическую, тепловую, световую и химическую энергию. Эта мощность обусловлена преобразованием энергии первичного двигателя, полученной от природного источника, в электроэнергию. Реактивная мощность не требует для своего производства затрат каких-либо видов энергии, не преобразовывается в другие виды мощности, не совершает работу. Она обусловлена наличием реактивных элементов, обладающих емкостью и индуктивностью и способных накапливать и отдавать электромагнитную энергию.

Несмотря на специфические особенности, в электроэнергетике РМ придают такой же смысл, что и активной мощности. Для нее приняты такие же понятия: потребление, генерирование, передача, потери и баланс мощности. При этом считается, что если ток отстает по фазе от приложенного к рассматриваемому элементу напряжения (индуктивный характер нагрузки), то РМ потребляется данным элементом и имеет положительный знак. В случае, когда ток опережает напряжение (емкостный характер нагрузки), РМ генерируется и имеет отрицательное значение.

Реактивная мощность генерируется генераторами электростанций, линиями электропередачи, синхронными компенсаторами и синхронными электродвигателями, батареями статических конденсаторов, статическими источниками РМ и т.д.

Концентрация производства РМ во многих случаях не является эффективной, так как ее передача по электрическим сетям снижает пропускную способность линий и трансформаторов по активной мощности и вызывает дополнительные потери активной мощности и напряжения.

При проектировании и эксплуатации систем электроснабжения стремятся снизить потребляемую промышленными предприятиями РМ до оптимального значения. С этой целью осуществляется компенсация РМ, под которой понимается установка местных источников РМ, благодаря чему повышается пропускная способность эле-

ментов систем электроснабжения, снижаются потери мощности и энергии, повышаются уровни напряжения.

Вид, мощность, размещение и режим работы источников РМ должны обосновываться соответствующими технико-экономическими расчетами.

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО РАСЧЕТУ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Выбор средств компенсации РМ в электрических сетях промышленных предприятий с присоединенной мощностью 750 кВ А и более производится в соответствии с РТМ 36.18.32.6-92 "Указания по проектированию установок компенсации реактивной мощности в электрических сетях общего назначения". В качестве источников РМ на промышленных предприятиях используются в первую очередь батареи статических конденсаторов напряжением до 1 кВ и синхронные электродвигатели напряжением 6–10 кВ. Учитывается также РМ, которую целесообразно получать из энергосистемы. Конденсаторные установки на напряжении выше 1 кВ при соответствующем обосновании могут использоваться лишь на предприятиях с непрерывным режимом работы. Ограничение применения батарей высоковольтных конденсаторов (БВК) объясняется трудностями осуществления частой коммутации емкостных нагрузок.

При расчете компенсации РМ синхронные двигатели (СД) 6 – 10 кВ делятся на две группы. В первую входят наиболее экономичные СД, имеющие единичную мощность  $P_{\text{дн}} > 2500$  кВт или частоту вращения ротора  $n > 1000$  мин<sup>-1</sup>. Располагаемая реактивная мощность  $Q_{\text{дн}}$  таких двигателей используется полностью без обосновывающих расчетов. Под располагаемой мощностью понимается максимальная РМ СД, генерируемая при номинальном токе возбуждения, номинальном напряжении статора и при нагрузке двигателя по активной мощности, меньшей номинальной. Так как СД, как правило, имеют загрузку по активной мощности, меньшую 85 %, то располагаемая РМ СД может быть принята на 20 % больше номинальной. Отметим, что генерируемая такими двигателями суммарная величина  $Q_{\text{дн}}$  должна быть учтена при определении расчетных нагрузок предприятия.

Во вторую группу входят СД, имеющие  $P_{\text{дн}} \leq 2500$  кВт и  $n \leq 1000$  мин<sup>-1</sup>. Использование СД этой группы для компенсации РМ требует технико-экономического обоснования.

Расчет компенсации РМ выполняется в несколько этапов. Первоначально предприятие, состоящее из совокупности отдельных зданий, может быть разбито на несколько технологически концентрированных групп цеховых трансформаторов одинаковой единичной мощности. В пределах каждой группы все трансформаторы должны иметь один и тот же коэффициент загрузки и один вид компенсирующих устройств, которые предполагается использовать. Предварительно необходимо определить расчетные нагрузки трансформаторов, учитывая предельные возможности передачи мощности по линиям до 1 кВ.

Для каждой группы трансформаторов принимается одинаковые номинальная мощность и коэффициент загрузки, после чего определяется минимальное число трансформаторов. Затем производится расчет установленной мощности батарей низковольтных конденсаторов (БНК) в сетях до 1 кВ для каждого цехового трансформатора, а также для предприятия в целом. После этого уточняются активная и реактивная нагрузки предприятия с учетом потерь мощности в трансформаторах и вычисляется экономическое значение РМ, потребляемой из энергосистемы.

На следующем этапе расчета определяется реактивная мощность, которую целесообразно получить от СД напряжением 6 – 10 кВ.

Анализ баланса РМ на границе раздела предприятия и энергосистемы определяет дальнейший порядок расчетов. Если реактивной мощности, поступающей из энергосистемы, а также от БНК и СД 6 – 10 кВ, не хватает для покрытия реактивных нагрузок потребителя, то выявляется целесообразность более полного использования РМ СД, имеющих  $P_{\text{дн}} \leq 2500$  кВт и  $n \leq 1000$  мин<sup>-1</sup>, когда их располагаемая мощность использована на предыдущих этапах расчета не полностью. В случае, когда и дополнительная РМ СД 6 – 10 кВ не обеспечивает баланса РМ, для 1-, 2- и 3-сменных предприятий рассматривается целесообразность дополнительной установки БНК, а для предприятий с непрерывным режимом работы – БВК. При нецелесообразности дополнительной установки БНК или БВК недостающую РМ получают из энергосистемы.

При выполнении технико-экономических расчетов в качестве базовых приняты стоимостные показатели, установленные для Республики Беларусь преискурантом № 09-01 "Тарифы на электрическую и тепловую энергию", введенным в действие с 01.01.91 г., а также по [3].

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ БАТАРЕЙ КОНДЕНСАТОРОВ, УСТАНОВЛИВАЕМЫХ В СЕТИ ДО 1 КВ

Для каждой группы цеховых трансформаторов одинаковой мощности определяется минимальное их число, необходимое для питания расчетной активной нагрузки, по выражению

$$N_{T \min} = \frac{P_{\text{рн}}}{\beta_T S_T}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{рн}}$  – расчетная активная нагрузка на напряжении до 1 кВ данной группы трансформаторов;

$\beta_T$  – коэффициент загрузки трансформаторов, определяемый в зависимости от категории электроприемников по надежности электроснабжения;

$S_T$  – номинальная мощность цеховых трансформаторов, принимаемая в зависимости от удельной плотности нагрузки.

Полученная по (1) величина округляется до ближайшего большего целого числа.

Наибольшее значение РМ, которое может быть передано через трансформаторы в сеть до 1 кВ при коэффициенте загрузки трансформаторов  $\beta_T \leq 0,9$ , определяется по следующим выражениям:

$$Q_T = \sqrt{(1,1S_T\beta_T N_{T \min})^2 - P_{\text{рн}}^2} \quad (2)$$

для масляных трансформаторов;

$$Q_T = \sqrt{(1,05S_T\beta_T N_{T \min})^2 - P_{\text{рн}}^2} \quad (3)$$

для сухих трансформаторов.

Отметим, что коэффициенты 1,1 и 1,05 учитывают допустимую систематическую перегрузку трансформаторов в течение одной смены при коэффициенте сменности по энергоиспользованию менее 0,9.

Суммарная мощность БНК по критерию выбора минимального числа трансформаторов

$$Q_{\text{НК1}} = Q_{\text{РН}} - Q_{\text{Т}}, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{РН}}$  – расчетная реактивная нагрузка до 1 кВ рассматриваемой группы трансформаторов.

Если  $Q_{\text{НК1}} < 0$ , то следует принять  $Q_{\text{НК1}} = 0$ .

Величина  $Q_{\text{НК1}}$  распределяется между цеховыми трансформаторами прямо пропорционально их реактивным нагрузкам. Затем выбираются стандартные номинальные мощности БНК для сети до 1 кВ каждого трансформатора (табл.1).

Т а б л и ц а 1

Основные технические характеристики низковольтных комплектных конденсаторных установок

Тип	Номинальная мощность, квар	Мощность ступени регулирования, квар	Число ступеней, шт.
1	2	3	4
УКМ58-0,4-100-33½У3	100	33½	3
УКМ58-0,4-200-33½У3	200	33½	6
УКМ58-0,4-268-67У3	268	67	4
УКМ58-0,4-402-67У3	402	67	6
УКМ58-0,4-536-67У3	536	67	8
УКБН-0,38-100-50У3	100	50	2
УКБТ-0,38-150-У3	150	150	1
УКТ-0,38-150У3	150	150	1
УКБ-0,38-150У3	150	—	—

1	2	3	4
УКБН-0,38-200-50У3	200	50	4
УКЛН-0,38-300-150У3	300	150	2
УКЛН-0,38-450-150У3	450	150	3
УКЛН-0,38-600-150У3	600	150	4
АКУ 0,4-100-10У3	100	10	10
АКУ 0,4-100-25У3	100	25	4
АКУ 0,4-125-25У3	125	25	5
АКУ 0,4-150-10У3	150	10	15
АКУ 0,4-150-25У3	150	25	6
АКУ 0,4-175-25У3	175	25	7
АКУ 0,4-200-20У3	200	20	10
АКУ 0,4-200-25У3	200	25	8
АКУ 0,4-220-20У3	220	20	11
АКУ 0,4-225-25У3	225	25	9
АКУ 0,4-240-20У3	240	20	12
АКУ 0,4-240-25У3	250	25	10
АКУ 0,4-260-20У3	260	20	13
АКУ 0,4-260-25У3	275	25	11
АКУ 0,4-280-20У3	280	20	14
АКУ 0,4-300-20У3	300	20	15
АКУ 0,4-300-25У3	300	25	12
АКУ 0,4-325-25У3	325	25	13
АКУ 0,4-330-15У3	330	15	22
АКУ 0,4-350-25У3	350	25	14
АКУ 0,4-375-25У3	375	25	15
АКУ 0,4-380-20У3	380	20	19
АКУ 0,4-400-20У3	400	20	20
АКУ 0,4-400-25У3	400	25	16
АКУ 0,4-420-20У3	420	20	21
АКУ 0,4-425-25У3	425	25	17
Автоматизированные конденсаторные установки настенного исполнения			
АКУ 0,4-50-10У3	50	10	5
АКУ 0,4-50-12,5У3	50	12,5	4
АКУ 0,4-75-12,5У3	75	12,5	6
АКУ 0,4-100-25У3	100	100	4

**Пример 1.** Определите мощность БНК для цеха, имеющего нагрузки  $P_{PH} = 3120$  кВт и  $Q_{PH} = 2670$  квар. Единичная номинальная мощность масляных трансформаторов типа ТМЗ  $S_T = 1000$  кВ·А, коэффициент загрузки  $\beta_T = 0,8$ .

**Решение.** По выражению (1) определяем минимальное число цеховых трансформаторов:

$$N_{T \min} = \frac{3120}{0,8 \cdot 1000} = 3,9 : N_{T \min} = 4.$$

Наибольшая реактивная мощность, которая может быть передана через трансформаторы в сеть до 1 кВ, по (2) равна

$$Q_T = \sqrt{(1,1 \cdot 1000 \cdot 0,8 \cdot 4)^2 - 3120^2} = 1630 \text{ квар.}$$

Суммарная мощность БНК по (4):

$$Q_{HK1} = 2670 - 1630 = 1040 \text{ квар.}$$

Мощность БНК, приходящаяся на один трансформатор, определяется по формуле

$$Q_{HK} = \frac{Q_{HK1}}{N_{T \min}}; \quad Q_{HK} = \frac{1040}{4} = 260 \text{ квар.}$$

По табл.1 принимаем ближайшую типовую мощность БНК

$$Q_{HK\Phi} = 260 \text{ квар.}$$

Типономинал установки – АКУ-0,4 – 260 – 20УЗ (20 – мощность ступени в квар).

Определим суммарную установленную мощность БНК цеха:

$$Q_{HK\Phi 1} = 4 \cdot 260 = 1040 \text{ квар.}$$

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Каждая группа высоковольтных СД в зависимости от номинальной мощности и частоты вращения ротора рассматривается индивидуально в целях использования их для компенсации реактивной мощности. Располагаемая реактивная мощность СД, имеющих  $P_{\text{дн}} > 2500$  кВт или  $n > 1000$  мин<sup>-1</sup> (независимо от величины  $P_{\text{дн}}$ ), используется для компенсации РМ во всех случаях без обосновывающих расчетов.

Величина РМ, генерируемой этими группами СД,

$$Q_{\text{д1}} = \sum (Q_{\text{др}} - Q_{\text{дн}}) \approx 0,2 \cdot Q_{\text{дн}}. \quad (5)$$

Использование для компенсации РМ СД, имеющих  $P_{\text{дн}} \leq 2500$  кВт и  $n \leq 1000$  мин<sup>-1</sup>, должно быть технико-экономически обосновано. Для этого необходимо найти соотношение удельной стоимости потребления РМ и энергии из энергосистемы, не превышающего экономического значения, и удельной стоимости потерь активной мощности при генерировании РМ в СД и конденсаторных установках.

Удельная стоимость экономического потребления РМ и энергии при наличии на предприятии приборов учета максимальной РМ вычисляется по выражению

$$C_{QЭ} = (c_1 + d_1 T_{MQЭ} \cdot 10^{-2}) \cdot 1,6 K_1, \quad (6)$$

а при отсутствии таких приборов – по выражению

$$C_{QЭ} = (d_1 T_{MQЭ} \cdot 10^{-2}) \cdot 1,6 K_1, \quad (7)$$

где  $c_1$  – плата за 1 квар потребляемой РМ;  $c_1 = 1,2$  руб./квар·год);

$d_1$  – плата за 1 квар·ч потребляемой реактивной энергии, принимаемая равной 0,03 коп./квар·ч при расчетах по выражению (6) и 0,08 коп./квар·ч – по выражению (7);

$T_{MQЭ}$  – годовое число часов использования максимальной РМ при потреблении, не превышающем экономического значения;

$K_1$  – коэффициент, отражающий изменение цен на конденсаторные установки.

Величина  $K_1$  может быть принята равной коэффициенту увеличения ставки двухставочного тарифа на электроэнергию  $K_W$  (по сравнению со значениями основной ставки  $a = 60$  руб./кВт·год) и дополнительной ставки  $b = 1,8$  коп./кВт·ч), установленными для Беларуси преискурantom № 09-01, введенным в действие с 01.01.91 г), который определяется по формуле

$$K_W = \frac{aK_{W1} + bT_M \cdot 10^{-2} K_{W2}}{a + bT_M \cdot 10^{-2}}, \quad (8)$$

где  $K_{W1}$  и  $K_{W2}$  – коэффициенты увеличения основной и дополнительной ставок тарифа на электроэнергию (определяются делением действующих ставок тарифа на 60 и  $1,8 \cdot 10^{-2}$  соответственно);

$T_M$  – число часов использования максимальной нагрузки предприятия.

Величина  $T_{M\text{ОЭ}}$  определяется в зависимости от соотношения степени компенсации  $\psi$  и отношения натуральной минимальной нагрузки к натуральной максимальной нагрузке  $K_M$  по следующим выражениям:

$$\text{при } \psi \leq K_M \quad T_{M\text{ОЭ}} = \frac{T_\Gamma (K_M - 2\psi + 1)}{2(1 - \psi)}; \quad (9)$$

$$\text{при } \psi > K_M \quad T_{M\text{ОЭ}} = \frac{T_\Gamma (1 - \psi)}{2(1 - K_M)} \quad (10)$$

где  $T_\Gamma$  – годового фонд рабочего времени.

Величина  $\psi$  может быть принята для подстанций с первичным напряжением 35, 110, 220, 500 кВ равной соответственно 0,7; 0,6; 0,5; 0,25, а при питании от шин генераторного напряжения – 0,25.

Значение  $K_M$  принимается для 1-, 2-, 3-сменной и непрерывной работы (НР) равным соответственно 0,9; 0,8; 0,7; 0,8.

Годовой фонд рабочего времени  $T_\Gamma$  для 1-, 2-, 3- сменной и непрерывной работы соответственно равен 2000, 4000, 6000, 8500 ч.

Величины  $T_{M\text{ОЭ}}$  для указанных выше значений  $T_\Gamma$ ,  $K_M$  и  $\psi$  приведены в табл. 2.

Годовое число часов использования максимальной реактивной мощности

Число смен	$T_{\Gamma}$ , ч	$K_M$	$T_{MQЭ}$ , ч, при значениях $\psi$			
			0,25	0,5	0,6	0,7
1	2000	0,9	1867	1800	1750	1667
2	4000	0,8	3467	3200	3000	2667
3	6000	0,7	4800	4200	3750	3000
НР	8500	0,8	7367	6800	6375	5667

Удельная стоимость потерь активной мощности в СД и компенсирующих устройствах

$$C_{\text{PГ}} = a \cdot K_{\text{W1}} + b T_{\Gamma} \cdot 10^{-2} \cdot K_{\text{W2}}. \quad (11)$$

Целесообразность использования СД для компенсации РМ при одновременном потреблении РМ из энергосистемы, не превышающем экономическое значение, определяется соотношением

$$R = \frac{C_{\text{QЭ}}}{C_{\text{PГ}}}. \quad (12)$$

Используя  $R$ , по специальным таблицам находят оптимальные коэффициенты загрузки СД по РМ  $\alpha$ . Например, в табл. 3 и 4 для  $\alpha = 0,2; 0,6; 1; 1,2$  приведены минимальные значения  $R$ , при которых применение РМ СД экономически целесообразно по сравнению с потреблением из энергосистемы. При значении  $R$ , находящемся в интервале между приведенными в табл. 3 и 4 значениями, величина  $\alpha$  определяется линейной интерполяцией. При значениях  $R$ , меньших, чем указаны в табл. 3 и 4 для  $\alpha = 0,2$ , использование генерируемой СД РМ экономически нецелесообразно.

Суммарная величина РМ, генерируемая СД, имеющими  $P_{\text{дн}} \leq 2500$  кВт и  $n \leq 1000$  мин<sup>-1</sup>, определяется по формуле

$$Q_{д2} = \sum \alpha \cdot Q_{дн}. \quad (13)$$

РМ СД, которую экономически целесообразно использовать для компенсации реактивной мощности при одновременном оптимальном потреблении РМ из энергосистемы, вычисляется по выражению

$$Q_{сд} = Q_{д1} + Q_{д2}. \quad (14)$$

Отметим, что СД, которые нецелесообразно применять для компенсации РМ, должны работать с  $\cos\varphi = 1$ .

Т а б л и ц а 3

### Синхронные электродвигатели 6 кВ

Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	$\alpha$	Минимальное значение $R$ при номинальной мощности СД, кВт									
		320	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
100	0,2	–	–	–	–	0,03	0,03	0,03	0,025	0,02	0,015
	0,6	–	–	–	–	0,04	0,04	0,04	0,035	0,03	0,025
	1,0	–	–	–	–	0,05	0,05	0,05	0,04	0,035	0,035
	1,2	–	–	–	–	0,055	0,055	0,055	0,045	0,04	0,04
150	0,2	0,04	0,03	0,03	–	–	–	–	–	–	–
	0,6	0,055	0,045	0,04	–	–	–	–	–	–	–
	1,0	0,08	0,06	0,05	–	–	–	–	–	–	–
	1,2	0,08	0,065	0,06	–	–	–	–	–	–	–
167	0,2	0,04	0,035	0,03	0,03	0,025	–	–	–	–	–
	0,6	0,05	0,045	0,04	0,04	0,035	–	–	–	–	–
	1,0	0,065	0,055	0,05	0,05	0,045	–	–	–	–	–
	1,2	0,065	0,06	0,055	0,055	0,05	–	–	–	–	–
187	0,2	0,035	0,03	0,025	0,02	0,02	0,02	0,02	–	–	–
	0,6	0,045	0,035	0,035	0,03	0,03	0,03	0,025	–	–	–
	1,0	0,06	0,055	0,05	0,045	0,045	0,04	0,03	–	–	–
	1,2	0,065	0,06	0,055	0,05	0,05	0,045	0,035	–	–	–

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
250	0,2	0,035	0,03	0,025	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	–	–
	0,6	0,045	0,04	0,03	0,03	0,03	0,052	0,025	0,025	0,02	–
	1,0	0,06	0,05	0,04	0,035	0,035	0,03	0,03	0,03	0,025	0,02
	1,2	0,065	0,055	0,045	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,0	0,02
300	0,2	0,035	0,03	0,025	0,025	0,025	0,025	0,02	–	–	–
	0,6	0,045	0,04	0,035	0,03	0,03	0,03	0,025	0,02	–	–
	1,0	0,06	0,05	0,045	0,04	0,035	0,035	0,03	0,025	0,02	–
	1,2	0,065	0,06	0,05	0,045	0,04	0,04	0,035	0,03	0,025	0,02
375	0,2	0,035	0,03	0,025	0,02	0,02	0,02	–	–	–	–
	0,6	0,045	0,04	0,035	0,025	0,025	0,025	0,02	0,02	–	–
	1,0	0,055	0,045	0,04	0,03	0,03	0,03	0,025	0,025	0,02	–
	1,2	0,06	0,055	0,045	0,035	0,035	0,035	0,03	0,03	0,025	0,02
500	0,2	–	0,02	0,02	0,02	0,02	–	–	–	–	–
	0,6	–	0,025	0,025	0,025	0,025	0,02	0,02	–	–	–
	1,0	–	0,035	0,035	0,03	0,03	0,025	0,025	0,02	–	–
	1,2	–	0,04	0,04	0,035	0,035	0,03	0,028	0,025	0,02	–
600	0,2	–	–	–	0,02	–	–	–	–	–	–
	0,6	–	–	–	0,025	0,02	0,02	0,02	–	–	–
	1,0	–	–	–	0,03	0,025	0,025	0,025	0,02	–	–
	1,2	–	–	–	0,035	0,03	0,03	0,028	0,025	0,02	–
750	0,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	0,6	–	–	–	–	0,02	–	–	–	–	–
	1,0	–	–	–	–	0,025	0,02	–	–	–	–
	1,2	–	–	–	–	0,025	0,025	0,02	–	–	–
1000	0,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	0,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	1,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	1,2	–	–	–	–	0,02	–	–	–	–	–

## Синхронные электродвигатели 10 кВ

Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	$\alpha$	Минимальное значение $R$ при номинальной мощности СД, кВт			
		1250	1600	2000	2500
250	0,2	0,016	–	–	–
	0,6	0,025	–	–	–
	1,0	0,03	0,02	–	–
	1,2	0,035	0,025	0,02	–
300	0,2	0,015	0,015	–	–
	0,6	0,025	0,025	0,02	–
	1,0	0,03	0,03	0,025	0,02
	1,2	0,035	0,035	0,03	0,023
375	0,2	0,015	–	–	–
	0,6	0,025	0,02	0,02	0,02
	1,0	0,03	0,027	0,025	0,022
	1,2	0,035	0,03	0,028	0,025
500	0,2	0,015	–	–	–
	0,6	0,025	0,02	–	–
	1,0	0,03	0,027	0,02	–
	1,2	0,035	0,03	0,022	0,02
600	0,2	–	–	–	–
	0,6	–	–	–	–
	1,0	0,02	0,02	0,02	–
	1,2	0,025	0,025	0,022	0,02
750	0,2	–	–	–	–
	0,6	–	–	–	–
	1,0	0,02	0,02	0,02	–
	1,2	0,025	0,25	0,022	0,02
1000	0,2	–	–	–	–
	0,6	0,017	–	–	–
	1,0	0,022	0,02	–	–
	1,2	0,025	0,022	0,018	–

**Пример 2.** Химический комбинат получает питание от понижающей подстанции 220/10,5 кВ. В технологическом процессе используются следующие группы СД 10 кВ:

- 1) 6 двигателей по 630 кВт,  $n = 500 \text{ мин}^{-1}$ ;
- 2) 4 двигателя по 800 кВт,  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ ;
- 3) 4 двигателя по 1250 кВт,  $n = 500 \text{ мин}^{-1}$ ;
- 4) 2 двигателя по 3200 кВт,  $n = 750 \text{ мин}^{-1}$ .

Все синхронные двигатели имеют  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,9$ ;  $\text{tg} \varphi_{\text{ном}} = 0,48$ .

Комбинат работает в непрерывном режиме. Время использования максимальной нагрузки  $T_{\text{м}} = 6200 \text{ ч}$ . На предприятии установлены приборы учета максимальных нагрузок. Расчет за электроэнергию производится по двухставочному тарифу. Основная ставка тарифа  $a = 100134 \text{ руб./кВт}\cdot\text{год}$ , а дополнительная  $- b = 77,5 \text{ руб/кВт}\cdot\text{ч}$ .

Определите величину РМ, которую экономически целесообразно получать от СД 10 кВ.

**Решение.** Так как в табл. 4 отсутствуют СД мощностью 630 кВт, то их нецелесообразно применять для компенсации РМ. Эти двигатели должны работать с  $\cos \varphi = 1$ .

Наиболее экономичными являются СД мощностью 800 кВт ( $n > 1000 \text{ мин}^{-1}$ ) и 3200 кВт ( $P_{\text{дн}} > 2500 \text{ кВт}$ ). С учетом того что  $Q_{\text{дн}} = P_{\text{дн}} \cdot \text{tg} \varphi_{\text{ном}}$ , величину РМ, генерируемой данными электродвигателями, определим по формуле (5):

$$Q_{\text{д1}} = 0,2 \cdot (4 \cdot 800 \cdot 0,48 + 2 \cdot 3200 \cdot 0,48) = 922 \text{ квар.}$$

Найдем коэффициенты увеличения ставок тарифа на электроэнергию по выражению (8):

$$K_{\text{w1}} = \frac{100134}{60} = 1669;$$

$$K_{\text{w2}} = \frac{77,5}{1,8 \cdot 10^{-2}} = 4306;$$

$$K_{\text{w}} = \frac{60 \cdot 1669 + 1,8 \cdot 6200 \cdot 10^{-2} \cdot 4306}{60 + 1,8 \cdot 6200 \cdot 10^{-2}} = 3384.$$

Для предприятий с непрерывной работой  $K_{\text{м}} = 0,8$ . При высшем напряжении понижающей подстанции 220 кВ степень компенсации РМ  $\psi = 0,5$ . Тогда по табл.2 определяем  $T_{\text{мОЭ}} = 6800 \text{ ч}$ .

По выражению (6), приняв  $K_1 = K_w$ , вычислим удельную стоимость экономического потребления РМ из энергосистемы:

$$C_{OЭ} = (1,2 + 0,03 \cdot 6800 \cdot 10^{-2}) \cdot 1,6 \cdot 3384 = 17543 \text{ руб./квар.}$$

Удельную стоимость потерь активной мощности в СД при непрерывном режиме работы ( $T_r = 8500$  ч.) определяем по формуле (11):

$$C_{PГ} = 60 \cdot 1669 + 1,8 \cdot 8500 \cdot 10^{-2} \cdot 4306 = 758958 \text{ руб./кВт.}$$

Соотношение удельных стоимостей  $C_{OЭ}$  и  $C_{PГ}$  определяется коэффициентом

$$R = \frac{17543}{758958} = 0,023.$$

По табл. 4 для  $R = 0,023$  путем линейной интерполяции для СД мощностью 1250 кВт и  $n = 500 \text{ мин}^{-1}$  найдем значение коэффициента загрузки по РМ:

$$a = 0,2 + \frac{0,023 - 0,015}{0,025 - 0,015} (0,6 - 0,2) = 0,52.$$

Реактивная мощность, генерируемая четырьмя СД с  $P_{дн} = 1250$  кВт, вычисляется по выражению (13):

$$Q_{л2} = 0,52 \cdot 4 \cdot 1250 \cdot 0,48 = 1248 \text{ квар.}$$

Суммарная РМ, которую экономично получать от СД комбината:

$$Q'_{сд} = 922 + 1248 = 2170 \text{ квар.}$$

#### 4. РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ИЗ СЕТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Экономически целесообразное значение РМ, потребляемой предприятием в часы больших нагрузок из сети энергосистемы, определяется по выражению

$$Q_{\text{Э}} = \bar{P}_p \cdot \text{tg} \varphi_{\text{Э}}, \quad (15)$$

где  $\bar{P}_p$  – математическое ожидание расчетной активной нагрузки потребителя на границе балансового разграничения с энергосистемой;

$\text{tg} \varphi_{\text{Э}}$  – максимальное значение экономического коэффициента РМ.

Математическое ожидание расчетной активной и реактивной нагрузки потребителя:

$$\bar{P}_p = k_0 \cdot P_p; \quad (16)$$

$$\bar{Q}_p = k_0 \cdot Q_p, \quad (17)$$

где  $P_p$  и  $Q_p$  – расчетная активная и реактивная мощность предприятия (с учетом потерь в трансформаторах);

$k_0$  – коэффициент приведения расчетной нагрузки к математическому ожиданию,  $k_0 = 0,9$ .

В расчетах компенсации значение экономического коэффициента РМ определяется [1] по выражению

$$\text{tg} \varphi_{\text{Э}} = \frac{240 \cdot \text{tg} \varphi_{\text{б}} \cdot K_1}{a \cdot d_{\text{max}} + 50 \cdot b}, \quad (18)$$

где  $d_{\text{max}}$  – отношение потребления энергии предприятием в квартале максимальной нагрузки энергосистемы к потреблению в квартале наибольшей нагрузки предприятия (при отсутствии таких сведений принимают  $d_{\text{max}} = 1$ );

$a$  – основная ставка действующего тарифа на активную мощность, руб.(кВт·год);

$b$  – дополнительная ставка действующего тарифа на активную электроэнергию, коп./кВт·ч;

$\text{tg}\phi_6$  – базовый коэффициент РМ, принимаемый равным 0,25; 0,3 и 0,4 для сетей 6–20 кВ, присоединенных к шинам подстанций с высшим напряжением соответственно 35,110 и 220–330 кВ [1].

Если в результате расчета по формуле (18) окажется, что  $\text{tg}\phi_3 > 0,6$ , его значение принимают равным 0,6. Для шин 6 – 20 кВ понижающих подстанций с напряжением 500 кВ и выше и шин генераторного напряжения  $\text{tg}\phi_3 = 0,6$ . Для потребителей, питающихся от сети до 1 кВ энергоснабжающей организации, принимается  $\text{tg}\phi_3 = 0,15$  [2].

**Пример 3.** Определите экономическое значение реактивной мощности, потребляемой в часы максимальных нагрузок из сети энергосистемы, для приборостроительного завода, питающегося от понижающей подстанции 110/10,5 кВ. Расчетная активная нагрузка завода с учетом потерь мощности в цеховых трансформаторах  $P_p = 10500$  кВт,  $T_m = 3200$  ч. Основная ставка тарифа на электроэнергию  $a = 100134$  руб./(кВт·год), дополнительная  $b = 77,5$  руб./кВт·ч.

**Решение.** Определяем коэффициенты увеличения ставок тарифа на электроэнергию:

$$K_{w1} = \frac{100134}{60} = 1669;$$

$$K_{w2} = \frac{77,5}{1,8 \cdot 10^{-2}} = 4306;$$

$$K_1 = K_w = \frac{60 \cdot 1669 + 1,8 \cdot 3200 \cdot 10^{-2} \cdot 4306}{60 + 1,8 \cdot 3200 \cdot 10^{-2}} = 2961.$$

Так как сведений о потреблении электроэнергии заводом в кварталах максимальных нагрузок энергосистемы и предприятия не имеется, то принимаем  $d_{\max} = 1$ . Для сети 10 кВ, присоединенной к шинам подстанций с высшим напряжением 110 кВ, базовый коэффициент РМ  $\text{tg}\phi_6 = 0,3$ . В этом случае максимальное значение экономического коэффициента РМ по выражению (18):

$$\operatorname{tg} \varphi_{\Sigma} = \frac{240 \cdot 0,3 \cdot 2961}{100134 + 50 \cdot 77,5 \cdot 100} = 0,44.$$

Вычисляем по формуле (16) математическое ожидание расчетной активной нагрузки завода:

$$\bar{P}_p = 0,9 \cdot 10500 = 9450 \text{ кВт.}$$

Экономически целесообразное значение РМ, потребляемой в часы максимальных нагрузок из сети энергосистемы, определяется по выражению (15):

$$Q_{\Sigma} = 9450 \cdot 0,44 = 4158 \text{ квар.}$$

## **5. АНАЛИЗ БАЛАНСА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ГРАНИЦЕ БАЛАНСОВОЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

Разграничение системы электроснабжения промышленного предприятия и энергосистемы по балансовой принадлежности производится, как правило, на уровне шин 6,3 – 10,5 кВ питающей подстанции. Для данного уровня вычисляется величина

$$\Delta Q' = \bar{Q}_p - Q_{\text{НК1}} - Q_{\text{СД}} - Q_{\Sigma} \quad (19)$$

Если  $\Delta Q' < 0$ , то рекомендуется уменьшить  $Q_{\Sigma}$  до обеспечения условия  $\Delta Q' = 0$ . На этом расчет компенсации РМ заканчивается.

При установке в узле нагрузки большого числа СД, генерирующих РМ, численно превосходящую расчетную реактивную нагрузку остальных электроприемников,

$$\bar{Q}_p - Q_{\text{НК1}} - Q'_{\text{СД}} \leq 0. \quad (20)$$

В этом случае в целях ограничения выдачи РМ в сеть энергосистемы рекомендуется предусмотреть работу СД со значением  $\cos \varphi$ ,

близким к единице. Технический предел генерирования РМ в сеть энергосистемы в часы малых нагрузок определяется [1] по формуле  $\text{tg}\varphi_{\Gamma} = 0,1$ .

При  $\Delta Q' > 0$  должна быть рассмотрена возможность получения недостающей РМ следующими способами:

1) дополнительным генерированием РМ СД мощностью до 2500 кВт и частотой оборотов до  $1000 \text{ мин}^{-1}$ , если их располагаемая РМ использована не полностью при определении  $Q_{\text{д2}}$  ( $\alpha < 1, 2$ );

2) дополнительной установкой БНК (сверх  $Q_{\text{НК1}}$ );

3) установкой батарей высоковольтных конденсаторов (БВК) в узлах нагрузки 6 – 10 кВ (для предприятий с непрерывным режимом работы);

4) дополнительным потреблением РМ из энергосистемы, превышающим экономическое значение.

Перечисленные способы получения РМ рассматриваются взаимосвязанно.

## **6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ БОЛЕЕ ПОЛНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Целесообразность более полного использования РМ СД рассматривается для двигателей, имеющих  $P_{\text{дн}} \leq 2500 \text{ кВт}$  и  $n \leq 1000 \text{ мин}^{-1}$ . При этом для 1-, 2- и 3-сменных предприятий затраты на генерирование РМ СД сопоставляются с затратами при потреблении РМ из энергосистемы, превышающем экономическое значение, и генерировании РМ установками БНК. С этой целью определяются соотношения

$$R = \frac{C_{\text{ОП}}}{C_{\text{РГ}}} \quad \text{и} \quad R = \frac{Z_{\text{НК}}}{C_{\text{РГ}}}, \quad (21)$$

где  $C_{\text{ОП}}$  – удельная стоимость потребления РМ и энергии, превышающего экономическое значение, руб./квар-год);

$Z_{\text{НК}}$  – удельные затраты на компенсацию РМ установками БНК, руб./квар.

Для предприятий с непрерывным режимом работы затраты на генерирование РМ СД сопоставляются с величиной  $C_{\text{ОП}}$  и затратами при генерировании РМ установками БВК:

$$R = \frac{C_{QP}}{C_{PG}} \quad \text{и} \quad R = \frac{Z_{BK}}{C_{PG}}, \quad (22)$$

где  $Z_{BK}$  – удельные затраты на компенсацию РМ установками БВК, руб./квар.

При наличии на предприятии приборов учета максимальной РМ удельная стоимость потребления дополнительной РМ и энергии [1] определяется по формуле

$$C_{QP} = (c_2 + d_2 \cdot T_{MQP} \cdot 10^{-2}) \frac{2 \cdot K_1 \cdot K_W}{1 + K_1}, \quad (23)$$

а при их отсутствии –

$$C_{QP} = d_2 \cdot T_{MQP} \cdot 10^{-2} \frac{2 \cdot K_1 \cdot K_W}{1 + K_1}, \quad (24)$$

где  $C_2$  – плата за 1 квар потребляемой РМ, превышающей экономическое значение,  $C_2 = 3,6$  руб./(квар·год);

$d_2$  – плата на 1 квар·ч потребляемой реактивной энергии,  $d_2 = 0,09$  коп./квар·ч при расчете по выражению (23) и  $0,2$  коп./квар·ч – по выражению (24);

$T_{MQP}$  – годовое число часов использования максимальной РМ при потреблении, превышающем экономическое значение.

Величина  $T_{MQP}$  вычисляется по формулам (9) или (10) при значении  $\psi$ , равном

$$\psi = 1 - \frac{Q_{ПЭ}}{Q_P}, \quad (25)$$

где  $Q_{ПЭ}$  – величина потребляемой из энергосистемы РМ, превышающая экономическое значение,  $Q_{ПЭ} = \Delta Q'$ .

Удельные затраты на компенсацию РМ установками БНК и БВК:

$$Z_{НК} = 0,22 C_{НК} + Z_{РНК}; \quad (26)$$

$$Z_{BK} = 0,22 (C_{BK} + C_B) + Z_{РBK}, \quad (27)$$

где  $C_{\text{НК}}$ ,  $C_{\text{БК}}$  и  $C_{\text{В}}$  – соответственно удельная стоимость БНК, ББК и выключателя 6 – 10 кВ, руб./квар;

$Z_{\text{РНК}}$  и  $Z_{\text{РБК}}$  – удельные затраты на потери активной мощности в установках БНК и ББК соответственно, руб./квар.

Значения  $C_{\text{НК}}$ ,  $C_{\text{БК}}$  и  $C_{\text{В}}$  можно найти с учетом коэффициента  $K_1$  ( $K_w$ ), приняв базовую удельную стоимость БНК в диапазоне 7,5 – 10,5 руб./квар, ББК – 3,7 – 4,9 руб./квар, выключателей в камерах типа КСО – 0,5–3 руб./квар, выключателей в камерах типа КРУ – 0,9 – 5,1 руб./квар [3].

Отметим, что меньшие значения указанных удельных стоимостных показателей соответствуют большим мощностям конденсаторных установок.

Удельные затраты на потери активной мощности в БНК и ББК:

$$Z_{\text{РНК}} = C_{\text{РГ}} \cdot \Delta P_{\text{кн}}; \quad (28)$$

$$Z_{\text{РБК}} = C_{\text{РГ}} \cdot \Delta P_{\text{кв}}, \quad (29)$$

где  $\Delta P_{\text{кн}}$  и  $\Delta P_{\text{кв}}$  – удельные потери активной мощности в БНК и ББК соответственно;  $\Delta P_{\text{кн}} = 0,004$  кВт/квар;  $\Delta P_{\text{кв}} = 0,002$  кВт/квар [1].

Из найденных по (21) или (22) двух значений  $R$  принимается меньшее, по которому определяется коэффициент  $\alpha$  (табл. 2 и 3). Суммарная величина дополнительно генерируемой СД РМ определяется по формуле

$$Q_{\text{ДЗ}} = \sum a Q_{\text{ДН}}. \quad (30)$$

Если значение  $R$  окажется меньше, чем рассчитанное по выражению (12), то величина  $Q_{\text{ДЗ}}$  принимается равной  $Q_{\text{Д2}}$ .

Результирующее значение используемой РМ СД:

$$Q''_{\text{СД}} = Q_{\text{Д1}} + Q_{\text{ДЗ}}. \quad (31)$$

После определения  $Q''_{\text{СД}}$  анализируют баланс РМ, вычисляя

$$\Delta Q'' = \bar{Q}_{\text{Р}} - Q_{\text{НК1}} - Q''_{\text{СД}} - Q_{\text{Э}}. \quad (32)$$

Если  $\Delta Q'' = 0$ , то расчет компенсации на этом заканчивается. При  $\Delta Q'' < 0$  следует уменьшить мощность  $Q_3$  на величину  $\Delta Q''$ . Когда  $\Delta Q'' > 0$ , то рассматривается целесообразность дополнительной установки БНК (для 1,-2 и 3- сменных предприятий) или БВК (для предприятий с непрерывным режимом работы).

**Пример 4.** Предприятие, работающее в три смены и получающее электроэнергию от подстанции 110/6,3 кВ, имеет расчетную реактивную нагрузку  $Q_p = 4530$  квар. Приборы учета максимальной реактивной мощности в системе электроснабжения на предприятии отсутствуют. Время использования максимальной нагрузки  $T_m = 5100$  ч в год. В производственном процессе используются четыре синхронных электродвигателя напряжением 6 кВ, каждый из которых имеет номинальную мощность  $P_{дн} = 400$  кВт и частоту вращения  $n = 500$  мин<sup>-1</sup>. Основная ставка действующего тарифа на электроэнергию  $a = 100134$  руб./(кВт · год), дополнительная –  $b = 77,5$  руб./кВт·ч.

Предварительный расчет показал, что от синхронных электродвигателей экономически целесообразно получать реактивную мощность  $Q_{д2} = 553$  квар, а величина небаланса реактивной мощности  $\Delta Q' = 1520$  квар.

Определите целесообразность более полного использования реактивной мощности синхронных электродвигателей.

**Решение.** По выражению (8) находим коэффициенты увеличения ставок тарифа на электроэнергию:

$$K_{w1} = \frac{100134}{60} = 1669;$$

$$K_{w2} = \frac{77,5}{1,8 \cdot 10^{-2}} = 4306;$$

$$K_1 = K_w = \frac{60 \cdot 1669 + 77,5 \cdot 5100}{60 + 1,8 \cdot 5100 \cdot 10^{-2}} = 3263.$$

Определяем математическое ожидание реактивной нагрузки предприятия по формуле (17):

$$\overline{Q}_p = 0,9 \cdot 4530 = 4077 \text{ квар.}$$

Степень компенсации реактивной мощности вычисляем по выражению (25):

$$\psi = 1 - 1520 / 4077 = 0,63.$$

По формуле (11) определяем удельную стоимость потерь активной мощности в синхронных электродвигателях, принимая для трехфазного предприятия  $T_{\Gamma} = 6000$  ч:

$$C_{p\Gamma} = 60 \cdot 1669 + 1,8 \cdot 6000 \cdot 10^{-2} \cdot 4306 = 565188 \text{ руб./кВт.}$$

Для трехфазного предприятия отношение натуральной минимальной нагрузки к максимальной  $K_M = 0,7$ . Так как  $\Psi < K_M$ , то годовое число часов использования максимальной реактивной мощности при потреблении, превышающем экономическое значение, определяется по формуле (9):

$$T_{M\text{оп}} = \frac{6000 \cdot (0,7 - 2 \cdot 0,63 + 1)}{2 \cdot (1 - 0,63)} = 3568 \text{ ч.}$$

Так как на предприятии нет приборов учета максимальной реактивной мощности, то удельная стоимость потребления реактивной мощности и энергии, превышающего экономическое значение, определяется по выражению (24) при  $K_1 = K_{\text{ш}}$ :

$$C_{\text{оп}} = 0,2 \cdot 3568 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{2 \cdot 3263 \cdot 3263}{1 + 3263} = 46555,3 \text{ руб./квар.}$$

При среднем значении удельной стоимости низковольтных конденсаторов  $C_{\text{нк}} = 9$  руб./квар (по состоянию на 01.01.91 г.), с учетом коэффициента  $K_1$ , по выражению (26) определяем удельные затраты на компенсацию реактивной мощности установками батарей низковольтных конденсаторов:

$$Z_{\text{нк}} = 0,22 \cdot 9 \cdot 3263 + 565188 \cdot 0,004 = 8721,5 \text{ руб./квар.}$$

По формулам (21) вычисляем соотношения  $R$ :

$$R = \frac{46555,3}{565188} = 0,08; \quad R = \frac{8721,5}{565188} = 0,02.$$

Из значений  $R$  принимается меньшее, т.е.  $R = 0,02$ . По табл. 3 для двигателя мощностью 400 кВт и  $n = 500 \text{ мин}^{-1}$  при  $R = 0,02$  находим  $\alpha = 0,2$ .

С учетом того что номинальное значение коэффициента реактивной мощности синхронного двигателя равно 0,48, определяем по выражению (30) суммарную величину дополнительно генерируемой реактивной мощности:

$$Q_{ДЗ} = 0,2 \cdot 4 \cdot 400 \cdot 0,48 = 153,6 \text{ квар.}$$

Так как значение  $Q_{ДЗ}$  оказалось меньше, чем  $Q_{Д2}$  (553 квар), то более полно использовать синхронные двигатели для компенсации реактивной мощности экономически нецелесообразно. В дальнейших расчетах величина  $Q_{ДЗ}$  принимается равной  $Q_{Д2}$ , т.е.  $Q_{ДЗ} = 553 \text{ квар}$ .

## **7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ БАТАРЕЙ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ**

В случае отсутствия или не использования для компенсации РМ СД 6 – 10 кВ при  $\Delta Q' > 0$ , а также когда  $\Delta Q'' > 0$ , для 1-, 2- и 3-сменных предприятий должна быть рассмотрена эффективность дополнительной установки БНК мощностью  $Q_{НК2}$ . Для этого определяется значение экономически целесообразной реактивной мощности  $Q_{ТЭ}$ , которая может быть передана через цеховые трансформаторы в сеть напряжением до 1 кВ.

При потреблении РМ из энергосистемы, превышающем экономическое значение,

$$Q_{ТЭ} = \frac{3_{НК} - C_{QP}}{2A}, \quad (33)$$

где  $A$  – расчетная величина, характеризующая затраты на потери активной мощности при передаче РМ в сеть напряжением до 1 кВ, определяемая по формуле

$$A = \frac{C_{\text{РП}} \cdot R_{\Sigma}}{U_{\text{Н}}^2 \cdot 10^{-2}}, \quad (34)$$

где  $C_{\text{РП}}$  – удельная стоимость потерь активной мощности и энергии при передаче РМ в сети внутриводской системы электроснабжения, руб/(кВт·год);

$R_{\Sigma}$  – эквивалентное сопротивление сети 6 – 10 кВ (от шин 6 – 10 кВ распределительного пункта (РП), главной понизительной подстанции (ГПП) до шин 0,4 кВ цеховых трансформаторных подстанций (ТП), Ом;

$U_{\text{Н}}$  – номинальное напряжение сети (6 или 10 кВ).

Удельная стоимость потерь активной мощности и энергии

$$C_{\text{РП}} = aK_{W1} + b\tau_Q \cdot 10^{-2} K_{W2} \quad (35)$$

где  $\tau_Q$  – число часов максимальных потерь при передаче реактивной мощности.

$$\text{При } \psi \leq K_M \quad \tau_Q = T_{\Gamma} \left[ \frac{K_M - \psi}{1 - \psi} + \frac{1}{3} \frac{(1 + K_M)^2}{(1 - \psi)^2} \right]; \quad (36)$$

$$\text{При } \psi > K_M \quad \tau_Q = \frac{T_{\Gamma}(1 - \psi)}{3(1 - K_M)}. \quad (37)$$

Значение  $\tau_Q$  можно найти по табл. 5.

Число часов максимальных потерь при передаче реактивной мощности

Т <sub>Г</sub> , ч	К <sub>м</sub>	τ <sub>Q</sub> , ч, при значениях ψ						
		0,1	0,25	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
2000	0,9	1786	1745	1627	1542	1407	1167	667
4000	0,8	3177	3028	2613	2333	1926	1333	667
6000	0,7	4074	3920	3120	2625	2000	1333	667
8500	0,8	6751	6435	5553	4958	4093	2833	1417

Следует отметить, что степень компенсации ψ определяется по выражению (25) при  $Q_{ПЭ} = \Delta Q'$  (если СД не применяются для дополнительной компенсации РМ) или при  $Q_{ПЭ} = \Delta Q''$ . Значение  $S_{оп}$ , вычисленное по формуле (23) или (24), должно быть откорректировано при изменении значения  $Q_{ПЭ}$ , если  $Q''_{сд} > Q'_{сд}$ .

Эквивалентное сопротивление сети 6 – 10 кВ для каждой группы цеховых трансформаторов

$$R_{Э} = (R_T + r_0 I_{ср}) / N_T, \quad (38)$$

где  $R_T$  – активное сопротивление схемы замещения трансформатора, приведенное к высшему напряжению, Ом;

$r_0$  – удельное активное сопротивление кабельной линии, Ом/км;

$I_{ср}$  – средняя длина кабельных линий 6 – 10 кВ к цеховым трансформаторам, км;

$N_T$  – количество цеховых трансформаторов рассматриваемой группы.

Величина  $R_T$  для трансформаторов указана в табл. 6: при напряжении 10 кВ – слева от черты, 6 кВ – справа.

## Активные сопротивления трансформаторов и кабельных линий

Параметры сети	$S_T$ , кВ А			
	630	1000	1600	2500
$R_T$ Трансформатора типа МТЗ, Ом	1,91/0,69	1,08/0,39	0,64/0,23	0,38/0,14
$R_T$ Трансформатора типа ТСЗЛ, Ом	1,79/0,64	1,02/0,37	0,59/0,21	0,23/0,08
Площадь сечения жилы питающего кабеля, мм <sup>2</sup>	50	70	95	120
$r_0$ , Ом/км	0,625	0,447	0,329	0,261

Оценка величины  $r_0$  является трудной задачей, так как формирование распределительной сети 10 кВ предприятия к началу расчета компенсации РМ, как правило, закончено не полностью. Следовательно, отсутствует достоверная информация не только о параметрах, но и о топологии сети. Поэтому можно дать рекомендации лишь общего и приближенного характера. Так, принимаем значения  $r_0$  по табл.5, представляя, что каждый трансформатор подключен к шинам РП или ГПП радиальной линией [4].

Средняя длина кабельной линии

$$l_{CP} = L / N_T, \quad (39)$$

где  $L$  – суммарная длина линий рассматриваемой распределительной сети 6 – 10 кВ, км.

Для определения сопротивления  $R_{\Sigma}$  схемы замещения электрических сетей всего предприятия можно использовать выражение

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{\Sigma i}}}, \quad (40)$$

где  $R_{\Sigma i}$  – эквивалентное сопротивление сети 6 – 10 кВ  $i$ -й группы цеховых трансформаторов;

$n$  – число групп трансформаторов предприятия.

Если найденное по (33)  $Q_{T\Sigma} \leq 0$ , то принимается  $Q_{HK2} = Q_T$ , но не более  $\Delta Q''$ . При  $Q_{T\Sigma} > Q_T$  величина  $Q_{HK2} = 0$ . В случае когда  $Q_{T\Sigma} < Q_T$ , величина  $Q_{HK2} = Q_T - Q_{T\Sigma}$ , но не более  $\Delta Q''$ . Отметим, что значение  $Q_T$  определяется по формуле (2) или (3).

В случае целесообразности дополнительной установки БНК общая мощность БНК на предприятиях, работающих в 1, 2 и 3 смены, составляет

$$Q_{HK} = Q_{HK1} + Q_{HK2}.$$

После определения  $Q_{HK}$  производится балансовый расчет компенсации РМ, т.е. вычисляется величина

$$\Delta Q''' = \bar{Q}_P - Q_{HK} - Q''_{Сд} - Q_{\Sigma}. \quad (41)$$

При  $\Delta Q''' = 0$  выбор средств компенсации РМ следует считать законченным.

Если  $\Delta Q''' < 0$ , то рекомендуется уменьшить мощность  $Q_{HK2}$ . При  $\Delta Q''' > 0$  недостающая РМ, превышающая экономическое значение, должна быть получена из энергосистемы.

**Пример 5.** Двухсменное предприятие питается от подстанции 110/10,5 кВ через распределительный пункт. Приборы учета максимальной реактивной нагрузки на предприятии отсутствуют. Расчет за электропотребление ведется по двухставочному тарифу: основная ставка  $a = 100134$  руб./кВт · год), дополнительная –  $b = 77,5$  руб./кВт·ч. Время использования максимальной нагрузки  $T_m = 3200$  ч в год. Предприятие состоит из двух отдельных корпусов. Корпус 1 имеет расчетную активную нагрузку  $P_{PH} = 3200$  кВт, реактивную –  $Q_{PH} = 2430$  квар. В корпусе устанавливаются четыре трансформатора типа ТМЗ-1000. Длины радиальных кабельных линий от РП до

трансформаторов Т1 и Т2 – 20 м, Т3 и Т4 – 200 м. Предварительный расчет показал, что к каждому трансформатору на напряжение до 1 кВ целесообразно присоединить БНК типа УКМ58 мощностью 200 квар каждая.

Корпус 2 имеет нагрузки на напряжение до 1 кВ  $P_{\text{рн}} = 1530$  кВт и  $Q_{\text{рн}} = 1370$  квар. Работу корпуса обеспечивают два трансформатора типа ТМЗ-1000. Длина кабельной линии к трансформатору Т5 – 250 м, Т6 – 350 м. Для каждого трансформатора предусматривается БНК типа УКМ58 мощностью 200 квар.

Все трансформаторы имеют коэффициент загрузки  $\beta_{\Gamma} = 0,8$ . Математическое ожидание расчетной реактивной нагрузки

$$\bar{Q}_{\text{р}} = 3078 \text{ квар.}$$

В результате предварительного расчета оказалось, что небаланс реактивной мощности  $\Delta Q'' = 192,2$  квар.

Определите целесообразность дополнительной установки БНК.

**Решение.** По выражению (8) рассчитываем коэффициенты увеличения ставок двухставочного тарифа:

$$K_{\text{w}1} = \frac{100134}{60} = 1669;$$

$$K_{\text{w}2} = \frac{77,5}{1,8 \cdot 10^{-2}} = 4306;$$

$$K_1 = K_{\text{w}} = \frac{60 \cdot 1669 + 1,8 \cdot 3200 \cdot 10^{-2} \cdot 4306}{60 + 1,8 \cdot 3200 \cdot 10^{-2}} = 2961.$$

Определяем по формуле (11) удельную стоимость потерь активной мощности в компенсирующих устройствах при  $T_{\Gamma} = 4000$  ч:

$$C_{\text{рГ}} = 60 \cdot 1669 + 1,8 \cdot 4000 \cdot 10^{-2} \cdot 4306 = 410172 \text{ руб./кВт.}$$

Приняв удельную стоимость БНК  $C_{\text{нк}} = 9$  руб./квар, с учетом коэффициента  $K_1 = K_{\text{w}} = 2961$  находим по выражению (26) удельные затраты на компенсацию реактивной мощности установками БНК:

$$Z_{\text{НК}} = 0,22 \cdot 9 \cdot 2961 + 410172 \cdot 0,004 = 7503,5 \text{ руб./квар.}$$

Вычисляем по формуле (25) степень компенсации реактивной мощности:

$$\psi = 1 - \frac{192,2}{3078} = 0,94.$$

При  $\psi = 0,94$  и  $K_M = 0,8$  (для двухсменного предприятия) годовое число часов использования максимальной реактивной мощности определяется по выражению (10):

$$T_{\text{МОП}} = \frac{4000 \cdot (1 - 0,94)}{2 \cdot (1 - 0,8)} = 600 \text{ ч.}$$

По формуле (24) вычисляем удельную стоимость потребления РМ и энергии, превышающего экономическое значение:

$$C_{\text{ОП}} = 0,2 \cdot 600 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{2 \cdot 2961 \cdot 2961}{1 + 2961} = 7104,0 \text{ руб./квар.}$$

Так как  $C_{\text{ОП}} < Z_{\text{НК}}$ , то необходимо определить по выражению (34) расчетную величину, характеризующую затраты на потери активной мощности при передаче реактивной мощности. При  $\psi > K_M$  по формуле (37) находим время максимальных потерь:

$$\tau_Q = \frac{T_{\Gamma} \cdot (1 - 0,94)}{3 \cdot (1 - 0,8)} = 400 \text{ ч.}$$

Рассчитываем удельную стоимость потерь активной мощности и энергии по выражению (35):

$$C_{\text{РП}} = 60 \cdot 1669 + 1,8 \cdot 400 \cdot 10^{-2} \cdot 4306 = 131143,2 \text{ руб./кВт.}$$

По формуле (38) определяем эквивалентное сопротивление сети 10 кВ:

для корпуса 1

$$l_{\text{СР}} = \frac{20 \cdot 2 + 200 \cdot 2}{4} \cdot 10^{-3} = 0,11 \text{ км;}$$

$$R_{\text{Э}} = \frac{1,08 + 0,447 \cdot 0,11}{4} = 0,28 \text{ Ом};$$

для корпуса 2

$$l_{\text{CP}} = \frac{250 + 350}{2} \cdot 10^{-3} = 0,3 \text{ км};$$

$$R_{\text{Э}} = \frac{1,08 + 0,447 \cdot 0,3}{2} = 0,61 \text{ Ом}.$$

Для всего предприятия по выражению (40) определяем

$$R_{\text{Э}} = \frac{1}{\frac{1}{0,28} + \frac{1}{0,61}} = 0,19 \text{ Ом}.$$

По формуле (34) рассчитываем

$$A = \frac{131143,2 \cdot 0,19}{10^2 \cdot 10^3} = 0,25 \frac{\text{руб.}}{\text{кВт}^2}.$$

По формуле (33) вычисляем значение экономически целесообразной реактивной мощности, которая может быть передана через цеховые трансформаторы:

$$Q_{\text{ТЭ}} = \frac{7503,5 - 7104,0}{2 \cdot 0,25} = 799,0 \text{ квар.}$$

Находим по выражению (2) наибольшее значение реактивной мощности, которое может быть передано через трансформаторы в сеть до 1кВ:

для корпуса 1

$$Q_{\text{T}} = \sqrt{(1,1 \cdot 1000 \cdot 0,8 \cdot 4)^2 - 3200^2} = 1466,4 \text{ квар};$$

для корпуса 2

$$Q_T = \sqrt{(1,1 \cdot 1000 \cdot 0,8 \cdot 2)^2 - 1530^2} = 869,9 \text{ квар};$$

для предприятия в целом

$$Q_T = 1466,4 + 869,9 = 2336,3 \text{ квар.}$$

Так как  $Q_{ТЭ} < Q_T$ , то дополнительная мощность БНК принимается равной  $\Delta Q''$ , т.е.

$$Q_{НК2} = 192,2 \text{ квар.}$$

Находим общую расчетную мощность БНК предприятия:

$$Q_{НК} = 6 \cdot 200 + 192,2 = 1392,2 \text{ квар.}$$

Распределяем  $Q_{НК2}$  прямо пропорционально реактивным нагрузкам корпусов:  
корпус 1

$$Q_{НК2} = 192,2 \cdot \frac{2430}{2430 + 1370} = 122,9 \text{ квар};$$

корпус 2:

$$Q_{НК2} = 192,2 \cdot \frac{1370}{2430 + 1370} = 69,3 \text{ квар.}$$

Дополнительная мощность БНК, приходящаяся на один трансформатор, для корпуса 1 составляет 30,7 квар, а для корпуса 2 – 34,7 квар.

Это значительно меньше ступеней номинальных мощностей серийно выпускаемых комплектных конденсаторных установок. Поэтому представляется целесообразным увеличить мощность БНК только наиболее удаленных от РП трансформаторов.

На трансформаторах Т1 и Т2 корпуса 1 и Т5 корпуса 2 предусматриваем установку БНК типа УКМ58-0,4-200-33½У3, а на трансформаторах Т3 и Т4 корпуса 1 и Т6 корпуса 2 – УКМ58-0,4-268-67У3.

В этом случае фактическую общую мощность комплектных БНК предприятия определяем по формуле

$$Q_{\text{НКФ}} = 3 \cdot 200 + 3 \cdot 268 = 1404 \text{ квар},$$

что на 11,8 квар (0,8%) превышает расчетное значение  $Q_{\text{НК}} = 1392,2$  квар. В связи с этим следует уменьшить значение реактивной мощности  $Q_{\text{Э}}$ , потребляемой из энергосистемы, на величину 11,8 квар.

## **8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ УСТАНОВКИ БАТАРЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ**

Если в результате расчета по выражению (32)  $\Delta Q'' > 0$ , то для предприятий с непрерывным режимом работы должна быть рассмотрена целесообразность установки в сети 6 – 10 кВ БВК мощностью

$$Q_{\text{ВК}} = \bar{Q}_{\text{Р}} - Q_{\text{НК1}} - Q_{\text{СД}}'' - Q_{\text{Э}}. \quad (42)$$

Затраты на установку БВК должны быть сопоставлены с затратами на передачу потребителю из энергосистемы РМ, превышающей экономическое значение и равной

$$Q_{\text{ПЭ}} = Q_{\text{ВК}} = \Delta Q''.$$

Принятие экономически целесообразного решения определяется соотношением  $Z_{\text{ВК}}$  и  $C_{\text{ОП}}$  (откорректированным в связи с изменением значения  $Q_{\text{ПЭ}}$ ). Если  $Z_{\text{ВК}} < C_{\text{ОП}}$ , то установка БВК в сети 6 – 10 кВ экономически оправдана. При  $Z_{\text{ВК}} > C_{\text{ОП}}$  целесообразным является получение дополнительной РМ  $Q_{\text{ПЭ}}$  из энергосистемы. При  $Z_{\text{ВК}} = C_{\text{ОП}}$  оба варианта получения дополнительной РМ равноценны.

В табл. 7 даны номинальные мощности некоторых типов высоковольтных конденсаторных установок.

**Основные технические характеристики высоковольтных  
конденсаторных установок**

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная мощность, квар
УКЛ-6,3-450У3	6,3	450
УКЛ-6,3-900У3	6,3	900
УКЛ-6,3-1350У3	6,3	1350
УКЛ-10,5-450У3	10,5	450
УКЛ-10,5-900У3	10,5	900
УКЛ-10,5-1350У3	10,5	1350
УКЛ-10,5-2700У3	10,5	2700
УКЛ-6,3-450У1	6,3	450
УКЛ-10,5-450У1	10,5	450
УКЛ-10,5-1800У1	10,5	1800

**9. РАЗМЕЩЕНИЕ КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК  
И УПРАВЛЕНИЕ ИМИ**

Для распределения электроэнергии с помощью магистральных шинопроводов (МШ) БНК можно устанавливать непосредственно в производственных помещениях, если окружающая среда не содержит проводящей пыли, химически активных веществ, не отнесена к взрывоопасным или пожароопасным зонам, исключены механические воздействия от транспортных средств и перемещаемых грузов, а степень защиты оболочки БНК не ниже IP4X. При этом на одном МШ следует предусматривать установку не более двух близких по мощности БНК. БНК с единичной мощностью до 400 квар подключается к МШ без дополнительной установки коммутационного аппарата, а при мощности более 400 квар – через коммутационный аппарат. Если условия окружающей среды отличаются от вышеуказанных, то БНК рекомендуется устанавливать в помещениях цеховых трансформаторных подстанций с подключением к сборным шинам низшего напряжения с помощью автоматического выключателя распределительного устройства. БНК могут размещаться и в других электропомещениях.

Установки БВК располагаются, как правило, в специальных помещениях, а также в электромашинных помещениях и подстанциях.

Установки БНК и БВК должны иметь ручное управление для включения или отключения установки в целом или ее части эксплуатационным персоналом.

Для обеспечения оптимального режима работы электрических сетей с переменным графиком потребления РМ установки БНК должны иметь в своем составе устройства автоматического ступенчатого регулирования мощности в функции РМ, реактивного или полного тока узла нагрузки, к которому подключена БНК. Этому условию удовлетворяют установки типа УКМ, УКТ, УКТБ, АКУ и др.

Автоматическое регулирование мощности БВК рекомендуется осуществлять при наличии у потребителя выключателей 6 – 10 кВ, предназначенных для частой коммутации емкостной нагрузки. При их отсутствии регулирование мощности БВК производить не следует.

Конденсаторы батарей должны иметь разрядные устройства, в качестве которых могут применяться:

- трансформаторы напряжения или устройства с активно-индуктивным сопротивлением для БВК;
- устройства с активным или активно-индуктивным сопротивлением для БНК.

В установках БВК разрядные устройства должны быть постоянно присоединены к конденсаторам (без коммутационных аппаратов). Для БНК рекомендуется автоматическое включение разрядных устройств в момент отключения конденсаторов. При этом для конденсаторов со встроенными разрядными сопротивлениями наружных разрядных устройств не требуется.

Конденсаторные установки в целом должны иметь защиту от токов короткого замыкания, действующую на отключение без выдержки времени.

### **Список использованных источников**

1. Указания по проектированию установок компенсации реактивной мощности в электрических сетях общего назначения промышленных предприятий. РТМ 36.18.32.6-92// Инструктивные и информационные материалы по проектированию электроустановок. – М.: ВНИПИ "Тяжпромэлектропроект", 1993. – №2. – С.24 – 53.

2. Инструкция по системному расчету компенсации реактивной мощности в электрических сетях // Промышленная энергетика. – 1991. – №7. – С.50 – 55.
3. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
4. Жохов Б.Д. Выбор компенсирующих устройств в сетях общего назначения// Промышленная энергетика. – 1993. – №2. – С.36 – 40.
5. Радкевич В.Н. Проектирование систем электроснабжения. – Мн.: НПООО "Пион", 2001. – 292 с.

Учебное издание

РАДКЕВИЧ Владимир Николаевич

РАСЧЕТ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
ПРЕДПРИЯТИЙ

Учебно-методическое пособие по курсовому  
и дипломному проектированию

Редактор Е.И. Кортель. Корректор М.П. Антонова  
Компьютерная верстка А.Г. Гармазы

---

Подписано в печать 22.04.2004.

Формат 60x84 1/16. Бумага типографская №2.

Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл.печ.л. 2,3. Уч.-изд.л. 1,8. Тираж 200. Заказ 24.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

Лицензия ЛВ № 155 от 30.01.2003. 220013, Минск, проспект Ф.Скорины, 65