

**ОРГАНИЗАЦИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ
(ОСЖД)**

I издание

Разработано экспертами Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 15 – 17 сентября 2015 г.,
Комитет ОСЖД, г. Варшава

Утверждено совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 27 – 30 октября 2015 г.,
Комитет ОСЖД, г. Варшава

Дата вступления в силу: 30 октября 2015 г.

Примечание: Теряют силу памятки ОСЖД:

Р 610 (I издание от 26.10.2007 г.);

Р 612/2 (III издание от 27.10.2000 г.);

Р 612/5 (I издание от 06.11.2008 г.).

Р 640

**ОБЩИЕ МЕТОДЫ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ И ОЦЕНКИ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ
КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
2. Терминология.....	3
3. Общие положения	3
4. Показатели системы тягового электроснабжения переменного тока, необходимые для выбора параметров устройств компенсации реактивной мощности.....	4
5. Выбор мест размещения и мощности устройств компенсации реактивной мощности.....	5
6. Оценка эффективности применения устройств компенсации реактивной мощности.....	11

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Компенсация реактивной мощности в тяговых сетях переменного тока обеспечивает повышение энергетической эффективности работы системы тягового электроснабжения, а также позволяет повысить пропускную и провозную способность участка железной дороги.

В настоящей памятке определены общие подходы к выбору параметров и оценке эффективности их применения в тяговых сетях переменного тока. Памятка разработана с учетом основных положений следующих рекомендаций:

1) Р 610 «Рекомендации по устройствам компенсации реактивной мощности и фильтрации гармонических составляющих тока тяговых подстанций 25 кВ 50 Гц с трехфазными трансформаторами» (I издание от 26.10.2007 г.);

2) Р 612/2 «Рекомендации по компенсации реактивной мощности в системах тягового электроснабжения» (III издание от 27.10.2000 г.);

3) Р 612/5 «Рекомендации по устройствам компенсации реактивной мощности и фильтрации гармонических составляющих тока тяговых подстанций 25 кВ 50 Гц с однофазными трансформаторами» (I издание от 6 ноября 2008 г.).

2. ТЕРМИНОЛОГИЯ

Устройство поперечной компенсации реактивной мощности – устройство компенсации реактивной мощности, включаемое параллельно нагрузке.

Устройство продольной компенсации реактивной мощности – устройство компенсации реактивной мощности, включаемое последовательно с нагрузкой.

Фильтрокомпенсирующее устройство – устройство компенсации реактивной мощности, обладающее дополнительной функцией фильтрации высших гармонических составляющих тока железнодорожного электроподвижного состава.

Номинальная мощность устройства компенсации реактивной мощности – мощность первой гармоники устройства компенсации реактивной мощности, генерируемая при номинальном напряжении.

3. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.1. Памятка содержит общие методы, распространяющиеся на устройства компенсации реактивной мощности, применяемые в системах тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ и 2×25 кВ.

3.2. Целью памятки является определение общих подходов при выборе параметров устройств компенсации реактивной мощности и оценке эффективности их использования в тяговой сети переменного тока.

3.3. Основными задачами, решаемыми в системах тягового электроснабжения с помощью устройств компенсации реактивной мощности, являются:

- снижение потерь электрической энергии в тяговой сети и в оборудовании тяговых подстанций;
- снижение уровня потребления реактивной мощности тяговыми подстанциями в режимах тяги и рекуперативного торможения;
- снижение потерь напряжения в тяговой сети и повышение пропускной и провозной способности участка железной дороги;
- снижение уровня несинусоидальности напряжения в тяговой сети.

3.4. В системах тягового электроснабжения переменного тока применяются устройства продольной и поперечной компенсации реактивной мощности. Для решения задачи снижения уровня несинусоидальности напряжения в тяговой сети применяются фильтрокомпенсирующие устройства.

3.5. Места присоединения устройств компенсации реактивной мощности в системе тягового электроснабжения переменного тока – шины 27,5 кВ тяговых подстанций и (или) постов секционирования контактной сети.

3.6. Выбор мощности и мест размещения устройств компенсации реактивной мощности определяется на основании технико-экономических расчетов.

4. ПОКАЗАТЕЛИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

4.1. В качестве основных параметров системы тягового электроснабжения переменного тока, необходимых для выбора типа и мощности устройств компенсации реактивной мощности, принимают:

- минимальное трехминутное напряжение на токоприемнике электроподвижного состава;
- коэффициент реактивной мощности тяговой нагрузки.

Дополнительными параметрами системы тягового электроснабжения переменного тока являются:

- суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на шинах 27,5 кВ тяговых подстанций – для выбора фильтрокомпенсирующих

устройств;

- максимальный 10-минутный ток тяговой нагрузки – для выбора устройств продольной компенсации реактивной мощности.

4.2. Показатели системы тягового электроснабжения для проектируемого расчетного участка определяют по размерам движения с перспективой на пять лет. Для расчетного участка, находящегося в эксплуатации, руководствуются следующими положениями:

- при решении задачи увеличения критической нормы веса поезда на лимитирующих перегонах в расчетах используют нормативный график движения поездов;

- при решении задачи пропуска поездов повышенной массы и длины в расчетах используют заданный пакетный график движения поездов;

- при решении задачи повышения пропускной способности на перспективу в расчетах используют перспективный график движения поездов.

4.3. Минимальное нормируемое трехминутное напряжение на токоприемнике электроподвижного состава принимают равным 21 кВ, а для расчетных участков с максимальной скоростью движения пассажирских поездов свыше 160 км/ч – равным 24 кВ (среднее за одну минуту).

4.4. Коэффициент реактивной мощности тяговой нагрузки определяют суммарно для всех присоединений контактной сети, получающих питание от одной фазы тяговой подстанции 25 кВ (2×25 кВ).

4.5. Расчет показателей системы тягового электроснабжения переменного тока для целей выбора типа и мощности устройств компенсации реактивной мощности производят в границах расчетного участка железной дороги в следующей последовательности:

- выполнение тяговых расчетов;
- создание суточного графика движения поездов на расчетном участке;
- проведение электрических расчетов.

5. ВЫБОР МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ И МОЩНОСТИ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

5.1. Выбор мест размещения и определение мощности устройств компенсации реактивной мощности производят в следующей последовательности.

На первом этапе на основе рассчитанных показателей системы тягового электроснабжения определяют варианты размещения устройств компенсации реактивной мощности.

На втором этапе выполняют расчет и проверку параметров устройств

компенсации реактивной мощности для выбранных вариантов размещения.

На третьем этапе осуществляют выбор устройств компенсации реактивной мощности из ряда выпускаемых промышленностью.

На четвертом этапе выполняют технико-экономическое сравнение вариантов размещения устройств компенсации реактивной мощности в системе тягового электроснабжения.

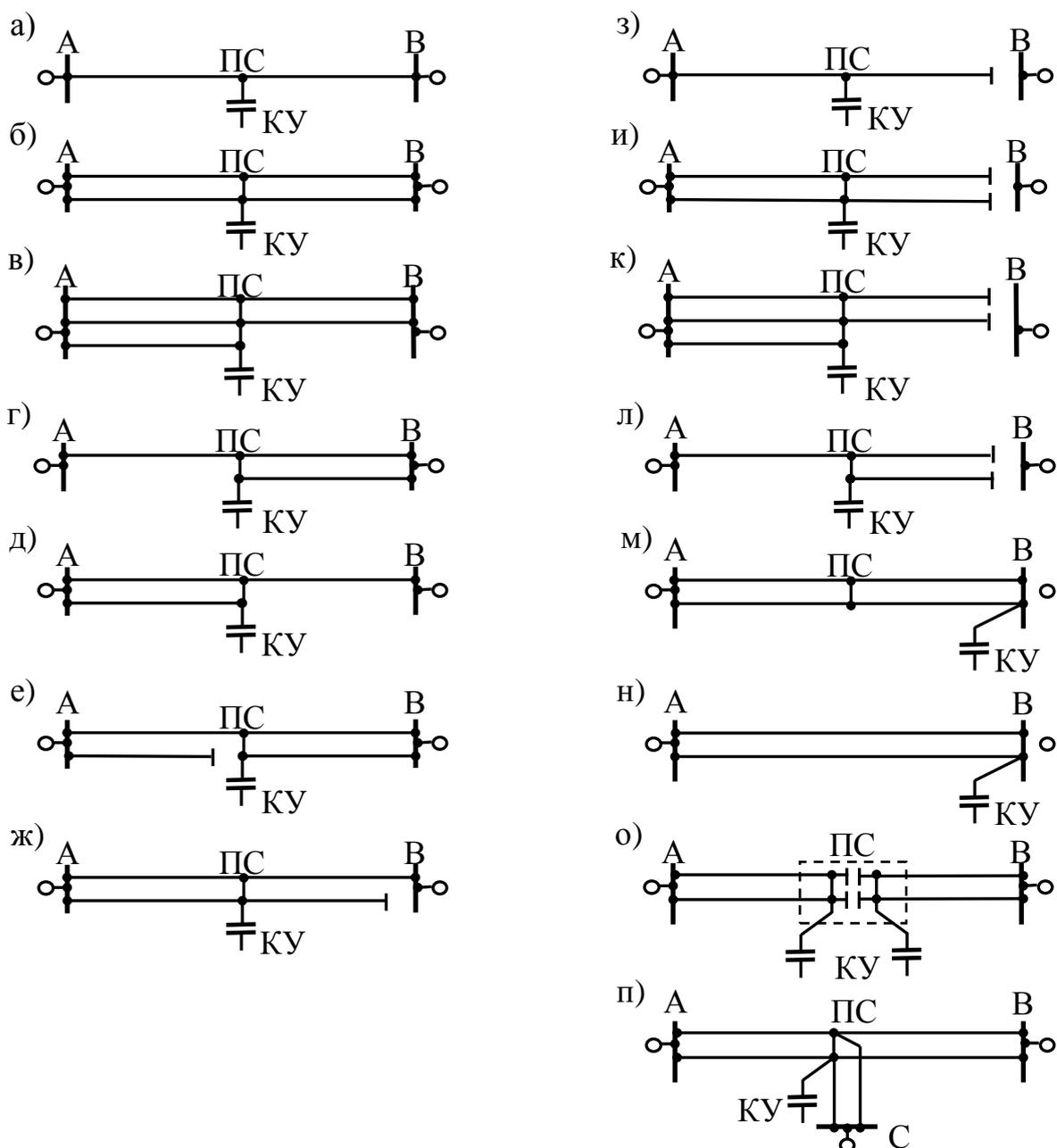
5.2. Основные варианты схем питания и секционирования тяговой сети с размещением на расчетном участке устройств поперечной компенсации реактивной мощности приведены на рисунке 1.

5.3. Выбор фазы включения устройства поперечной компенсации реактивной мощности на шинах тяговой подстанции определяется необходимостью симметрирования тяговой нагрузки. Рекомендуется включать устройства поперечной компенсации реактивной мощности в отстающую фазу тяговой подстанции.

В случае, если нагрузка опережающей фазы значительно превосходит нагрузку отстающей фазы, необходимо рассмотреть вариант установки устройства поперечной компенсации реактивной мощности как в отстающую, так и опережающую фазы.

5.4. На участках железных дорог со значительными колебаниями тяговой нагрузки рекомендуется применять регулируемые устройства поперечной компенсации реактивной мощности, которые позволяют изменять потребляемую реактивную мощность ступенчато (одно- или многозвенные устройства) или плавно (статические тиристорные компенсаторы).

5.5. При необходимости снижения уровня несинусоидальности напряжения в тяговой сети в качестве устройств поперечной компенсации применяют фильтрокомпенсирующие устройства, располагаемые на посту секционирования или на тяговой подстанции.



а – двусторонний режим питания расчетного участка; б, в, г, д – двусторонний узловой режим питания расчетного участка; е, ж – двусторонний комбинированный режим питания расчетного участка; з – односторонний режим питания расчетного участка; и, к, л – односторонний узловой режим питания расчетного участка; м – односторонний узловой режим питания расчетного участка (подстанция В отключена от контактной сети); н – односторонний отдельный режим питания расчетного участка (подстанция В отключена от контактной сети); о – двусторонний комбинированный режим питания расчетного участка; п – комбинированный узловой режим питания расчетного участка

Рисунок 1. Основные варианты схем питания и секционирования тяговой сети и размещения устройств поперечной компенсации реактивной мощности

5.6. Мощность устройства поперечной компенсации реактивной мощности на посту секционирования Q_{KV} , соответствующая номинальному ряду мощностей, выпускаемых промышленностью, должна быть больше или равна расчетному значению мощности $Q_{KV \text{ расч}}$ и не превышать средней реактивной мощности тяговой нагрузки на расчетном участке:

$$Q_{KV \text{ расч}} \leq Q_{KV} \leq Q_{\text{ср м.с}} , \quad (1)$$

где $Q_{\text{ср м.с}}$ – средняя реактивная мощность тяговой нагрузки на межподстанционной зоне, квар.

$$Q_{\text{ср м.с}} = \frac{(W_{Q_{\text{м.с} A}} + W_{Q_{\text{м.с} B}})}{24 \cdot D_{\text{инт.мес}}} , \quad (2)$$

где $W_{Q_{\text{м.с} A}}$, $W_{Q_{\text{м.с} B}}$ – расход реактивной электроэнергии за месяц интенсивных нагрузок по присоединениям контактной сети тяговых подстанций A и B , питающим расчетный участок, квар·ч;

$D_{\text{инт.мес}}$ – число суток месяца интенсивных нагрузок.

5.7. Устройство поперечной компенсации реактивной мощности для тяговой подстанции выбирают из выпускаемых промышленностью устройств поперечной компенсации реактивной мощности, при этом номинальная мощность выбранного устройства компенсации реактивной мощности не должна превышать реактивной мощности тяговой подстанции, определяемой по выражению:

$$Q_{\text{ТП}}^* = \frac{W_Q}{24 \cdot D_{\text{инт.мес}}} - \left(Q_{\kappa 1} + Q_{\kappa 2} + Q_{\kappa.П.С1} \cdot \frac{L_{AB} - l_{АП}}{L_{AB}} + Q_{\kappa.П.С2} \cdot \frac{L_{CA} - l'_{ПА}}{L_{CA}} \right) , \quad (3)$$

где $W_Q / 24 \cdot D_{\text{инт.мес}}$ – реактивная мощность тяговой подстанции без учета устройств поперечной компенсации реактивной мощности за интенсивный месяц, Мвар;

$Q_{\kappa 1}, Q_{\kappa 2}$ – мощность устройств поперечной компенсации реактивной мощности на фазах тяговой подстанции, Мвар;

$Q_{\kappa.П.С1}, Q_{\kappa.П.С2}$ – мощность устройств поперечной компенсации реактивной мощности на постах секционирования справа и слева от подстанции соответственно, Мвар;

L_{AB}, L_{CA} – расстояние между тяговыми подстанциями A, B и A, C соответственно, км;

$l_{АП}, l'_{ПА}$ – расстояния от подстанции A до постов секционирования справа и слева, км.

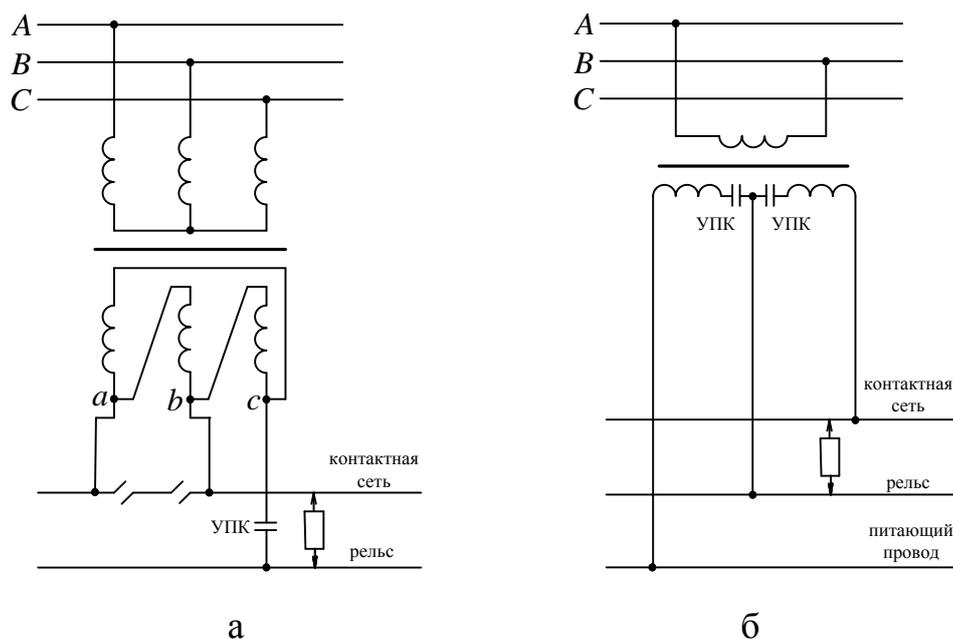
Если в расчетах то или иное устройство поперечной компенсации реактивной мощности отсутствует, то соответствующее значение в формуле

(3) принимают равным нулю.

5.8. Повышение напряжения в тяговой сети при установке устройства компенсации реактивной мощности не должно превышать максимально допустимого значения (29 кВ).

5.9. После выбора мощности устройства поперечной компенсации реактивной мощности на тяговой подстанции выполняют проверку по обеспечению поддержания минимального уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава. В случае необходимости повышения минимального уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава на тяговых подстанциях дополнительно размещают устройства поперечной компенсации реактивной мощности.

5.10. Устройства продольной компенсации реактивной мощности в системе тягового электроснабжения напряжением 25 кВ размещают в отсасывающей линии тяговой подстанции, в системе тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ – в линиях «понижающий трансформатор-рельс» со стороны контактной сети и питающего провода (рисунок 2).



а – в системе тягового электроснабжения напряжением 25 кВ;
б – в системе тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ

Рисунок 2. Включение устройств продольной компенсации реактивной мощности на тяговых подстанциях

5.11. Определение мощности устройств продольной компенсации реактивной мощности выполняют в следующем порядке:

- оценка целесообразности установки переключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности;

- определение расчетных значений номинального сопротивления $X_{УПК\ расч}$ и тока $I_{УПК\ расч}$ устройства продольной компенсации реактивной мощности и, при необходимости, ступеней его регулирования;

- выбор параметров устройства продольной компенсации реактивной мощности.

5.12. Целесообразность установки переключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности оценивают путем анализа режимов параллельной работы понижающих трансформаторов тяговой подстанции в зависимости от значения тяговой нагрузки:

- установка непереключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности целесообразна, если на расчетном участке железной дороги на тяговую нагрузку постоянно работает только один понижающий трансформатор;

- установка переключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности с двухступенчатым регулированием целесообразна, если на тяговую нагрузку постоянно работают два понижающих трансформатора или же второй понижающий трансформатор работает только при кратковременном увеличении тяговой нагрузки. В этом случае постоянно в работу введена первая ступень, а вторую подключают при включении в работу второго понижающего трансформатора.

5.13. На основе расчетных значений $X_{УПК\ расч}$ и $I_{УПК\ расч}$ выбирают номинальные параметры $X_{УПК}$ и $I_{УПК}$ устройства продольной компенсации реактивной мощности и, при необходимости, ступеней его регулирования с учетом следующих выражений:

$$\begin{cases} I_{УПК} \geq I_{УПК\ расч}, \\ 0,7X_{УПК\ расч} \leq X_{УПК} \leq 1,1X_{УПК\ расч}. \end{cases} \quad (4)$$

Номинальное значение установленной мощности конденсаторных батарей устройства продольной компенсации реактивной мощности и ступеней его регулирования определяют исходя из выражения, МВ·А:

$$Q_{УПК} = \frac{U_{УПК}^2}{X_{УПК}}, \quad (5)$$

где $U_{УПК}$ – номинальное рабочее напряжение устройства продольной компенсации реактивной мощности в максимальном режиме, принимаемое по паспортным данным, кВ.

5.14. Для тяговых подстанций системы тягового электроснабжения напряжением 2×25 кВ предусматривают разделение устройства продольной компенсации реактивной мощности на две последовательно соединенные равные части, одну из которых подключают в линию «понижающий

трансформатор-рельс» со стороны контактной сети, а другую – в линию «понижающий трансформатор-рельс» со стороны питающего провода.

6. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

6.1. Основным результатом реализации варианта оснащения расчетного участка устройствами компенсации реактивной мощности выступает увеличение пропускной (проезной) способности расчетного участка и вызванный этим рост дохода или прибыли железной дороги.

Дополнительными результатами являются: снижение уровня потерь электроэнергии в тяговой сети и оборудовании тяговых подстанций, повышение коэффициента реактивной мощности, снижение уровня несимметрии и несинусоидальности напряжения.

6.2. При расчете эффективности устройств компенсации реактивной мощности следует учитывать взаимоотношения с национальными энергоснабжающими организациями в зависимости от методов расчета за потребленную реактивную электроэнергию и возможных санкций за снижение показателей качества электроэнергии.

6.3. Для определения экономических преимуществ одного варианта оснащения расчетного участка устройствами компенсации реактивной мощности по сравнению с другим используют показатели сравнительной экономической эффективности.

6.4. Основные показатели сравнительной эффективности:

- сравнительная величина интегрального эффекта;
- приведенные затраты;
- срок окупаемости дополнительных инвестиций;
- коэффициент сравнительной эффективности.

6.5. Сравнительная величина интегрального эффекта характеризует дополнительную величину интегрального эффекта, полученную от внедрения одного варианта оснащения расчетного участка устройствами компенсации реактивной мощности по сравнению с другим:

$$\Delta \mathcal{E}_{инт} = \sum_{t=0}^{T_p} \Delta P_t \cdot \eta_t - \sum_{t=0}^{T_p} \Delta Z_t \cdot \eta_t - \sum_{t=0}^{T_p} \Delta K_t \cdot \eta_t, \quad (6)$$

где T_p – расчетный период, лет;

t – текущий расчетный шаг;

ΔP_t – разница результатов по сравниваемым вариантам оснащения расчетного участка устройствами компенсации реактивной мощности;

η_t – коэффициент дисконтирования;

ΔZ_t – разница текущих затрат по сравниваемым вариантам оснащения расчетного участка устройствами компенсации реактивной мощности;

ΔK_t – разница инвестиционных затрат (капитальных вложений) по сравниваемым вариантам оснащения расчетного участка устройствами компенсации реактивной мощности.

6.6. Коэффициент дисконтирования применяют для приведения разновременных (относящихся к разным шагам расчета) денежных потоков к одному моменту времени, обычно начальному году реализации инвестиционного проекта:

$$\eta_t = \frac{1}{(1+d)^t}, \quad (7)$$

где d – норма дисконта, выражаемая в долях единицы или в процентах в год.

Критерием выбора варианта оснащения расчетного участка устройствами компенсации реактивной мощности служит максимум сравнительного интегрального эффекта.

6.7. Приведенные затраты представляют собой частный случай сравнительного интегрального эффекта. Их определяют, если отличие сравниваемых вариантов оснащения расчетного участка устройствами компенсации реактивной мощности друг от друга состоит только в размерах потребных инвестиционных вложений и текущих затратах. Наиболее эффективное решение соответствует минимуму приведенных затрат. Приведенные затраты рассчитывают по формуле:

$$Z_{прив} = \sum_{t=0}^{T_p} Z_t \cdot \eta_t + \sum_{t=0}^{T_p} K_t \cdot \eta_t, \quad (8)$$

где Z_t – текущие затраты, возникающие в ходе реализации варианта оснащения расчетного участка устройствами компенсации реактивной мощности;

K_t – инвестиционные затраты для реализации варианта оснащения расчетного участка устройствами компенсации реактивной мощности.

6.8. Срок окупаемости дополнительных инвестиций представляет собой временной период, за который дополнительные инвестиционные затраты на более капиталоемкий вариант будут возмещены благодаря приросту экономических результатов, обусловленному их реализацией. В общем случае срок окупаемости дополнительных инвестиций определяют из выражения:

$$\sum_{t=0}^{T_{ок}^{доп}} \Delta \Phi_t \cdot \eta_t = \sum_{t=0}^{T_{ок}^{доп}} \Delta K_t \cdot \eta_t, \quad (9)$$

где $\Delta \mathcal{E} \phi_t$ – прирост экономических результатов от реализации более капиталоемкого варианта оснащения расчетного участка устройствами компенсации реактивной мощности;

ΔK_t – дополнительные инвестиционные вложения для реализации варианта оснащения расчетного участка устройствами компенсации реактивной мощности;

$T_{ок}^{don}$ – срок окупаемости дополнительных инвестиций.