

**ОРГАНИЗАЦИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ОСЖД)**

I издание

Разработано экспертами Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 25-28 мая 2010 г., Литовская Республика, г. Вильнюс

Утверждено совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 19-22 октября 2010 г., Комитет ОСЖД, г. Варшава

Дата вступления в силу: 22 октября 2010 г.

**Р  
612/7**

**РЕКОМЕНДАЦИИ  
ПО ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В УСТРОЙСТВАХ  
ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ  
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

## Содержание

1. Общие положения.....	3
2. Управление мощностью главных понижающих и преобразовательных трансформаторов тяговых подстанций .....	3
3. Применение новых схем преобразования электрической энергии переменного тока в постоянный.....	5
4. Компенсация реактивной мощности в тяговых, распределительных и осветительных сетях .....	6
5. Совершенствование схем питания и секционирования контактной сети.....	7
6. Переход на питание тяговых и трансформаторных подстанций на более высокий класс напряжения .....	8
7. Применения новых схем усиления устройств электроснабжения в междуподстанционных зонах на участках, электрифицированных на постоянном токе.....	9
8. Заключение.....	10

## **1. Общие положения**

1.1. В настоящее время вопросам экономии электроэнергии во всем мире уделяется все больше внимание. Это связано с ограниченным запасом первичных энергоносителей на Земле, ухудшением экологической обстановки вследствие преобразования первичных энергоносителей в электрическую энергию, а в части железнодорожного транспорта – снижение себестоимости перевозок за счет снижения потребления электроэнергии.

1.2. Данные рекомендации следует использовать:

- при разработке программ энергосбережения та мероприятий по экономии электроэнергии на предприятиях железнодорожного транспорта;
- при определении направлений модернизации и реконструкции распределительных сетей, тяговых подстанций и тяговых сетей железнодорожного транспорта;
- при принятии решения о проведении электрификации новых железнодорожных линий и направлений, а также при определении эффективности использования видов тяги на вновь сооружаемых линиях железнодорожного транспорта.

## **2. Управление мощностью главных понижающих и преобразовательных трансформаторов тяговых подстанций**

2.1. Тяговые подстанции электрифицированных магистральных железных дорог для обеспечения электрической тяги, как потребителя первой категории, а также других потребителей первой и второй категории, в основном имеют по два и больше главных понизительных трансформатора и по несколько преобразовательных агрегатов для преобразования переменного тока в постоянный для питания участков постоянного тока.

2.2. Поскольку суточный график нагрузки тяговых подстанций неравномерный, то держать включенными в работу все трансформаторы на протяжении суток нецелесообразно, так как идет потребление электрической энергии на покрытия потерь в стали сердечника, вихревые токи и гистерезис С другой стороны при увеличении загрузки трансформатора увеличиваются потери в меди обмоток (нагрузочные потери).

2.3. Для снижения потерь электрической энергии, расходуемой на холостой ход и нагрузочных потерь в трансформаторах, необходимо применять устройства автоматики, включающие или отключающие главные понизительные трансформаторы и преобразовательные агрегаты в зависимости от общей нагрузки тяговой подстанции или тягового потребления.

2.4. Уставки по току (мощности) для включения и отключения главных понизительных трансформаторов или преобразовательных агрегатов следует определять по минимуму приведенных потерь электрической энергии, т.е. суммарных активных и реактивных потерь с учетом экономического эквивалента реактивной мощности.

2.5. Для определения уставок для каждого трансформатора (агрегата) или группы параллельно работающих трансформаторов (агрегатов) должен быть

определен оптимальный коэффициент загрузки  $\beta$  исходя из соотношения потерь холостого хода и нагрузочных потерь, а для преобразователей следует учесть и дополнительные потери на работу вспомогательных машин.

2.6. Максимальный коэффициент полезного действия трансформаторов ( $\eta$ ) достигается при  $\beta = \sqrt{\Delta P_{xx}/\Delta P_{кз}}$ . Необходимо отметить, что в основном для применяемых в настоящее время трансформаторов при  $\beta = 0,5 \div 1,0$  изменение  $\eta$  незначительно, поэтому для экономии электроэнергии устройства автоматики управления рабочей мощностью подстанций в общем случае должны быть настроены по условию обеспечения коэффициента загрузки  $\beta \geq (0,5 \div 1,0)$ . Для более точной настройки необходимо использовать паспортные данные соответствующих трансформаторов та преобразовательных агрегатов.

2.7. В общем случае целесообразность включения ( $n + 1$ ) трансформатора, или отключения ( $n - 1$ ) трансформатора из группы предназначенных для параллельной работы трансформаторов на подстанции можем определить по граничных коэффициентах загрузки работающих трансформаторов:

- в случае роста нагрузки целесообразность включения следующего трансформатора экономически оправдано при :

$$\beta \geq \sqrt{\frac{n+1}{n}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{xx} + k_e \cdot \Delta Q_{xx}}{\Delta P_{кз} + k_e \cdot \Delta Q_{кз}}};$$

- в случае снижения нагрузки целесообразность отключения одного из трансформаторов экономически выгодна при

$$\beta \geq \sqrt{\frac{n-1}{n}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{xx} + k_e \cdot \Delta Q_{xx}}{\Delta P_{кз} + k_e \cdot \Delta Q_{кз}}};$$

Где:

- $n$  – число работающих трансформаторов;
- $\Delta P_{xx}$  – мощность потерь холостого хода трансформатора, кВт;
- $\Delta P_{кз}$  - мощность потерь короткого замыкания трансформатора, кВт;
- $\Delta Q_{xx}$  – мощность реактивных потерь холостого хода трансформатора, квар;
- $\Delta Q_{кз}$  - мощность реактивных потерь короткого замыкания трансформатора, квар;
- $k_e$  – коэффициент повышения потерь активной энергии (экономический коэффициент, который определяет повышение потерь активной энергии от перетока реактивной энергии (кВт/квар) в определенной системе электроснабжения. Его можно определить по таблице:

Характеристика системы, трансформатора	$k_e, \text{кВт/квар}$	
	В часы максимума энергосистемы	В часы минимума энергосистемы)
Трансформаторы, которые питаются напрямую от шин энергосистемы	0,02	0,02
Трансформаторы, которые питаются от шин генераторного напряжения	0,07	0,04
Трансформаторы 110/35/10 кВ, питаемые от районных сетей	0,1	0,06
Трансформаторы 10(6)/0,4 питаемые от районных сетей	0,15	0,1

При отсутствии ведомостей о системе электроснабжения, или если  $k_e$  не определено энергосистемой, его можно ориентировочно принимать равным 0,07 кВт/квар для сетей свыше 1000 В и 0,125 кВт/квар для сетей ниже 1000В.

### 3. Применение новых схем преобразования электрической энергии переменного тока в постоянный

3.1. В настоящее время широко применяются двенадцатипульсовые схемы выпрямления вместо шестипульсных, при этом достигается снижение потерь электрической энергии, которые в общем случае можно определить по формуле:

$$\Delta W_{\text{год}} = (\Delta w_{\text{тс}} + \Delta w_{\text{тс}} + \Delta w_{\text{с}} + \Delta w_{\text{в}} + \Delta w_{\text{Д}}) * W_{\text{год}};$$

где:

-  $\Delta W_{\text{год}}$  – годовой объем снижения потерь электроэнергии в системе электроснабжения за счет внедрения нового типа преобразовательного агрегата, тыс.кВтчас.;

-  $W_{\text{год}}$  – годовой объем переработки электроэнергии новым преобразовательным агрегатом, тыс. кВт.час.

-  $\Delta w_{\text{тс}}$  - снижение потерь электроэнергии в тяговой сети за счет улучшения внешних характеристик выпрямительных агрегатов. Для двенадцатипульсовой схемы выпрямления в сравнении с шестипульсной это примерно 0,013-0,016%;

-  $\Delta w_{\text{тс}}$  - снижение потерь электрической энергии в трансформаторах за счет увеличения К.П.Д новых типов трансформаторов по сравнению с заменяемыми. Принимается по паспортным данным трансформаторов, в среднем его можно принять 0,3-0,36%;

-  $\Delta w_{\text{с}}$  – снижение потерь электрической энергии в системе электроснабжения за счет сокращения потребления реактивной мощности, в среднем этот показатель для предварительных расчетов можно принять 1,5-2%;

-  $\Delta w_{\text{в}}$  - снижение потребления электроэнергии на нужды принудительной вентиляции для охлаждения преобразователей, ориентировочно для расчетов

можно принять 0,25-1,2%, более точно по техническим данным нового преобразователя и того, который меняется;

-  $\Delta w_D$  - снижение потерь электроэнергии в диодах выпрямительного агрегата за счет улучшения их параметров и уменьшения количества, для первоначальных расчетов может быть принято 0,7-1,2%.

3.2. В зависимости от того, полностью производится замена преобразовательного агрегата, или только выпрямителя, от технических параметров выпрямителей, в расчетной формуле могут отсутствовать те или другие составляющие.

3.3. С целью уменьшения срока окупаемости капитальных инвестиций в первую очередь рекомендуется производить замену устаревших преобразовательных агрегатов, годовой объем переработки которых составляет 20 и более миллионов кВт. час.

#### 4. Компенсация реактивной мощности в тяговых, распределительных и осветительных сетях

4.1. Реактивная мощность, протекая по линиях и трансформаторах, создает в них дополнительные потери активной мощности, которые можно определить по формуле:

- в линиях:

$$\Delta P_L = S^2/U^2 * R = (P^2 + Q^2)/U^2 * R = [P^2 + (P * \operatorname{tg} \varphi)^2]/U^2 * R;$$

- в трансформаторах:

$$\Delta P_T = S^2 T/U^2 * R_T = (P^2 T + Q^2 T)/U^2 * R_T = [P^2 T + (P T * \operatorname{tg} \varphi)^2]/U^2 * R_T,$$

где:

$S$ ,  $P$ ,  $Q$  – соответственно полная, активная и реактивная мощности, протекающие по элементам электроснабжения;

-  $U$  – уровень напряжения, на котором происходит электропередача;

-  $R$  - активное сопротивление системы электроснабжения;

4.2. Снижение перетоков реактивной энергии в линиях и трансформаторах можно достичь компенсацией реактивной мощности (энергии) непосредственно у потребителей. При этом снижаются потери как активной, так и реактивной мощности и энергии в элементах систем электроснабжения. Это подтверждается расчетными формулами:

$$\Delta W = [P_n^2 + (Q_n - Q_{ку})^2]/U^2_{ном} * R_{\Sigma} * t;$$

$$\Delta Q_n = [P_n^2 + (Q_n - Q_{ку})^2]/U^2_{ном} * X_{\Sigma} * t;$$

где:

-  $\Delta W$ ,  $\Delta Q_n$  – потери активной и реактивной энергии в элементах системы электроснабжения (кВт. час., квар. час) за расчетное время  $t$ ;

-  $P_n$ ,  $Q_n$  – активная и реактивная мощности, потребляемые нагрузкой, кВт, квар;

- $Q_{ку}$  – мощность, генерируемая устройством компенсации реактивной мощности, квар;
- $U_{ном}$  – номинальное напряжение сети, кВ;
- $R_{\Sigma}, X_{\Sigma}$  - суммарное активное и реактивное сопротивление системы электроснабжения, Ом;
- $t$  – время, в течении которого производится расчет, час.

4.3. В системах тягового электроснабжения размещение компенсирующих устройств в основном осуществляют на постах секционирования (в середине фидерных зон), или на тяговых подстанциях.

4.4. Выбор мощности компенсирующих устройств производят выходя из анализа суточных графиков потребления реактивной мощности, не допуская перекомпенсации реактивной мощности (генерации в энергосистему), так как в этом случае возможны штрафные санкции со стороны энергосистемы, которые могут свести на нет экономический эффект от применения компенсирующих устройств.

4.5. Эффективность применения компенсирующих устройств оценивается исходя из факторов:

- стоимости снижения потерь активной энергии в сетях за счет снижения перетоков реактивной энергии;
- снижения стоимости оплаты за потребленную реактивную энергию за счет снижения величины ее потребления;
- увеличение оплаты за генерированную в энергосистему реактивную электроэнергию, в случае ее наличия.

4.6. Наиболее целесообразными на данное время есть применение регулируемых компенсирующие устройства без трансформаторного типа, включаемых непосредственно на шины потребителя. Если речь идет о тяге поездов, то включение компенсирующих устройств необходимо производить на шины тягового электроснабжения тяговых подстанций, или постов секционирования (при тяге переменного тока 25 кВ). Применение низковольтных компенсирующих устройств с включением их через трансформаторы всегда невыгодно из-за высоких потерь активной энергии в этих трансформаторах.

## **5. Совершенствование схем питания и секционирования контактной сети**

5.1. С целью уменьшения потерь активной электрической энергии необходимо стремиться к снижению активного сопротивления тяговой сети, в том числе и непосредственно контактной сети. Для этой цели рекомендуются следующие мероприятия:

5.1.1. Применение схем двухстороннего или параллельного питания контактной сети в междуподстанционных зонах вместо консольных схем питания.

5.1.2. Применение постов секционирования и пунктов параллельного соединения в междуподстанционных зонах.

5.1.3. Увеличение сечения несущих тросов и контактных проводов (при их замене или модернизации контактной сети).

5.1.4. Применение усиливающих проводов, а также более частое применение поперечных соединителей между несущим тросом, контактным проводом и усиливающими проводами.

5.1.5. Применение на переменном токе системы экранирующих и усиливающих проводов (ЭУП) (при модернизации и реконструкции контактной сети, или проектировании новых участков).

5.1.6. Применение системы тягового электроснабжения переменного тока 2х25 кВ (при модернизации и реконструкции, а также при новой электрификации).

5.2. Решение по конкретному мероприятию необходимо принимать, учитывая окупаемость привлекаемых капиталовложений, с учетом других факторов, например увеличение грузопотока, скорости движения поездов, необходимость повышения уровней напряжений в контактной сети и т. д.

5.3. Отдельно необходимо отметить такое мероприятие, как ликвидация перетоков активной и реактивной мощности по контактной сети между соседними подстанциями. Эти перетоки возникают как следствие «слабой» электрической связи данных подстанций между собой по системе внешнего электроснабжения. Перетоки активной и реактивной электроэнергии по системе тягового электроснабжения между соседними тяговыми подстанциями в основном возникают на участках, электрифицированных на переменном токе 25 кВ, и вызывают дополнительные потери электрической энергии в активных сопротивлениях элементов тяговой сети. При этом возможны случаи, когда необходимо оплачивать потребление активной электроэнергии не только на покрытие этих потерь, а и за весь переток мощности, который возвращается во внешнюю энергосистему на соседней подстанции. Кроме того, увеличивается оплата за потребленную и генерированную реактивную электроэнергию.

Для уменьшения, или ликвидации перетоков мощности по контактной сети рекомендуется (если вопрос нельзя решить изменением параметров схемы внешнего электроснабжения) применять двухсторонние схемы питания с постом секционирования посередине фидерной зоны с вакуумным выключателем в шине поста. Вакуумный выключатель оборудуется автоматикой, которая его включает кратковременно на момент замыкания воздушных промежутков изолирующих сопряжений контактной сети ползком токоприемников подвижного состава.

## **6. Переход на питание тяговых и трансформаторных подстанций на более высокий класс напряжения**

6.1. Как известно потери активной энергии в трехфазной сети в общем случае могут быть определены по формуле:

$$\Delta W = (S^2 / U^2) * R * t = (P^2 + Q^2) U^2 * R * t,$$

где:

-  $S$ ,  $P$ ,  $Q$  – соответственно полная, активная и реактивная мощности, протекающие по элементам электроснабжения;



- $U$  – уровень напряжения, на котором происходит электропередача;
- $R$  - активное сопротивление системы электроснабжения;
- $t$  – время в течении которого происходит передача энергии.

Формула показывает, что потери активной энергии снижаются обратно пропорционально квадрату уровня напряжения, при котором происходит электропередача.

6.2. Перевод электроснабжения на более высокий класс напряжения значительно снижает потери активной электроэнергии в системе электроснабжения, но для его реализации требуются также значительные капитальные инвестиции, поэтому, для подтверждения принятия решения необходимо произвести технико-экономические расчеты с учетом:

- наличия доступного источника электроснабжения требуемого класса напряжения;
- оценить необходимые затраты на присоединение, проектирование и выполнение необходимых строительных работ;
- оценить стоимость снижения потерь электрической энергии в результате реализации проекта;
- учесть другие положительные факторы, например переход на более низкие тарифы на электроэнергию на новом классе напряжения, повышение качества электроэнергии, стабилизация уровней напряжения и.т.д.

## **7. Применения новых схем усиления устройств электроснабжения в междустанционных зонах на участках, электрифицированных на постоянном токе**

7.1. В настоящее время в связи с развитием силовой полупроводниковой электроники на ряде железных дорог при увеличении грузопотока и скорости движения на отдельных участках постоянного тока находят применение схемы усиления тягового электроснабжения в виде:

- одноагрегатных комплектных тяговых подстанций, которые получают питание по трехфазных линиях напряжением 10-35 кВ от действующих тяговых подстанций;
- преобразовательные агрегаты 6,6/3,3 кВ, которые получают питание от действующих подстанций по линии постоянного тока 6,6 кВ.

Данные установки располагают в междустанционных зонах вблизи точек, на которых не обеспечивается необходимый уровень напряжения в контактной сети. Их применение в ряде случаев может также привести к снижению потерь активной энергии в системе электроснабжения тяги поездов, так как часть потока мощности осуществляется на более высоком классе напряжения.

При результирующей оценке величины снижения потерь электроэнергии следует учитывать потери, которые возникают в устройствах систем усиления (вновь устанавливаемых преобразователях, трансформаторах, линиях питания).

## 8. Заключение

В настоящее время в связи с увеличением стоимости электрической энергии уменьшение потерь в системах электроснабжения железных дорог дает значительное снижение затрат на оплату электроэнергии, а следовательно и снижение себестоимости перевозок.

Однако в ряде случаев снижение потерь электроэнергии в электрических сетях сопряжено с привлечением новых капитальных инвестиций. Поэтому в первую очередь предпочтение необходимо отдавать организационно-техническим мероприятиям, которые не требуют значительных капитальных затрат.

При проведении модернизации, реконструкции и новом строительстве все проекты должны оцениваться комплексно, в том числе и с точки зрения их энергоэффективности, поскольку энергоэффективный проект, даже если он дороже, может иметь меньший срок окупаемости, а в дальнейшем дает дополнительные преимущества - снижения эксплуатационных расходов.