

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ: ЭТАПЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

Хворост Н.В., к.т.н., доц.

ГП “Харьковский метрополитен”

Украина, 61012, Харьков, ул. Энгельса, 29  
тел. (0572) 23-74-02

Панасенко Н.В., д.т.н., проф.

Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ “ХПИ”, каф. “Электрический транспорт и тепловозостроение”  
тел. (0572) 47-34-65

*Виконаний аналіз столітнього періоду електрифікації залізниць в світі. Розглянуті перспективні шляхи покращення систем електричної тяги залізниць України в XXI-му столітті.*

*Выполнен анализ столетнего периода электрификации железных дорог мира. Рассмотрены перспективные пути совершенствования систем электрической тяги железных дорог Украины в XXI-м столетии.*

**ВВЕДЕНИЕ**

На электрических железных дорогах мира, общая протяженность которых на конец XX века составила около 240 тыс. км, распространение получили три системы электрической тяги (Система электрической тяги СЭТ включает в себя подсистему тягового электроснабжения (ТЭС), состоящую из тяговых подстанций (ТП), контактной сети (КС) и рельсов (Р) и тяговую подсистему, состоящую из электроподвижного состава (ЭПС) – электровозов и электропоездов) (СЭТ), отличающиеся друг от друга по роду тока в контактной сети [1, 2]:

- СЭТ постоянного тока;
- СЭТ переменного тока пониженной частоты 16 $\frac{2}{3}$ , 20, 25 Гц;
- СЭТ переменного тока промышленной частоты 50 (60) Гц.

Наибольший удельный вес в общей протяженности электрических железных дорог приходится на железные дороги с СЭТ переменного тока промышленной частоты 50 Гц напряжением 25 кВ – 40,5%. На электрические железные дороги с СЭТ постоянного тока напряжением 3,0 кВ и 1,5 кВ приходится соответственно по 35,2% и 7,8%, а на электрические железные дороги с СЭТ переменного тока пониженной частоты 16 $\frac{2}{3}$  Гц напряжением 15 кВ – 14,6% от общей протяженности электрических железных дорог [3].

**ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ**

В историческом плане, начало электрификации железных дорог связано со строительством в конце XIX века первой железной дороги Балтимор – Огайо (США) протяженностью 115 км с СЭТ постоянного тока напряжением 660 В, использующей ЭПС с коллекторными тяговыми двигателями постоянного тока последовательного возбуждения и контакторно-реостатной системой управления. В Российской империи, первостроителями электрической железной дороги были украинские инженеры, выпускники Петербургского института инженеров путей сообщений Дмитренко П.П. и Дубелир Г.Д. Под их руководством было выполнено проектирование и в 1901 году построена железная дорога, электрифицированная в СЭТ постоянного тока, протяженностью 20,6 км, связывающая г. Лодзь с пригородами.

Дальнейшее развитие СЭТ постоянного тока шло в основном только по пути повышения напряжения в контактной сети. Так, принятая концепция первого этапа (20-е – 40-е годы прошлого столетия) массовой электрификации железных дорог мира основывалась на СЭТ постоянного тока напряжением 1200 В и 1500 В. Концепция второго этапа массовой электрификации железных дорог мира (30-е – 60-е годы прошлого столетия) основывалась уже на СЭТ постоянного тока напряжением 3000 В.

Здесь следует отметить, что структурно СЭТ постоянного тока напряжением 1,5 кВ и 3,0 кВ отличаются только расстояниями между тяговыми подстанциями  $l_{ТП}$ : в первом случае  $l_{ТП} \approx 15 - 20$  км, а во втором –  $l_{ТП} \approx 25 - 30$  км.

При питании тяговых подстанций СЭТ постоянного тока от сетей внешнего электроснабжения, а это, как правило, электрические сети трехфазного тока ВЛ35, ВЛ110 или ВЛ220, напряжение внешнего электроснабжения с помощью промежуточных трансформаторов понижается, а затем с помощью электромашиных (двигатель переменного тока – генератор постоянного тока) или статических (трансформатор – выпрямитель) преобразователей преобразовывается в энергию постоянного тока которая на напряжении 1,5 кВ или 3,0 кВ и подается в тяговую сеть.

Практически повсеместное использование СЭТ постоянного тока на первом и втором этапах массовой электрификации железных дорог обусловлено главным ее достоинством, заключающемся в возможности непосредственного подключения к тяговой сети электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения, электромеханические характеристики которых в наибольшей мере отвечают требованиям тяги и которые на начало электрификации уже были серийно освоены электротехнической промышленностью [4].

К недостаткам эксплуатируемых СЭТ постоянного тока в первую очередь необходимо отнести сравнительно невысокий уровень напряжения в контактной сети. Это обстоятельство, при непрерывно возрастающих мощностях ЭПС, обуславливает повышенные потери энергии и напряжения в элементах СЭТ, что приводит к снижению пропускной и провозной способности электрических железных дорог.

Проведенные в 60-х годах прошлого столетия в СССР, Италии и Польше научно-технические работы по созданию СЭТ постоянного тока напряжением 6 кВ и выше не привели к положительным результатам из-за сложности, громоздкости, низкой надежности и большой стоимости тягового высоковольтного электрооборудования ЭПС с коллекторными электродвигателями постоянного тока, имеющих конструктивное ограничение рабочего напряжения на уровне 1500-1650 В в существующем колесном габарите.

Принципиально, альтернативным путем на начало электрификации железных дорог в вопросе повышения напряжения в контактной сети была СЭТ переменного тока пониженной частоты  $16\frac{2}{3}$  Гц напряжением 15 кВ, разработанная немецкими специалистами в конце XIX века. Этим путем в начале XX столетия и пошла Германия, несмотря на то, что на тот период для таких СЭТ потребовалось строительство для нужд электрических железных дорог специальных электростанций, вырабатывающих однофазный ток пониженной частоты  $16\frac{2}{3}$  Гц. Электроэнергия в такой СЭТ к контактной сети подводится при помощи простых трансформаторных подстанций располагающихся на расстоянии 40-50 км и понижающих высокое напряжение однофазного переменного тока, поступаемого от специальных электростанций однофазного тока частоты  $16\frac{2}{3}$  Гц, до уровня 15 кВ. Здесь следует отметить, что СЭТ переменного тока пониженной частоты  $16\frac{2}{3}$  Гц позволила использовать на ЭПС коллекторные двигатели однофазного тока последовательного возбуждения, характеристики которых для тяги обеспечивались тогдашним уровнем развития электротехники (в то время такие двигатели на частоту 50 Гц строить не умели). Питание коллекторных тяговых электродвигателей однофазного тока на ЭПС осуществляется от вторичной обмотки бортового трансформатора понижающего напряжение контактной сети до уровня их оптимального напряжения (400-600 В). В настоящее время СЭТ пониженной частоты  $16\frac{2}{3}$  Гц напряжением 15 кВ применяют на электрических железных дорогах Германии, Швеции, Швейцарии, Австрии, Норвегии. Основное достоинство СЭТ переменного тока пониженной частоты  $16\frac{2}{3}$  Гц напряжением 15 кВ заключается в довольно высоком уровне напряжения в контактной сети, во многом нивелировалось низкими коэффициентами мощности и тяги ЭПС с коллекторными двигателями переменного тока ( $\cos \phi$  коллекторных двигателей переменного тока в номинальном режиме равен  $0,8\div 0,88$  при трогании становится меньше  $0,3\div 0,4$ ; а коэффициент тяги ЭПС в часовом режиме не превышает  $0,17\div 0,19$  [5]). Поэтому СЭТ переменного тока пониженной частоты  $16\frac{2}{3}$  Гц напряжением 15 кВ и получила ограниченное распространение в период первого и второго этапов массовой электрификации железных дорог.

Освоение в 40-х годах прошлого столетия электротехнической промышленностью производства силовых ионных вентилях – игнитронов, характеристики которых решали задачу создания выпрямительных установок, отвечающие требованиям по надежности и массогабаритным параметрам условиям применения на подвижном составе, позволило существенно улучшить эффективность ЭПС однофазного переменного тока пониженной частоты за счет использования в них серийных тяговых коллекторных электродвигателей пульсирующего тока, по своим характеристикам незначительно уступающим серийным тяговым кол-

лекторным электродвигателям постоянного тока [6, 7]. Однако это техническое достижение в принципе решало задачу создания эффективного ЭПС переменного тока промышленной частоты 50(60) Гц при любом (высоком) уровне напряжения в контактной сети. Поэтому в основу концепции третьего этапа массовой электрификации железных дорог (50-е – 90-е годы прошлого столетия) была положена СЭТ переменного тока промышленной частоты 50 Гц напряжением 25 кВ.

Высокое напряжение в контактной сети в СЭТ переменного тока промышленной частоты определяет ее преимущества: большое расстояние между подстанциями ( $l_{ТП} \geq 40 - 60$  км), меньше сечение проводов контактной сети ( $140\div 220$  мм<sup>2</sup> в медном эквиваленте). Внешнее электроснабжение в этой системе обеспечивается, как и в СЭТ постоянного тока, от трехфазных электрических сетей ВЛ110 или ВЛ220, тяговые подстанции превращаются в простые понижающие подстанции, контактная сеть – в линию электропередачи повышенного напряжения, напоминающая собой линию городской подстанции глубокого ввода, а сам ЭПС – в такую подстанцию глубокого ввода. Преобразовательный агрегат однофазного переменного тока 50 Гц, 25 кВ в постоянный ток (трансформатор – выпрямитель) размещается на ЭПС, что, с одной стороны, усложняет ЭПС, а с другой стороны, позволяет исключить пусковые резисторы и упростить коммутационную аппаратуру управления. Тяговые двигатели пульсирующего тока выполняются на оптимальное рабочее напряжение (700-800) В и на ЭПС используется их параллельное соединение. Пуск ЭПС обеспечивается регулированием выходного напряжения преобразовательного агрегата, что возможно как путем изменения коэффициента трансформации трансформатора, так и путем применения управляемых вентилях в выпрямителе преобразовательного агрегата. Здесь необходимо отметить, что однофазная тяговая нагрузка в СЭТ переменного тока промышленной частоты вызывает неравномерность загрузки фаз системы внешнего электроснабжения. Однако, применение на тяговых подстанциях компенсирующих конденсаторных установок и подключение понижающих трансформаторов подстанций с чередованием нагруженных фаз позволяет снизить несимметрию до границы предельных норм [8].

В историческом аспекте, начало электрификации в Украине связано с введением в 1938 году в эксплуатацию однопутного участка Запорожье – Кривой Рог Приднепровской железной дороги, электрифицированного по СЭТ постоянного тока напряжением 3 кВ. Массовая же электрификация железных дорог Украины приходится на вторую половину XX века (середина 50-х годов). На начальном периоде она проводилась только в рамках концепции второго этапа электрификации, а именно, в рамках СЭТ постоянного тока напряжением 3 кВ. В этой системе электрической тяги были электрифицированы Южная, Приднепровская и Донецкая железные дороги. Электрификация железных дорог Украины в рамках концепции третьего этапа началась только в первой половине 60-х годов прошлого столетия и она получила широкое распространение на Юго-Западной и Одесской железных дорогах. Электрификация Львовской железной дороги в этот период проходила как в рамках концепции второго этапа (в направлении западной границы),

так и в рамках концепции третьего этапа (в направлении Юго-Западной железной дороги).

На конец XX века на Украине в примерно равных долях по роду тока в СЭТ было электрифицировано свыше 9 тыс. км железнодорожных линий, что составило около 40% от общей протяженности железных дорог страны.

Оптимальным же по мнению международных экспертов для стран с развитой железнодорожной инфраструктурой (аналогичной Украине) является электрификация 50–60% от общей протяженности железнодорожной сети страны с выполнением ими 80–90% общего объема перевозки грузов и пассажиров (см. материалы конференции МСЖД, ЮАР, 2000 г.).

Проблема выбора СЭТ и совершенствования ее подсистем на всех этапах электрификации железных дорог была в центре научных дискуссий и принятия инженерных решений. Здесь следует отметить, что каждая из концепций электрификации отражала тот уровень развития электротехники, который был достигнут на начало каждого из ее этапов. Определяющими факторами при выборе типа СЭТ на каждом из этапов электрификации являлись тяговый электропривод ЭПС и устройства преобразования параметров электроэнергии ТЭС. Поэтому совершенствование подсистем СЭТ на всем периоде электрификации предопределялось самим процессом развития электротехники и в первую очередь достижениями в таких ее областях как электромеханика, электроника и автоматика. Замена тяговых коллекторных электродвигателей на бесколлекторные двигатели (асинхронные и синхронные), применение высокоэффективных статических преобразователей параметров электроэнергии переменного тока в постоянный и наоборот на базе силовых полностью управляемых (включаемых и выключаемых по управляющему электроду) полупроводниковых приборов на напряжения и токи свыше 3 кВ и 1 кА соответственно, создание быстродействующих систем микропроцессорной автоматики для управления преобразованием и потреблением электроэнергии как на ЭПС, так и в ТЭС и составляют основу современной концепции четвертого этапа электрификации железных дорог, вызванного к жизни необходимостью организации скоростного и высокоскоростного пассажирского движения.

Здесь следует отметить, что для первой высокоскоростной железной дороги Нью – Токайдо (Япония) протяженностью 515 км, которая была введена в эксплуатацию в 1964 году, в ее СЭТ были еще заложены технические решения, определяемые концепцией третьего этапа электрификации, а именно, для ЭПС – тяговый электропривод постоянного тока с выпрямительно-трансформаторным регулированием, для ТЭС – структуры централизованного электропитания контактной сети от тяговых подстанций с трансформаторным преобразованием трехфазного напряжения промышленной частоты в однофазное напряжение промышленной частоты. Для реализации заданной тяговой мощности с целью обеспечения максимальных скоростей движения на уровне 200 км/час, эти технические решения потребовали только моторвагонной тяги с обмоториванием всех вагонов электропоезда и сокращения расстояния между тяговыми подстанциями до 20 км что резко повысило удельную стоимость (до свыше 2 млн. дол. США за 1 км) строи-

тельства высокоскоростной железной дороги [9]. Поэтому построенную специализированную высокоскоростную линию Нью – Токайдо, как и введенное во Франции в 1967 году скоростное движение в системе «Капитоль» на линиях со смешанным движением, следует рассматривать в рамках третьего этапа электрификации как практическое доказательство технической реализуемости и экономической целесообразности использования колесного электротранспорта для скоростных и высокоскоростных пассажирских перевозок на железных дорогах.

Фактически о четвертом этапе электрификации железных дорог мира было заявлено в 70-х годах прошлого столетия утверждением планов создания сети высокоскоростных железных дорог в Японии (Шин-Кансен), Европе (Европолитен) и США (АМТРАК). Именно эти планы основывались на новом типе ЭПС – электровазов и электропоездов с бесколлекторным тяговым электроприводом и структурах ТЭС, пригодных для организации распределенного электропитания контактной сети на основе статических преобразователей с высоковольтными управляемыми полупроводниковыми приборами и микропроцессорными системами управления.

#### ПУТИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ УКРАИНЫ В XXI-М ВЕКЕ

Окончательное утверждение в жизнь четвертого этапа электрификации произошло в 80-90 годы прошлого столетия с серийным освоением производства высокоскоростных поездов с бесколлекторными двигателями: серии 300 мотор-вагонной тяги (Япония) и серий TGV (Франция), ICE (Германия) локомотивной тяги и введением в эксплуатацию тяговых преобразовательных подстанций в Бремене и Карлсфельде (Германия) мощностью 100/132 МВ·А, принципиально позволяющими реализовать структуру ТЭС с распределенным питанием контактной сети для всех типов СЭТ [10, 11]. На рис. 1,а,б представлены структуры тяговой электропередачи (ТЭП) электроваза поезда ICE1 и тяговой преобразовательной подстанции (ТПП) СЭТ переменного тока пониженной частоты 16 $\frac{2}{3}$  Гц напряжения 15 кВ.

На наш взгляд, СЭТ на базе структур рис. 1,а,б позволяют обеспечить решение ряда задач, стоящих перед электрическими железными дорогами Украины в рамках решения главной (целевой) проблемы железнодорожного транспорта, а это – двукратное снижение затрат и увеличение производительности до конца первой половины XXI века при безусловном обеспечении безопасности движения поездов. Основными из этих задач, по нашему мнению, являются [12–25]:

- 1) задача качественного отбора электроэнергии системой электротяги от трехфазной системы внешнего электроснабжения;
- 2) задача снижения энергозатрат в подсистемах электротяги;
- 3) задача снятия ограничений по пропускной и провозной способности со стороны подсистем электротяги;
- 4) задача создания двухсистемного универсального электроваза для пассажирско-грузовых поездов ( $V_{\max} = 140$  км/час) и пассажирско-скоростных ( $V_{\max} = 200$  км/час).

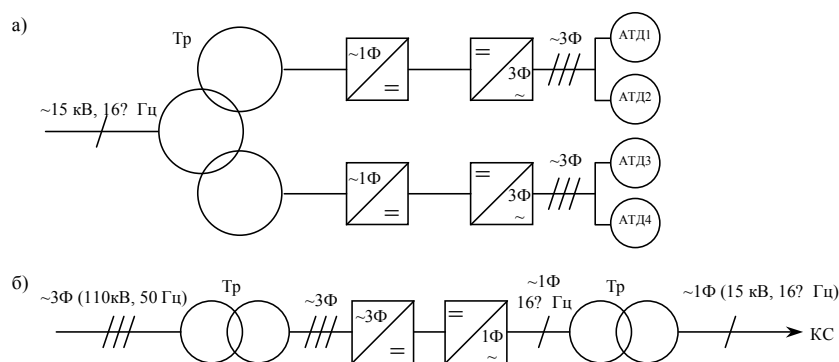


Рис. 1. Структуры тяговой электропередачи электровоза поезда ICE1 (а) и тяговой преобразовательной подстанции (б) СЭТ переменного тока пониженной частоты 16 $\frac{2}{3}$  Гц напряжения 15 кВ

Решение этих задач не возможно без поиска новых структурных и схемных решений как для СЭТ в целом, так и для звеньев ее подсистем, а также без глубокого анализа на стадии разработки СЭТ процессов преобразования электроэнергии, затрачиваемой на перевозочный процесс. Это в равной степени относится как к СЭТ постоянного тока, так и к СЭТ переменного тока. При этом критичным фактором для эксплуатируемой на Украине СЭТ постоянного тока является принятый уровень напряжения 3,0 кВ как со стороны ЭПС по критерию массо-габаритных показателей коллекторных тяговых электродвигателей, так и со стороны ТЭС по критерию потерь в контактной сети [14]. Критичным же фактором для эксплуатируемой на Украине СЭТ переменного тока является однофазный отбор электроэнергии от трехфазной системы внешнего электроснабжения как с точки зрения ухудшения качества потребляемой энергии, так и с точки зрения «барьерных» ограничений скорости со стороны контактной сети [2, 8, 9, 14].

В заключении отметим, что стратегия развития СЭТ на четвертом этапе электрификации железных дорог должна опираться на том, что технически и экономически выработка электроэнергии и ее потребление в сфере электрической тяги наиболее эффективна трехфазным переменным током, а передача к ЭПС по тяговой сети повышенного напряжения (6÷50) кВ [1]. При этом должно учитываться то обстоятельство, что уровень рабочего напряжения бесколлекторных тяговых электродвигателей при существующих изоляционных и ферромагнитных материалах может быть поднят до (6÷10) кВ [7].

В настоящее время на электрических железных дорогах Украины применяется в основном централизованная схема питания тяговой сети при которой тяговые подстанции питаются от районных подстанций системы внешнего электроснабжения. Ее дальнейшее совершенствование за счет усиления контактной сети и уменьшения расстояния между подстанциями не снимает критических факторов как в СЭТ постоянного тока, так и в СЭТ переменного тока. Кроме того, строительство новой тяговой подстанции при централизованной системе питания тяговой сети требует, как правило, больших капитальных вложений в систему внешнего электроснабжения, которые в некоторых случаях могут превышать стоимость самой подстанции [21]. Децентрализованная или распределенная схема питания тяговой сети, классическим примером которой служит схема питания контактной сети СЭТ переменного тока пониженной частоты 16 $\frac{2}{3}$  Гц напряжения 15

кВ [13], как правило, не требует дополнительных капитальных вложений в систему внешнего электроснабжения при строительстве новых подстанций. Следует также отметить, что в СЭТ переменного тока пониженной частоты 16 $\frac{2}{3}$  Гц напряжения 15 кВ сняты критические факторы, присущие отечественным СЭТ (постоянного и переменного тока).

Учитывая уровень существующих полупроводниковых приборов, изоляционных и ферромагнитных материалов наиболее перспективной системой ТЭС для практической реализации СЭТ постоянного тока является схема питания контактной сети напряжением 6 кВ с двухпроводной продольной линией (ПЛ) постоянного тока двухстороннего питания напряжением 36 кВ и преобразовательными пунктами питания (ППП) 36/6 кВ, на основе преобразователя постоянного напряжения [26–30]. Структурная схема ТЭС с продольной линией 36 кВ представлена на рис. 2.

В такой СЭТ на опоры контактной сети с полевой стороны может устанавливаться только один положительный питающий провод продольной линии, а отрицательным проводом питания в этом случае будет служить рельс. Двухстороннее питание продольной линии напряжением 36 кВ осуществляется от двух главных тяговых подстанций ГТП1 и ГТП2 расположенных на расстоянии 100÷125 км друг от друга и имеющих по два независимых ввода трехфазными линиями внешнего электроснабжения 220(110) кВ. Структурно схема главной тяговой подстанции состоит из трех преобразовательных агрегатов 1ПА – 3ПА, включенных по выходу параллельно и один из которых находится в резерве (рис. 3). В состав схемы преобразовательного агрегата входят тяговый трансформатор (Тр) и двенадцатипульсовый управляемый выпрямитель (УВ), работающий с углом управления  $\alpha = 0$ . Тяговый трансформатор имеет три вторичных обмотки, две из которых обеспечивают питание управляемого выпрямителя, а третья – питание районных потребителей. Применение в преобразовательных агрегатах управляемых выпрямителей с углом управления  $\alpha = 0$  позволяет, наряду с выполнением функции по преобразованию переменного напряжения в постоянное, реализовать бесконтактную токовую защиту главных подстанций при коротком замыкании в линии продольного питания 36 кВ [31]. От линии продольного питания 36 кВ поступает напряжение к преобразовательным пунктам питания (ПП1 – ПП6), которые располагаются на расстоянии 20÷25 км друг от друга.

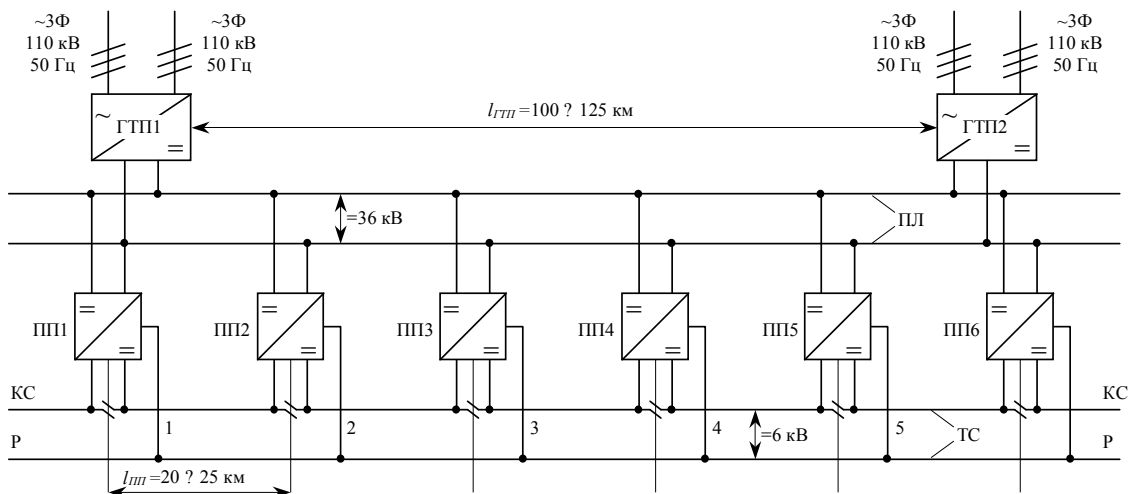


Рис. 2. Структурная схема ТЭС с продольной питающей линией постоянного тока напряжения 36 кВ СЭТ постоянного тока 6кВ

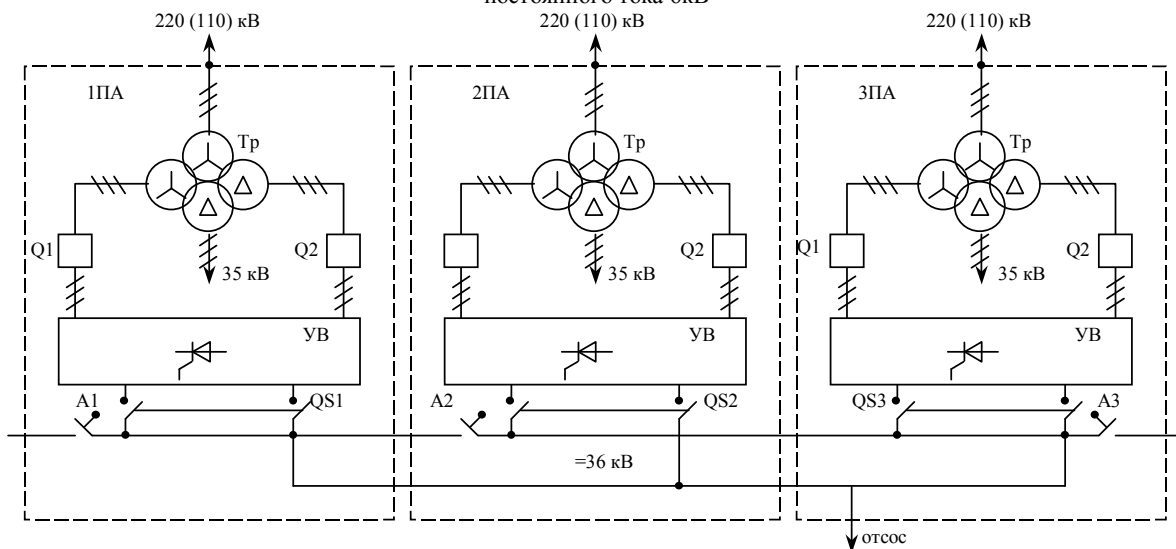


Рис. 3. Структурная схема главной тяговой подстанции для ТЭС постоянного тока с линией продольного питания напряжением 36 кВ

В состав схемы преобразовательного пункта питания, обеспечивающего в контактной сети напряжение 6 кВ, входят три преобразователя постоянного напряжения ППН1 – ППН3, включаемых по входу и выходу параллельно и один из которых также находится в резерве (рис. 4). В состав преобразователя постоянного напряжения входят однофазный автономный инвертор напряжения (АИН), однофазный трансформатор повышенной частоты ( $T_{ПЧ}$ ) и выпрямительно-инверторный преобразователь (ВИП). Такая структура ППН обеспечивает двухсторонний обмен электроэнергией, что позволяет передавать энергию рекуперации ЭПС в продольную линию питания 36 кВ. Это обстоятельство существенно расширяет область использования рекуперативного торможения в СЭТ постоянного тока.

Дополнительный резонансный фильтр, настроенный на частоту звена повышенной частоты и емкость, устанавливаемые на входе АИН, снижают уровень высших гармоник в такой степени, что между главными подстанциями и преобразовательными пунктами питания циркулирует только активная мощность [11]. Таким образом, приведенная на рис. 2 структура ТЭС с продольной линией питания 36 кВ

потребляет от системы внешнего электроснабжения только ту реактивную мощность, которая обусловлена степенью несовершенства двенадцатипульсовых схем выпрямителей, а это, как известно [17], очень небольшая и величина.

Для СЭТ переменного тока промышленной частоты ТЭС может быть выполнено с продольной питающей линией однофазного переменного тока промышленной частоты напряжения 110 кВ и однофазными трансформаторными пунктами питания (ОТПП) 110/27,5 кВ [29]. В этом случае главные тяговые подстанции будут представлять собой преобразователи трехфазного напряжения 220(110) кВ в однофазное 110 кВ со звеном постоянного тока, структура которых аналогична структуре ТЭС системы электротяги переменного тока пониженной частоты 16 $\frac{2}{3}$  Гц, 15 кВ (рис. 1,б). Однако, такое техническое решение, несмотря на решаемые задачи качественного отбора электроэнергии от системы внешнего электроснабжения и отказа от нейтральных вставок, требует для продольной линии питания 110 кВ прокладки вдоль полотна железной дороги однофазной ЛЭП 110 кВ, что может быть оправдано лишь при строительстве специализированной высокоскоростной железной дороги.

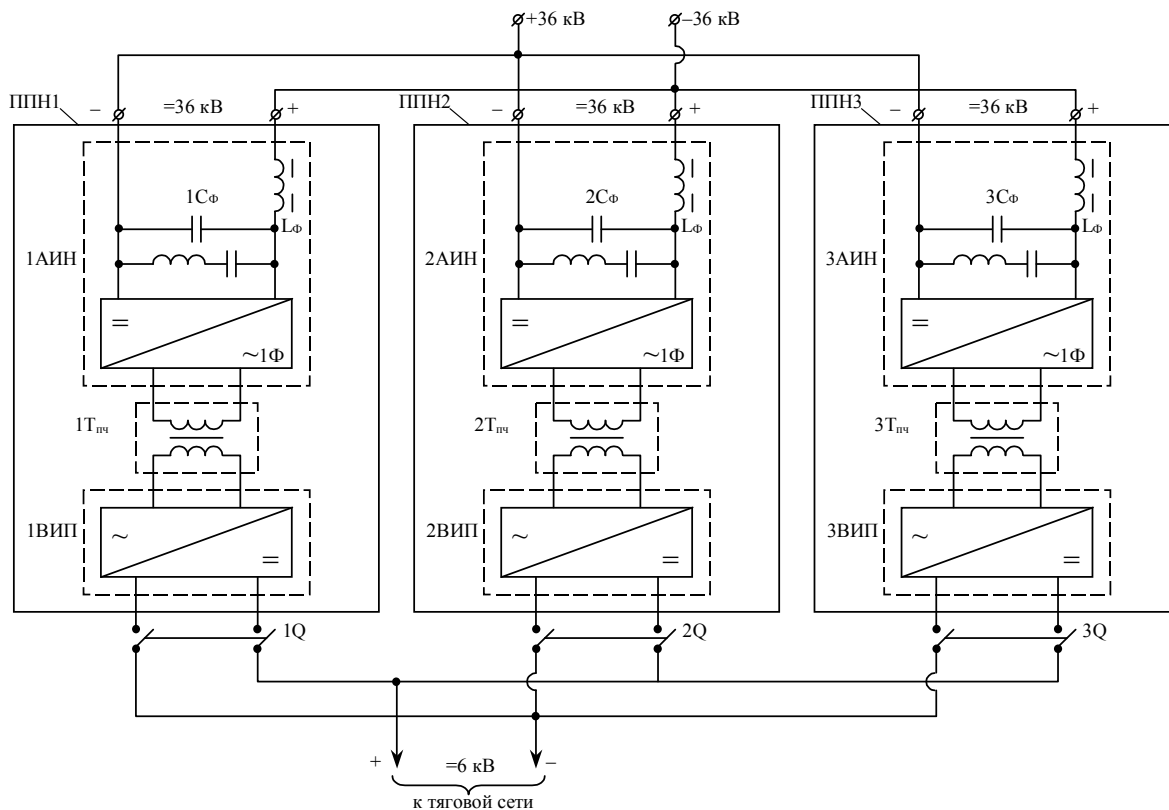


Рис. 4. Структурная схема преобразовательного пункта питания тяговой сети напряжением 6 кВ для ТЭС с продольной линией питания постоянного тока напряжения 36 кВ

На наш взгляд, более рациональной структурой ТЭС с продольной линией питания для СЭТ переменного тока промышленной частоты является структура, рассмотренная ранее применительно к СЭТ постоянного тока напряжения 6 кВ (рис. 2). В этом случае полностью унифицируются главные тяговые подстанции для двух типов СЭТ – переменного тока промышленной частоты и постоянного тока, а два (один) провода линии продольного питания напряжения 36 кВ подвешиваются на опорах контактной сети с полевой стороны как и в СЭТ переменного тока 25 кВ, 50 Гц с ЭУП [20]. В преобразовательные пункты питания ТЭС электротяги переменного тока промышленной частоты с продольной линией питания постоянного тока напряжения 36 кВ входят три преобразователя постоянного напряжения 36 кВ в однофазное переменное промышленной частоты 50 Гц напряжения 25 кВ, включаемые по входу и выходу параллельно и один из которых находится в резерве. Однако, структурно преобразователи постоянного напряжения в переменное, могут быть двух модификаций (рис. 5,а,б). Структурная модификация рис. 5,а представляет собой структуру автономного преобразователя, состоящего из двух последовательно включенных звеньев: однофазного инвертора напряжения (АИН<sub>50</sub>) и однофазного трансформатора (Т<sub>50</sub>) промышленной частоты 50 Гц. Структурная модификация рис. 5,б представляет собой структуру автономного преобразователя, состоящего из трех последовательно включенных звеньев: однофазного инвертора напряжения повышенной частоты (АИН<sub>пч</sub>), однофазного трансформатора повышенной частоты (Т<sub>пч</sub>) и обратимого непосредственного преобразователя частоты (НПЧ) с выходными параметрами 50 Гц и 25 кВ.

В заключении этого подраздела отметим, что ТЭС с продольной линией питания постоянного тока напряжения 36 кВ как для СЭТ переменного тока 25 кВ, 50 Гц, так и для СЭТ постоянного тока 6кВ, решает задачи в части:

- качественного отбора электроэнергии от трехфазной системы внешнего электроснабжения;
- снижения потерь энергии и напряжения в контактной сети;
- повышения пропускной и провозной способности по ТЭС и, что особенно важно для скоростного и высокоскоростного движения, улучшаются условия токосъема для СЭТ постоянного тока и снимаются «барьерные ограничения» по скорости со стороны тяговой сети из-за отказа от изолирующих нейтральных вставок в контактной сети СЭТ переменного тока.
- Кроме того, применение ТЭС с линией продольного питания постоянного тока 36 кВ позволяет:
  - использовать провода контактной сети меньшего сечения;
  - облегчить защиту от токов короткого замыкания в контактной сети;
  - уменьшить потенциалы рельсов относительно земли, а, следовательно, опасность электрокоррозийного разрушения подземных сооружений вблизи СЭТ постоянного тока;
  - уменьшить расходы на развитие внешнего электроснабжения, что особенно важно, при дальнейшем усилении тягового электроснабжения;
  - использовать систему гибкого усиления электроснабжения на отдельных наиболее нагруженных участках тяговой сети;
  - перейти на полностью автоматическое управление ТЭС.

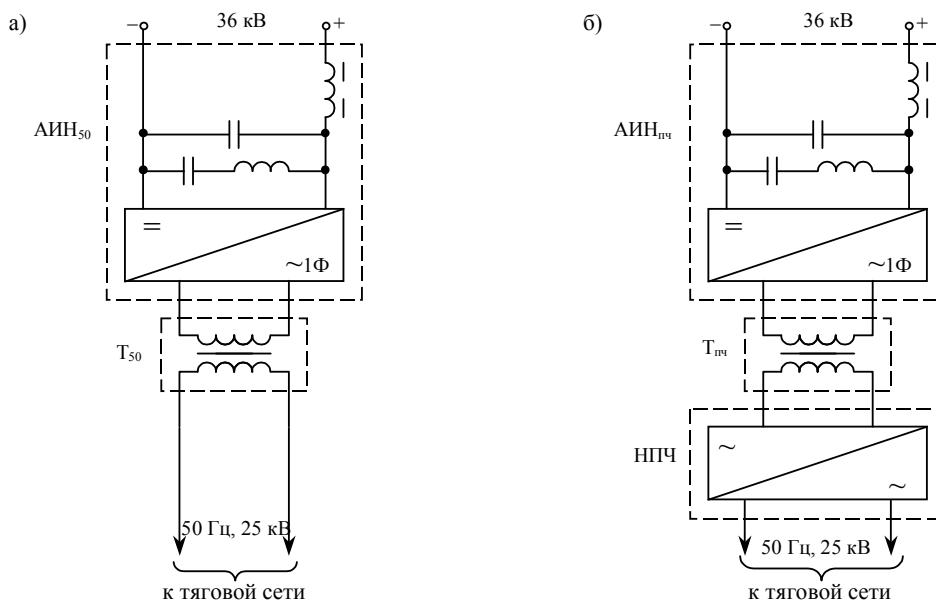


Рис. 5. Структуры преобразователей постоянного напряжения в переменное для преобразовательных пунктов питания ТЭС переменного тока промышленной частоты с продольной линией питания постоянного тока

Основное требование к электроподвижному составу XXI века – это повышение его мобильности и энергоэффективности при сохранении высоких мощностных и тяговых характеристик, достигнутых в мировой практике на конец XX века.

Повышение мобильности магистрального ЭПС, а это увеличение расчетной скорости, времени суточной работы и удлинения плеч обращения – единственный путь сохранения, а в некоторых случаях и уменьшения, количества ЭПС при осуществлении возрастающего объема перевозок.

Характерной особенностью ЭПС для высокоскоростных пассажирских поездов есть узкая специализация поездов на основе мотор-вагонной тяги постоянной составности [32] для которых вопросы мобильности решаются повышением общей надежности поезда и составлением оптимального графика движения. Эти условия определяют также и мобильность электропоездов пригородного сообщения.

Концепция же пассажирских поездов для скоростного движения, как правило, предусматривает использование локомотивной тяги, что, в принципе, обуславливает переменную их составность и, следовательно, прицепляемость и отцепляемость электропоездов. Учитывая это обстоятельство, а также тот факт, что скоростное пассажирское движение ( $V_{\max} = 200$  км/час) совмещается с обычным пассажирским движением ( $V_{\max} = 160$  км/час), специализированным грузовым ( $V_{\max} = 120$  км/час) и смешанным грузовым ( $V_{\max} = 100$  км/час) движениями [9], то для высокой мобильности электропоездов, обслуживающих эти поезда, необходима их универсальность. На наш взгляд, вопрос универсальности электропоездов может быть решен на базе структур «гибкого типажа», предложенного проф. Феоктистовым В.П., использующих для формирования любого локомотива (сплотки) одного типа базовой секции [23]. Каждая базовая локомотивная секция выпускается в расчете на установку двух кабин управления, любая из которых (или обе) непосредственно в условиях депо может быть заменена

на на переходной блок, позволяющий при сплотке локомотивной бригаде переход в соседнюю секцию, где с той же стороны должен быть установлен такой же переходной блок. Таким образом, применение модульных блоков К (кабина) и П (переходной) дает возможность на базе одной и той же силовой секции формировать такие варианты составности локомотива:

- локомотив на базе одной секции с двумя кабинами;
- локомотив на базе двух секций по схеме «кабина – переходной блок» и «переходной блок – кабина»;
- локомотив на базе трех (и более) секций по схеме «кабина – переходной блок», «переходной блок – переходной блок» и «переходной блок – кабина».

Все секции сплотки управляются по синхронному принципу из кабины главной секции, для чего используется телемеханическая беспроводная система на базе спутниковой связи.

Применительно к электрическим железным дорогам Украины с перспективой их развития в XXI веке мощность электровоза для скоростных поездов с экономически оправданным числом вагонов 8–14 составляет (4500÷9000) кВт. Эти данные хорошо совпадают с данными, приведенными в работе [9]. Для обеспечения грузового движения с экономически оправданной массой поезда 3000÷9000 тонн, требуется мощность электровоза (4200÷14000) кВт. Эти данные хорошо совпадают с данными проф. Гетьмана Г.К. [33]. Указанные мощности хорошо реализуются в локомотивной тяге на основе базовой секции локомотива мощностью 4800 кВт. В этом случае структура парка электропоездов при концепции «гибкого типажа» обеспечивает выдачу под поезда электропоездов мощностью 4800 кВт (вариант односекционного двухкабинного электровоза), 9600 кВт (вариант двухсекционного электровоза схемы «кабина – переходной блок» – «переходной блок – кабина») и 14400 кВт (вариант трехсекционного электровоза схемы «кабина – переходной блок» – «переходной блок – переходной блок» – «переходной блок – кабина»).

Сформировавшееся на начало XXI века мнение

отечественных и зарубежных специалистов-электровозостроителей [16, 25, 34-39] склонилось в пользу четырехосности электровозной секции на основе двухосной тележки, то есть к осевой формуле базовой секции электровоза  $2^0-2^0$ . Реализация же мощности 4800 кВт в базовой четырехосной электровозной секции практически выполнимо на основе индивидуального поосевого тягового привода с одноступенчатым силовым редуктором и использованием в качестве тягового двигателя асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором [40, 41]. В конструктивном плане, оснащение электровозного парка Украины в XXI веке целесообразно производить на базе двух модификаций базовых электровозных секций: грузо-пассажирской и пассажирско-скоростной, то есть фактически сохранить сложившуюся концепцию раздельных парков магистральных электровозов. Здесь следует отметить, что основными отличительными особенностями грузо-пассажирского и пассажирско-скоростного исполнения должен быть тип кузова и тип тяговой передачи, связывающей колесную пару с тяговым двигателем. Так, для грузо-пассажирской электровозной секции, допускающей большие осевые нагрузки (до 23,5 тн) и работающей при скоростях движения до 140 км/час, следует использовать стальной рамный кузов и тяговую передачу на основе опорно-осевого подвешивания тягового двигателя. Это позволит, с одной стороны, увеличить срок службы электровоза за счет более долговечной конструкции кузова [22], а с другой стороны, уменьшить стоимость и эксплуатационные затраты за счет более низкой стоимости мотор-колесных блоков в производстве и эксплуатации [41]. Для пассажирско-скоростной секции, работающей при скорости 160 км/час и выше, и требующей более низких нагрузок на ось (21 и меньше тн) [42], следует использовать цельнонесущий фермовый кузов, боковые стенки которого практически не воспринимают сил нажатия буферов и поэтому могут быть выполнены из легких материалов [43]. Тяговая же передача пассажирско-скоростной секции выполняется только на базе опорно-рамного (более точнее опорно-кузовного) подвешивания тягового двигателя, что позволяет снизить неподрессоренную массу тележки и тем самым при указанных скоростях уменьшить динамическое воздействие электровоза на путь [9]. При этом, более высокая стоимость и увеличение трудоемкости обслуживания и ремонта пассажирско-скоростной секции электровоза по сравнению с грузо-пассажирской секцией будут окупаться снижением затрат на содержание путевой структуры.

Создание универсального электровоза (грузо-пассажирского или пассажирско-скоростного) для эксплуатации в двух СЭТ: переменного и постоянного тока, является одной из важнейших задач в направлении повышения мобильности локомотивного парка железных дорог за счет увеличения длины плеч их обращения. Эта задача становится особенно актуальной для железных дорог Украины в связи с организацией скоростного пассажирского движения, основные маршруты которого, как правило, имеют два типа

тягового электроснабжения (см. например Харьков – Киев, Киев – Днепропетровск, Киев – Донецк, Киев – Симферополь). По нашему мнению, основой для разработки такого электровоза как для грузо-пассажирского, так и для пассажирско-скоростного движения, наряду с рассмотренными ранее конструкторскими подходами, является принцип универсальности электросхемы и ее компонентов, заключающийся в минимальной элементной избыточности электросхемы и возможности только за счет изменения ее конфигурации, обеспечить работу электровоза в двух СЭТ: переменного и постоянного тока.

На рис. 6 представлена универсальная силовая электросхема четырехосного пассажирско-скоростного электровоза с асинхронными трехфазными двигателями и потележечным управлением, работающего в двух СЭТ: переменного тока 50 Гц, 25 кВ и постоянного тока 6 кВ.

При работе электровоза в СЭТ переменного тока 50 Гц, 25 кВ, его электросхема через пантограф подключается к тяговой сети силовым контактом К1, а контакт К2 остается при этом разомкнутым. В этом случае, все каналы электросхемы, а именно, каналы питания тяговых асинхронных электродвигателей ТЭП1 и ТЭП2, канал бортового источника электроснабжения БИЭС и канал поездного источника электроснабжения ПИЭС питаются от вторичных обмоток W2 (1W2 – 4W2) тягового трансформатора Тр, к первичной обмотке W1 которого прикладывается напряжение тяговой сети 25 кВ, 50 Гц через замкнутый контакт К1. Преобразовательная часть каналов питания асинхронных электродвигателей выполнена на основе обратимого преобразователя переменного однофазного напряжения в трехфазное переменное напряжение с промежуточным звеном постоянного напряжения 6 кВ («ВИП – С<sub>ф</sub> – АИН»). Преобразовательная часть каналов БИЭС и ПИЭС выполнена на основе мостового выпрямителя однофазного переменного тока.

При работе электровоза в СЭТ постоянного тока 6 кВ, его электросхема через пантограф подключается к тяговой сети силовым контактом К2, а контакт К1 остается при этом разомкнутым. В этом режиме конфигурация электросхемы электровоза несколько изменяется за счет введения дросселя фильтра L<sub>ф</sub>, включаемого последовательно с контактом К2 и выведения из работы первичной обмотки W1 тягового трансформатора Тр, включенной последовательно с контактом К1. Теперь роль каналов питания тяговых асинхронных электродвигателей (ТАД1 – ТАД4) выполняют инверторы напряжения АИН1 и АИН2, питаемых от входного LC-фильтра, а роль источника питания каналов БИЭС и ПИЭС выполняют обратимые преобразователи ВИП1 и ВИП2, работающие синхронно и получающие питание также от LC-фильтра. Преобразователь ВИП1 и ВИП2 формируют переменное напряжение промышленной частоты на обмотках 1W2 и 2W2 тягового трансформатора Тр, являющихся теперь первичными по отношению к обмоткам 3W2 и 4W2 каналов БИЭС и ПИЭС соответственно.



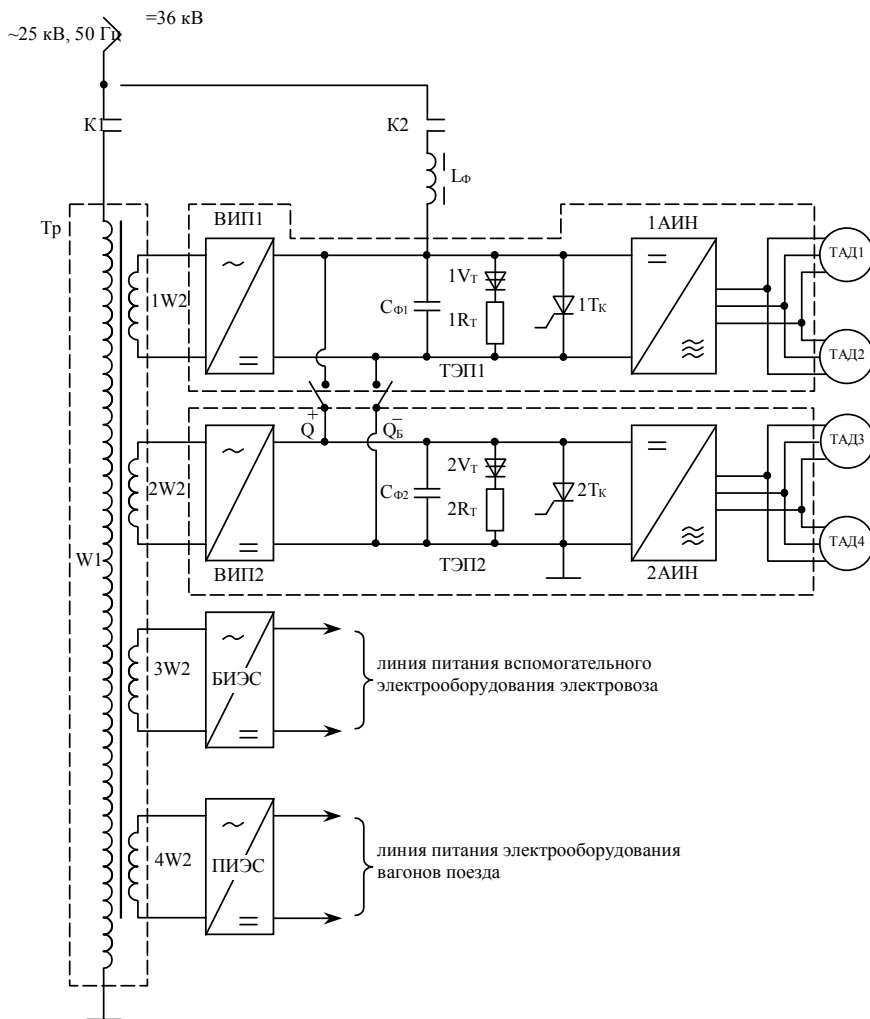


Рис. 6. Универсальная силовая электросхема двухсистемного четырехосного пассажирско-скоростного электровоза с асинхронными трехфазными двигателями и потележечным управлением

Таким образом, установка на борту электровоза переменного тока двух дополнительных устройств, а именно, быстродействующего выключателя постоянного тока и реактора фильтра решает задачу его использования в СЭТ постоянного тока напряжения 6 кВ. Если же решается задача создания двухсистемного электровоза 25 кВ, 50 Гц/3 кВ, что, на наш взгляд, является актуальным для электровозостроителей Украины на современном этапе, то в преобразовательной части каналов питания тяговых электродвигателей электровоза переменного тока предусматривается звено постоянного тока напряжением 3 кВ и, как в предыдущем случае, дополнительно вводятся в схему быстродействующий выключатель постоянного тока и реактор фильтра. Расчеты универсальной схемы (рис. 6), выполненные авторами с применением мультикритериальной оптимизации (вес, объем, к.п.д., цена) [44, 45], позволяют сделать вывод о возможности создания на базе четырехосного электровоза переменного тока ДСЗ двух модификаций двухсистемного электровоза двойного питания 25 кВ, 50 Гц/3 кВ мощностью 4800 кВ и нагрузкой на ось 21 и 22 тн: грузо-пассажирского с опорно-осевым подвешиванием тяговых асинхронных двигателей на максимальную скорость 140 км/час и пассажирско-скоростного с опорно-кузовным подвешиванием тяговых асинхронных двигателей на максимальную скорость 200

км/час. С учетом ценообразования на комплектующие и материалы, сложившегося на 1.09.2003 г., себестоимость односекционного четырехосного электровоза двойного питания с потележечным управлением не превысит:

- для грузо-пассажирской модификации 1350-1400 тыс. дол. США;
- для пассажирско-скоростной – 1500 - 1600 тыс. дол. США

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Более чем столетний период электрификации железных дорог характеризуется устойчивой тенденцией увеличения напряжения как в контактной сети ТЭС, так и на тяговых электродвигателях ЭПС. Концепция СЭТ каждого этапа электрификации отображает тот уровень развития технических средств преобразования электроэнергии, который был достигнут на их начало. В определенной степени уровень напряжения в контактной сети являлся и продолжает оставаться фактором совершенства СЭТ. Тяговый коллекторный электропривод ЭПС всех типов СЭТ периода первых трех этапов электрификации являлся наиболее критичным фактором на пути качественного повышения эффективности электрических железных дорог. Это особенно четко проявилось при организации скоростного и высокоскоростного пассажирского

движения.

Современный (четвертый) этап развития электрификации железных дорог, характеризующийся массовым внедрением на сети дорог мира скоростного и высокоскоростного пассажирского движения, основан на комплексном подходе к совершенствованию подсистем электрической тяги (ТЭС и ЭПС), который заключается в усилении ТЭС за счет перехода к децентрализованным схемам питания тяговой сети и повышения мощности ЭПС за счет применения тягового асинхронного электропривода. Реализация комплексного подхода, который стал возможным благодаря последним достижениям в областях электромеханики, автоматики, силовой электроники, преобразовательной и микропроцессорной технике, позволит, практически полностью снять ограничения по пропускной и провозной способности электрических железных дорог, как со стороны ЭПС, так и со стороны ТЭС, что особенно важно при организации скоростных и высокоскоростных перевозок.

Применительно к Украине, где скоростное пассажирское движение на железных дорогах еще практически не началось, а современное электровозостроение только начало делать первые шаги, комплексный подход к совершенствованию электрических железных дорог в XXI веке является наиболее перспективным направлением. При этом, по мнению авторов, дальнейшее развитие отечественного электровозостроения должно идти на основе принципа «гибкого типажа» путем создания двух модификаций двухсистемных базовых четырехосных секций с АТД и потележечным управлением мощностью 4800 кВт на базе унифицированной электросхемы: грузо-пассажирского ( $V_{\max} = 140$  км/час) и пассажирско-скоростного ( $V_{\max} = 200$  км/час) исполнений по схеме «кабина – переходной блок», в которых должна предусматриваться замена кабины на переходной блок и наоборот.

Совершенствование же ТЭС должно идти по принципу экономической целесообразности. Так, для СЭТ переменного тока 50 Гц, 25 кВ это переход на действующих линиях к тяговому электроснабжению с ЭУП, а на вновь строящихся линиях высокоскоростного движения – к распределенному ТЭС с продольной линией питания постоянного тока напряжения 36 кВ. Для СЭТ постоянного тока целесообразно повышение напряжения в контактной сети до 6 кВ и обязательный переход к схеме распределенного электропитания тяговой сети от линии продольного электропитания постоянного тока напряжения 36 кВ. При распределенной схеме ТЭС необходимо предусматривать внешнее электроснабжение главных тяговых подстанций прямо от генерирующих электростанций, так как аренда общесетевых высоковольтных ЛЭП110 и ЛЭП220 дороже чем строительство новых собственных высоковольтных ЛЭП.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Исаев И.П., Фрайфельд А.В. Беседы об электрической железной дороге. – М.: Транспорт, 1989. – 359 с.
- [2] Кисляков В.А., Плакс А.В., Пупынин В.Н. и др. Электрические железные дороги. – М.: Транспорт, 1993. – 280 с.
- [3] Котельников А.В., Белоглазова Н.С. Эффективность электрификации железных дорог и перспективы даль-

нейшего ее развития в России. // Электрификация и развитие железнодорожного транспорта в России. Традиции, современность, перспективы: Материалы международного симпозиума Eltrans'2001, 23-26 октября 2001 г., ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2002. – С.46-56.

- [4] Зеефельнер Е.Е. Электрическая тяга. Теория и применение электрической тяги на железных дорогах. – М.: НКПС – Транспечать, 1926. – 750 с.
- [5] Калинин В.К. Электровозы и электропоезда. – М.: Транспорт, 1991. – 480 с.
- [6] Скобелев В.Е. Двигатели пульсирующего тока. – Л.: Энергия, 1968. – 231 с.
- [7] Курбасов А.С. Повышение работоспособности тяговых электродвигателей. – М.: Транспорт, 1977. – 223 с.
- [8] Мамошин Р.Р. Повышение качества энергии на тяговых подстанциях дорог переменного тока. – М.: Транспорт, 1973. – 224 с.
- [9] Высокоскоростное пассажирское движение (на железных дорогах). Под ред. Н.В. Колодяжного. – М.: Транспорт, 1976. – 416 с.
- [10] Киселев И.П. Развитие высокоскоростного подвижного состава. // Электрификация и развитие железнодорожного транспорта в России. Традиции, современность, перспективы: Материалы международного симпозиума Eltrans'2001, 23-26 октября 2001 г., ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2002. – С.190-199.
- [11] Новые силовые полупроводниковые приборы для тягового электроснабжения. / Железные дороги мира, №1, 2000. – С.46-51.
- [12] Пронтарский А.Ф. Системы и устройства электроснабжения. – М.: Транспорт, 1979. – 261 с.
- [13] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- [14] Бурков А.Т. Выбор тока и уровня напряжения электрического транспорта новых поколений. // Электрификация и развитие железнодорожного транспорта в России. Традиции, современность, перспективы: Материалы международного симпозиума eltrans 2001, 23-26 октября 2001 г., ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2002. – С.37-40.
- [15] Василянский А.М., Мамошин Р.Р. Симметрирование тяговых нагрузок на железных дорогах, электрифицированных по системе переменного тока. // Электрификация и развитие железнодорожного транспорта в России. Традиции, современность, перспективы: Материалы международного симпозиума eltrans'2001, 23-26 октября 2001 г., ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2002. – С.156-162.
- [16] Котельников А.В., Нестрахов А.С. Железнодорожный транспорт России в 2000...2030 г.г. (научная концепция). / Вестник ВНИИЖТа, №5, 2000. – С.3-15.
- [17] Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций. Под ред. докт. тех. наук М.Т. Шалимова. – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.
- [18] Новый электроподвижной состав магистральных и горных железных дорог. Под ред. докт.тех. наук В.Г. Щербакова. – Новочеркасск, издательство НГТУ, 1996. – 210 с.
- [19] Аржанников Б.А. Совершенствование системы электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ. / Тезисы докладов Международного симпозиума Eltrans'2001. – Санкт-Петербург, издательство ПГУПС, 2001. – С.45-46.
- [20] Бочев А.С. Электротяговая сеть с ЭУП и перспективы ее применения. / Тезисы докладов Международного симпозиума Eltrans'2001. – Санкт-Петербург, издательство ПГУПС, 2001. – С.101.
- [21] Бочев А.С., Фигурнов Е.П. Электротяговая сеть с экранированным проводом в современных условиях. / Электрификация и развитие железнодорожного транспорта в России. Традиции, современность, перспекти-

- вы: Материалы международного симпозиума eltrans 2001, 23-26 октября 2001 г., ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2002. – С.171-175.
- [22] Русак А.Д. Современный электроподвижной состав железных дорог России и проблемы его развития. / Электрификация и развитие железнодорожного транспорта в России. Традиции, современность, перспективы: Материалы международного симпозиума eltrans 2001, 23-26 октября 2001 г., ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2002. – С.176-181.
- [23] Феокистов В.П. Концепция грузовых и грузопассажирских электровозов нового поколения. / Электрификация и развитие железнодорожного транспорта в России. Традиции, современность, перспективы: Материалы международного симпозиума eltrans 2001, 23-26 октября 2001 г., ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2002. – С.200-202.
- [24] Сорин Л.Н., Носков А.А. Пассажирские электровозы России. / Электрификация и развитие железнодорожного транспорта в России. Традиции, современность, перспективы: Материалы международного симпозиума eltrans 2001, 23-26 октября 2001 г., ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2002. – С.203-210.
- [25] Чумак В.В., Браташ В.А. Перспективы развития электровозостроения в Украине. / Транспорт: Збірник наукових праць. – Вип. 11. – Дніпропетровськ, 2002. – С.3-6.
- [26] Курбасов А.С. Система электрической тяги XXI века. / Железные дороги мира, №4, 1999. – С.19-20.
- [27] Курбасов А.С. Эффективность системы электрической тяги постоянного тока 6 кВ. / Железнодорожный транспорт, №11, 2002. – С.32-34.
- [28] Омеляненко В.И., Панасенко Н.В., Панасенко Н.Н. Пути совершенствования системы электрической тяги постоянного тока. / Тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития железнодорожного состава» (г. Новочеркасск, 17-19 июня 2003 г.). – Новочеркасск, 2003. – С.39-41.
- [29] Марикин А.Н. Проблемы развития перспективных систем электроснабжения тяги поездов. / Тезисы докладов Международного симпозиума Eltrans'2001. – Санкт-Петербург, издательство ПГУПС, 2001. – С.57-58.
- [30] Жемчугов В.Г. Преобразовательный модуль 24/3 кВ для системы тягового электроснабжения и ЭПС. / Тезисы докладов Международного симпозиума Eltrans'2001. – Санкт-Петербург, издательство ПГУПС, 2001. – С.72-73.
- [31] Марикин А.Н. Схемотехника современных тяговых подстанций постоянного тока и перспективные системы электроснабжения. / Электрификация и развитие железнодорожного транспорта в России. Традиции, современность, перспективы: Материалы международного симпозиума eltrans 2001, 23-26 октября 2001 г., ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2002. – С.147-155.
- [32] Панасенко М.В. Проблеми розвитку швидкісного руху в Україні. / Збірник наук. праць ХарДАЗТ «Напівпровідникові та мікропроцесорні пристрої в електроенергетичних системах транспорту», Харків, Видавництво ХарДАЗТ, 200. – С.3-5.
- [33] Гетьман Г.К. Наукові основи визначення раціонального ряду потужностей вантажних електровозів для залізниць України. // Автореферат дис. на здобуття наук. ст. докт. тех. наук. – Дніпропетровськ, 2001. – 36 с.
- [34] Браташ В.А. Состояние и перспективы развития электровозостроения в Украине. / Тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития железнодорожного состава» (г. Новочеркасск, 17-19 июня 2003 г.). – Новочеркасск, 2003. – С.27-28.
- [35] Носков А.Л. НЭВЗ и современный рынок железнодорожного электроподвижного состава. / Тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития железнодорожного состава» (г. Новочеркасск, 17-19 июня 2003 г.). – Новочеркасск, 2003. – С.8-10.
- [36] Сорин Л.Н. Программа работ ВЭЛНИИ по созданию перспективных электровозов. / Тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития железнодорожного состава» (г. Новочеркасск, 17-19 июня 2003 г.). – Новочеркасск, 2003. – С.10-13.
- [37] Покровский С., Гай Ш., Штер М. Состояние и перспективы проекта ЭП10. / Тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития железнодорожного состава» (г. Новочеркасск, 17-19 июня 2003 г.). – Новочеркасск, 2003. – С.20-23.
- [38] Тхабисимов Б. Разработка и внедрение современных типов подвижного состава. / Тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития железнодорожного состава» (г. Новочеркасск, 17-19 июня 2003 г.). – Новочеркасск, 2003. – С.24.
- [39] Балашвили Д.Н., Манджavidзе Н.Г., Натенадзе Т.В. Состояние и перспективы развития электровозостроения на Тбилиском АО «Электровозостроитель». / Тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития железнодорожного состава» (г. Новочеркасск, 17-19 июня 2003 г.). – Новочеркасск, 2003. – С.28-30.
- [40] Головченко В.А. О некоторых особенностях схем и конструкций перспективных магистральных электровозов. / Известия ВУЗов. Электромеханика, №3, 2000. – С.4-12.
- [41] Сорин Л.Н. Перспективные электровозы. / Электровозостроение: Сб. научн. трудов ОАО «ВЭЛНИИ». – Новочеркасск, 2001. – С.3-14.
- [42] Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями. Под ред. д.т.н., проф. Ротанова Н.А. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.
- [43] Медель В.Б. Подвижной состав электрических железных дорог. М.: Транспорт, 1974. – 232 с.
- [44] Vincent T.L., Grantham W.J. Optimality in parametric system. – Wiley, N.Y., 1981. – 450 p.
- [45] Zeleny M. Multiple criteria decision making. – Mc Craw-Hill, N.Y., 1982. – 540 p.

*Поступила 18.09.2003*