

И.В. Доманский

РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С УСТРОЙСТВАМИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В статті проведена порівняльна оцінка регульованих установок компенсації реактивної потужності та розроблена методика вибору їх параметрів і місць розміщення в електротяговій мережі. Проведені дослідження та аналіз режимів роботи електротягових мереж і ліній енергосистем, що їх живлять. Виділені фактори, які в найбільшій мірі впливають на енергозбереження. Бібл. 15, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: компенсація реактивної потужності, енергозбереження, система тягового електропостачання, режими роботи, фактори, що впливають, енергетична безпека.

В статье дана сравнительная оценка регулируемых установок компенсации реактивной мощности и разработана методика выбора их параметров и мест размещения в электротяговой сети. Проведены исследование и анализ режимов работы электротяговых сетей и питающих линий энергосистем. Выделены факторы, которые в наибольшей степени влияют на энергосбережение. Библ. 15, табл. 2, рис. 4.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, энергосбережение, система тягового электроснабжения, режимы работы, влияющие факторы, энергетическая безопасность.

Введение и постановка проблемы. Минимизация потерь электроэнергии в тяговой сети является целевой задачей участия системы тягового электроснабжения (СТЭ) в формировании энергетической эффективности электрической тяги в целом [1]. Наименьшая мощность СТЭ требуется при наиболее равномерном распределении поездов (по их числу и типу) во времени. Повышение энергетической эффективности режимов работы СТЭ переменного тока с нерациональными потоками реактивной мощности и наличием транзита мощности из-за межсистемных перетоков требует применения автоматического регулирования напряжения на тяговых подстанциях и ввода в работу рациональных мощностей компенсирующих устройств.

Эффективность применения конденсаторных установок в электроэнергетике известна давно [2-6]. Они позволяют повысить провозную способность железных дорог при больших нагрузках за счет повышения напряжения в тяговой сети до нормируемых значений. С их помощью также нормализуется баланс по реактивной мощности в рассматриваемом узле электроснабжения для обеспечения приемлемого режима напряжения для потребителя, решаются вопросы снижения потерь мощности и в целом повышается качество электроэнергии.

Практика доказала приемлемость в тяговом электроснабжении установок поперечной (КУ) и продольной (УПК) емкостной компенсации для повышения эффективности и надежности работы железных дорог. Тем не менее, проблема совершенствования КУ и УПК с учетом современных требований к электроснабжению является первоочередной и требует выполнения их регулируемые и переключаемые, учитывающая основные нормативно-правовые документы [7].

Для эффективного распределения инвестиций при модернизации СТЭ важно путем технико-экономических расчетов на имитационных моделях [8, 9] определить наиболее влияющие факторы на энергосбережение. Необходимо разработать новую методику выбора параметров и мест размещения

поперечной и продольной компенсации в СТЭ во взаимосвязи с режимами работы систем внешнего электроснабжения (СВЭ).

Цель статьи – системный анализ режимов работы внешнего и тягового электроснабжения и выбор параметров и мест размещения устройств компенсации, позволяющих обеспечить энергосбережение в тяговых сетях переменного тока и экономичность процесса перевозок.

Сравнительная оценка регулируемых установок компенсации реактивной мощности. В зависимости от способов регулирования рассмотрим следующие группы перспективных регулируемых КУ и УПК для тягового электроснабжения:

1. Плавно регулируемая установка КУ с нерегулируемой конденсаторной батареей и с параллельно включенным трансреактором, регулируемым тиристорным блоком, и фильтрами для снижения гармоник, образованных работой тиристорного блока.
2. Ступенчато регулируемая КУ с несколькими переключаемыми секциями конденсаторных батарей.
3. Переключаемые УПК.

В настоящее время в тяговых сетях, сетях 35 кВ и выше применяются схемы с реактором, регулируемым тиристорами (СТК), рис.1,а. Изменяя угол регулирования тиристоров от 0 до $\pi/2$, изменяется величина тока, протекающая через реактор, от номинального значения до нуля. Недостаток схемы с управляемыми тиристорами – наличие высших гармоник в токе, который потребляется реактором из сети. В схеме с реактором, управляемом тиристорами, обязательно должны быть фильтры Φ , настроенные на нечетные гармоники [10, 11].

Вместо реактора может применяться реактор-трансформатор для снижения напряжения на коммутируемых тиристорах. Проект этой схемы выполнен в Словакии для тягового электроснабжения. Известны схемы с включением КБ через понижающий трансформатор (автотрансформатор), обеспечивающие возможность работы СТК на пониженном напряжении.

© И.В. Доманский

СТК мощностью 10 Мвар и напряжением 25 кВ с реакторной группой ТРГ, управляемой тиристорами, и мощными фильтро-компенсирующими цепями введен в эксплуатацию на участке тяговой сети 25 кВ с одно-сторонним питанием в Chathill (Англия). В часы пик потеря напряжения в конце линии составляла 8-9 кВ, установка СТК обеспечила снижение потери напряжения на 3 кВ при максимальной мощности нагрузки.

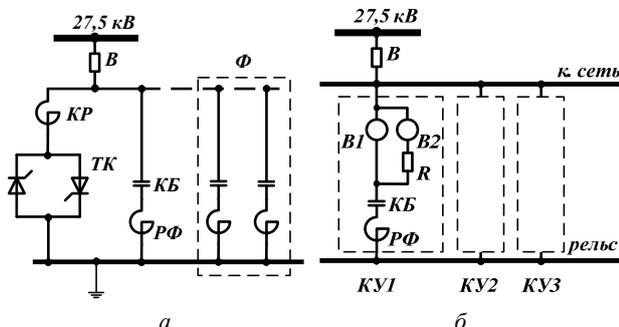


Рис. 1. Регулируемые КУ с плавной регулировкой (а), и ступенчатые (б): КР – компенсирующий реактор; Ф – фильтро-компенсирующие цепи; РФ – фильтровый реактор; ТК – тиристорный компенсатор

На тяговой подстанции Villenoy (Франция) в 2003 г. включены три однофазных СТК на каждую фазу с тем, чтобы дополнительно снижать несимметрию тяговой нагрузки путем пофазного регулирования мощности СТК.

Украинские железные дороги также имеют опыт применения плавно регулируемой установки КУ. Так на тяговой подстанции Александрия Одесской железной дороги в 2009 г. введено в работу три установки КУ (производитель СКД ЭЛЕКТРОТЕХНИКА), общей мощностью 18,4 Мвар, (рис. 1,а). В фазу А и фазу В включены регулируемые установки СТК с конденсаторами типа CUEFS 23-8.7/600/WF и реакторами компенсирующим и декомпенсирующим соответственно KTL-182/155 и KTL-192/210 с $Q_A = 7609$ квар и $Q_B = 7565$ квар. Нерегулируемая установка КУ с конденсаторами КЭК1-1,05-63-1У1 и реактором ФРОМ-3200/35 У1, мощностью $Q = 5699$ квар включается в фазу А или В. Для обеспечения компенсации (декомпенсации) реактивной мощности и фильтрации высших гармонических составляющих напряжения и тока применяется общая схема динамической компенсации, при которой преобразователь системы СОМРАСТ осуществляет регулировку величины фазного тока декомпенсирующих реакторов. В основе этой системы – блок полупроводникового преобразователя, который включает в себя оптотиристры с защитными резисторно-конденсаторными элементами и блок сигнализации. До установки КУ среднесуточное потребление электроэнергии тяговой подстанции в 2009 г. составляло $S = 250-j80$ МВА, $\text{tg}\varphi=0,32$. Для такой нагрузки, установленные мощности конденсаторов (18,4 Мвар) превышают правильно рассчитанные по реактивной мощности, режиму напряжения, несимметрии, гармоникам в несколько раз [10]. В частности, мощность потерь только в стали сердечников реакторов ФРОМ-3200/35 У1 составляет 10,5 кВт.

Известный вариант регулируемых КУ – ступенчатые, когда КУ состоит из нескольких секций и в зависимости от регулируемого параметра (напряжение, ток, реактивная мощность и т.д.) включается-отключается очередная секция (рис. 1,б, секции КУ1, КУ2, КУ3). В каждой секции включены конденсаторная батарея КБ, реактор РФ и главный выключатель В1 с демпфирующей цепочкой В2 – R. Задача демпфирующей цепи снизить до допустимых значений броски тока и напряжения при включении одиночной секции и при включении очередной секции параллельно включенным секциям.

Из секций формируются ступени мощности КУ. Обычно значения мощностей секций КУ соответствуют геометрической прогрессии (например, 2, 4, 8). В частности, если КУ состоит из двух секций 2 и 4 Мвар, то формируются следующие три ступени мощности: 2, 4 и $2 + 4 = 6$ Мвар. В качестве секций могут быть включены секции КУ или фильтро-компенсирующие устройства (ФКУ). Типовой вариант двухрезонансной ФКУ в целом соответствует предъявленным требованиям в договорах электро-снабжения, однако отличается высоким значением соотношения установленной к полезной мощности (2,25) и высокой стоимостью. Заслуживает внимания схема установки КУ с функцией фильтрации высших гармоник КУф модульного типа [12].

Необходимость модульного построения диктуется тем, что в общем случае степень необходимого снижения потребляемой реактивной мощности и высших гармонических составляющих тока (напряжения) в соответствии с нормативами на каждой тяговой подстанции различна. Поэтому в ФКУ должна быть возможность изменения соответствующих параметров путем включения (отключения) соответствующих модулей. Проблема отключения КУ в настоящее время решена: вакуумные выключатели надежно отключают емкостные токи КУ без бросков тока и напряжения. Поэтому основное внимание при переходных режимах обращают на процессы включения устройств. Таким образом, наряду с компенсацией реактивной мощности обеспечивается электромагнитная совместимость СТЭ с СВЭ, ЭПС, с цепями автоматики и телемеханики и устройствами проводной и радио связи.

Установка УПК для СТЭ с непрерывно изменяющимися нагрузками – мощное техническое решение повышения и стабилизации напряжения на токоприемнике ЭПС грузонапряженных участков железных дорог. Для повышения напряжения на токоприемниках ЭПС, а также для симметрирования напряжения на шинах 27,5 кВ УПК следует включить в отсасывающую линию тяговой подстанции (рис. 2). УПК должна быть, как правило, переключаемой с двумя секциями. При работе одного трансформатора работает одна секция, которая определяет первую ступень УПК по сопротивлению и мощности. При работе двух трансформаторов подключается вторая секция, и тем самым совместно с первой секцией формирует вторую ступень УПК. Если на подстанции всегда в работе один трансформатор, то УПК должна

содержать одну секцию. С ростом сопротивления X_S СВЭ повышается эффективность работы УПК. С учетом опыта работы УПК рекомендуется устанавливать ее на тяговых подстанциях, где сопротивление X_S больше 0,5 Ом.

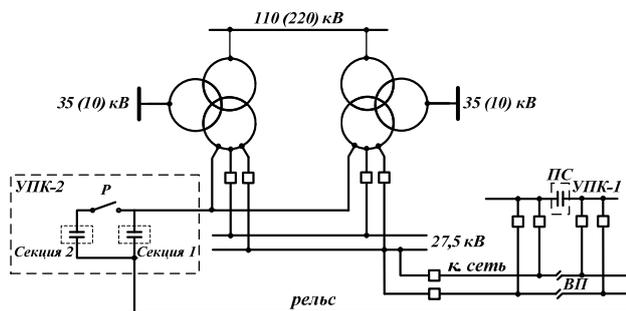


Рис. 2. Продольная емкостная компенсация в СТЭ

Целесообразность такого способа включения была проверена многолетним опытом эксплуатации на Горьковской и Восточно-Сибирской ж.д. Такой способ включения повышает уровень напряжения в контактной сети (особенно на плече питания от отстающей фазы), и, что очень важно, симметрирует напряжение на шинах 27,5 кВ. В результате снижается несимметрия напряжения на линиях ДПП и АВ (автоблокировки) [13, 14].

Известно, что нормативы по показателям качества электрической энергии относятся к шинам балансовой принадлежности (для тяговых подстанций, к шинам 110 (220) кВ). Несимметрия и несинусоидальность на этих шинах зависит не только от тяговой нагрузки, но и растет от увеличения X_S СВЭ. Реализация энергоэффективного режима СТЭ и возможный разброс X_S СВЭ требует применения устройства контролирующего X_S .

Опыт эксплуатации УПК в странах Западной Европы и России показывает, что нет необходимости в большой степени компенсации УПК: во первых, при больших нагрузках включается второй трансформатор и уменьшается сопротивление подстанции; во вторых, большая степень компенсации УПК приводит к большому уравнивательным токам по тяговой сети и перегрузке трансформаторов тяговых подстанций. Поэтому следует по возможности снижать степень компенсации до допустимого значения $K = 0,7$.

Далее ограничимся рассмотрением двух вариантов регулируемых КУ (плавно и ступенчато) для тяговой сети переменного тока. Краткая характеристика и оценка указанных вариантов по критериям стабилизации напряжения, компенсации реактивной мощности и снижению потерь электроэнергии в СТЭ показывает:

1. *Краткая характеристика.* Вариант 1. Главное преимущество – плавное регулирование компенсирующей (емкостной) реактивной мощности с заданным быстродействием, реагирует на реальный график тяговой нагрузки. При этом практически отсутствуют броски тока и напряжения при регулировании реактивной мощности. Для реализации плавно регулируемой установки введено следующее силовое оборудование, что определяет повышенную стоимость установки: нерегулируемая КУ с резонансной настройкой

на 150 Гц; трансреактор; тиристорный регулятор; фильтры снижения гармоник; коммутационная аппаратура указанного оборудования. Вариант 2. Главное преимущество – простота исполнения, что определяет пониженную стоимость установки. Указанное КУ выполнено с демпфирующим устройством, обеспечивающим коммутацию секций с допустимыми бросками тока и напряжения. Оборудование установки: ступенчатая регулируемая с несколькими секциями конденсаторных батарей, настроенными на 150 (250) Гц (не более 2-3 секций); коммутационная аппаратура для секций. Так как регулирование происходит путем включения-отключения секций коммутационным аппаратом (принимается однофазный вакуумный выключатель 27,5 кВ), то важно определить ресурс выключателя при коммутации секций КУ. По паспортным данным электрический ресурс коммутационной стойкости: при номинальном токе (1250 А) – 20000 циклов ВО. Механический ресурс – 60000 циклов ВО (при условии замены вакуумных камер с механическим ресурсом 30000 циклов). Срок службы выключателя – 30 лет. Следует учесть, что выключатель отключает-включает активно-емкостной ток секции не более 200 А (при включении-отключении секции вводится резистор 80 Ом). Поэтому реальный электрический ресурс будет значительно больше (30000-40000 циклов и более). Если считать, что в течение суток будет происходить 10-20 переключений выключателя одной секции, то камеры следует заменить через $(30000-40000)/[(10-20) \times 30 \times 12] = 5,5-8$ лет. Указанный срок работы установки свидетельствует на приемлемость этого варианта для эксплуатации.

2. *Стабилизация напряжения в тяговой сети.* Допустимое напряжение на токоприемнике грузового ЭПС 21-29 кВ [7]. Поэтому быстродействие КУ с тиристорным регулятором СТК не имеет решающего преимущества. Единственно, что важно учесть – резкое повышение напряжения сверх нормированного 29 кВ при сбросе тяговой нагрузки. Но в этом случае должна работать защита КУ без выдержки времени. Таким образом, с точки зрения поддержания напряжения на токоприемнике нет необходимости в быстродействии КУ и для условий эксплуатации достаточно использовать ступенчатое регулирование КУ. Следует учесть, что главная составляющая доходной части регулирования КУ, необходимая для технико-экономических расчетов, составляет эффект в эксплуатационной работе железных дорог от повышения и стабилизации напряжения.

3. *Компенсация реактивной мощности.* При расчете КУ по критерию повышения пропускной способности железнодорожных участков по напряжению всегда будет обеспечена компенсация реактивной мощности до нормативных значений. Поэтому с этой точки зрения, рассматриваемые варианты идентичны.

4. *Снижение потерь электроэнергии.* Здесь следует рассмотреть снижение потерь мощности при переходе от нерегулируемых КУ к регулируемым, что подробно рассмотрено в [10]. С учетом специфики изменяющейся тяговой нагрузки указанное снижение сравнительно небольшое и составляет несколько процентов от полных потерь мощности без КУ. Причем

с ростом пропускной способности эффект снижения потерь от регулирования реактивной мощности снижается и вряд ли стоит ориентироваться на окупаемость регулирования КУ за счет дополнительного снижения потерь мощности. Вместе с тем потери мощности в КУ с тиристорным регулированием (вариант 1) на порядок и более превышают потери в ступенчато регулируемой КУ (вариант 2). Вполне возможно, что при тщательном сравнительном расчете вариантов окажется, что потери мощности в тяговой сети при включении СТК будут превосходить потери мощности при отключенном её состоянии.

5. *Технико-экономические расчеты* показывают, что для тяговых сетей отечественных железных дорог в настоящее время применение СТК связано с большими капитальными вложениями, что определяет большие сроки окупаемости инвестиций (более 10-15 лет). Поэтому применение СТК в тяговом электроснабжении требует упрощения и удешевления, прежде всего тиристорно-реакторной группы регулирования. В тоже время нормативные документы для тягового электроснабжения допускают большой разброс напряжений на токоприемнике ЭПС: 21(24) – 29 кВ, а быстрое действие СТК в регулировании напряжения не имеет решающего значения для работы ЭПС. Поэтому естественно желание применить более простые технические решения для регулирования мощности КУ в тяговых сетях.

6. *Перспективы применения вариантов.* Регулируемая КУ с тиристорным регулятором СТК (вариант 1) не имеет решающего технического преимущества перед ступенчато регулируемой КУ. В то же время стоимость КУ с тиристорным регулированием СТК в 4-6 раз и более превышает стоимость ступенчато регулируемой КУ. На современном этапе и в ближайшей перспективе для массового внедрения регулируемых КУ в тяговой сети целесообразен вариант 2 схемы ступенчатого регулирования КУ.

Методика выбора параметров и мест размещения установок поперечной компенсации в СТЭ. Известно, что компенсация реактивной мощности направлена в основном на экономию (уменьшение потерь) при эксплуатации тяговых сетей и одновременно на улучшение качества напряжения. Для нахождения наилучшего решения необходимо сопоставлять стоимость установки компенсирующих устройств и дополнительной аппаратуры к ним (с учетом расходов на эксплуатацию) с экономией на стоимости потерь в тяговых сетях, а также с выигрышем, полученным за счет улучшения качества напряжения ЭПС и нетяговых потребителей. Эффективный вариант компенсации реактивной мощности тяговой нагрузки – распределенная система КУ в тяговой сети, когда КУ включены на постах секционирования и на тяговых подстанциях (рис. 3).

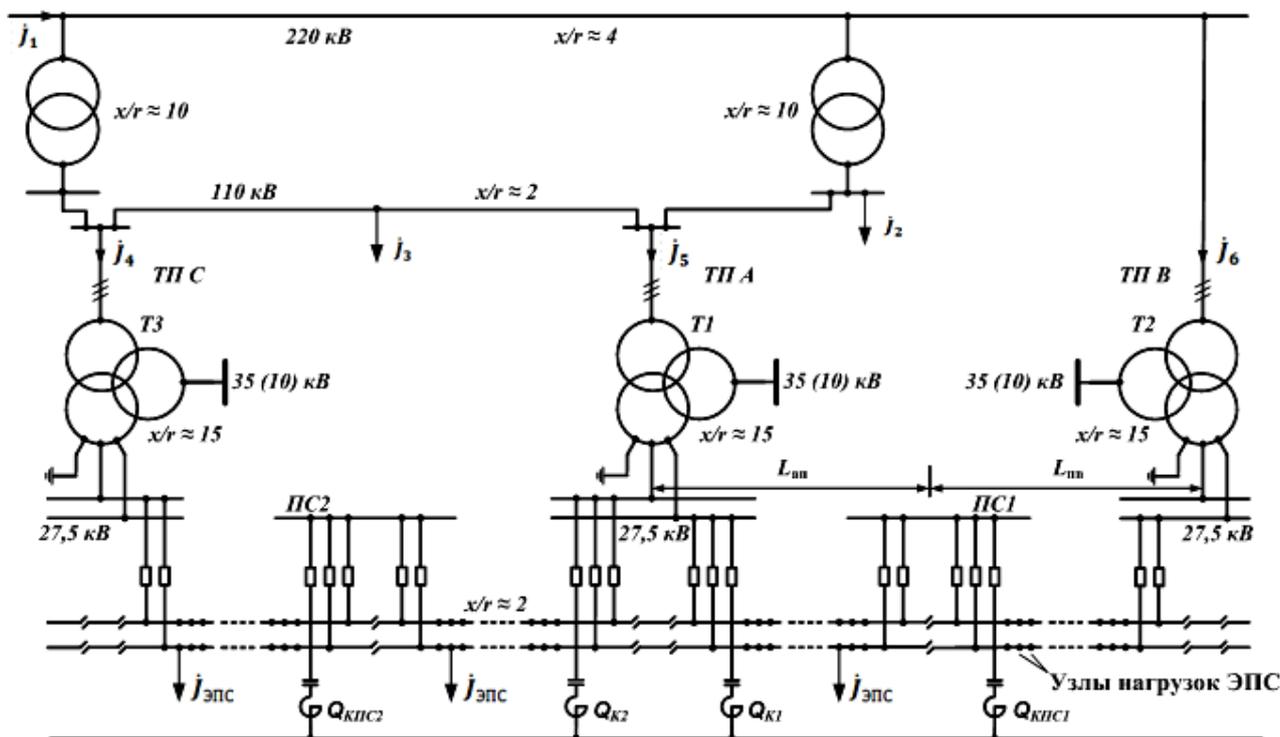


Рис. 3. Фрагмент внешнего электроснабжения тяговой сети с распределенной поперечно емкостной компенсацией

Для выбора номинальной мощности КУ следует выполнить расчет наименьшего действующего напряжения на токоприемнике ЭПС для заданных размеров движения по нормальной (проектной) схеме СТЭ с учетом сгущения поездов в интенсивный час. Расчеты во всех случаях следует выполнять с использованием программных комплексов с имитацией взаимосвязанных мгновенных схем движущихся нагруз-

зок ЭПС [2, 8, 9, 15]. Так для каждой из межподстанционных зон рассматриваемого участка (рис. 3) при заданных размерах движения и нормальной схеме питания определяется фактическое наименьшее напряжение на токоприемнике ЭПС $U_{\text{мин.ф.}}$:

$$\dot{U}_{\text{мин.ф.}} = \left(\sum_{i=1}^n \dot{U}_{\text{ши}i} - \Delta \dot{U}_{\text{max}i} \right) / n, \quad (1)$$

где $\dot{U}_{\text{ши}}$ – мгновенное значение напряжения на шинах тяговой подстанции; $\Delta \dot{U}_{\text{maxi}}$ – мгновенное максимальное падение напряжения в векторе $\Delta \dot{U}$ падений напряжений от узлов нагрузок ЭПС до базисного узла; n – количество решенных мгновенных схем за время моделирования T .

Падение напряжения на участке сети от любого узла до базисного находится по выражению

$$\Delta \dot{U} = \mathbf{M}_{\alpha t}^{-1} \dot{U}_{\alpha}, \quad (2)$$

где $\mathbf{M}_{\alpha t}^{-1}$ – транспонированная обратная первая матрица инцидентий для дерева схемы; $\dot{U}_{\alpha} = \mathbf{Z}_{\alpha} \dot{I}_{B\alpha} - \dot{E}_{\alpha}$ – вектор падения напряжения на ветвях дерева схемы; \dot{E}_{α} – э.д.с. в ветвях дерева схемы. Здесь для определения токов в ветвях схемы по известным нагрузкам поездов и нагрузкам внешней системы электроснабжения используется выражение

$$\dot{I}_B = \mathbf{N}_t \left\{ \left(\mathbf{N} \mathbf{Z}_B \mathbf{N}_t \right)^{-1} \left[\mathbf{N} \left(\dot{E}_{\xi} + \dot{E}_{\tau} \right) - \mathbf{N} \mathbf{Z}_B \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{\alpha}^{-1} \\ 0 \end{pmatrix} \mathbf{j} \right] \right\} + \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{\alpha}^{-1} \\ 0 \end{pmatrix} \mathbf{j}, \quad (3)$$

где $\mathbf{M}_{m \times n}$ и $\mathbf{N}_{k \times n}$ – первая и вторая матрицы инцидентий; m – количество узлов; n – количество ветвей; $k = n - m$ – количество независимых контуров; \mathbf{Z}_B – матрица сопротивлений ветвей; $\mathbf{j} = (\mathbf{j}_1, \mathbf{j}_2, \dots, \mathbf{j}_m)$ – вектор задающих токов; \dot{E}_{ξ} – вектор э.д.с. в ветвях дерева и хорд без трансформаций; \dot{E}_{τ} – вектор э.д.с. в ветвях дерева и хорд с трансформациями; \mathbf{M}_{α}^{-1} – обратная матрица инцидентий для дерева схемы. Здесь элементы τ в векторах \dot{E}_{τ} и \dot{I}_B связаны зависимостями $\dot{E}_{\alpha\tau} = \mathbf{K} \dot{E}_{\beta\tau}$ и $-\mathbf{K} \dot{I}_{\alpha\tau} = \dot{I}_{\beta\tau}$ где \mathbf{K} – квадратная матрица коэффициентов трансформации размерностью τ ; α – ветви дерева схемы; β – ветви хорд схемы; ξ – ветви дерева и хорд не связанные с трансформациями.

В задачах, не требующих расчета токораспределения, вектор падения напряжения определяется по формуле:

$$\Delta \dot{U} = \dot{Y}^{-1} \mathbf{j}, \quad (4)$$

где $\dot{Y} = \mathbf{M} \mathbf{Z}_B^{-1} \mathbf{M}_t$ – матрица узловых проводимостей.

Вначале принимаем вариант с размещением КУ на постах секционирования (на рис. 3 $Q_{\text{КПС1}}$ и $Q_{\text{КПС2}}$). Расчетная мощность КУ, необходимая для повышения напряжения до нормированного значения $Q_{\text{к}}^*$, определяется разностью наименьших значений нормированного и фактического действующего напряжения на токоприемнике ЭПС ($U_{\text{мин.норм.}} - U_{\text{мин.ф.}}$) и входным индуктивным сопротивлением до КУ ($X_{\text{вх}}$) по формуле, Мвар:

$$Q_{\text{к}}^* = U_{\text{ном}}^2 \left(U_{\text{мин.норм.}} - U_{\text{мин.ф.}} \right) / \left(U_{\text{мин.норм.}} \cdot X_{\text{вх}} \right), \quad (5)$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение КУ ($U_{\text{ном}} = 27,5$ кВ); $X_{\text{вх}}$ – входное индуктивное сопротивление до КУ.

Входное индуктивное сопротивление до КУ поста секционирования при двустороннем питании контактной сети от смежных подстанций ТП А и ТП В (рис. 3) определяется по формуле, Ом:

$$X_{\text{вх}} = \frac{A \cdot B}{A + B}, \quad (6)$$

где $A = X_{\text{тс.а}} + 2X_{\text{тр.а}} + 2X_{\text{с.а}}$, $B = X_{\text{тс.в}} + 2X_{\text{тр.в}} + 2X_{\text{с.в}}$; $X_{\text{тс.а}}$ и $X_{\text{тс.в}}$ – индуктивные сопротивления тяговой сети соответственно от подстанций ТП А и ТП В до КУ, Ом; $X_{\text{тр.а}}$ и $X_{\text{тр.в}}$ – индуктивные сопротивления включенных в работу трансформаторов на подстанциях ТП А и ТП В, Ом; $X_{\text{с.а}}$ и $X_{\text{с.в}}$ – индуктивные сопротивления системы внешнего электроснабжения соответственно до подстанций ТП А и ТП В, Ом.

Индуктивное сопротивление включенных в работу трансформаторов на подстанции ТП А (ТП В) определяется по формуле, Ом:

$$X_{\text{тр}} = U_{\text{кз}} \cdot U_{\text{ном}}^2 / 100 \cdot n \cdot S_{\text{тр}}, \quad (7)$$

где $U_{\text{кз}}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора, %; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение трансформатора ($U_{\text{ном}} = 27,5$ кВ); $S_{\text{тр}}$ – номинальная мощность трансформатора, МВ·А, n – количество включенных в работу трансформаторов.

Индуктивное сопротивление системы внешнего электроснабжения определяется по формуле, Ом:

$$X_{\text{с}} = U_{\text{ном}}^2 / S_{\text{кз}}, \quad (8)$$

где $S_{\text{кз}}$ – мощность трехфазного короткого замыкания на шинах 110 (220) кВ тяговой подстанции, МВ·А.

Индуктивное сопротивление тяговой сети для узловой схемы питания (рис. 3) определяется по формуле:

$$X_{\text{с.а}} = x_{22} \cdot L_{\text{ап}}; \quad X_{\text{с.в}} = x_{22} \cdot L_{\text{пв}}, \quad (9)$$

где $x_{22} = 0,278$ Ом/км – удельное индуктивное сопротивление для узловой схемы питания с контактной подвеской состоящей из несущего троса, контактного провода и рельсовой сети; $L_{\text{ап}}$ и $L_{\text{пв}}$ – расстояния до поста секционирования соответственно от подстанций ТП А и ТП В.

Для предотвращения частых отключений КУ поста секционирования от повышенного напряжения при малых нагрузках в тяговой сети номинальная мощность КУ не должна превышать среднюю реактивную мощность тяговой нагрузки рассматриваемой межподстанционной зоны ($Q_{\text{тс}}$):

$$Q_{\text{кпс}} \leq Q_{\text{тс}}. \quad (10)$$

Для межподстанционной зоны, например, между подстанциями ТП А и ТП В (рис. 3) средняя реактивная мощность определяется по формуле, Мвар:

$$Q_{\text{тс}} = (W_{\text{Qтс.а}} + W_{\text{Qтс.в}}) / (24 \cdot D_{\text{и}}), \quad (11)$$

где $W_{\text{Qтс.а}}$ – расход реактивной энергии в тяговой сети от подстанции ТП А за интенсивный месяц, Мварч; $W_{\text{Qтс.в}}$ – то же от подстанции ТП В; $D_{\text{и}}$ – число суток интенсивного месяца.

Значения $W_{\text{Qтс.а}}$ и $W_{\text{Qтс.в}}$ определяются: для проектируемых участков – по результатам тяговых и электрических расчётов; для участков, находящихся в эксплуатации – по данным технического учёта электроэнергии.

Если неравенство (10) не выполняется, то номинальную мощность КУ, размещаемого на посту секционирования, ограничивают значением, не превышающим $Q_{\text{тс}}$, и предусматривают дополнительное КУ на одной из смежных тяговых подстанций.

Для определения мощности КУ, размещаемого на тяговой подстанции, повторяют расчёт по формуле (5),

учитывая в составе исходных данных выбранную мощность КУ на посту секционирования. При этом следует определить не только значение $U_{\text{мин.ф.}}$, но и место межподстанционной зоны, в котором это значение наиболее вероятно.

Дополнительное КУ необходимо разместить на той из двух тяговых подстанций, которая питает данную межподстанционную зону отстающей фазой. Если отстающие фазы с обеих сторон данной межподстанционной зоны, то для размещения КУ выбирают тяговую подстанцию, ближайшую к тому месту межподстанционной зоны, в котором значение $U_{\text{мин.ф.}}$ наиболее вероятно.

При выполнении расчётов применительно к эксплуатируемым участкам железных дорог достоверность исходных данных, подлежащих использованию при расчётах, должна быть проверена путём измерений. Окончательный выбор параметров и мест размещения КУ следует выполнять путём сравнения их стоимостных показателей.

Имитационное моделирование и анализ режимов работы СТЭ и СВЭ. Параллельно работающие электротяговая сеть 27,5 кВ и сеть 110 или 220 кВ (рис. 3) разнородны (имеют различные отношения реактивного сопротивления к активному, X/R) и передача мощности по ним происходит при увеличенном значении потерь активной мощности и энергии, то есть при сниженной экономичности работы сети в целом. Для приведенной схемы, условия нагрева проводов сети низшего напряжения ограничивают пропускную способность всей сети. Часть сети более высокого напряжения (220 кВ, 110 кВ) недогружается, а часть сети с менее высоким напряжением перегружается. Переток мощности идет по тяговой сети.

В качестве исходных данных для моделирования были использованы результаты тяговых расчетов и экспериментально измеренные нагрузки ЭПС, параметры СТЭ и СВЭ и размеры движения. При этом была принята вероятностная модель графика движения поездов. Имелась возможность имитации работы не регулируемых и регулируемых компенсирующих устройств, как на тяговой подстанции, так и на посту секционирования. Использовался принцип последовательного моделирования взаимосвязанных мгновенных схем нагрузок ЭПС (рис. 3).

Результаты имитационного моделирования активных и реактивных потерь энергии получены для типичной межподстанционной зоны двухпутного участка с узловой схемой питания, среднестатистической длины (44 км), с колебаниями напряжения на шинах 27,5 кВ, $\Delta U_{\text{max}} = \Delta U_{\text{min}} = 1500$ В и средним квадратичным отклонением $\sigma_0 = 300$ В. Сопротивление тяговой сети определяется изменением типов подвесок ПБСМ70+МФ100 и ПБСМ95+МФ100 при рельсах Р65. Максимальная разнотипность поездов составляет 8 типов, в том числе пассажирский массой 1000 т, порожний массой 1200 т, грузовые поезда с массой 2000, 2500, 3000, 3500 и 4000 т, а минимальная - два типа: пассажирский и грузовой средневзвешенный. Степень использования пропускной способности N/N_0 изменяется от 0,53 до 0,8. Отношение времени хода поезда по фидерной зоне ко времени его хода

под током α изменяется в пределах от 1,2 до 1,8 по нечетному пути и от 1,15 до 2,1 по четному.

Потери энергии на выбранной зоне исследованы путем проведения многовариантных расчетов полнофакторного эксперимента при имитации работы системы тягового электроснабжения в течение суток. Предварительный анализ позволил выделить влияющие на потери энергии факторы: X_1 – уравнивающий ток; X_2 – сопротивление тяговой сети; X_3 – степень использования пропускной способности; X_4 – разнотипность поездов; X_5 – отношение полного времени хода поезда по межподстанционной зоне ко времени его хода под током.

Учет фактора изменения тока компенсирующего устройства зависит от места расположения компенсирующего устройства. В этой связи целесообразно было исследовать на имитационной модели влияние изменения тока компенсирующего устройства на потери энергии при нахождении остальных факторов на средних уровнях. Результаты режимов работы СТЭ на имитационной модели приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Ток компенсирующего устройства, А	Суточный расход энергии на зоне, МВ·А·ч	Суточные потери энергии на зоне, кВ·А·ч	Процент активных потерь, %
<i>Схема узлового питания с КУ на посту секционирования</i>			
0	129,0+j102,2	1615,9+j3532,2	1,25
25	129,3+j86,2	1564,4+j3412,1	1,21
50	129,6+j69,9	1609,7+j3476,6	1,24
100	130,4+j37,2	1987,4+j4179,5	1,52
<i>Схема узлового питания с КУ в отстающей фазе тяговой подстанции</i>			
25	128,8+j102,1	1594,1+j3496,4	1,24
50	128,7+j69,7	1582,6+j3473,8	1,23
100	128,4+j36,9	1571,7+j3457,6	1,22

Таблица 2

Параметры	Значения параметров при коэффициенте неравномерности нагрузки путей 1,05	
	без учета уравнивающих токов и КУ	с учетом уравнивающих токов и КУ
Суточный расход энергии на зоне, МВ·А·ч	154,5+j134,0 154,5+j134,0	157,65+j624,8 157,65+j624,8
Суточные потери энергии на зоне, кВ·А·ч	1894,5+j4158,0 1788,0+j3972,0	2262,0+j5016,0 2158,0+j4838,0
Процент активных потерь	1,22 1,16	1,43 1,37
Снижение активных потерь энергии при применении схемы с тремя пунктами параллельного соединения, %	5,6	4,6
То же реактивных, %	4,3	3,5
Примечание. В числителе для схемы узлового питания; в знаменателе – для параллельной схемы.		

Анализируя данные табл. 1 и 2, можно сделать вывод о различной степени влияния на активные и реактивные потери энергии изменений токов компенсирующих устройств, схемы питания и уравнивающего

тока. Если наименьшее напряжение $U_{\text{мин.ф}}$ на ЭПС меньше $U_{\text{мин.норм}}$ (21 кВ), а при скоростном движении (24 кВ), то установленная на посту секционирования КУ обеспечивает добавку напряжения до нормированного значения $\delta U_{\text{ку}} = U_{\text{мин.норм}} \cdot X_{\text{вх}}/X_{\text{ку}}$, где $X_{\text{ку}}$ – реактивное сопротивление компенсирующей установки, Ом.

Основное преимущество КУ на посту секционирования – эффективное снижение потерь напряжения и потерь мощности в контактной сети, что приводит к усилению пропускной способности электрифицированной линии. В тоже время существенным ограничением является необходимость постоянного обслуживания КУ вдали от ремонтных баз.

Преимущество КУ на тяговых подстанциях – более простые условия эксплуатации и меньшие затраты на обслуживание. В связи с более стабильным напряжением на шинах 27,5 кВ (по сравнению с напряжением на посту секционирования) генерируемая мощность больше на 20-30 %.

Распределенная система КУ в тяговой сети позволяет путем отключения, включения КУ регулировать напряжение и реактивную мощность и минимизировать перетоки мощности по тяговой сети (рис. 4).

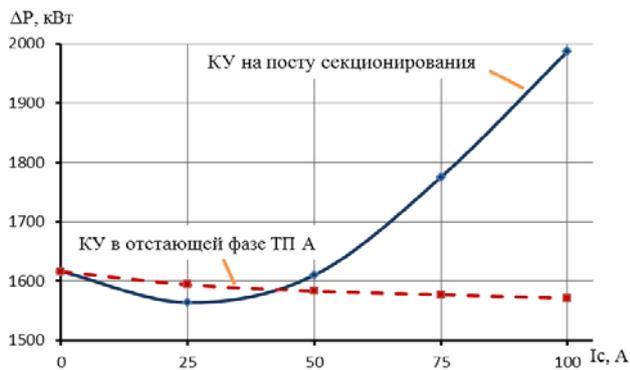


Рис. 4. Зависимость потерь энергии от тока КУ

В результате анализа полученных данных установлено:

- Наибольшее влияние на потери энергии оказывает уравнивающий ток. Так, при наличии на межподстанционной зоне среднего уравнивающего тока 100 А потери активной энергии увеличиваются на 57,9 %, а реактивной – на 59,4 % по сравнению с вариантом, когда уравнивающий ток отсутствует.

- Переход от схемы узлового питания к схеме параллельного питания при наличии уравнивающего тока и работе компенсирующих устройств уменьшает потери активной энергии всего лишь на 4,6 %, а реактивной на 3,5 %. Дальнейшее увеличение числа параллельных соединений до 5 на фидерную зону уменьшает потери энергии на 2 %.

- Установка КУ в отстающей фазе тяговой подстанции с емкостным током 100 А позволяет снизить суточные потери активной и реактивной энергии на фидерной зоне с узловой схемой питания на 2,8 и 2,1 % соответственно. При установке КУ на посту секционирования с емкостным током 25 А активные потери снижаются на 3,2 % и реактивные на 3,4 %.

Выводы.

1. Техничко-экономические расчеты показывают, что в настоящее время для тяговых сетей отечествен-

ных железных дорог применение плавно регулируемой установки КУ с нерегулируемой конденсаторной батареей и с параллельно включенным трансреактором, регулируемым тиристорным блоком, и фильтрами для снижения гармоник связано с большими капитальными вложениями, что определяет большие сроки окупаемости инвестиций (более 10-15 лет). Наиболее перспективными для тягового электроснабжения на сегодня являются ступенчатое регулируемые устройства компенсации реактивной мощности.

2. Для эффективного применения устройств компенсации реактивной мощности в системах тягового электроснабжения переменного тока необходимо разработать нормативно-правовую документацию о необходимости применения и порядке выбора параметров и мест размещения устройств поперечной и продольной компенсации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетична стратегія Укрзалізниці на період до 2015 р. і на перспективу до 2020 р. Затв. державною адміністрацією залізничного транспорту України 26.11.2013 р. – К., 2013. – 104 с.
2. Марквард К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
3. Рене Пелисье. Энергетические системы: пер. с франц. [предисловие и коммент. В.А. Веникова]. – М.: Высш. шк., 1982. – 568 с.
4. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
5. Мамошин Р.Р., Герман Л.А. Выбор типа компенсирующего устройства в системе тягового электроснабжения // Вестник ВНИИЖТ. – 1990. – №5. – С. 26-29.
6. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
7. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. № ЦЕ-0009: Затв. Наказ Укрзалізниці 24.12.2004 р., № 1010-ЦЗ. / Мін-во трансп. та зв'язку України. – К., 2005. – 80 с.
8. Корниенко В.В., Котельников А.В., Доманский В.Т. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы (Аналитический обзор). – К.: Транспорт Украины, 2004. – 196 с.
9. Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте // Материалы 6-го межд. симпозиума «Элтранс-2011». – СПб.: ПГУПС, 2013. – 584 с.
10. Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: учеб. пособие. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 315 с.
11. Статические компенсаторы реактивной мощности для электрических сетей. Сб. статей. Под ред. В.И. Кочкина. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2010. – 296 с.
12. Герман Л.А., Серебряков А.С., Гончаренко В.П., Мининцев А.В. Эффективность фильтрокомпенсирующих устройств в тяговой сети переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. – 2013. – №5. – С. 56-62.
13. Герман Л.А., Гончаренко В.П. Современная схема продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения // Вестник РГУПС. – 2013. – №2. – С. 12-17.
14. Молин Н.И., Соколовский И.А., Щербаков В.С. Установка продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения переменного тока // Материалы 5-го межд. симпозиума «Элтранс-2009». – СПб.: ПГУПС, 2010. – С. 155-165.

15. Доманський І.В. Перспективи розвитку схемо-технічних рішень зовнішнього електропостачання тягових підстанцій залізниць // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – №5(979). – С. 54-65.

REFERENCES

1. *Energetichna strategija Ukrzaliznici na period do 2015 r. i na perspektivu do 2020 r. Zatv. derzhavnoju administracieju zalizничного transportu Ukrainu 26.11.2013 r.* [Energy Strategy Railways for the period up to 2015 and for the future by 2020. Approved by State Administration of Railway Transport of Ukraine 11.26.2013]. Kyiv, 2013. 104 p. (Ukr).

2. Markvard K.G. *Elektrosnabzhenie elektrificirovannyh zheleznyh dorog* [Power supply of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p. (Rus).

3. Rene Pelis'e. *Energeticheskie sistemy: per. s franc. predislovie i koment. V.A. Venikova* [Energy Systems: translation from French. Foreword and comments by V.A. Venikov]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982. 568 p. (Rus).

4. Borodulin B.M., German L.A., Nikolaev G.A. *Kondensatornye ustanovki elektrificirovannyh zheleznyh dorog* [Condenser units for electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1983. 183 p. (Rus).

5. Mamoshin R.R., German L.A. Selecting the type of compensating device in the traction power supply. *Vestnik VNIIZhT – Vestnik of Railway Research Institute*, 1990, no.5, pp. 26-29. (Rus).

6. Zhelezko Yu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaja moshhnost'. Kachestvo elektroenergii* [Loss of electricity. Reactive power. Power quality]. Moscow, ENAS Publ., 2009. 456 p. (Rus).

7. *Pravila ulashtuvannja sistemi tjavovogo elektropostachannja zaliznicni Ukrainy. № CE-0009: Zatv. Nakaz Ukrzaliznici 24.12.2004 r., № 1010-CZ. Min-vo transp. ta zvyazku Ukrainy* [Terms ordering system traction power railways of Ukraine. Number IS-0009. Approved Order Railways 24.12.2004., no.1010-CH. Ministry of Transport and Communications of Ukraine]. Kyiv, 2005. 80 p. (Ukr).

8. Kornienko V.V., Kotel'nikov A.V., Domanskyi V.T. *Elektrifikacija zheleznyh dorog. Mirovye tendencii i perspektivy (Analiticheskij obzor)* [Electrification of railways. Global trends and perspectives (Analytical review)]. Kyiv, Transport of Ukraine Publ., 2004. 196 p. (Rus).

9. Electrification and energy infrastructure traction trains in railway transport. *Materialy 6 mezhd. simpoziuma «ELTRANS-2011»* [Proceedings of the 6th Int. symposium «ELTRANS-2011»]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2013, 584 p. (Rus).

10. German L.A., Serebryakov A.S. *Reguliruemye ustanovki emkostnoj kompensacii v sistemah tjavovogo elektrosnabzhenija zheleznyh dorog: ucheb. posobie* [Adjustable capacitive compensation systems, traction power supply of railways: a tutorial]. Moscow, FGBOU «Training Center on Education for rail transport» Publ., 2013. 315 p. (Rus).

11. Kochkin V.I. *Sticheskie kompensatory reaktivnoj moshhnosti dlya elektricheskikh setey. Sb. statej* [Static var compensator for electrical networks. Collection of articles]. Moscow, Alex-CM Publ., 2010. 296 p. (Rus).

12. German L.A., Serebryakov A.S., Goncharenko V.P., Mizincev A.V. The effectiveness of filter-devices in traction AC. *Vestnik VNIIZhT – Vestnik of Railway Research Institute*, 2013, no.5, pp. 56-62. (Rus).

13. German L.A., Goncharenko V.P. Modern longitudinal capacitive compensation scheme in the traction power supply. *Vestnik RGUPS – Bulletin of Rostov State Transport University*, 2013, no.2, pp. 12-17. (Rus).

14. Molin N.I., Sokolovskiy I.A., Shcherbakov V.S. Installing longitudinal capacitive compensation system traction power supply AC. *Materialy 5 mezhd. simpoziuma «ELTRANS-2009»* [Proceedings of the 5th Int. symposium «ELTRANS-2009»]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2010, pp. 155-165. (Rus).

15. Domanskyi I.V. Prospects of development schemes and technical solutions to external power railway traction substations. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2013, no.5(979), pp. 54-65. (Ukr).

Поступила (received) 09.02.2015

Доманский Илья Валерьевич, к.т.н., доц.,
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 067 9621995, e-mail: dvt_nord@mail.ru

I.V. Domanskyi

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Modes of operation of the system of traction power AC using reactive power compensation devices.

The paper presents a systematic analysis of existing methods of reactive power compensation. The study of operating modes of the systems external and traction power supply is carried out. The methodology for selecting promising compensation schemes and energy-saving in the traction networks AC electrified railway lines is offered. The comparative evaluation of prospective controlled compensation devices shows that use of seamlessly adjustable devices with unregulated condensing the battery and with parallel translator regulated with thyristor unit and with filters to reduce harmonics bond to the large capital investments. For traction networks of domestic railways payback period is more than 10-15 years. The most promising for traction power supply today is a stepwise adjustable devices of reactive power compensation. For the efficient allocation of investments in programs and projects of modernization of system traction power supply developed by the methodology of selecting parameters and places placement devices transverse compensation in the system traction power supply, which is based on the use of software systems with imitation of interconnected instant circuits moving loads of electric rolling stock. Based on the results of multiple calculations full factor experiment when simulating work of the systems traction power supply during the day marked the most influencing factors on energy-saving in process freight on electric traction and established the extent of their influence. These include the overflows of power, the resistance of traction network, reactive power compensation, power supply circuits and the organization of trains. Innovative technologies energy-saving railways from positions of consideration their close connection with the systems external power supply are proposed. References 15, tables 2, figures 4.

Key words: reactive power compensation, energy saving, system traction power supply, regimes work, influencing factors, energy security.