

В.О. Бондаренко, И.В. Доманский, Г.Н. Костин

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ТЯГОВЫМИ НАГРУЗКАМИ

У статті запропоновані інноваційні напрямки енергозбереження в тягових мережах залізниць і нові схемотехнічні рішення присоединения тягових підстанцій до мереж енергосистем, що забезпечують енергобезпеку процесу перевезень. Дано обґрунтування необхідності розрахунку тягових підстанцій по векторному методу трифазного споживання енергії від підстанцій НЕК «Укрэнерго». Бібл. 15, табл. 3, рис. 4.

Ключові слова: енергетична безпека, залізничний транспорт, процес перевезень, мережі енергосистем, енергоефективність режимів, пересувні тягові підстанції.

В статье предложены инновационные направления энергосбережения в тяговых сетях железных дорог и новые схемотехнические решения присоединения тяговых подстанций к сетям энергосистем, обеспечивающие энергобезопасность перевозочного процесса. Дано обоснование необходимости расчета тяговых подстанций по векторному методу трехфазного потребления энергии от подстанций НЭК «Укрэнерго». Библ. 15, табл. 3, рис. 4.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, железнодорожный транспорт, процесс перевозок, сети энергосистем, энергоэффективность режимов, передвижные тяговые подстанции.

Введение и постановка проблемы. Анализ изменения структуры энергобаланса железных дорог показывает стойкую тенденцию ориентации их энергетики преимущественно на электропотребление. Так, за прошлый период (1997-2012 гг.) удельный вес электроэнергии в общем энергобалансе железных дорог вырос с 51 % до 70,5 %. К известным позитивным свойствам электроэнергии (легкая доступность, транспортабельность, готовность к потреблению и др.) добавилось еще одно, чрезвычайно важное в современных условиях – низшая себестоимость работ и услуг, которые выполняются с использованием электрической энергии по сравнению с другими основными видами потребления топливно-энергетических ресурсов [1-5].

В Украине с 1950-х гг. по системе переменного тока 25 кВ, 50 Гц электрифицировано 5,5 тыс. км (53 % полигона) железных дорог. Мировым опытом подтверждены неоспоримые преимущества системы переменного тока перед системой электрификации на постоянном токе 3 кВ. В настоящее время доля электрифицированных участков от общей эксплуатационной длины железных дорог составляет 47,3 %, при этом доля электротяги в общем грузообороте равна 91,2 %. Однако последствия экономического кризиса существенно снизили темпы электрификации железных дорог в 2014-2016 гг. В результате важнейшая электрифицированная линия Харьков – Полтава – Кременчуг – Знаменка работает в вынужденных режимах с питанием тяговой сети от передвижных подстанций [5-8].

Одним из актуальных вопросов обеспечения энергобезопасности процесса перевозок является эффективная реализация тяговой электроэнергетической резервной мощности электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока. Пути реализации резервной мощности разные. Если основным направлением на железных дорогах стран с развитой экономикой является размещение на тяговых подстанциях стационарных тяговых резервных агрегатов, то на железных дорогах Украины этот вопрос решается за счет передвижных резервных тяговых

подстанций. Последние вводятся в эксплуатацию в период устойчивого роста объема перевозок. При падении перевозок они могут быть задействованы на других направлениях, на которых ожидается рост объемов перевозок. Естественно, что такая «гибкая» система резервирования должна быть увязана схемно и режимно с системами внешнего электроснабжения.

С целью уменьшения расходов на обеспечение отрасли электроэнергией все железные дороги Украины осуществляют снабжение электроэнергией потребителей по регулируемому тарифу, что позволяет экономить сотни млн. грн. при закупке электроэнергии (в 2014 г. – 631 млн. грн.). Преимущества закупки электроэнергии на оптовом рынке электроэнергии очевидны, однако появляются некоторые особенности оплаты за электроэнергию в условиях вынужденных режимов работы электротяговых сетей с применением передвижных тяговых подстанций [2-5].

Темпы старения устройств электроснабжения при существующем дефиците финансирования продолжают опережать темпы реконструкции. Длина линий электрифицированного полигона, которые эксплуатируются сверх усредненного срока (40 лет) выросла до 6393 км или 62,3 % в 2012 году, а на сегодня эта цифра приближается до 6820 км или 67 %. Со сроком службы свыше 30 лет работают 232 стационарных (78 % от общего количества) и 10 передвижных тяговых подстанций. В настоящее время необходима полная реконструкция больше 50 % развернутой длины контактной сети и тяговых подстанций. Для стабилизации положения нужно увеличение темпов обновления устройств тягового электроснабжения в период с 2016 по 2020 годы ежегодно не менее 600-670 км контактной сети и 10-15 тяговых подстанций при средней потребности в финансировании на одну подстанцию около 50 млн. грн. [1, 7, 8].

Причины низкой энергоэффективности электроснабжения лежат в технических, экономических, организационных процессах: непригодное состояние электрических сетей из-за износа оборудования; несимметрия нагрузки фаз линий; неполнофазные

режимы работы линий электропередач; влияние потоков энергии в общих элементах сети (эффект нелинейности потерь); нескомпенсированные перетоки реактивной мощности.

Поэтому вопрос о существенном увеличении объемов работ по модернизации, повышению надежности и энергоэффективности тягового электроснабжения, а также по электрификации новых железнодорожных линий относится в настоящее время к важнейшим приоритетам развития железнодорожной энергетики Украины.

Цель статьи – анализ и разработка путей повышения энергоэффективности режимов работы электрических систем с тяговыми нагрузками и обоснование необходимости расчета тяговых подстанций по векторному методу трехфазного потребления энергии от подстанций НЭК «Укрэнерго».

1. Анализ энергоэффективности тягового и внешнего электроснабжения электрифицированной линии Полтава – Кременчуг – Александрия. Общий недостаток схем присоединений тяговых подстанций (ТП) электрифицированных участков за период 1993-2011 гг. заключается в том, что практически все подстанции присоединялись к сетям 110 кВ Облэнерго, а ряд из них до таких сетей 110 кВ, которые соединяли разные энергосистемы.

Выбор схемы внешнего электроснабжения ТП (рис. 1) выполнен в соответствии с «Нормами технологического проектирования энергетических систем и электрических сетей 35 кВ и выше» и новыми схемотехническими решениями присоединения ТП к сетям энергосистем, которые обоснованы в работах [5, 9] и используются при электрификации железных дорог.

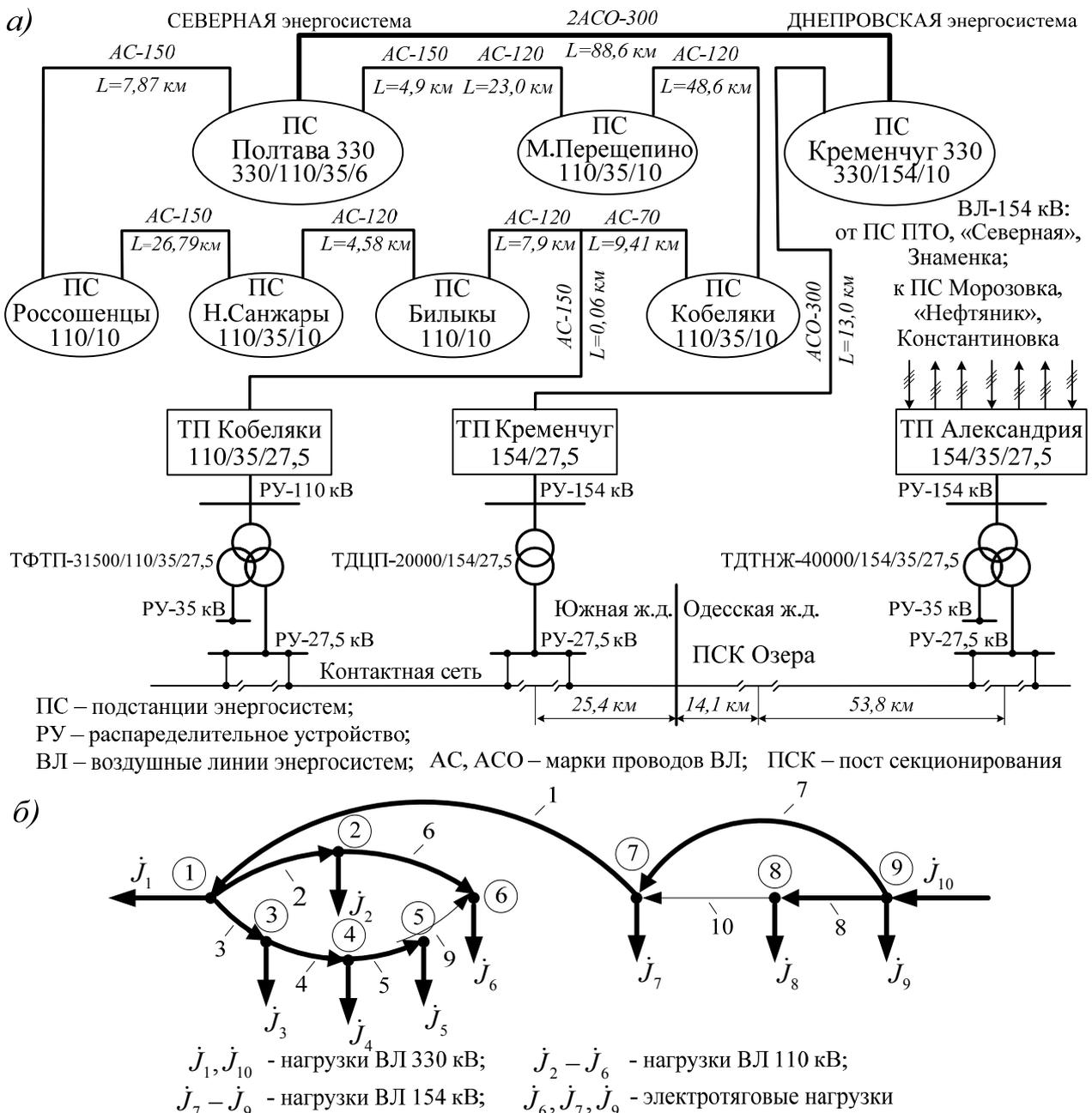


Рис. 1. Схема внешнего электроснабжения тяговых подстанций на стыке Южной и Одесской ж. д. и ее направленный граф

Источником внешнего электроснабжения тяговых подстанций являются подстанции 330 кВ Северной и Днепровской энергосистем. Подстанция 330/110 кВ Полтава вводилась в эксплуатацию с 1964 г. по 1997 г. В настоящее время на подстанции установлены 4 автотрансформатора: два по 125 МВА и два по 200 МВА. Открытое распределительное устройство (ОРУ) 330 кВ ПС Полтава выполнено по схеме 330-10 «трансформатор – шины с присоединением линий через два выключателя». На этом напряжении имеются связи со Змиевской ТЭС, с подстанциями 750/330 кВ Североукраинская и 330/154 кВ Кременчугская.

ОРУ 110 кВ Полтава имеет четыре секции, два секционных и два совмещенных с обходными шиносоединительных выключателя. Распределение электрической мощности от ПС Полтава на напряжении 110 кВ осуществляется потребителям г. Полтава и Полтавской области, а также тяговым подстанциям.

ОРУ 154 кВ тяговой подстанции Александрия имеет три секции шин 154 кВ на которые поступает питание от ПС «Северная» и ПС Знаменка. Распределение электрической мощности от ТП Александрия на напряжении 154 кВ осуществляется потребителям ПС Константиновка, ПС «Нефтяник» и ПС Морозивка.

На ТП Александрия в 2009 году введено в работу три плавно регулируемых установок поперечной емкостной компенсации (КУ) (производитель ЧРД ЭЛЕКТРОТЕХНИКА), общей мощностью 18,4 Мвар. В фазу *A* и фазу *B* 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 *A* или *B*. 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 оптоэлектронные тиристоры 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 [10-15]. Вполне возможно, при такой громадной мощности конденсаторов тиристоры постоянно полностью открыты. Интересно бы узнать их реальное состояние и режим работы. Анализируя состояние КУ в части оценки потерь энергии, в первую очередь следует обратить внимание на установки с фильтровыми маслонаполненными реакторами типа ФРОМ-3200/35 У1. Кроме повышенной сложности технического обслуживания этих реакторов, для них характерны повышенные потери

энергии. В частности, мощность потерь только в стали сердечников реакторов составляет 10,5 кВт.

Технико-экономические расчеты показывают, что для тяговых сетей отечественных железных дорог в настоящее время применение плавно регулируемых установок КУ связано с большими капитальными вложениями, что определяет большие сроки окупаемости инвестиций (более 10-15 лет).

В общем случае для повышения экономичности работы неоднородной сети могут быть применены следующие мероприятия: деление сети низшего напряжения, применение продольно-емкостной компенсации в линиях высшего напряжения, включение вольтодобавочных трансформаторов в ветви связи сетей разных номинальных напряжений. Наивыгоднейшее решение определяется путем технико-экономических расчетов на имитационных моделях с учетом режимов работы питающих энергосистем [3-5]. В настоящее время контактная сеть участка Кобеляки – Кременчуг – Александрия секционирована нейтральными вставками и представляет собой длинные консольные участки с односторонним питанием.

Параллельно работающие электротяговая сеть 27,5 кВ и сети 110, 154, 330 кВ (рис. 1) разнородны и передача мощности по ним происходит при увеличенном значении потерь активной мощности и энергии, то есть при сниженной экономичности работы сети в целом. Неоднородность тяговых и питающих сетей энергосистем приводит к увеличению эквивалентного активного сопротивления R_{eq} на пути передачи энергии. Так, если для однородной сети, эквивалентное активное сопротивление R_{eqo} будет равно

$$R_{eqo} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} = \frac{r}{2}, \text{ то для разнородной, граф которой}$$

показан на рис. 1, б, $R_{eq} = Re \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}$, и увеличение

активного сопротивления можно определить следующим выражением

$$\frac{R_{eq} - R_{eqo}}{R_{eqo}} = \frac{(\xi_1 - \xi_2)^2}{2 + (\xi_1 + \xi_2)^2}, \quad (1)$$

где ξ_1, ξ_2 – отношения реактивного сопротивления к активному, соответствующих ветвей графа.

Расчеты с реальными значениями сопротивлений по выражению (1) позволяют сделать вывод о том, что при параллельной работе сетей 110 и 27,5 кВ, 154 и 27,5 кВ приходится ожидать увеличения эквивалентного сопротивления на 15-20 %. Следовательно, на 15-20 % большими будут потери мощности.

Основной нагрузкой сети является нагрузка системы \dot{J}_1 и \dot{J}_{10} , нагрузки тяговых подстанций $\dot{J}_6, \dot{J}_7, \dot{J}_9$ имеют существенно меньшее значение. Ветви графа схемы, приведенной к одному напряжению имеют различные отношения реактивного сопротивления к активному $\xi = x/r$. Для приведенной схемы условия нагрева проводов сети низшего напряжения ограничивают пропускную способность всей сети. Часть сети более высокого напряжения (330 кВ, 154 кВ) недогружается, а часть сети с менее высоким

напряжением перегружается. Переток мощности идет по ветвям 6 и 10 графа схемы.

Неоднородность параллельно работающих сетей 330, 154, 110, 27,5 кВ, специфические режимы их эксплуатации сводят к минимуму преимущества замкнутых сетей, заключающиеся в большей надежности электроснабжения, лучшем качестве электроэнергии и если нет возможности учесть перетоки мощности по тяговой сети в тарифах, неизбежно использование консольных схем питания.

Тяговые подстанции Кобеляки и Кременчуг питаются от Северной энергосистемы, а Александрия – от Днепровской энергосистемы. Схема параллельной работы и секционирования тяговой сети показана на рис. 2. Включение тяговых подстанций на параллельную работу неизбежно вызовет перетоки мощности по тяговой сети даже при соответствии нормированных значений напряжений на первичных обмотках по причине различия их мощностей.

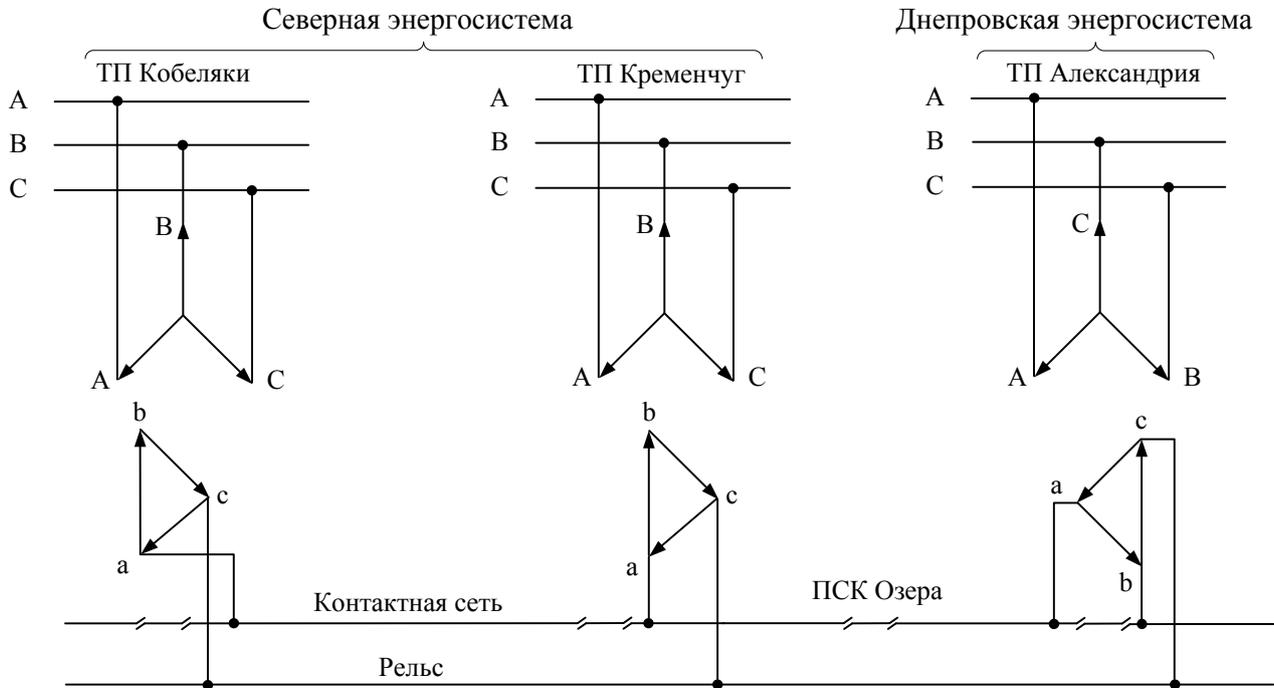


Рис. 2. Схема параллельной работы тяговых подстанций

Учитывая, что полный расход электроэнергии тяговой подстанции состоит из расхода электроэнергии на тягу поездов, потерь и перетоков электроэнергии по тяговой сети, можно предложить формулу для определения перетока

$$W_{over} = W - \Delta W - W_{TS} = \sum_{i=1}^n (I_{shi} \dot{U}_{ti} - \Delta \dot{S}_i) - W_{Tsi}^*$$

где W – полный расход электроэнергии тяговой подстанции; W_{TS} – расход электроэнергии на тягу поездов; ΔW – потеря энергии в тяговых сетях; I_{shi} – сопряженный комплекс мгновенных значений токов плеч питания тяговой подстанции; \dot{U}_{ti} – мгновенное значение напряжения на шинах тяговой подстанции; n – количество решенных мгновенных схем при имитационном моделировании режимов электротяговых сетей.

Предварительная оценка схемы питания тяговой сети и выбор схемы, позволяющей приблизиться к энергосберегающему режиму системы тягового электроснабжения, определяется моделированием перетоков мощности и потерь энергии. В то же время реализация автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии на всех железных дорогах Украины позволяет уже сегодня использовать данные

счетчиков электроэнергии тяговых подстанций и осуществлять фактическое определение расходов электроэнергии при различных схемах питания. Последние модификации счетчиков на тяговых подстанциях (при соответствующем программном обеспечении) могут измерять и потери энергии на межподстанционной зоне. Анализируя эту информацию, энергодиспетчер может выбрать энергосберегающую схему питания [5].

2. Вынужденные режимы работы передвижных тяговых подстанций и питающих линий энергосистем. Реальности сегодняшнего дня таковы, что, практически не имея резерва, передвижные подстанции длительное время работают вместо стационарных на грузонапряженных участках, а на некоторых сверхдлинных консольных участках нагружены только одним плечом питания, что приводит к резкой несимметрии токов фаз тяговых трансформаторов (наименее нагруженными являются две фазы) и в итоге к повышенным потерям энергии [5, 6].

В мае 2014 г. была введена в эксплуатацию передвижная подстанция «Тяга Кременчуг», которая присоединена непосредственно к магистральным электрическим сетям Северной энергосистемы, а именно ПС-330 «Кременчуг». Режимы ее работы определены техническими условиями, в том числе и режимы при питании длинных консольных участков одним плечом

питания («отстающей» или «опережающей» фазой) [8]. Это необходимо для реализации перевозочного процесса по условию обеспечения минимально допустимого уровня напряжения электроподвижного состава на лимитирующих участках ($U = 21$ кВ). Как показано ниже такие режимы работы передвижной подстанции вызывают протекание в одной из фаз питающей линии тяговых трансформаторов активно-емкостного тока и, как результат, генерацию энергии в питающую сеть линии электропередачи 154 кВ, что и фиксируется расчетными электросчетчиками. Согласно теории электрических сетей и существующих правил учета электроэнергии, для таких режимов трехфазной питающей сети необходимо использование векторного метода, т.е. учета электроэнергии как сумм энергий во всех фазах с учетом знака.

Известно, что на дорогах однофазного тока питание тяговой сети, как правило, осуществляется от трехфазной линии передачи через трансформаторы, соединенные в ту или иную схему [3]. Из всех возможных схем соединения обмоток трехфазных трансформаторов наибольшее распространение на железных дорогах Украины получила схема, в которой тяговая обмотка соединена в треугольник. При соединении тяговых обмоток в треугольник загружаются хоть и не одинаково, но все три фазы высоковольтной линии. При этом возможно питание районной нагрузки от третьей обмотки трансформатора напряжением 10 или 35 кВ. Первичная обмотка трехфазного трансформатора всегда соединяется в звезду. При соединении тяговой обмотки в треугольник нет цепи для токов нулевой последовательности основной частоты. В этом случае значительно меньше мешающее влияние высоковольтной линии на линии связи. Указанные обстоятельства оказали решающее влияние на то, что тяговая обмотка трехфазного трансформатора соединяется в треугольник. Более равномерная нагрузка фаз трехфазной линии передачи достигается при питании тяговых подстанций от всех трех фаз линии передачи. В этом случае секции тяговой сети слева и справа от подстанции питаются от различных фаз линии передачи и, следовательно, имеют напряжения, не совпадающие по фазе друг с другом.

При рассмотрении схем тяговых подстанций за положительное направление токов (I_A, I_B, I_C) в линии передачи, в ответвлениях от линии передачи к подстанции, а также в фидерах, питающих тяговую сеть (I_L, I_R и I_P), будем принимать направление от питающего центра к потребителю. За положительное направление токов в электрических локомотивах будем принимать направление от контактного провода к рельсу. Для схемы питания (рис. 3) совмещенная векторная диаграмма напряжений и токов для частного случая (наименее нагруженными являются две фазы) показана на рис. 4. При построении диаграммы принимаем коэффициент трансформации равным единице и пренебрегаем током холостого хода и потерями напряжения в обмотках. Тогда напряжения \dot{U}_A, \dot{U}_B и \dot{U}_C и соответственно напряжения $\dot{U}_{ac}, \dot{U}_{ba}$ и \dot{U}_{cb} будут представляться одними и теми же векторами (рис. 4). Вектор тока \dot{I}_L (левая сторона) принятого на-

пряжения следует ориентировать относительно вектора напряжения \dot{U}_{ac} . На векторной диаграмме показан ток \dot{I}_L , сдвинутый от «своего» напряжения на некоторый угол φ_L . Вектор тока \dot{I}_R (идущего вправо от подстанции) при направлении, показанном на рис. 3, ориентируется от вектора «своего» напряжения $-\dot{U}_{cb}$, противоположного напряжению \dot{U}_{cb} , показанному на диаграмме (рис. 4). Отложив на диаграмме напряжение $-\dot{U}_{cb}$ (показано пунктиром), сможем относительно него со сдвигом на некоторый угол φ_R нанести вектор тока \dot{I}_R . Зная \dot{I}_L и \dot{I}_R нетрудно найти ток \dot{I}_P в проводе, присоединенном к рельсу, как уравновешивающую их величину (как так $\dot{I}_L + \dot{I}_R + \dot{I}_P = 0$), а также токи фаз трансформатора [3]:

$$\dot{I}_a = \frac{2}{3} \dot{I}_L + \frac{1}{3} \dot{I}_R; \dot{I}_b = \frac{1}{3} \dot{I}_R - \frac{1}{3} \dot{I}_L; \dot{I}_c = -\frac{2}{3} \dot{I}_R - \frac{1}{3} \dot{I}_L.$$

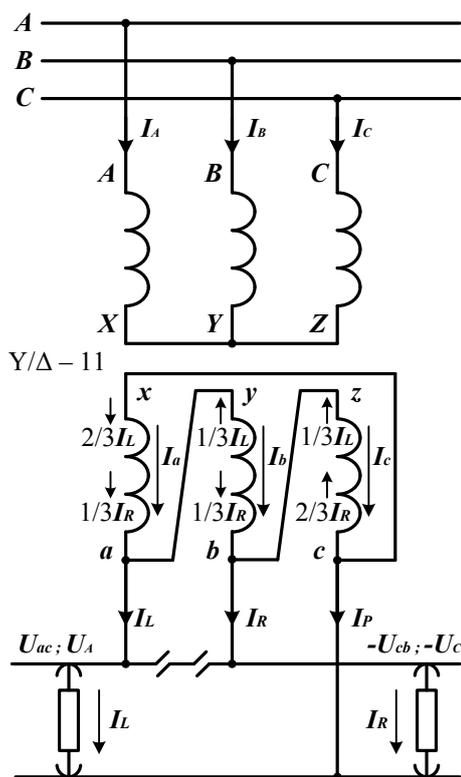


Рис. 3. Схема питания тяговой сети однофазного тока при помощи трехфазного трансформатора, соединенного по схеме Y/Δ-11

Левая фидерная зона с током \dot{I}_L питается от напряжения \dot{U}_{ac} . Это напряжение генерируется как в обмотке ax , так и в обмотках $ybzc$ (где оно получается в результате геометрического сложения напряжений двух обмоток by и cz). Но сопротивление обмотки ax в два раза меньше сопротивления двух других обмоток, соединенных последовательно. Поэтому ток \dot{I}_L разделяется между этими генерирующими напряжение \dot{U}_{ac} обмотками в отношении 2:1. Аналогичным образом делится и ток \dot{I}_R . Можно заметить (рис. 3), что наименее нагруженной фазой является та фаза треугольника, которая непосредственно не соединена с рельсами. В данном случае, когда одна из нагрузок, \dot{I}_L или \dot{I}_R , равна нулю, наименее нагруженными оказываются две фазы.

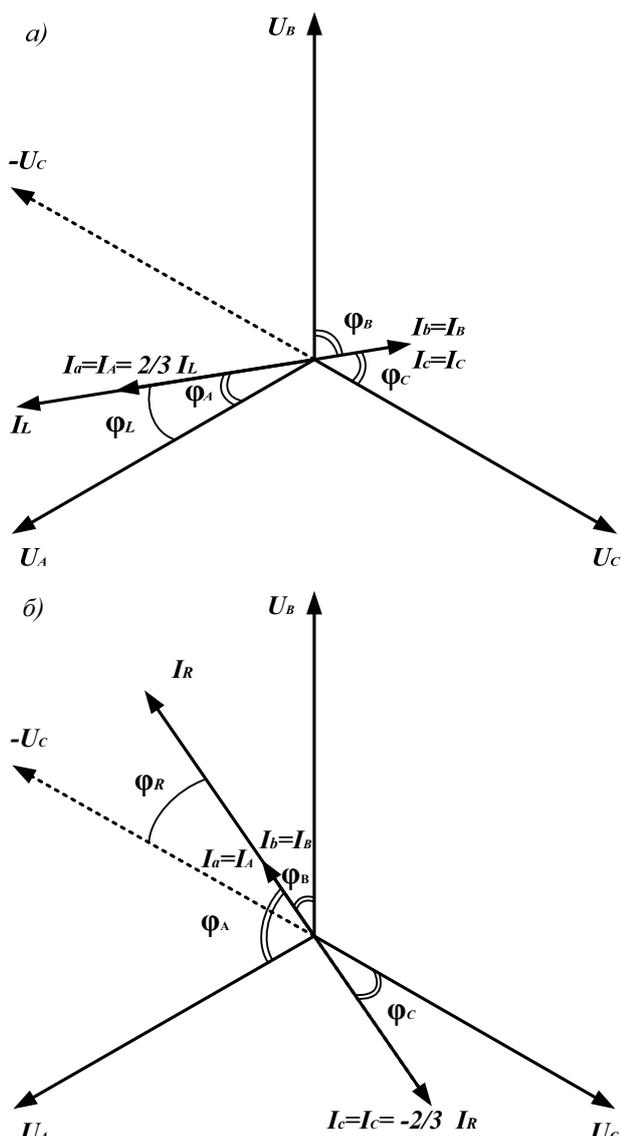


Рис. 4. Векторная диаграмма для определения токов фаз трехфазного трансформатора для частного случая: а – нагрузка I_R правого плеча питания равна нулю; б – нагрузка I_L левого плеча питания равна нулю

Разберем более подробно частный случай, когда наименее нагруженными оказываются две фазы, например, при питании тяговой нагрузки только левого плеча «отстающей» фазой (рис. 4,а) или только правого плеча «опережающей» фазой (рис. 4,б). При питании нагрузки левого плеча I_L «отстающей» фазой (рис. 4,а) углы сдвига фаз между токами I_A , I_B и I_C и напряжениями U_A , U_B , U_C значительно увеличиваются. Заметим, что $\varphi_A = \varphi_L$, ток I_B отстает от напряжения U_B на угол φ_B , а I_C опережает напряжение U_C на угол φ_C . Таким образом, одна из наименее нагруженных фаз тягового трансформатора начинает генерировать ток в питающую сеть. При питании нагрузки правого плеча I_R «опережающей» фазой (рис. 4,б) $\varphi_C = \varphi_R$, ток I_B опережает напряжение U_B и теперь эта фаза тягового трансформатора генерирует ток в питающую сеть.

При наличии районной нагрузки на тяговой подстанции и малых тяговых нагрузках такого режима

может и не быть, но для передвижных подстанций (РУ-10 кВ для районных потребителей не всегда проектируются) они неизбежны.

Экспериментальные исследования проводились для нормального и вынужденного режимов работы электротяговой сети. Вынужденным (временным) режимом, в условиях работы передвижной тяговой подстанции, считается режим, при котором участок Кременчуг–Озера питается напряжением 27,5 кВ фазы А, а фаза В находится в холостом режиме. Нормальным режимом будем считать режим, при котором тяговая подстанция питает участок Кременчуг – Озера (фаза А) и Кременчуг – Кобеляки (фаза В). Установлено, что мощность передвижной тяговой подстанции «Тяга Кременчуг» 20 МВт не позволяет обеспечить процесс перевозок на консольном участке тяговой сети длиной 39,5 км Кременчуг–Озера в нормальном режиме по причине необходимости обеспечения минимально допустимого уровня напряжения 21 кВ на пантографе электроподвижного состава лимитирующего перегона.

Приведенные результаты измерений подтверждают, что обратное направление энергии в наименее нагруженной фазе В со стороны высшего напряжения возникает в результате смещения токов в обмотке ub тягового трансформатора в вынужденном режиме работы передвижной подстанции «Тяга Кременчуг».

Экспериментальными исследованиями подтверждены причины возникновения режима генерации в фазе В ВЛ-154 кВ и соответствие тяговой нагрузки требованиям ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в сетях электроснабжения общего назначения».

Отсутствие источника генерации со стороны тяговой нагрузки подтверждена экспериментальными измерениями на вводе 27,5 кВ тягового трансформатора передвижной подстанции «тяга Кременчуг» при различных нагрузках на фидерной зоне Кременчуг – Озера (табл. 1). Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтверждают теоретические исследования по вопросу применения векторного алгоритма учета объемов электроэнергии при питании передвижных тяговых подстанций от магистральных электрических сетей НЕК Укрэнерго.

3. Оценка учета электрической энергии на тяговых подстанциях. Известно, что на тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог приборы коммерческого учета электрической энергии должны устанавливаться на границе балансовой принадлежности оборудования, то есть на уровне питающего напряжения тяговых трансформаторов. Однако на большинстве тяговых подстанций учет электрической энергии ведется на уровне низкого и среднего напряжения. При этом потери электрической энергии в тяговых и понизительных трансформаторах определяются расчетным путем. Устройство учета электрической энергии на уровнях низкого и среднего напряжения объясняется отсутствием измерительных трансформаторов тока и напряжения на уровне высокого напряжения трансформаторов стационарных подстанций старого типа, а на передвижных они не предусмотрены даже проектом.

Таблица 1

Экспериментальные измерения на вводе 27,5 кВ ТП «Тяга Кременчуг»

№	№ изм.	P_a , кВт	P_b , кВт	Q_a , квар	Q_b , квар	U_{ab} , В	U_{ca} , В	U_{bc} , В	I_a , А	I_b , А	φ_a	φ_b
1	32	2604,3	60,9	577,5	38,9	102,6	94,6	86,2	99,0	2,6	133,2	272,6
2	36	3313,8	64,7	498,6	24,3	102,4	95,3	84,7	122,4	2,5	128,9	260,8
3	37	4513,3	64,8	156,0	20,2	101,6	95,0	83,4	162,1	2,5	122,7	257,2
4	41	4868,1	63,5	-1004,9	24,9	101,3	95,7	83,6	179,3	2,6	108,3	261,5
5	40	6391,0	61,4	-1944,8	24,8	100,2	95,3	82,6	239,6	2,5	103,1	262,2
6	33	8250,0	62,4	-2558,6	17,8	99,3	95,6	82,3	306,6	2,5	102,9	255,3
7	34	8789,0	63,0	-2328,2	18,9	99,0	96,3	81,1	321,4	2,6	104,6	256,6
8	25	10142,0	62,9	-3898,4	27,6	98,3	97,2	81,7	383,8	2,8	98,9	263,1
9	21	13013,0	186,4	-5024,8	78,8	96,8	96,3	78,2	485,4	8,1	99,1	263,1
10	10	14855,5	203,7	-5802,5	70,0	95,6	97,1	78,0	555,0	8,8	98,0	258,4
11	11	16439,5	218,1	-6666,0	70,7	94,8	96,6	76,5	615,2	9,5	98,2	258,3
12	14	18155,5	227,0	-6886,0	78,8	94,0	96,9	74,3	673,6	10,2	99,3	259,2
13	19	21235,5	246,5	-7804,5	87,8	92,5	97,9	72,4	781,0	11,4	99,8	259,8

Примечание. 9-13 – кратковременные включения фазы В для питания тяговой сети фидерной зоны Кременчуг – Кобеляки; (коэффициент ТТ – 1000/5, коэффициент учета – 55000).

Точки расчета с ОПЭ за потребленную электроэнергию расположены в ячейке № 2 ОРУ-154 кВ ПС-330 «Кременчуг». Расчетный учет на тягу поездов установлен на фидерах контактной сети, а технический учет – на вводе 27,5 кВ силового трансформатора передвижной подстанции «Тяга Кременчуг». Сравнительный анализ объема покупаемой и отпу-

щенной электрической энергии за период май – ноябрь 2014 г. свидетельствует о наличии небаланса, который превышает 10 % (табл. 2, 3). Анализ данных (см. табл. 2, 3) показывает, что расчет объема перетока электрической энергии в точке расчета осуществляется преднамеренно или ошибочно по следующему принципу.

Таблица 2

Отчетные данные отпуска и приема электроэнергии ТП «Тяга Кременчуг»

Месяц	Объем электроэнергии на ВЛ-154 кВ, тыс. кВт·ч		Прием на шины 27,5 кВ, кВт·ч	Расчетные потери, тыс. кВт·ч		Небаланс ВЛ-154 кВ	
	Отпуск	Генерация		в трансформаторе	ВЛ-154	тыс. кВт·ч	%
Май	3 270,6	406,8	2 855,7	27,082	1,686	386,115	11,8
Июнь	3 643,2	457,2	3 172,3	27,877	2,223	440,758	12,1
Июль	3 965,4	472,68	3 472,6	29,541	2,557	460,697	11,6
Август	4 215,6	526,86	3 666,3	30,629	2,904	515,796	12,2
Сентябрь	4 726,8	600,48	4 100,5	29,427	3,881	593,009	12,5
Октябрь	5 238,0	635,04	4 573,2	31,544	4,594	628,704	12,0
Ноябрь	5 455,8	671,58	4 751,7	31,961	5,218	666,926	12,2

Таблица 3

Отчетные балансы отпуска и приема электроэнергии ПС-330 Кременчуг

Месяц	Получено на шины 154 кВ, тыс. кВт·ч			Отпущено с шины 154 кВ, тыс. кВт·ч	Небаланс шин 154 кВ, тыс. кВт·ч
	От автотрансформатора	От других источников	От тяговой подстанции		
Май	169 862,4	4 908,6	406,8	175 132,4	-361,8
Июнь	163 753,2	4 307,4	457,2	168 269,4	-208,8
Июль	185 108,4	8 172,0	473,4	193 366,8	-86,4
Август	223 824,6	543,6	527,4	224 535,6	-167,4
Сентябрь	206 530,2	1 656,0	599,4	208 222,2	-64,8
Октябрь	212 432,4	6 161,4	635,4	218 410,2	-421,2
Ноябрь	200 809,8	7 444,8	671,4	208 215,0	39,6

Установленные в расчетной точке электросчетчики настроены на пофазный учет в обоих направлениях, а при определении объема перетока электрической энергии учитываются объемы отпущенной электроэнергии по каждой фазе отдельно. Таким образом, при наличии режима генерации в любой

фазе данный объем из расчета исключается. В результате такого расчета железная дорога ежемесячно, начиная с мая 2014 г. (с момента ввода в эксплуатацию ВЛ-154 кВ и передвижной тяговой подстанции «Тяга Кременчуг»), закупает электрической энергии почти на 500 тыс. кВт·ч больше, чем постав-

ляет потребителю. При месячном объеме перетока по ВЛ-154 кВ 4000-4500 тыс. кВт·ч потери на ВЛ превышают 10 % при нормативных потерях по тарифу 1-го класса закупки энергии 3,66-3,86 %. В итоге небаланс между объемом электрической энергии, отпущенным с ПС-330 «Кременчуг», и фактическим объемом, полученным железной дорогой на ТП «Тяга Кременчуг» за период май-ноябрь 2014 г., составил 3 771 тыс. кВт·ч. Вместе с тем следует отметить, что при определении величины небаланса шин 154 кВ ПС-330 «Кременчуг» и подстанции в целом расчет осуществляется с учетом полнофазного режима перетока электроэнергии во всех точках учета, в том числе и с учетом генерации фазы В ВЛ-154 «Тяга Кременчуг». Таким образом, алгоритм расчетов при составлении баланса ПС-330 «Кременчуг» является отличным от алгоритма расчетов объема для поставщиков электрической энергии, присоединенных к этой подстанции, что противоречит установленным правилам.

Выводы.

1. Анализ электрических систем с тяговыми нагрузками показывает, что для повышения их энергоэффективности нужна полномасштабная программа модернизации. Инвестиционные программы структур входящих в состав ПАТ «Укрзалізниця» должны быть синхронизированы по своим технологическим показателям, а также по критериям энергоэффективности и качества энергообеспечения с аналогичными инвестиционными программами внешней энергетики.

2. При анализе рисков и угроз энергообеспечению процесса перевозок железных дорог со стороны внешнего электроснабжения предлагается использовать систему рейтинговых оценок состояния энергетической безопасности по совокупности следующих индикаторов: надежность системы энергоснабжения, с учетом высокой меры износа основных производственных фондов энергетического хозяйства региона; отношение суммы мощности электростанций и пропускной способности межсистемных связей к максимальной электрической нагрузке потребителей на территории региона; оценка перетоков мощности в электротяговой сети и учет их в тарифах при расчетах за электроэнергию.

3. Для повышения качества электроэнергии, надежности и безопасности электроснабжения и снижения расходов и времени строительства тяговых подстанций предлагаются новые схемотехнические решения внешнего электроснабжения, которые базируются на присоединении к сетям НЕК «Укрэнерго» (220-330 кВ) и использовании устройств регулируемой компенсации реактивной мощности.

4. В результате теоретических и экспериментальных исследований вынужденных режимов работы передвижной тяговой подстанции «Тяга Кременчуг» установлено, что при отсутствии нагрузки левого или правого плеча питания тяговой сети одна из двух наименее нагруженных фаз тягового трансформатора вызывает протекания в одной из фаз питающей линии активно-емкостного тока обратного направления, что фиксируется расчетными электросчетчиками с пофазным алгоритмом расчетов как генерация наименее

нагруженной фазы. Такие режимы линий энергосистем неизбежны и вызваны необходимостью обеспечения минимально допустимого уровня напряжения электроподвижного состава на длинных консольных участках тяговой сети и для них необходимо использование векторного метода определения объема электроэнергии.

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. Корниенко В.В., Котельников А.В., Доманский В.Т. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы (Аналитический обзор). – К.: Транспорт Украины, 2004. – 196 с.
3. Марквард К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
4. Рене Пелисье. Энергетические системы: пер. с франц. [предисловие и коммент. В.А. Веникова]. – М.: Высш. шк., 1982. – 568 с.
5. Доманський І.В. Основи енергоефективності електричних систем з тяговими навантаженнями: монографія. – Харків: Вид-во ТОВ «Центр інформації транспорту України», 2016. – 224 с.
6. Доманский И.В. Режимы в электрических системах с передвижными тяговыми подстанциями переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. – 2016. – Т.75. – № 1. – С. 19-25.
7. Доманський І.В. Електрифікація залізниць – джерело підвищення енергетичної ефективності процесу перевезень // Залізничний транспорт України. – 2014. – №1. – С. 19-23, 31-33.
8. 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.
9. Доманський І.В. Системний аналіз зовнішнього електропостачання тягових підстанцій залізниць // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №3. – С. 54-63. doi: 10.20998/2074-272X.2013.3.10.
10. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Николаенко В.Г. Оптимизация несимметричных режимов систем электроснабжения // К.: Наукова думка, 1987. – 174 с.
11. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии // М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
12. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог // М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
13. Герман Л.А., Гончаренко В.П. Современная схема продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения // Вестник РГУПС. – 2013. – №2. – С. 12-17.
14. Доманский И. В. Режимы работы системы тягового электроснабжения переменного тока с устройствами компенсации реактивной мощности // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №3. – С. 59-66. doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.09.
15. Герман Л.А., Серебряков А.С., Максимова А.А. Фильтрокомпенсирующие установки в тяговых сетях переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. – 2016. – Т.75. – №1. – С. 26-34.

REFERENCES

1. *Energetichna strategija Ukrzaliznici na period do 2015 r. i na perspektivu do 2020 r. Zatv. derzhavnoju administraciju zalizничного транспорту України 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. Kornienko V.V., Kotel'nikov A.V., Domanskyi V.T. *Elektrifikacija zheleznyh dorog. Miroye tendencii i perspektivy (Analiticheskij obzor)* [Electrification of railways. Global trends and perspectives (Analytical review)]. Kyiv, Transport of Ukraine Publ., 2004. 196 p. (Rus).
3. Markvard K.G. *Elektrosnabzhenie elektrificirovannyh zheleznyh dorog* [Power supply of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p. (Rus).
4. Rene Pelis'e. *Energeticheskie sistemy* [Energy Systems]. Moscow, Higher School Publ., 1982. 568 p. (Rus).
5. Domanskyi I.V. *Osnovi energoefektivnosti elektrichnih sistem z tjavovimi navantazhennjami: monografija* [Basics of energy efficiency of electrical systems with traction load: monograph]. Kharkiv, TOV «Tsentr informatsiyi transportu Ukrainy» Publ., 2016. 224 p. (Ukr).
6. Domanskyi I.V. Modes in electrical systems with mobile AC traction substations. *Vestnik of Railway Research Institute*, 2016, vol.75, no.1. pp. 19-25. (Rus).
7. Domanskyi I.V. Electrification of railways – source of energy efficiency of process transportations. *Railway Transport of Ukraine*, 2014, no. 1, pp. 19-23, 31-33. (Ukr).
8. *Pravyta ulashuvannia systemy tiahovoho elektropostachannia zaliznyts Ukrainy. № TsE-0009: Zatv. Nakaz Ukrzaliznytsi 24.12.2004 r., № 1010-TsZ. / Min-vo transp. ta zviazku Ukrainy* [Terms ordering system Traction Power railways of Ukraine. Number IS-0009: approved. Order Railways year 24.12.2004., № 1010-CH. Ministry of Transport and Communications of Ukraine]. Kyiv, 2005. 80 p. (Ukr).
9. Domansky I.V. System analysis of external power supply of railways traction substation. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2013, no.3, pp. 54-63. (Ukr). doi: 10.20998/2074-272X.2013.3.10.
10. Shidlovskij A.K., Kuznetsov V.G., Nikolaenko V.G. *Optimizacija nesimmetrichnyh rezhimov sistem elektrosnabzhenija* [Optimization of asymmetrical modes of power supply systems]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1987. 174 p. (Rus).
11. Zhelezko Yu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaja moshhnost'. Kachestvo elektroenergii* [Loss of electricity. Reactive power. Power quality]. Moscow, ENAS Publ., 2009. 456 p. (Rus).
12. 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).
13. German L.A., Goncharenko V.P. Modern longitudinal capacitive compensation scheme in the traction power supply. *Bulletin of Rostov State Transport University*, 2013. no.2. pp. 12-17. (Rus).
14. Domanskyi I.V. Modes of operation of the system of traction power AC using reactive power compensation devices. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no.3, pp. 59-66. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.09.
15. German L.A., Serebryakov A.S., Maksimova A.A. Filter compensating installation in AC traction networks. *Vestnik of Railway Research Institute*, 2016. no.1. pp. 26-34. (Rus).

Поступила (received) 29.11.2016

Бондаренко Владимир Омелянович¹, д.т.н., проф.,
Доманский Илья Валерьевич¹, к.т.н.,
Костин Геннадий Николаевич²,

¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 21,
e-mail: dvt.nord@mail.ru

²Харьковское региональное отделение
филиала «Энергосбыт» ПАО «Укрзалізниця»,
61052, Харьков, ул. Конарева, 7,
e-mail: ee_ugd_kh@ukr.net

V.O. Bondarenko¹, I.V. Domanskyi¹, G.N. Kostin²

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Kyrychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Kharkiv regional department of the branch «Energosbyt»
of Public Joint Stock Company «Ukrainian Railway»,
7, Konareva Str., Kharkiv, 61052, Ukraine.

Analysis of energy efficiency of operating modes of electrical systems with the traction loads.

Innovative scenarios of reliable energy supply of transportation process aimed at reducing the specific energy consumption and increase energy efficiency of the systems of electric traction. The paper suggests innovative energy saving directions in traction networks of railways and new circuit solutions accessing traction substations in energy systems networks, ensure energy security of the transportation process. To ensure the energy security of rail transport special schemes were developed to propose the concept of external power traction substations, which would increase the number of connections to the networks of 220 – 330 kV, as well as the creation of transport and energy corridors, development of its own supply of electric networks of 110 kV substations and mobile RP-110 kV of next generation. Therefore, the investment program of the structures owned by the Ukrainian Railways (Ukrzaliznytsia) need to be synchronized in their technological characteristics, as well as the criteria of reliability and quality of power supply with the same external energy investment programs. It is found that without any load on left or right supplying arm one of two less loaded phases of traction transformer begins generating specific modes in the supplying three-phase line. Thus, modes of mobile substation cause leakage in one of the phases of the supply line of traction transformers of active-capacitive current, and as a result generating energy in the main power line of 154 kV, which is fixed and calculated by electricity meters. For these three phase mode supply network is necessary to use 1st algorithm, i.e. taking into account the amount of electricity as the energy in all phases. For effective application of reactive power compensation devices in the AC traction power supply systems it is proposed to develop regulatory documentation on necessity of application and the order of choice of parameters and placement of compensation systems taking into account operation mode of power systems and the use of software systems with imitation of instantaneous inter-related schemes of transport loads. References 15, tables 3, figures 4.

Key words: energy security; railway transport; the process of transportation; networks of power systems; efficiency of modes; mobile traction substations.