

УДК 656.2.004.18

Режимы в электрических системах с передвижными тяговыми подстанциями переменного тока

И. В. ДОМАНСКИЙ

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (НТУ «ХПИ»), Харьков, 61002, Украина

Аннотация. Инновационные сценарии надежного энергетического обеспечения перевозочного процесса направлены на снижение удельного потребления энергоресурсов и повышение энергоэффективности систем электрической тяги. 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.

Для эффективного применения устройств компенсации реактивной мощности в системах тягового электроснабжения переменного тока предлагается разработать нормативно-правовую документацию о необходимости применения и порядке выбора параметров и мест размещения устройств компенсации с учетом режимов работы энергосистем и использованием программных комплексов с имитацией взаимосвязанных мгновенных схем движущихся нагрузок.

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

Введение. Электрификация железных дорог всегда была приоритетным направлением развития систем тяги [1–5]. В настоящее время во всем мире большинство высоконагруженных магистральных, в том числе высокоскоростных, линий электрифицированы на переменном токе, преимущественно промышленной частоты 50 Гц напряжением 25 кВ. На Украине с 1950-х гг. по системе переменного тока 25 кВ, 50 Гц электрифицировано 5,5 тыс. км (53% полигона) железных дорог. Доля электрифицированных участков от общей эксплуатационной длины железных дорог составляет 47,3%, при этом доля электротяги в общем грузообороте равна 91,2%. Подтверждены неоспоримые преимущества системы переменного тока перед системой электрификации на постоянном токе 3 кВ.

С целью уменьшения расходов на обеспечение отпаса электроэнергии все железные дороги Украины осуществляют снабжение электрической энергией потребителей по регулируемому тарифу. Они являются лицензиатами по передаче и поставке электроэнергии и полноправными субъектами оптового рынка электроэнергии (ОРЭ), что позволяет экономить сотни миллионов гривен при закупке электрической энергии (в

2014 г. — 631 млн гривен, 1 гривна = 2,84 рубля по курсу на октябрь 2015 г.). Преимущества закупки электроэнергии на ОРЭ очевидны, однако появляются некоторые особенности оплаты за электроэнергию в условиях вынужденных режимов работы электротяговых сетей с применением передвижных тяговых подстанций.

Придавая большое значение основному для железных дорог виду тяги, руководством Укрзализныци была принята «Программа электрификации железных дорог на период 2012–2016 гг.». Однако последствия экономического кризиса существенно снизили темпы электрификации железных дорог в 2013–2015 гг. В результате важнейшая электрифицированная линия Харьков — Полтава — Кременчуг — Знаменка работает в вынужденных режимах с питанием тяговой сети от передвижных подстанций. Целью статьи является разработка схемотехнических решений для повышения энергоэффективности режимов работы электротяговой сети переменного тока и обоснование необходимости расчета передвижных тяговых подстанций по векторному методу трехфазного потребления энергии от подстанций Национальной энергетической компании «Укрэнерго» (НЭК «Укрэнерго»).

1. Обеспечение энергобезопасности перевозочного процесса. Существенным повышением надежности работы тяговых сетей является их питание от подстанций НЭК «Укрэнерго». Новые схемотехнические решения присоединения тяговых подстанций к сетям энергосистем обоснованы в работах [6, 7] и используются при электрификации железных дорог. Концепция развития схем внешнего электроснабжения тяговых подстанций с учетом требований электроэнергетики Украины базируется на следующих основных положениях:

- строительство по согласованию с НЭК «Укрэнерго» объектов тяговой энергетики (тяговые подстанции с заходами высоковольтных линий электропередачи региональных энергосистем);
- увеличение количества присоединений к сетям НЭК «Укрэнерго» (220–330 кВ) для повышения качества электроэнергии и уменьшения потерь при ее передаче, а также снижение расходов и времени строительства новых или реконструкции существующих тяговых подстанций;

E-mail: dvt_nord@mail.ru

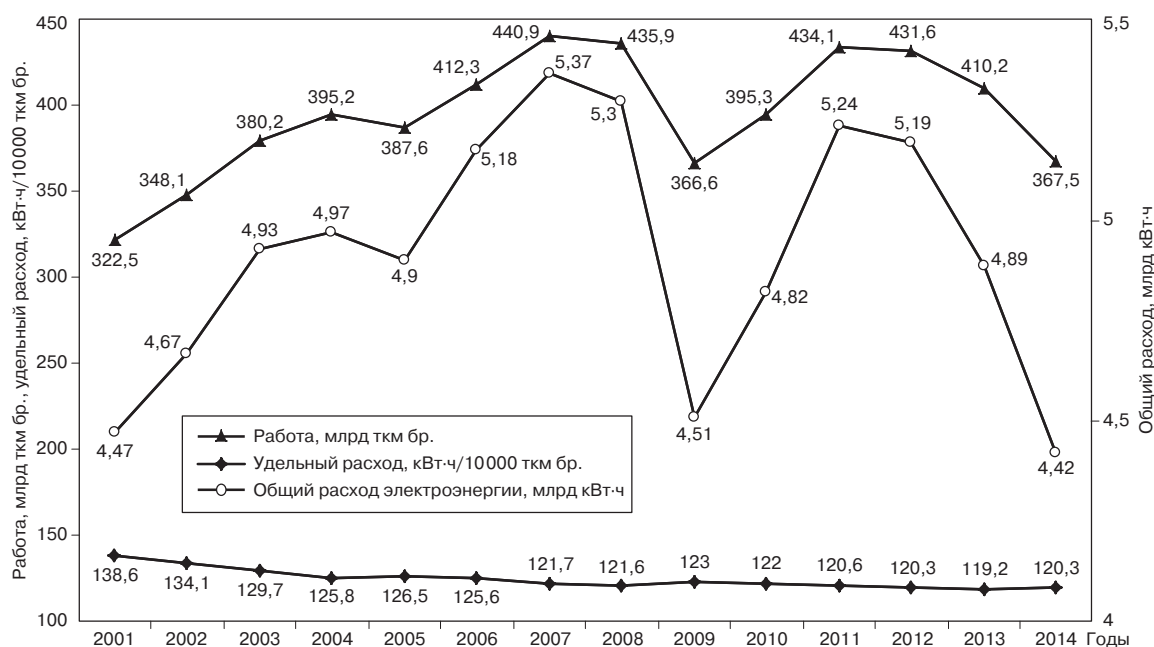


Рис. 1. Изменение работы, общих и удельных расходов электроэнергии в электротяге

Fig. 1. Dynamics of changes in tariffs and savings in electricity purchase costs

- создание транспортно-энергетических коридоров в полосе отчуждения железных дорог, что эффективно при сооружении новых железнодорожных линий в энергодефицитных регионах;
- повышение надежности и безопасности электроснабжения тяговых подстанций путем развития собственных питающих электрических сетей 110 кВ и передвижных подстанций нового поколения с РУ-110 кВ;
- сотрудничество с энергосистемами в создании интеллектуальных электрических сетей (smart grids),

внедрение программных и аппаратных средств обмена информацией между УЗ и организациями по управлению надежностью и режимами электроснабжения НЭК «Укрэнерго»;

- снижение перетоков мощности и потерь энергии в сетях электротяги и питающих сетях энергосистем;
- снижение средств на закупку электроэнергии путем развития схем присоединения тяговых подстанций к сетям внешнего электроснабжения по первому классу (35, 110, 220, 330 кВ).

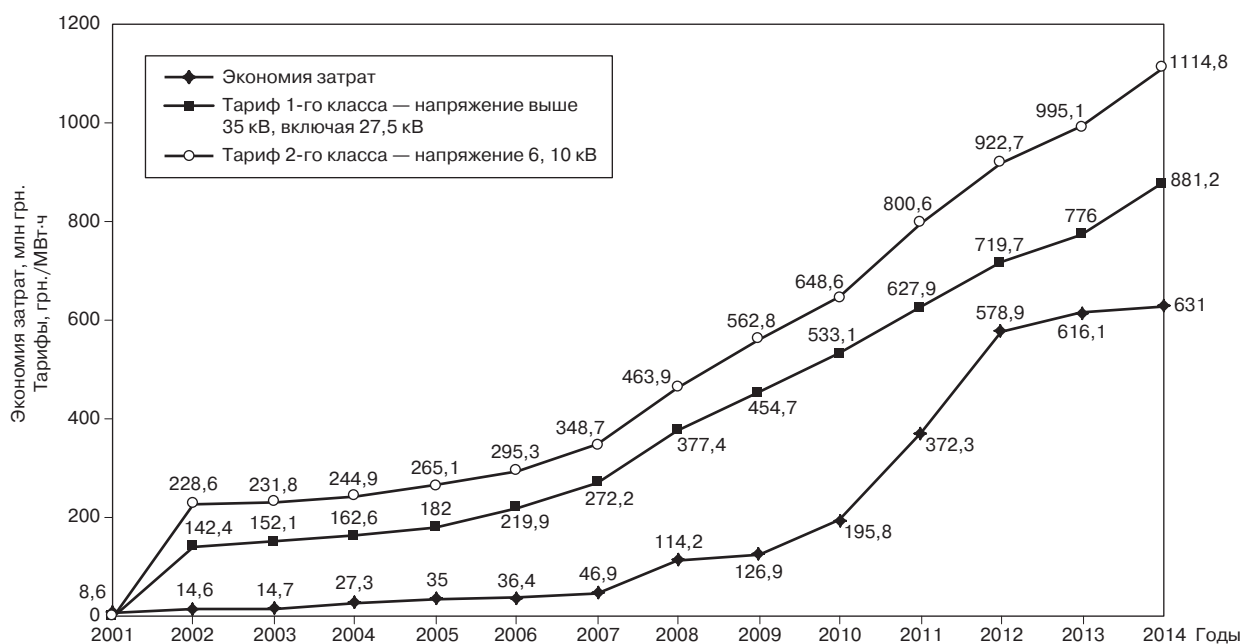


Рис. 2. Динамика изменения тарифов и экономия затрат на закупку электроэнергии

Fig. 2. Changing operation modes, general and specific electricity consumption in the electric traction

Эксплуатационной практикой многократно подтверждалось: чем ниже объем перевозок — тем выше их удельная энергозатратность (рис. 1). Последствия экономического кризиса существенно повлияли на снижение объемов работы на электрической тяге в 2009 г. к 2008 г. и в 2014 г. к 2012 г., соответственно на 16 и 15%, а также на снижение общего расхода энергии соответственно на 14,9 и 14,8%. Вместе с тем существенно возросла экономия затрат от внедрения прогрессивных методов закупки электроэнергии на ОРЭ при тенденции увеличения отпускных тарифов и особенно по 2-му классу закупки электроэнергии (рис. 2). Это, безусловно, увеличивает энергетическую безопасность железных дорог и снижает себестоимость перевозок.

Концептуальные схемы технического решения электроснабжения передвижных тяговых подстанций от подстанций НЭК «Укрэнерго» при существующих режимах работы энергосистем и перевозок на железной дороге определены в технических условиях электроснабжения передвижных тяговых подстанций 154/27,5/10 кВ. Они предусматривают выполнение нормативных требований энергорынка: надежности энергоснабжения и расчета по векторному методу трехфазного потребления электроэнергии с учетом знака направления потока энергии в каждой фазе.

2. Вынужденные режимы работы передвижных тяговых подстанций и питающих линий энергосистем. Передвижные тяговые подстанции предназначены для питания электрифицированных участков железных дорог при выходе из строя или остановке на капитальный ремонт устройств основных тяговых подстанций, а также в качестве средства увеличения мощности основной подстанции при временном изменении графика движения поездов [3, 8]. Однако 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 [9 – 11]. Аналогов применения передвижных подстанций в таких режимах работы нет.

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]. 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. На дорогах Украины получило распространение питание

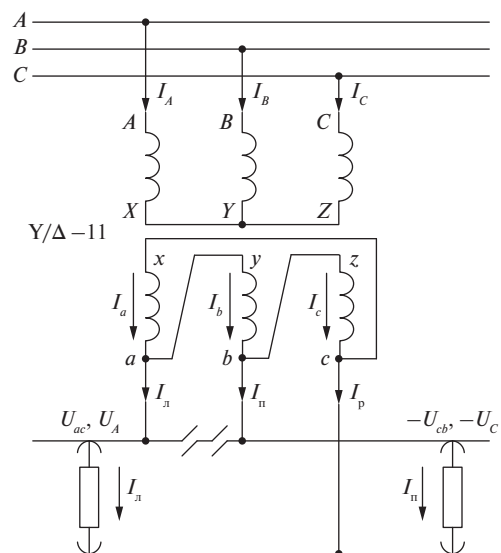


Рис. 3. Схема питания тяговой сети однофазного тока при помощи трехфазного трансформатора, соединенного по схеме Y/Δ – 11

Fig. 3. Power supply scheme of single phase current using a three-phase transformer connected by scheme Y/Δ – 11

тяговой сети от трехфазных трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Δ.

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_n 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 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 (см. рис. 4). Вектор тока $\dot{I}_l$ (левая сторона) принятого напряжения 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 $\dot{I}_n$ (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_n нанести вектор тока $\dot{I}_n$. Зная $\dot{I}_l$ и $\dot{I}_n$, нетрудно найти ток $\dot{I}_p$ в проводе, присоединенном к рельсу, как уравнивающую их величину (как так $\dot{I}_l + \dot{I}_n = 0$), а также токи фаз трансформатора [3]:

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

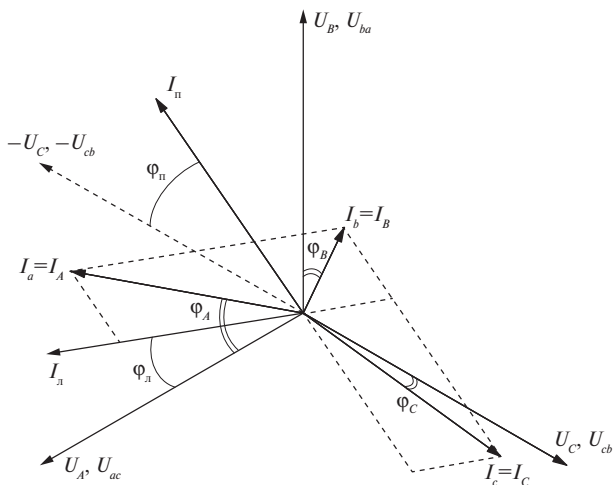


Рис. 4. Векторная диаграмма для определения токов фаз трехфазного трансформатора

Fig. 4. Vector diagram for determining current phases of a three phase transformer

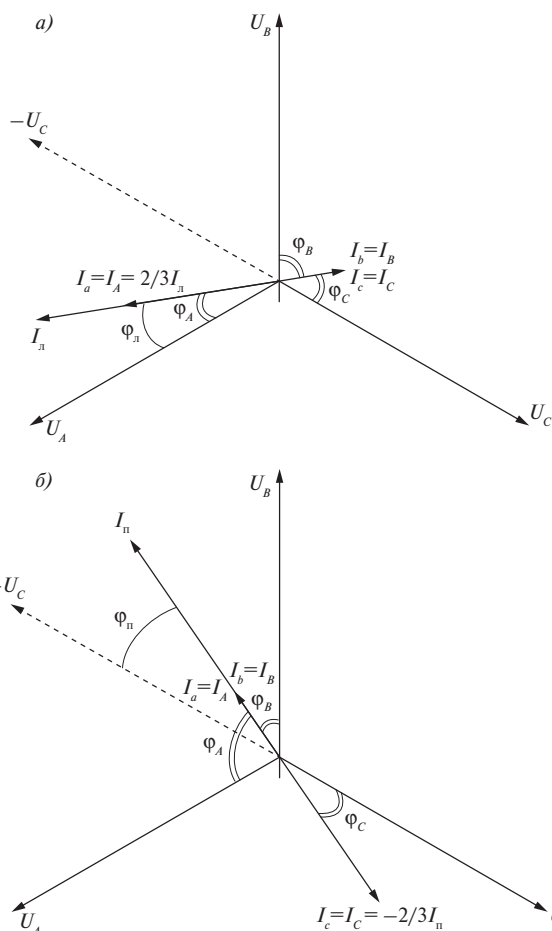


Рис. 5. Векторная диаграмма для определения токов фаз трехфазного трансформатора для частного случая:

a — нагрузка I_n правого плеча питания равна нулю; *б* — нагрузка I_l левого плеча питания равна нулю

Fig. 5. Vector diagram for determining current phases of a three phase transformer for special case:

a — load I_n of right supply arm equals zero; *b* — load I_l of left supply arm equals zero

Левая фидерная зона с током I_l питается от напряжения $\dot{U}_{ac}$. Это напряжение генерируется как в обмотке ax , так и в обмотках $ubzc$ (где оно получается в результате геометрического сложения напряжений двух обмоток — bu и cz). Но сопротивление обмотки ax в два раза меньше сопротивления двух других обмоток, соединенных последовательно. Поэтому ток I_l разделяется между этими генерирующими напряжение $\dot{U}_{ac}$ обмотками в отношении 2:1. Аналогичным образом делится и ток I_n . Можно заметить (см. рис. 3), что наименее нагруженной фазой является та фаза треугольника, которая непосредственно не соединена с рельсами. В данном случае, когда одна из нагрузок I_l или I_n равна нулю, наименее нагруженными оказываются две фазы. На векторной диаграмме рис. 4 показаны углы сдвига фаз ϕ_A, ϕ_B, ϕ_C между токами I_A, I_B и I_C и напряжениями $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ соответственно. Заметим, что ϕ_A больше ϕ_B , а ϕ_C меньше ϕ_B . Причем у «опережающей» (по ходу вращения векторов) фазы C угол меньше, чем у «отстающей» фазы A . Это обстоятельство существенно влияет на потери напряжения в трансформаторе.

Разберем более подробно частный случай, когда наименее нагруженными оказываются две фазы, например, при питании тяговой нагрузки только левого плеча «отстающей» фазой (рис. 5, *a*) или только правого плеча «опережающей» фазой (рис. 5, *б*). При питании нагрузки левого плеча I_l «отстающей» фазой (рис. 5, *a*) углы сдвига фаз между токами I_A, I_B и I_C и напряжениями $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ значительно увеличиваются. Заметим, что $\phi_A = \phi_B$, ток I_B отстает от напряжения $\dot{U}_B$ на угол ϕ_B , а I_C опережает напряжение $\dot{U}_C$ 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_n «опережающей» фазой (рис. 5, *б*) $\phi_C = \phi_B$, ток I_B опережает напряжение $\dot{U}_B$, 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. В мае 2014 г. была введена в эксплуатацию передвижная подстанция «Тяга Кременчуг», которая присоединена непосредственно к магистральным электрическим сетям Северной электроэнергетической системы, 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). Это необходимо для реализации перевозочного процесса по условию обеспечения минимально допустимого уровня напряжения электроподвижного состава (ЭПС) на лимитирующих участках ($U = 21$ кВ). Как показано

Отчетные данные отпуска и приема электроэнергии
Report data on releasing and receiving electric energy

Месяц	Отпуск ПС-330, кВт·ч	Прием ТП 27,5, кВт·ч	Потери, кВт·ч		Небаланс		Объем генерации, кВт·ч
			в трансформаторе	в ПЛ-154	кВт·ч	%	
Май	3 270 600	2 855 717	27 082	1 686	386 115	11,8	406 800
Июнь	3 643 200	3 172 342	27 877	2 223	440 758	12,1	457 200
Июль	3 965 400	3 472 605	29 541	2 557	460 697	11,6	472 680
Август	4 215 600	3 666 271	30 629	2 904	515 796	12,2	526 860

выше, 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 существующим правилам 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.

Точки расчета с ОРЭ 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 отпущенной электрической энергии за период май — август 2014 г. свидетельствует о наличии небаланса, который превышает 10% (таблица).

Анализ данных (см. таблицу) показывает, что расчет объема перетока электрической энергии в точке расчета осуществляется преднамеренно или ошибочно по следующему принципу. 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 ГП «Южная 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 поставляет 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 ПС-154 «Тяга Кременчуг» за период май — август 2014 г., составил 1 803 366 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.

3. Компенсация реактивной мощности в электротяговой сети. 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 выполнять их регулируемые и переключаемые, учитывая основные нормативно-правовые документы [12—13].

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. 6).

Для выбора номинальной мощности КУ следует выполнить расчет наименьшего действующего напряжения на токоприемнике ЭПС для заданных размеров движения по нормальной (проектной) схеме электро тяговой сети с учетом сгущения поездов в интенсивный час. Расчеты во всех случаях следует выполнять с использованием программных комплексов с имитацией взаимосвязанных мгновенных схем движущихся нагрузок ЭПС. Наиболее перспективными для тягового электроснабжения на сегодня являются ступенчато регулируемые устройства компенсации реактивной мощности. В работах [14, 15] показано развитие

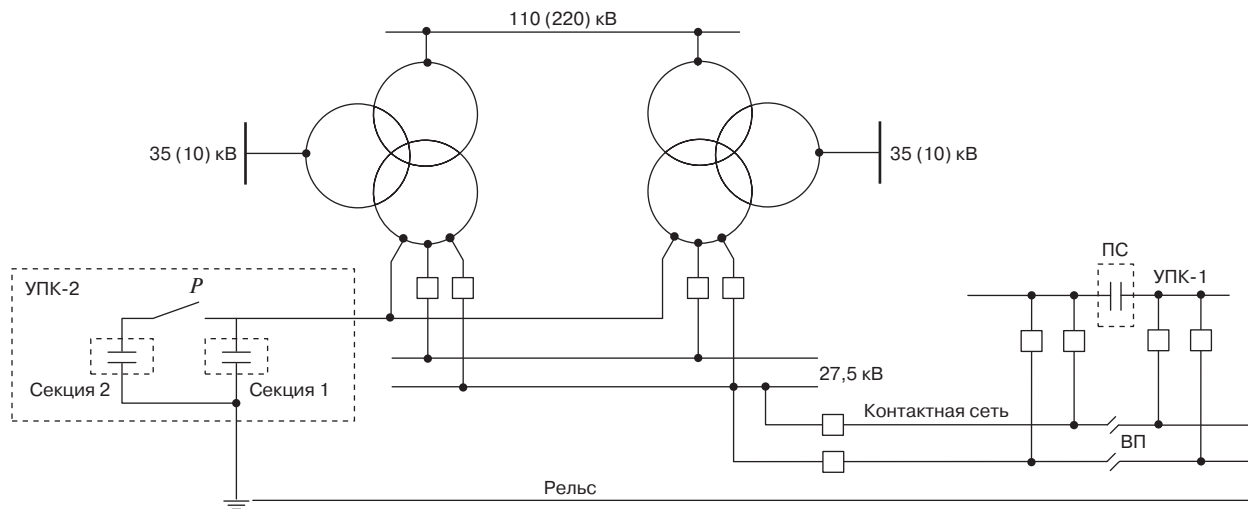


Рис. 6. Продольная емкостная компенсация в электротяговой сети
Fig. 6. Longitudinal capacitive compensation of electrotraction network

методов расчета систем тягового электроснабжения с учетом питающих их энергосистем и предложена методика выбора параметров и мест размещения установок поперечной и продольной компенсации.

Выводы. 1. Первоочередными задачами тягового электроснабжения являются строительство и модернизация стационарных тяговых подстанций с рациональными мощностями и схемами присоединения к энергосистемам, что позволит в итоге обеспечить энергетическую безопасность перевозок и экономию электроэнергии.

2. Важнейшими задачами являются совершенствование отечественных передвижных подстанций с расширенными функциональными возможностями, в том числе с учетом электроэнергии на высокой стороне трансформатора, и разработка передвижных устройств регулируемой компенсации реактивной мощности для оперативного обеспечения энергобезопасности перевозок в вынужденных режимах работы электрифицированных линий.

3. 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 с учетом режимов работы энергосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетична стратегія Укрзалізниці на період до 2015 року і на перспективу до 2020 року. Затв. державною адміністрацією залізничного транспорту України 26.11.2013 р. Київ, 2013. 104 с.
2. Корниенко В.В., Котельников А.В., Доманский В.Т. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы (Аналитический обзор). Киев: Транспорт Украины, 2004. 196 с.
3. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. 528 с.

4. Пелисье Р. Энергетические системы: пер. с франц. /предисловие и коммент. В.А. Веникова. М.: Высш. шк., 1982. 568 с.

5. Доманський І.В. Електрифікація залізниць — джерело підвищення енергетичної ефективності процесу перевезень // Залізничний транспорт України. 2014. № 1. С. 19 – 24, 31 – 33.

6. Доманський І.В. Системний аналіз зовнішнього електропостачання тягових підстанцій залізниць // Електротехніка і електромеханіка. 2013. № 3. С. 54 – 63.

7. Доманський І.В. Перспективи розвитку сучасних схемно-технічних рішень зовнішнього електропостачання тягових підстанцій залізниць // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. Харків: НТУ «ХПІ». 2013. № 5 (979). С. 54 – 65.

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. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Николаенко В.Г. Оптимизация несимметричных режимов систем электроснабжения. Киев: Наукова думка, 1987. 174 с.

10. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложносимметричные режимы электрических систем. Иркутск: ИРГУПС, 2005. 273 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.

15. Доманский И.В. Развитие методов расчета систем тягового электроснабжения и питающих их энергосистем // Електротехніка і електромеханіка. 2015. № 4. С. 62 – 68.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ДОМАНСКИЙ Илья Валерьевич, канд. техн. наук, докторант, кафедра «Электрический транспорт и тепловозостроение», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (НТУ «ХПИ»).

Статья поступила в редакцию 20.09.2015 г., принята к публикации 30.10.2015 г.

Modes in electrical systems with mobile AC traction substations

I.V. DOMANSKIY

National technical university "Kharkiv Polytechnic Institute" (NTU "KhPI"), Kharkiv, 61002, Ukraine

Abstract. 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 article 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 interrelated schemes of transport loads.

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

REFERENCES

1. Energy Strategy of Railways for the period up to 2015 and for the future by 2020. Approved by state administration of Railway Transport of Ukraine on November 26, 2013, 104 p. (in Ukr.)
2. Kornienko V.V., Kotelnikov A. V., Domanskiy V.T. *Elektrifikatsiya zheleznih dorog. Miroye tendentsii i perspektivy (Analiticheskiy obzor)* [Electrification of railways. Global trends and perspectives (Analytical Review)]. Kiyev, Transport of Ukraine Publ., 2004, 196 p.
3. Markvardt K.G. *Elektrosnabzheniye elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog* [Power supply of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p.
4. Rene Pelis'e. *Jenergeticheskie sistemy* [Energy Systems]. Moscow, Higher School Publ., 1982, 568 p.

5. Domanskiy I.V. *Electrification of railways — source of energy efficiency of the transport*. Zaliznichnyi transport Ukraini [Railway Transport of Ukraine]. 2014, no. 1, pp. 19 – 24, 31 – 33.

6. Domanskiy I.V. *Sistemniy analiz zovnishn'ogo elektro-postachannya tyagovikh pidstantsiy zaliznits'* [System analysis of external power supply traction substations of railways]. Elektrotehnika i elektromekhanika [Electrical engineering and electromechanics]. 2013, no. 3, pp. 54 – 63.

7. Domanskiy I.V. *Prospects of development schemes and technical solutions to external power railway traction substations*. Bulletin of NTU "KhPI", Series: Mathematical modeling in engineering and technology, 2013, 5 (979), pp. 54 – 65.

8. *Rules ordering system Traction Power railways of Ukraine*. Number IS-0009: approved. Order Railways year 24.12.2004., no. 1010CH. Ministry of Transport and Communications of Ukraine. Kiyev, 2005, 80 p., (in Ukr.)

9. Shidlovskiy A.K., Kuznecov V.G., Nikolaenko V.G. *Optimizatsiya nesimmetrichnykh rezhimov sistem elektrosnabzheniya* [Optimization of asymmetrical modes of power supply systems]. Kiyev, Naukova Dumka Publ., 1987, 174 p.

10. Zakarjukin V.P., Krjukov A.V. *Slozhnonnesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem* [Complex-asymmetrical modes of electrical systems]. Irkutsk, Irkutsk University Publ., 2005, 273 p.

11. Zhelezko Yu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'*. *Kachestvo elektroenergii* [Loss of electricity. Reactive power. Power quality]. Moscow, ENAS Publ., 2009, 456 p.

12. Borodulin B.M., German L.A., Nikolaev G.A. *Kondensatornye ustanovki elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog* [Capacitor units of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1983, 183 p.

13. German L.A., Goncharenko V.P. *Sovremennaya skhema prodol'noy emkostnoy kompensatsii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya* [Modern longitudinal capacitive compensation scheme in the traction power supply]. Vestnik RGUPS, 2013, no. 2, pp. 12 – 17.

14. Domanskiy I.V. *Rezhimy raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka s ustroystvami kompensatsii reaktivnoy moshchnosti* [Modes of operation of the system of traction power AC using compensation devices reactive power]. Elektrotehnika i elektromekhanika [Electrical engineering and electromechanics], 2015, no. 3, pp. 59 – 66.

15. Domanskiy I.V. *Razvitiye metodov rascheta sistem tyagovogo elektrosnabzheniya i pitayushchikh ikh energosistem* [Development of methods of calculation of systems traction power supply and them of power supply systems]. Elektrotehnika i elektromekhanika [Electrical engineering and electromechanics], 2015, no. 4, pp. 62 – 68.

ABOUT THE AUTHOR

DOMANSKIY Ilya Valerievich,

Cand. Sci. (Eng.), Doctoral Candidate,
Chair of Electrical transport and diesel locomotive building
National Technical University "Kharkov Polytechnical Institute"

Received 20.09.2015

Accepted 30.10.2015