

## Повышение эффективности функционирования тягового электроснабжения при применении возобновляемых источников электрической энергии

Юрий Петрович ГОНЧАРОВ<sup>1</sup>, Виктор Григорьевич СЫЧЕНКО<sup>2</sup>,  
Дмитрий Алексеевич БОСЫЙ<sup>3</sup>, Марина Сергеевна ПАСТУШЕНКО<sup>4</sup>,  
Евгений Николаевич КОСАРЕВ<sup>5</sup>

### Резюме

Существующие системы тягового электроснабжения постоянного и переменного тока в условиях морального и физического старения инфраструктуры требуют доработки и совершенствования в части обеспечения передачи электрической энергии требуемой мощности и надлежащего качества электроподвижному составу. Известные способы усиления тягового электроснабжения сводятся не только к внедрению новейших технологий и современного оборудования, а и к применению систем распределенного питания. Авторы статьи рассматривают возможность использования альтернативной энергии для питания собственных нужд тяговых подстанций и усиления тяговой сети постоянного тока. Применение солнечных батарей для преобразовательных пунктов позволяет осуществить переход от централизованного питания к распределенному, что в свою очередь снижает расход и потери электрической энергии непосредственно в тяговой сети. Приведенная методика расчетов для типовой межподстанционной зоны позволяет определить требуемые мощности усилительных пунктов и их количество для обеспечения минимально допустимого напряжения в контактной сети. Оценка технико-экономических показателей централизованной и распределенной систем тягового электроснабжения показывает в целом существенную экономию электрической энергии.

<sup>1</sup> Харьковский политехнический институт, e-mail: kafedrapbme@mail.ru.

<sup>2</sup> Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, e-mail: elsnz@mail.ru.

<sup>3</sup> Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, e-mail: dake@i.ua.

<sup>4</sup> Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, e-mail: ms\_estimate@mail.ru.

<sup>5</sup> Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, e-mail: kossik89@gmail.com.

**Ключевые слова:** электрическая энергия, электрифицированный транспорт, система электроснабжения, централизованная, распределенная, экономия

## 1. Введение

На сегодняшний день сформированы две системы питания электрифицированного транспорта: постоянного и переменного тока. Развитие и становление каждой из этих систем обуславливались состоянием развития научно-технического прогресса на определенный период времени. При этом необходимо отметить, что система постоянного тока с момента своего появления фактически не изменялась структурно, а изменялись, в основном, элементная база и применяемое оборудование. Система переменного тока, напротив, с самого начала своего применения постоянно подвергается разного рода усовершенствованиям. Можно констатировать, что, не принимая во внимание задекларированные преимущества и превалирующее в настоящее время внедрение системы переменного тока, опыт ее эксплуатации доказывает, что, в целом, система переменного тока уже не отвечает современным требованиям. За все годы эксплуатации и модернизации так и не были устранены основные недостатки этой системы: опасное электромагнитное влияние, несимметричная загрузка фаз и значительные объемы транзита реактивной энергии. Конечно, научные дискуссии относительно того, какая система электрификации лучше, ведутся давно, но детального и комплексного сравнительного анализа до этого времени не выполнено.

Эффективность работы тягового электроснабжения определяется не только родом тока, но и состоянием инфраструктуры передачи энергии потребителям (электроподвижному составу и не тяговым потребителям). Нынешнее состояние тягового электроснабжения характеризуется „стремительным” моральным и физическим старением инфраструктуры: контактной сети и тяговых подстанций. Эксплуатационная длина электрифицированных дорог, находящихся в эксплуатации более 40 лет, за последние 10 лет увеличилась в 20 раз и составляет почти 50% от их общей длины. Удельная повреждаемость контактной сети на 100 км развернутой длины с каждым годом растет. Такие же негативные тенденции можно отметить и относительно оборудования тяговых подстанций и линий электроснабжения (автоблокировки и продольного электроснабжения).

Внедрение скоростного движения, увеличение весовых норм поездов обуславливает необходимость наращивания провозной способности железных дорог. Для этого осуществляются мероприятия по увеличению скоростей движения, создаются новые электровозы большой мощности, ищутся способы усиления тягового электроснабжения. Существующие

системы тягового электроснабжения не всегда в состоянии обеспечить передачу электроэнергии требуемой мощности и высокого качества для этих поездов. Нередко провозную способность действующих участков стальных магистралей, электрифицированных на постоянном токе 3,0 кВ, ограничивают устройства электроснабжения. Однако, утверждение о том, что „электрифицированные участки постоянного тока уже поставили мощностной предел повышения скорости не более 200–250 километров в час”, представляется спорным. Важнейшим требованием организации скоростного пассажирского движения и движения поездов повышенного веса является обеспечение напряжения на токоприемнике электровозов не менее 2900 В с возможностью его увеличения вплоть до длительно допустимой величины, определенной ВНИИЖТом, и равной 3600 В [1].

В качестве основных способов усиления тяговой сети можно назвать следующие: строительство новых тяговых подстанций и пунктов параллельного соединения, применение мощных двенадцатипульсовых преобразовательных агрегатов, увеличение сечения контактной подвески и введение устройств регулирования напряжения на тяговых подстанциях, состоящих из преобразовательных трансформаторов, управляемых реакторов и шкафов автоматического регулирования напряжения типа ШАУН [2]. Однако, надо отметить, что существующие системы питания тяговой сети недостаточно эффективны и экономичны, даже при применении этих способов. Дело в том, суточная загрузка действующих тяговых подстанций при обеспечении графика интенсивного движения поездов не превышает 20–25%, при этом потери энергии в тяговой сети при пиковых нагрузках увеличиваются и достигают 10–15% от потребленной энергии. Радикальным способом повышения эффективности функционирования системы тягового электроснабжения, является повышение напряжения в контактной сети постоянного тока до 18–24 кВ. Однако, на наш взгляд, главным ограничивающим фактором является использование системы централизованного электроснабжения.

Значительно усилить тяговое электроснабжение может не только внедрение новейших технологий и современного оборудования, а и применение систем распределенного питания. Принципы построения этих систем были формулированы проф. Марквардом К.Г. еще в середине прошлого века. При их применении питание контактной сети осуществляется с помощью преобразовательных пунктов, подключаемых к продольной линии электропередачи повышенного напряжения переменного или постоянного тока. Экономический эффект достигается за счет уменьшения сечения проводов контактной сети, уменьшения потерь энергии, поддержания необходимого уровня напряжения в контактной сети и увеличения коэффициента использования мощности основного энергетического оборудования при снижении

его установленной мощности. На сегодняшний день проработаны несколько вариантов построения систем распределенного питания, в том числе с применением переменного тока повышенной частоты с полуволновой настройкой [3].

Целью этой статьи является рассмотрение возможностей применения источников возобновляемой энергии, в первую очередь, солнечной, для повышения эффективности функционирования систем тягового электроснабжения.

## **2. Направления внедрения возобновляемых источников электрической энергии в тяговом электроснабжении**

В настоящее время альтернативные источники электроэнергии стремительно развиваются, увеличивается количество поставщиков и изменяются условия предоставления услуг по электроснабжению. Этот процесс обусловлен тяжелой экологической ситуацией, необходимостью охраны окружающей среды и сложностями энергетической политики в мире. При этом развитие альтернативных источников энергии, как нового перспективного направления экономики, нуждается в государственном регулировании и управлении; в начальный период своего развития – финансовой поддержки и уменьшения налоговых ставок. Во многих странах в настоящий момент происходит выравнивание стоимости энергии традиционных и альтернативных источников, в первую очередь, как в связи с усилением экологических требований, так и увеличением стоимости энергии традиционных электрических станций (особенно угольных).

Украина за последние несколько лет добилась значительного прогресса в развитии источников альтернативной электрической энергии, в частности, солнечных (СЭС) и ветровых (ВЭС) электростанций. Одним из движущих факторов стало создание „Зеленого тарифа” на генерируемую альтернативными источниками электроэнергию. Подобные мероприятия должны стимулировать привлечение инвестиций в генерацию электроэнергии из энергии альтернативных источников. Укажем, что обновленный вариант Энергетической стратегии Украины на период до 2030 года предусматривает динамику роста указанного производства электроэнергии.

Анализ возможностей использования альтернативной энергетики в системах тягового электроснабжения показывает несколько возможных направлений:

- питание системы тягового электроснабжения от внешней энергетической системы, в которой, наряду с традиционными, функционируют в параллельном режиме и альтернативные источники электрической энергии,

- использование альтернативной энергии для усиления тяговой сети, питания объектов инфраструктуры и потребителей собственных нужд (на прямую).

На наш взгляд, наиболее перспективным направлением является использование солнечной энергии. Этот сектор является наиболее быстро растущим и, по оценкам экспертов, мировой рынок солнечных элементов ежегодно увеличивается более чем на 30%. Немаловажным фактором является возможность использования для солнечной генерации полосы отвода железных дорог и крыш зданий инфраструктуры тягового электроснабжения.

Солнечная энергия доступна в каждом углу нашей планеты, различаясь по плотности потока излучения не более чем вдвое. Отсюда, она привлекательна для всех стран, отвечая их интересам в плане энергетической независимости. Во-вторых, солнечная энергия – это экологически чистый источник, что позволяет использовать его во все возрастающих масштабах без негативного влияния на окружающую среду.

С технической точки зрения преимущества СЭС заключаются в отсутствии необходимости использовать какое-либо топливо, подвижные части, которые изнашиваются, проведения трудоемкого технического обслуживания для поддержания системы в работоспособном состоянии. Значительным преимуществом является их модульность, что дает возможность быстрого монтажа в местах эксплуатации, отсутствие эксплуатационного шума и источников вредных выбросов.

Для районов Украины и характерном для нашей широты рассеянном свете, модули на основе аморфного кремния имеют большую эффективность, чем модули на основе моно- и поликристаллического кремния. Этот факт подтвержден исследованиями ведущих зарубежных компаний. Но более высокая стоимость модулей из аморфного кремния пока делает их неконкурентоспособными на украинском рынке.

Устанавливать солнечные модули целесообразно на открытой местности, где солнечный свет не будут перекрывать деревья и здания. Также для эффективного использования следует определить наиболее оптимальный угол наклона и расстояние между батареями. Например, для Днепропетровской области целесообразно устанавливать фотоэлектрические модули под углом наклона к горизонту  $45^\circ$ .

### **3. Использование солнечной батареи для питания собственных нужд тяговой подстанции**

Солнечные батареи максимальное количество энергии вырабатывают в летний период, когда солнечная радиация достигает наивысшего значения

для Украины. В качестве примера рассмотрим тяговую подстанцию постоянного тока, количество потребляемой электроэнергии собственных нужд которой составляет 41 440 кВт·ч за период апрель-сентябрь. Среднее значение потребления собственных нужд в день, для этого периода составит 226,45 кВт·ч, т.е. 9,435 кВт.

Выполним расчет по определению необходимого количества солнечных элементов для возможности питания собственных нужд. Выбираем фотоэлектрический преобразователь марки DGE-SP120-W, который имеет невысокую стоимость и высокий КПД гальванического элемента. Мощность солнечной батареи состоит из выходных мощностей отдельных фотоэлементов. Выходной ток фотоэлементов батареи определяется числом элементов, соединенных параллельно, а выходное напряжение – числом элементов, соединенных последовательно.

Зная потребляемую мощность и мощность одного фотомодуля, определим необходимое количество фотобатарей:

$$N^{CB} = \frac{P_{ном}}{P_1^{CB}}, \quad (1)$$

где  $P_{ном}$  – номинальная мощность фотоэлектрической станции [Вт],  
 $P_1^{CB}$  – номинальная мощность фотомодуля [Вт].

$$N^{CB} = \frac{9435}{120} = 79 \text{ шт.}$$

Выполним расчет общего количества фотобатарей, учитывая способ подключения их к инвертору. Число модулей, соединенных последовательно:

$$N_{посл}^{CB} = \frac{U_{инв}}{U_{max}^{CB}}, \quad (2)$$

где  $U_{инв}$  – входное напряжение инвертора [В],  
 $U_{max}^{CB}$  – напряжение фотоэлектрического модуля модуля [В].

$$N_{посл}^{CB} = \frac{230}{16,19} = 14,02 \approx 14 \text{ шт.}$$

Мощность последовательно соединенных батарей:

$$P_{посл}^{CB} = N_{посл}^{CB} \cdot P_1^{CB} \quad (3)$$

$$P_{посл}^{CB} = 14 \cdot 120 = 1680 \text{ Вт.}$$

Число фотобатарей, соединенных параллельно:

$$N_{\text{пар}}^{CB} = \frac{P_{\text{max}}^{\text{сис}}}{P_{\text{посл}}^{CB}}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{max}}^{\text{сис}}$  – мощность расчетной системы:

$$N_{\text{пар}}^{CB} = \frac{9,435}{1,68} = 6 \text{ шт.},$$

Общее количество фотоэлектрических модулей в системе:

$$N^{CB} = N_{\text{пар}}^{CB} \cdot N_{\text{посл}}^{CB}, \quad (5)$$

$$N^{CB} = 6 \cdot 14 = 84 \text{ шт.}$$

Общая площадь фотоэлектрических модулей:

$$S_{\text{общ}} = S_1 \cdot N^{CB}, \quad (6)$$

$$S_{\text{общ}} = 0,8744 \cdot 84 = 73,45 \text{ м}^2.$$

Общая площадь крыши тяговой подстанции составляет 918 м<sup>2</sup>, то есть, фотоэлектрические модули будут занимать лишь 12% от общей площади крыши. Если учесть, что цена закупки электроэнергии составляет 743,7 грн. за 1 МВт·ч, то экономия покупки электроэнергии составит 30818,93 грн. за расчетный период для одной подстанции. При этом такая солнечная электроустановка окупится за 7 лет и прослужит 20–25 лет. Учитывая динамику изменения цен на электроэнергию срок окупаемости может быть уменьшен.

#### **4. Использование солнечной батареи для питания преобразовательных пунктов распределенной системы тягового электроснабжения**

Преимущество питания преобразовательных пунктов от солнечных батарей состоит в том, что нет необходимости в монтаже дополнительной питающей линии от тяговой подстанции и независимость их работы от нее. Схема линейного преобразовательного пункта состоит из однофазного инвертора на IGBT транзисторах, повышающего трансформатора и выпрямителя. Для уменьшения массогабаритных размеров трансформатора используется напряжение повышенной частоты (700 Гц), а сердечник трансформатора выполнен из аморфного сплава [4].

Для обеспечения минимально допустимого уровня напряжения в контактной сети (2,9 кВ) предлагается использование на межподстанционной зоне 1-го, 2-х или 3-х линейных преобразовательных пунктов. Расчеты мощностей преобразовательных пунктов приведены ниже. Они выполнялись для следующих исходных данных:

- Длина участка: 20 км,
- Мощность электровоза: 10 МВт,
- Ток электровоза при номинальном напряжении: 3000 А,
- Удельное сопротивление тяговой сети М120+2МФ100+Р65: 0,069 Ом/км,
- Схема питания тяговой сети: двухсторонняя,
- Расчетное время прохождения участка электровозом: 12 мин,
- Минимально допустимый уровень напряжения на токоприемнике: 2900 В.

### **I. Поддержание допустимого уровня напряжения в контактной сети при использовании 1-го преобразовательного пункта**

Определим необходимое значение тока преобразовательного пункта. Для этого зададимся граничным условием, что в точке экстремума кривой напряжения в контактной сети после включения усилительного пункта напряжение равно 2900 В.

Напряжение на токоприемнике электровоза для данной схемы питания при  $0 \leq x \leq \frac{l}{2}$  определяется выражением

$$U_{\kappa}(x) = U_{\text{ин}} - r_0 \cdot \left( I_{\phi 1} - \frac{I_{\text{yn}}}{2} \right) \cdot x, \quad (7)$$

в котором ток фидера

$$I_{\phi 1}(x) = \frac{(l-x)}{l} \cdot I_{\text{н}}. \quad (8)$$

Подставив (8) в (7) получим:

$$U_{\kappa}(x) = U_{\text{ин}} - r_0 \cdot \left( \frac{l-x}{l} I_{\text{н}} - \frac{I_{\text{yn}}}{2} \right) \cdot x. \quad (9)$$

Для определения координаты экстремума определим производную по координате  $x$

$$\frac{dU_{\kappa}}{dx} = \left[ -\frac{r_0 \cdot I_{\text{н}}}{l} (l \cdot x - x^2) + \frac{r_0}{2} \cdot I_{\text{yn}} \cdot x \right]. \quad (10)$$

После преобразований и упрощений, получим



$$x_{U_{\min}} = \frac{I_n - \frac{I_{yn}}{2}}{2 \cdot I_n} \cdot l. \quad (11)$$

Напряжение в этой точке должно быть не менее  $U_{x_{U_{\min}}} \geq 2900$  В. Для определения тока преобразовательного пункта в выражение (9) подставляем значение координаты экстремума:

$$U_{x_{U_{\min}}} = U_{ш} - r_0 \cdot (I_n \cdot \frac{l - \frac{I_n - \frac{I_{yn}}{2}}{2 \cdot I_n}}{l} - \frac{1}{2} \cdot I_{yn}) \cdot \frac{I_n - \frac{I_{yn}}{2}}{2 \cdot I_n} \cdot l. \quad (12)$$

После преобразований получим:

$$I_{yn}^2 - 4 \cdot I_n \cdot I_{yn} + 4 \cdot I_n^2 - \frac{16 \cdot \Delta U \cdot I_n}{r_0 \cdot l} = 0. \quad (13)$$

Решив квадратное уравнение, получим ток преобразовательного пункта в общем виде:

$$I_{yn} = 2 \cdot I_n \pm 4 \sqrt{\frac{\Delta U \cdot I_n}{r_0 \cdot l}}. \quad (14)$$

Подставляя значения исходных данных, получим  $I_{yn} = 2270$  А.

Напряжение на токоприемнике электровоза:

$$U_e = U_{ш} - r_0 \cdot I_{\phi} \cdot x. \quad (15)$$

Картина распределения напряжения на токоприемнике электровоза при использовании одного преобразовательного пункта (рис. 1) для двусторонней схемы питания выглядит, как показано на рисунке 2. Как видно из рисунка 2, напряжение после включения преобразовательного пункта не принимает значений ниже 2900 В.

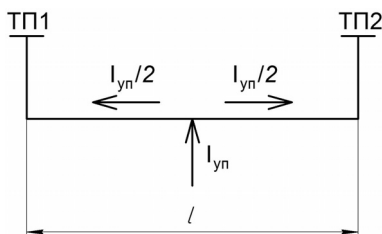


Рис. 1. Распределение токов преобразовательного пункта в тяговой сети

$$U_e' = U_{us} - r_0 \cdot \left( I_\phi - \frac{I_{yn}}{2} \right) \cdot x, \quad 0 \leq x \leq l/2, \quad (16)$$

$$U_e' = U_{us} - r_0 \cdot \left( I_\phi - \frac{I_{yn}}{2} \right) \cdot (l-x), \quad l/2 \leq x \leq l. \quad (17)$$

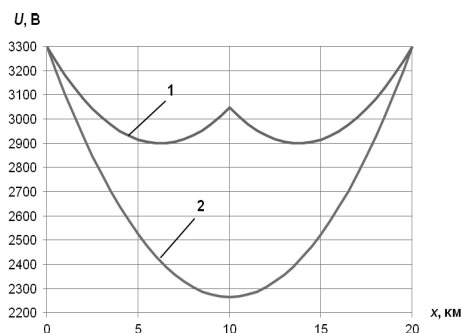


Рис. 2. Напряжение на токоприемнике электровоза:  
1) до включения преобразовательного пункта; 2) после включения

Необходимая мощность преобразовательного пункта для повышения напряжения до обеспечения нужного уровня напряжения в контактной сети:

$$P = \Delta U \cdot I_{yn}, \quad (18)$$

$$P = 783 \cdot 2270 = 1777410 \text{ Вт, принимаем } P_{yn} = 1,8 \text{ МВт.}$$

## II. Поддержание допустимого уровня напряжения в контактной сети при использовании 2-х преобразовательных пунктов

Определим необходимое значение тока преобразовательного пункта. Для этого необходимо задаться граничным условием, что минимальное значение напряжения в середине межподстанционной зоны составляет 2900 В. Координата экстремума функции напряжения  $x_{U_{\min}} = l/2$ , что следует из симметрии расчетной схемы. Напряжение в этой точке должно быть не менее  $U_{x_{U_{\min}}} \geq 2900 \text{ В}$ .

Напряжение на токоприемнике электровоза на участке  $l_{yn1} \leq x \leq l_{yn2}$  определяется формулой

$$U_k(x) = U_{us} - r_0 \cdot (I_{\phi 1} - I_{yn}) \cdot l_{yn1} - r_0 \cdot I_{\phi 1} \cdot (x - l_{yn1}). \quad (19)$$

Используя выражения для тока фидера (8), преобразовывая (19) получим

$$U_k(x) = U_{us} - r_0 \cdot \left( \frac{l-x}{l} \cdot I_u - I_{yn} \right) \cdot l_{yn1} - r_0 \cdot \frac{l-x}{l} \cdot I_u \cdot (x - l_{yn1}). \quad (20)$$

Для определения тока преобразовательного пункта в выражение (20) подставляем значение координаты экстремума:

$$U_{x_{U_{\min}}} = U_{us} - r_0 \cdot \left( \frac{l - \frac{l}{2}}{l} \cdot I_n - I_{yn} \right) \cdot l_{yn1} - r_0 \cdot \frac{l - \frac{l}{2}}{l} \cdot I_n \cdot \left( \frac{l}{2} - l_{yn1} \right). \quad (21)$$

После упрощения получим формулу для определения тока преобразовательного пункта:

$$I_{yn} = \frac{\Delta U + I_n \cdot l \cdot r_0}{l_{yn1} \cdot r_0}. \quad (22)$$

Выполняя подстановки для принятых исходных данных, получим  $I_{yn} = 1416$  А.

Напряжение на токоприемнике электровоза при использовании двух преобразовательных пунктов (рис. 3), рассчитывается по формулам (23–25).

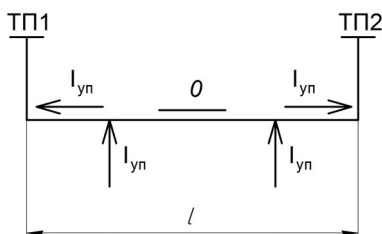


Рис. 3. Распределение токов 2-х преобразовательных пунктов в тяговой сети

$$U_e' = U_{us} - r_0 \cdot (I_\phi - I_{yn}) \cdot x, \quad 0 \leq x \leq l_{yn1}, \quad (23)$$

$$U_e' = U_{us} - r_0 \cdot (I_\phi - I_{yn}) \cdot l_{yn1} - r_0 \cdot I_\phi \cdot (x - l_{yn1}), \quad l_{yn1} \leq x \leq l_{yn2} \quad (24)$$

$$U_e' = U_{us} - r_0 \cdot (I_\phi - I_{yn}) \cdot (l - x), \quad l_{yn2} \leq x \leq l, \quad (25)$$

где  $l_{yn}$  – координата точки присоединения преобразовательного пункта [км],  
 $x$  – координата местонахождения поезда [км].

Кривые напряжения в контактной сети после включения двух преобразовательных пунктов будут иметь вид, представленный на рисунке 4.

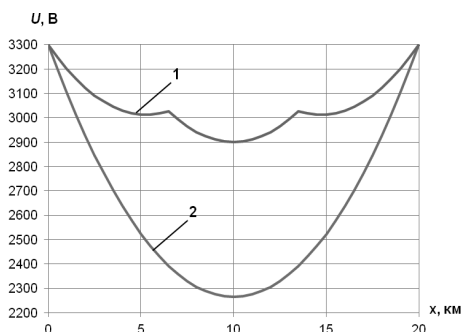


Рис. 4. Напряжение на токоприемнике электровоза:

1) до включения преобразовательных пунктов; 2) после включения

Необходимая мощность преобразовательного пункта для повышения напряжения до обеспечения допустимого уровня напряжения в контактной сети

$$P = \Delta U \cdot I_{yn}, \quad (26)$$

$P = 635 \cdot 1416 = 899160$  Вт, принимаем мощность каждого преобразовательного пункта  $P_{yn} = 0,9$  МВт.

### III. Поддержание допустимого уровня напряжения в контактной сети при использовании 3х преобразовательных пунктов

Определим необходимое значение тока преобразовательного пункта. Для этого необходимо задаться граничными условиями в точке с минимальным напряжением, которая будет находиться между двумя преобразовательными пунктами. Напряжение на токоприемнике электровоза для данной зоны определяется выражением

$$U_k(x) = U_u - r_0 \cdot \left( I_{\phi 1} - \frac{3}{2} \cdot I_{yn} \right) \cdot l_{yn1} - r_0 \cdot \left( I_{\phi 1} - \frac{1}{2} I_{yn} \right) \cdot (x - l_{yn1}) \quad (27)$$

Используя определение тока фидера (8), и подставляя в (27), получим

$$U_k(x) = U_u - r_0 \cdot \left( \frac{l-x}{l} \cdot I_n - \frac{3}{2} \cdot I_{yn} \right) \cdot l_{yn1} - r_0 \cdot \left( \frac{l-x}{l} \cdot I_n - \frac{1}{2} I_{yn} \right) \cdot (x - l_{yn1}) \quad (28)$$

Для определения координат экстремума необходимо взять производную

$$\frac{dU_k}{dx} = \left[ U_u - r_0 \cdot \left( \frac{l-x}{l} \cdot I_n - \frac{3}{2} \cdot I_{yn} \right) \cdot l_{yn1} - r_0 \cdot \left( \frac{l-x}{l} \cdot I_n - \frac{1}{2} I_{yn} \right) \cdot (x - l_{yn1}) \right]. \quad (29)$$

После вычислений и упрощений получим координату экстремума в общем виде

$$x_{U_{\min}} = \frac{l}{2} \cdot \left( 1 - \frac{I_{yn}}{2 \cdot I_H} \right). \quad (30)$$

Подставляя ее в выражение (28), получим

$$U_{x_{U_{\min}}} = U_{us} - r_0 \cdot \left[ \frac{l - \frac{l}{2} \cdot \left( 1 - \frac{I_{yn}}{2 \cdot I_H} \right)}{l} \cdot I_H - \frac{3}{2} \cdot I_{yn} \right] \times \\ \times I_{yn1} - r_0 \cdot \left[ \frac{l - \frac{l}{2} \cdot \left( 1 - \frac{I_{yn}}{2 \cdot I_H} \right)}{l} \cdot I_H - \frac{1}{2} \cdot I_{yn} \right] \cdot \left[ \frac{l}{2} \cdot \left( 1 - \frac{I_{yn}}{2 \cdot I_H} \right) - l_{yn1} \right] \quad (31)$$

После преобразований и упрощений получаем формулу для определения тока преобразовательного пункта в общем виде

$$\frac{r_0}{8 \cdot I_H} \cdot \left( l - \frac{1}{2} \right) \cdot I_{yn}^2 - r_0 \cdot \left( l_{yn} + \frac{1}{4} \right) \cdot I_{yn} + r_0 \cdot \frac{I_H}{4} - \Delta U = 0, \quad (32)$$

$$I_{yn} = 2 \cdot I_H \cdot \left( 1 + 4 \cdot \frac{l_{yn}}{l} \right) - \frac{8 \cdot I_H \cdot \sqrt{r_0^2 \cdot l_{yn}^2 + \frac{1}{2} \cdot r_0^2 \cdot l_{yn} \cdot l + \frac{1}{4} \cdot r_0 \cdot l \cdot \frac{\Delta U}{I_H}}}{r_0 \cdot l}. \quad (33)$$

Подставляя исходные данные, получим  $I_{yn} = 958,6$  А.

Напряжение на токоприемнике электровоза при использовании 3-х преобразовательных пунктов (рис. 5) определяется по формулам (34–37).

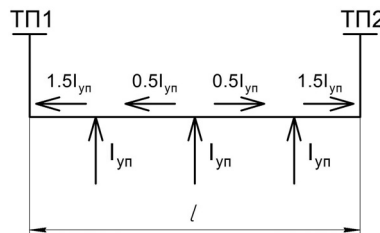


Рис. 5. Распределение токов 3-х преобразовательных пунктов в тяговой сети

$$U_e' = U_{us} - r_0 \cdot \left( I_{\phi} - \frac{3}{2} \cdot I_{yn} \right) \cdot x, \quad 0 \leq x \leq l_{yn1}, \quad (34)$$

$$U_e' = U_u - r_0 \cdot \left( I_\phi - \frac{3}{2} \cdot I_{yn} \right) \cdot l_{yn1} - r_0 \cdot \left[ \left( I_\phi - \frac{1}{2} \cdot I_{yn} \right) \cdot (x - l_{yn1}) \right], \quad l_{yn1} \leq x \leq l_{yn2} \quad (35)$$

$$U_e' = U_u - r_0 \cdot \left( I_\phi - \frac{3}{2} \cdot I_{yn} \right) \cdot l_{yn1} - r_0 \cdot \left[ \left( I_\phi - \frac{1}{2} \cdot I_{yn} \right) \cdot (l - x - l_{yn1}) \right], \quad l_{yn1} \leq x \leq l_{yn3} \quad (36)$$

$$U_e' = U_u - r_0 \cdot \left( I_\phi - \frac{3}{2} \cdot I_{yn} \right) \cdot (l - x), \quad l_{yn3} \leq x \leq l, \quad (37)$$

где  $l_{yn1}$ ,  $l_{yn2}$ ,  $l_{yn3}$  – координаты присоединений преобразовательных пунктов.

Кривые напряжения, рассчитанные по приведенным формулам, представлены на рисунке 6, из которого видно, что напряжение не снижается ниже заданной величины 2900 В.

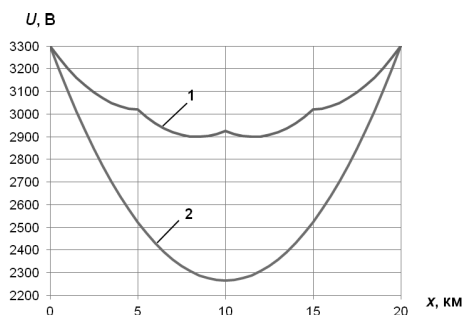


Рис. 6. Напряжение на токоприемнике электровоза: 1) до включения преобразовательных пунктов; 2) после включения

Необходимая мощность преобразовательного пункта для повышения напряжения до обеспечения минимально допустимого уровня напряжения в контактной сети:

Для усиливающих пунктов, расположенных на 5 м и 15 километров  
 $P_{yn1} = P_{yn3} = \Delta U_1 \cdot I_{yn} = 496 \cdot 958,6 = 475465,6 = \text{Вт}$ , принимаем мощность каждого усиливающего пункта  $P_{yn1} = P_{yn3} = 0,475 \text{ МВт}$ .

Для усиливающего пункта, расположенного на 10 м километре  
 $P_{yn2} = \Delta U_2 \cdot I_{yn} = 661 \cdot 958,6 = 633634,6 \text{ Вт}$ , принимаем мощность усиливающего пункта  $P_{yn2} = 0,634 \text{ МВт}$ .

## 5. Определение потерь мощности и расхода энергии на тягу до и после подключения преобразовательных пунктов

Потери мощности до подключения преобразовательного пункта:

$$\Delta P = r_0 \cdot (\bar{I}_{\phi 1}^2 \cdot l + \bar{I}_{\phi 2}^2 \cdot l), \quad (38)$$

Среднее значение потерь мощности до подключения преобразовательного пункта составили:  $\Delta P = 2018,25$  кВт.

Потери мощности после подключения 1-го преобразовательного пункта:

$$\Delta P = r_0 \cdot (\bar{I}_{\phi 1}^{\prime 2} \cdot l + \bar{I}_{\phi 2}^{\prime 2} \cdot l + \bar{I}_i^2 \cdot l), \quad (39)$$

$I_i$  – сумма тока фидера и тока преобразовательного пункта, А.

Среднее значение  $v$  кВт. После подключения преобразовательного пункта потери мощности уменьшились на 514,4 кВт.

Потери мощности после подключения 2-х преобразовательных пунктов:

$$\Delta P = r_0 \cdot (I_{\phi 1}^{\prime 2} \cdot l + I_{\phi 2}^{\prime 2} \cdot l + I_i^2 \cdot l + I_{\phi}^2 \cdot l). \quad (40)$$

Среднее значение потерь мощности после подключения 2-х преобразовательных пунктов составило:  $\Delta P = 1307,5$  кВт. После подключения 2-х преобразовательных пунктов потери мощности уменьшились на 710,8 кВт.

Потери мощности после подключения 3-х преобразовательных пунктов:

$$\Delta P = r_0 \cdot (I_{\phi 1}^{\prime 2} \cdot l + I_{\phi 2}^{\prime 2} \cdot l + \sum I_i^2 \cdot l). \quad (41)$$

Среднее значение потерь мощности после подключения 3-х преобразовательных пунктов составило:  $\Delta P = 1243,2$  кВт. После подключения 3-х преобразовательных пунктов потери мощности уменьшились на 775,07 кВт.

Аналогичным образом проводились расчеты расхода электрической энергии. Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Таблица 1

### Технико-экономические показатели систем электроснабжения

Показатель	Централизованная система	Распределенная система		
		1 пункт	2 пункта	3 пункта
Расход энергии $E$ [кВт·ч]	1980	1624	1620	1663
Потери мощности $\Delta P$ [кВт]	2018,3	1503,9	1307,5	1243,2
Снижение потерь мощности, кВт	–	514,4	710,8	775,1
Суммарное снижение расхода энергии $\Delta E$ [кВт·ч]	–	356	360	317
Суммарная экономия электроэнергии [кВт·ч]	–	462,9	502,2	472,3

## 6. Выводы

Анализ перспектив развития систем тягового электроснабжения, показывает, что распределенные системы питания тяговой нагрузки имеют лучшие технико-экономические показатели. При этом в устройствах тягового электроснабжения может использоваться энергия, получаемая от возобновляемых источников. Наиболее перспективным представляется использование солнечной энергии, как для питания собственных нужд, так и для построения пунктов подпитки тяговой сети. Экономия электрической энергии для питания собственных нужд тяговых подстанций в летний период только на полигоне постоянного тока может составить порядка 6,7 млн. грн. Использование солнечной энергии для построения пунктов подпитки в распределенной системе электрической тяги позволяет снизить расход электрической энергии и потери в тяговой сети при обеспечении заданного режима напряжения и времени хода поезда по перегону.

## Литература

1. Аржанников Б.А.: *Возможности системы электроснабжения постоянного тока для пропуска скоростных пассажирских и грузовых поездов повышенной веса* / Режим доступа: <http://www.eav.ru/pub11p.php?publid=2009-10a21>.
2. *Два варианта усиления системы электроснабжения тяги постоянного тока* / Режим доступа: <http://www.eav.ru/pub11.php?publid=2008-04a18>.
3. Гончаров Ю.П. и др.: *Система распределенного питания с промежуточным звеном повышенной частоты для электрифицированных железных дорог*. Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна, Вип. 38–2011, с. 45–52.
4. Гончаров Ю.П. и др.: *Использование полосы отчуждения железной дороги для генерации электроэнергии с помощью солнечных панелей*, Материалы IV Международной научно-практической конференции „Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности”, Воловец, 11.06–14.06.2013, 27 с.



## **Zwiększenie wydajności zasilania elektrotrakcyjnego za pomocą odnawialnych źródeł energii elektrycznej**

### **Streszczenie**

W warunkach technologicznego i fizycznego starzenia infrastruktury, istniejące systemy zasilania trakcji prądem stałym i zmiennym wymagają dalszego rozwoju i poprawy w zakresie zapewnienia przesyłu energii elektrycznej o wymaganej mocy i odpowiedniej jakości do taboru elektrycznego. Znane sposoby wzmocnienia zasilania trakcyjnego sprwadają się nie tylko do wdrożenia najnowszych technologii i nowoczesnego sprzętu lecz również do zastosowania układów rozdziału energii elektrycznej. Autorzy artykułu rozpatrują możliwość wykorzystania energii alternatywnej do zasilania potrzeb własnych podstacji trakcyjnych i wzmocnienia sieci trakcyjnej prądu stałego. Zastosowanie baterii słonecznych do punktów konwersji pozwala na przejście od zasilania centralnego do rozdziału energii elektrycznej, co z kolei zmniejsza zużycie i straty energii bezpośrednio w sieci trakcyjnej. Przedstawiona metodyka obliczeń dla typowej strefy międzypodstacyjnej pozwala określić wymagane moce punktów wzmacniających oraz ich liczbę w celu zapewnienia dopuszczalnego minimalnego napięcia w sieci jezdnej. Całościowa ocena wskaźników technicznych i ekonomicznych układów centralnego zasilania elektrotrakcyjnego i rozdziału energii elektrycznej na ogół wykazuje znaczne oszczędności energii elektrycznej.

**Słowa kluczowe:** energia elektryczna, transport zelektryfikowany, system zasilania centralnego, rozdział energii elektrycznej, oszczędność

## **Improvement of Traction Supply System Effectiveness with Application of Electrical Alternative Energy Sources**

### **Summary**

The existing AC and DC system of traction power supply in terms of moral and physical infrastructure aging require further development and improvement in terms of ensuring the transmission of electrical energy required capacity and quality of electric rolling stock. Known methods for enhancing traction power supply are reduced not only the introduction of new technologies and equipment but the using of distributed power systems. The authors examine the possibility of using alternative energy to power the auxiliary traction substations and DC traction network improvement. The use of solar panels for converting points can make the transition from a centralized to a distributed power supply, which in turn reduces the expense and loss of electrical energy directly in the traction network. The above method of calculation for a typical traction zone is determined the required power amplifier and the number of points for the minimum voltage in the contact network. Evaluation of technical and economic indicators of centralized and distributed supply of traction power systems shows significant savings of electric power.

**Keywords:** electric power, electrified transport, system of power supply, centralized, distributed, economy