

## ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

© **Гончаров Ю.П.**<sup>1</sup>, Сокол Е.И.<sup>2</sup>, Замаруев В.В.<sup>3</sup>, Ивахно В.В.<sup>4</sup>,  
Кривошеев С.Ю.<sup>5</sup>, Ересько А.В.<sup>6</sup>, Маляренко Е.А.<sup>7</sup>, Стысло Б.А.<sup>8</sup>,  
Панасенко Н.В.<sup>9</sup>, Сыченко В.Г.<sup>10</sup>, Косарев Е.Н.<sup>11</sup>

### СИСТЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ В ПОЛОСЕ ОТЧУЖДЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ С ПОМОЩЬЮ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

*Рассмотрена возможность размещения фотогенераторов в зоне отчуждения железной дороги. Предложена структурная и электрическая схемы системы распределенной генерации для питания электрической тяги постоянного тока. Произведен выбор и обоснование частоты промежуточных звеньев преобразователей, используемых в системе.*

**Ключевые слова:** распределенная система, фотогенератор, преобразователь, высокочастотный трансформатор, контактная сеть, полоса отчуждения.

**Гончаров Ю.П.**, Сокол Е.И., Замаруев В.В., Ивахно В.В., Кривошеев С.Ю., Ересько О.В., Маляренко Е.А., Стысло Б.О., Панасенко М.В., Сыченко В.Г., Косарев Е.М. Система перетворення енергії, що генерується в смугі відчуження залізниці за допомогою сонячних панелей. Розглянуто можливість розміщення фотогенераторів в зоні відчуження залізниці. Запропоновано структурну і електричну схеми системи. Зроблено вибір і обґрунтування частоти проміжних ланок перетворювачів, що використовуваних в системі.

**Ключові слова:** розподілена система, фотогенератор, перетворювач, високочастотний трансформатор, контактна мережа, смуга відчуження.

**Yu.P. Goncharov, E.I. Sokol, V.V. Zamaruev, V.V. Ivakhno, S.Yu. Krivosheev, O.V. Eres'ko, E.A. Malyarenko, B.O. Styslo, M.V. Panasenko, V.G. Sychenko, E.M. Kosarev. Transformation of power generated in railways dispossession belt by solar energy. The arising deficiency of traditional energy sources necessitates the use of renewable energetics. One of the advantages of the sources of renewable energy is the possibility of constructing a system of distributed generation. For conditions of Ukraine distributed**

<sup>1</sup> д-р техн. наук, профессор, НТУ «Харьковский политехнический институт», г. Харьков

<sup>2</sup> д-р техн. наук, чл.-кор. НАНУ, НТУ «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, [sokol@kpi.kharkov.ua](mailto:sokol@kpi.kharkov.ua)

<sup>3</sup> канд. техн. наук, профессор, НТУ «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, [vvz1@ukr.net](mailto:vvz1@ukr.net)

<sup>4</sup> канд. техн. наук, профессор, НТУ «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, [y-ivakhno@ukr.net](mailto:y-ivakhno@ukr.net)

<sup>5</sup> канд. техн. наук, профессор, НТУ «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, [serg@kpi.kharkov.ua](mailto:serg@kpi.kharkov.ua)

<sup>6</sup> канд. техн. наук, доцент, НТУ «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, [aerkoff@gmail.com](mailto:aerkoff@gmail.com)

<sup>7</sup> ассистент, НТУ «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, [malugin86@yandex.ua](mailto:malugin86@yandex.ua)

<sup>8</sup> аспирант, НТУ «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, [bogdanstyslo@gmail.com](mailto:bogdanstyslo@gmail.com)

<sup>9</sup> д-р техн. наук, профессор, «Государственный научно-исследовательский центр Укрзалізниця», г. Киев, [panasenko@gmail.com](mailto:panasenko@gmail.com)

<sup>10</sup> д-р техн. наук, доцент, «Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. ак. В. Лазаряна», г. Днепропетровск, [elpostz@i.ua](mailto:elpostz@i.ua)

<sup>11</sup> ассистент, «Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. ак. В. Лазаряна», г. Днепропетровск, [kossik89@gmail.com](mailto:kossik89@gmail.com)

*generators placed along the existing facilities with a linear arrangement are the most promising. The railways with their land dispossession belt can be used for these purposes. The distributed generation systems in railway transport can also be used in the regions with an unstable electricity supply, improving power quality, feeding autonomous objects of railway infrastructure. Distributed generation equipment can be used to reduce bias and voltage unbalance in power systems of stationary consumers. The projects using solar energy for the needs of railway transport show their high adaptability and efficiency. The article is devoted to the development of the DC power supply system. The railway contains additional longitudinal DC line with an operating voltage of about 1 kV and a system of semiconductor converters for connecting the longitudinal line and the main contact system through matching modules. Sequential positioning of the longitudinal line and the photo module is consistent with their properties as a current source that is proportional to the intensity of solar radiation. Semiconductor converters should be made using the same "a forward" topology, which simplifies the electrical circuit. Amorphous magnetic alloy is the most promising material for the existing isolation transformers in the system. Proper value of the operating frequency of the AC intermediaries is about 1 kHz. Traction power supply system with distributed PV generation, discussed in this article, will make it possible to put into practice the concept of intellectual traction power supply, optimizing the process of electric energy consumption in the traction network.*

**Keywords:** distributed system, photogenerator, converter, high-frequency transformer, contact line, roadway.

**Постановка проблеми.** В последние годы в энергетике прослеживается тенденция к децентрализации производства электроэнергии, что обусловлено исчерпанием традиционных энергоносителей и увеличением доли генераторов возобновляемой энергии, из всех видов которой Украина наиболее богата на солнечную. Для условий Украины с её высокой плотностью населения наиболее перспективны не крупные гелиостанции, занимающие специально выделенную большую площадь, а распределенные генераторы, размещенные вдоль существующих объектов с линейным расположением в пространстве. К числу таких объектов принадлежат и железные дороги с их земельными полосами отчуждения, которые приписаны к дорогам. На этих полосах можно размещать распределенные фотоэлектрические генераторы.

Генерируемую ими электроэнергию можно либо непосредственно использовать для тяги поездов, либо аккумулировать на тяговых подстанциях (или пунктах подпитки) вместе с энергией рекуперативного торможения. Авторами статьи в ряде предшествовавших работ предложена структура с продольной линией постоянного тока [1, 2], которая связывает фотогенераторы в последовательную электрическую цепь, и полупроводниковыми преобразователями для её подключения к приемнику электроэнергии, в качестве которого может выступать контактная сеть железной дороги постоянного тока.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Научно-практические аспекты разработки и внедрения систем децентрализованного производства как традиционной когенерационной, так и альтернативной энергетики малой и средней мощности исследованы во многих научных работах известных отечественных и зарубежных ученых. Весомый вклад в решение этой проблемы внесли В.И. Виссарионов, С.П. Денисюк, А.В. Кириленко, А.В. Крюков, А.В. Пуховник, А.С. Яндульский, Caldron R., Conti S. и др. [3-10]. По мнению ученых, децентрализация производства электроэнергии является важной составляющей инновационно-технологического обеспечения структурного реформирования энергетической отрасли с целью повышения ее эффективности и позволяет:

1. снизить потери электроэнергии при транспортировке из-за максимального приближения источника к потребителю;
2. уменьшить число и протяженность магистральных ЛЭП;
3. уменьшить последствия аварий на центральных электростанциях и главных ЛЭП;
4. обеспечить взаимное многократное резервирование электрогенерирующих мощностей;
5. снизить воздействие на окружающую среду за счет применения средств альтернативной энергетики.

Сферами применения установок распределенной генерации на железнодорожном транспорте могут быть следующие направления: объекты железнодорожного транспорта в регионах с неустойчивым электроснабжением; создание транспортно-энергетических коридоров, совмещающих трассы железной и автомобильной дорог, высоковольтные линии электропередач и линии связи; повышение качества электроэнергии; питание автономных объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта с использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии. Установки распределенной генерации могут быть применены для снижения отклонений и несимметрии напряжения в системах электроснабжения нетяговых потребителей. Пилотные проекты по применению солнечной энергии для нужд железнодорожного транспорта реализованы и показывают их высокую технологичность и эффективность [11-13]. Для повышения эффективности функционирования системы тягового электроснабжения постоянного тока проработаны вопросы использования солнечной энергии для усиления тяговой сети [14]. Кроме того, реализован проект совместного питания электроподвижного состава солнечными батареями и традиционной системой питания [15].

**Цель статьи** – разработка структуры системы электроснабжения железной дороги постоянного тока, использующей солнечные генераторы электрической энергии, установленные на земельной полосе отчуждения железной дороги, и анализ ее свойств и характеристик.

**Изложение основного материала.** Общая структура системы приведена на рис. 1. Солнечные панели устанавливаются в полосе отчуждения и соединяются друг с другом параллельно-последовательно в фотомодули, которые на рис. 1 обозначены как фотодиоды. Каждый фотомодуль присоединен к согласующему преобразователю (СП), который используется для максимизации энергии, полученной от фотомодуля, а также для гальванической развязки от последующих частей системы. Выход СП выполняется на постоянном токе при низком напряжении порядка 50 В, допустимом по условиям электробезопасности. Непосредственное подключение фотомодуля с СП непосредственно к контактной сети (КС) нецелесообразно и потребовало бы применения индивидуального развязывающего трансформатора с высоковольтной изоляцией вторичной обмотки. Поэтому параллельно КС на ее опорах или отдельно в полосе отчуждения прокладывается продольная линия (ПЛ) постоянного тока, которая соединяет отдельные фотомодули в единую последовательную цепь.

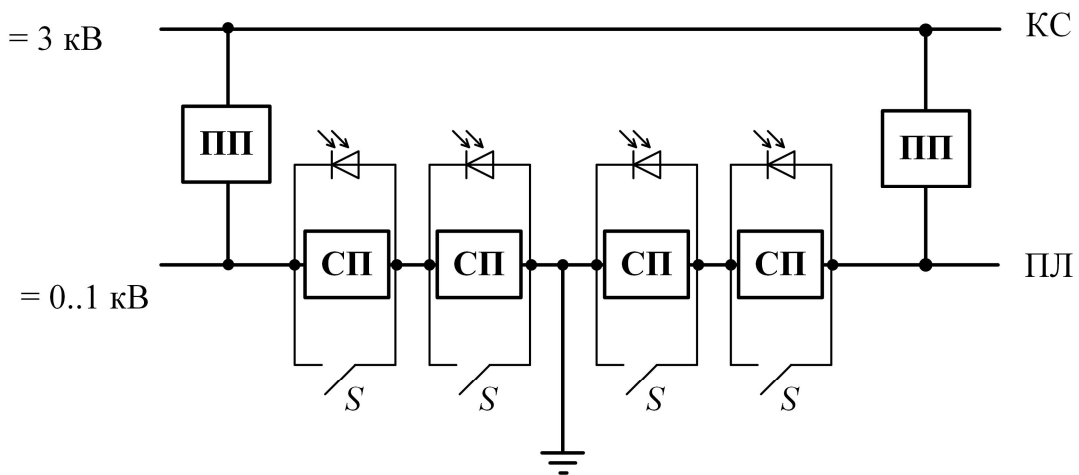


Рис. 1 – Структура системы подключения распределенных солнечных генераторов электрической энергии: КС – контактная сеть; ПЛ – продольная линия постоянного тока; СП – согласующие преобразователи; ПП – переходные (связывающие) преобразователи; S – шунтирующие ключи

Продольная линия разбивается на секции с величиной напряжения порядка 1 кВ на каждом, которые через переходные преобразователи (ПП) с повышающими трансформаторами и выпрямителями присоединены к КС. В качестве обратного (заземленного) провода для ПЛ может использоваться рельс. Средняя точка между соседними секциями ПЛ заземляется, поэтому напряжение ПП относительно земли равно напряжению одной секции.

Принцип последовательного подключения фотомодулей, использованный в структуре рис. 1, естественным образом согласуется с тем фактом, что каждый фотомодуль, как электрический генератор, является источником тока, зависящим от интенсивности солнечного излучения. На рис. 2 приведена идеализированная эквивалентная схема фотомодуля, которая содержит источник внутреннего тока  $i$ , идеальный диод  $VD$ , учитывающий наличие  $p$ - $n$ -перехода, и источник порогового напряжения  $u$ , учитывающий пороговое напряжение вольт-амперной характеристики  $p$ - $n$ -перехода (рис. 3, а).

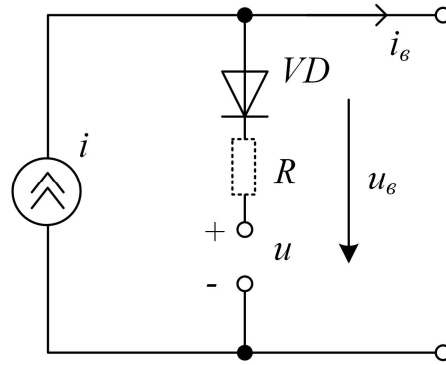


Рис. 2 – Электрическая эквивалентная схема фотомодуля

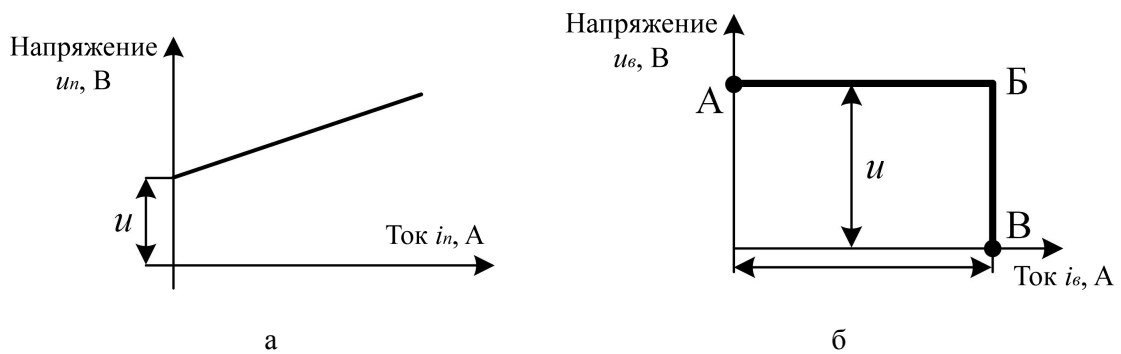


Рис. 3 – Линеаризованная вольт-амперная характеристика  $p$ - $n$  перехода (а),  $u_n$ ,  $i_n$  – напряжение и ток  $p$ - $n$ -перехода, внешняя характеристика фотомодуля как генератора (б):  $u_в$ ,  $i_в$  – входное напряжение и ток фотомодуля,  $u$  – пороговое напряжение

На рис. 3, б показана идеализированная характеристика фотомодуля, как генератора. Внешняя характеристика, как зависимость выходного напряжения  $u_в$  от выходного тока  $i_в$ , содержит участок ограничения напряжения АБ и участок ограничения тока БВ. Иногда учитывают также внутреннее сопротивление  $R$ , показанное на рис. 2 пунктиром. Сопротивление отображает наклон линеаризованной вольт-амперной характеристики  $p$ - $n$ -перехода (рис. 3).

Шунтирующий ключ  $S$  необходим для предотвращения аварийного режима при обрыве цепи фотомодуля. Обрыв цепи любого фотомодуля при последовательной организации системы ведет к отказу всей системы аналогично тому, как при параллельной организации системы к отказу системы приводит короткое замыкание в любом из ее элементов. В случае обрыва цепи поврежденный модуль шунтируется ключом  $S$ , а остающаяся часть системы продолжает нормальную работу при несколько пониженном выходном напряжении.

На рис. 4 показано возможное исполнение шунтирующего ключа. В случае обрыва цепи фотомодуля напряжение  $u_m$  повышается до пробивного напряжения стабилитрона  $VD_c$  и тиристор  $VS$  включается током  $i_y$ , который начинает протекать в цепи управляющего электрода [1].

ПП подключается к отрезку ПЛ, создающему на входе постоянное напряжение с величиной около 1 кВ, и содержит: входной фильтр (емкостной делитель напряжения) на двух конденсаторах  $C_d$ ; полумостовой инвертор напряжения (ИН); переходной трансформатор (ТП); выпрямитель В; выходной фильтр  $L, C$  (рис. 5).

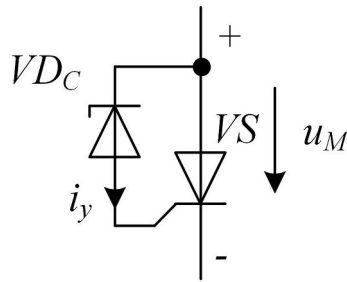


Рис. 4 – Пример исполнения шунтирующего ключа  $S$ ,  $i_y$  – ток управления тиристора  $VS$ ,  $u_M$  – падение напряжения на тиристоре

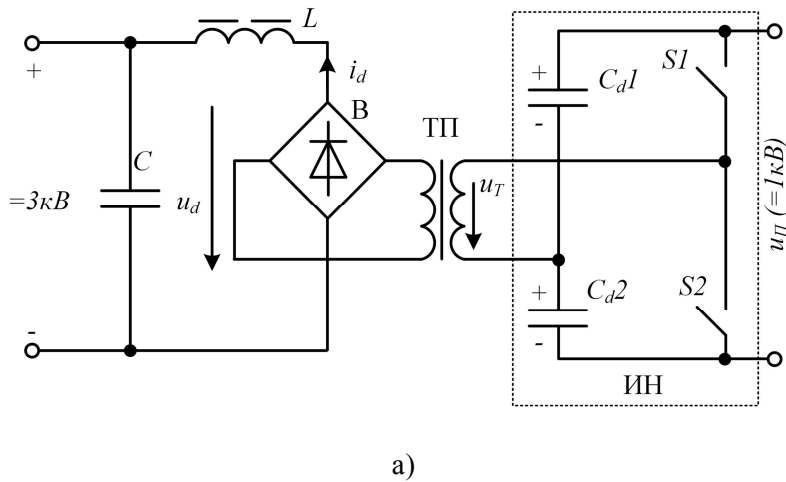


Рис. 5 – Переходный преобразователь прямоходовой топологии: а – схема; б – ключ инвертора

Выход ПП подключается к контактной сети 3 кВ. Как видно, совокупность элементов ПП соответствует традиционному прямоходовому преобразователю, широко используемому, например, в источниках питания электронной аппаратуры [16]. Возможно также построение ПП на базе инвертора тока.

ИН формирует на первичной обмотке трансформатора переменное напряжение квазипрямоугольной формы с амплитудой  $u_{\text{п}}/2$  (рис. 6, а). После выпрямления получаем импульсное напряжение с регулируемой паузой (рис. 6, б). На рис. 6, в показан ток в обмотке дросселя выходного фильтра.

Система управления формирует заданное среднее значение выходного тока  $i_d$ , что равносильно поддержанию заданного тока в отрезке ПЛ.

Возможно исполнение СП по той же самой схеме, что и для ПП (рис. 5), но входом структуры вместо источника  $u_{\text{п}}$  является выход фотомодуля, а выходом – ячейка продольной линии. Регулирование длительности паузы в напряжении  $u_d$  здесь используется для максимизации получаемой энергии, для чего необходим экстремальный регулятор выходного напряжения. Общая идеология построения экстремального регулятора известна из ряда опубликованных работ, например, [17]. Конкретные схемы ПП и СП могут отличаться друг от друга. Так, для СП, как более низковольтных преобразователей, может быть целесообразно использование нулевых либо однотактных схем в инверторе и выпрямителе.

Оба преобразователя (ПП и СП) обладают малыми размерами и поэтому могут устанавливаться на опорах контактной сети.

Как и в традиционных вторичных источниках электропитания (ИВЭП), применение повышенной частоты позволяет снизить расход активных материалов и энергии потери в развязывающих трансформаторах (ТП на рис. 5), которые являются наиболее дорогостоящими элементами преобразовательных схем. В традиционных ИВЭП небольшой мощности используют-

ся трансформаторы с сердечниками из порошковых магнитных материалов (ферритов) при величине частоты порядка десятков килогерц и более [16]. В данном применении (энергетическом) трансформаторы будут иметь достаточно большую мощность. Поэтому целесообразно изменение конструкции развязывающих трансформаторов и переход от порошковых магнитных материалов к ленточным при снижении рабочей частоты до значений порядка 1 кГц.

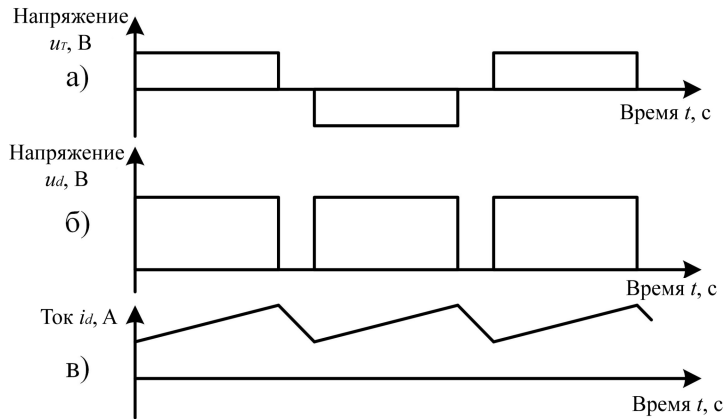


Рис. 6 – Диаграммы напряжений и токов в переходном преобразователе:  $u_T$  – квазипрямоугольное переменное напряжение трансформатора,  $u_d$  – выпрямленное импульсное напряжение,  $i_d$  – выпрямленный ток в обмотке дросселя выходного фильтра

На рис. 7 показана конструкция трансформатора с броневым (Ш-образным) сердечником. Для уменьшения потерь от вихревых токов в обмотках силовоточные (низковольтные) обмотки целесообразно изготавливать из тонкой проводниковой ленты с шириной, равной высоте катушки. Для слаботочных (высоковольтных) обмоток можно сохранить традиционную намотку проводником с круглым поперечным сечением, как это и показано на рис. 7.

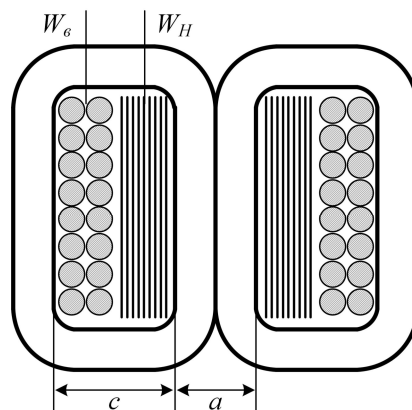


Рис. 7 – Конструкция трансформатора

Основным фактором, влияющим на выбор частоты, являются энергетические и массогабаритные характеристики силовых трансформаторов как наиболее дорогостоящих элементов рассматриваемой системы.

Для получения характеристик трансформаторов воспользуемся методикой работы [18]. Примем, что суммарная мощность вторичных обмоток в трансформаторе равна передаваемой мощности  $S$ . Геометрические характеристики представим согласно [18] в относительных единицах, принимая в качестве базисного линейного размера ширину  $a$  несущего обмотки стержня сердечника (рис. 7), в качестве базисной площади  $a^2$  и в качестве базисного объема  $a^3$ . Относительные геометрические характеристики обозначаем со звездочкой.

Допустимые значения электромагнитных нагрузок определяются, прежде всего, условиями нагрева, которые запишем в виде уравнений теплового равновесия, приравняющих тепловыделение и теплоотдачу:

$$P_k = \rho \cdot j^2 \cdot V_k^* \cdot \kappa_k \cdot a^3 = \alpha \cdot \tau_n \cdot \Pi_k^* \cdot a^2, \quad (1)$$

$$P_c = P_y \cdot \gamma_c \cdot B_m^2 \cdot V_c^* \cdot \kappa_c \cdot a^3 = \alpha \cdot \tau_n \cdot \Pi_c^* \cdot a^2, \quad (2)$$

где  $P_k$  и  $P_c$  – потери активной мощности в катушке и сердечнике;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление проводникового материала;  $B_m$  и  $j$  – электромагнитные нагрузки: амплитуда индукции в сердечнике и действующее значение плотности тока в обмотке;  $V_k$  и  $V_c$  – объёмы катушки и сердечника;  $\Pi_k$  и  $\Pi_c$  – поверхности охлаждения;  $\kappa_c$  и  $\kappa_k$  – коэффициенты заполнения сердечника магнитным и катушки проводниковым материалом;  $\tau_n$  и  $\alpha$  – допустимый перегрев поверхности, который примем для сердечника и катушки одинаковым, и коэффициент теплоотдачи с единицы поверхности в  $Вт / м^2 \cdot град$ ;  $P_y$  и  $\gamma_c$  – удельные потери в магнитном материале в  $Вт/кг$  и плотность магнитного материала в  $кг/м^3$ .

Из уравнений теплового равновесия находим:

$$j = \frac{k_j}{\sqrt{a}}, \quad (3)$$

$$B_m = \frac{k_\theta}{\sqrt{a}}, \quad (4)$$

$$k_j = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \tau_n \cdot \Pi_k^*}{\rho \cdot V_k^* \cdot \kappa_k}}, \quad (5)$$

$$k_\theta = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \tau_n \cdot \Pi_c^*}{P_y \cdot \gamma_c \cdot V_c^* \cdot \kappa_c}} \quad (6)$$

и получаем уравнения для определения базисного размера и массы активных материалов:

$$a^3 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{S}{f \cdot k_j \cdot k_\theta \cdot \kappa_c \cdot \kappa_k \cdot F_c^* \cdot F_{ок}^*}, \quad (7)$$

$$m = (\gamma_c \cdot V_c^* \cdot \kappa_c + \gamma_k \cdot V_k^* \cdot \kappa_k) \cdot a^3, \quad (8)$$

где  $\gamma_k$  – плотность проводникового материала катушки;  $F_c$  и  $F_{ок}$  – поперечные сечения сердечника и его окна с катушкой.

Следует учесть так же возможное ограничение по условиям насыщения магнитного материала, при котором допустимая индукция и базисный размер  $a$  находятся из равенств:

$$B_m \leq \frac{B_s}{1,2 \div 1,3}, \quad (9)$$

где  $B_s$  – индукция насыщения.

$$a = \left( \frac{\sqrt{2} \cdot S}{\pi \cdot f \cdot B_m \cdot j \cdot \kappa_c \cdot \kappa_k \cdot F_c^* \cdot F_{ок}^*} \right)^{2/7}. \quad (10)$$

Определяющее влияние на характеристики трансформаторов оказывает выбор типа магнитного материала. Для энергетических применений при повышенной частоте представляется наиболее перспективным использование новых магнитных материалов типа аморфных сплавов. Они изначально выпускаются в виде тонких лент, что в сочетании с более высоким, чем у электротехнических сталей, удельным электрическим сопротивлением позволяет получить меньшие потери на вихревые токи.

Аморфные сплавы рекомендуются для применения при частотах примерно до 20 кГц, что в принципе позволяет избавиться от звукового засорения окружающей среды. Однако энергетическая эффективность перехода в сверхзвуковую область частот неочевидна, что поясняется при записи соотношения для удельных потерь мощности в магнитном материале в зависимости от частоты:

$$P_y = P_{zc} + P_{ex} = \kappa_1 \cdot f + \kappa_2 \cdot f^2, \quad (11)$$

где  $P_{zc}$  и  $P_{ex}$  – удельные потери на гистерезис и вихревые токи;  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$  – коэффициенты, не зависящие от частоты.

В отличие от порошковых магнитных материалов типа феррита, в аморфных сплавах при частотах порядка единиц кГц существенно преобладают потери на вихревые токи. А это приводит к снижению эффекта, достигаемого от повышения частоты. Действительно, при пренебрежении потерями на гистерезис ( $\kappa_1 \rightarrow 0$ ) имеет место пропорция  $P_y \sim f^2$ , а тогда из (3 – 6) видно, что  $\kappa_B \sim f^{-1}$ , а из (7) следует, что базисный размер и вовсе не зависит от частоты. Последнее означает, что от частоты не зависит ни масса активных материалов, ни составляющие потери  $P_\kappa$  и  $P_c$ . Напротив того, при преобладании потерь на гистерезис ( $\kappa_2 \rightarrow 0$ ) имеем  $P_y \sim f$ ,  $\kappa_B \sim f^{-0,5}$ ,  $a^3 \sim f^{-0,5}$ , то есть при повышении частоты достигается существенная экономия как по массе, так и по составляющим потерь.

Таким образом, при использовании ленточных ферромагнитных материалов большую роль играет граничная частота

$$f_c = \frac{\kappa_1}{\kappa_2}, \quad (12)$$

при которой имеет место равенство удельных потерь на гистерезис и вихревые токи; при ее достижении начинается быстрое сокращение эффекта, получаемого от повышения частоты и в пределе, при  $f \rightarrow \infty$ , эффект вовсе исчезает. Обработка данных, которые приводит, например, ОАО «МСТАТОР», г. Новгород (Россия), дает значение граничной частоты около 700 Гц. Разумеется, эта цифра зависит от конкретного материала и конкретного производителя. Но в целом она говорит о том, что в энергетических применениях нет веских причин в пользу радикального повышения частоты промежуточного звена переменного тока вплоть до границы звукового диапазона. По энергетическим факторам достаточной будет частота  $f$  порядка 1 кГц, что поясняется графиком рис. 8. Аналогичный вид имеет зависимость для затрат активных материалов.

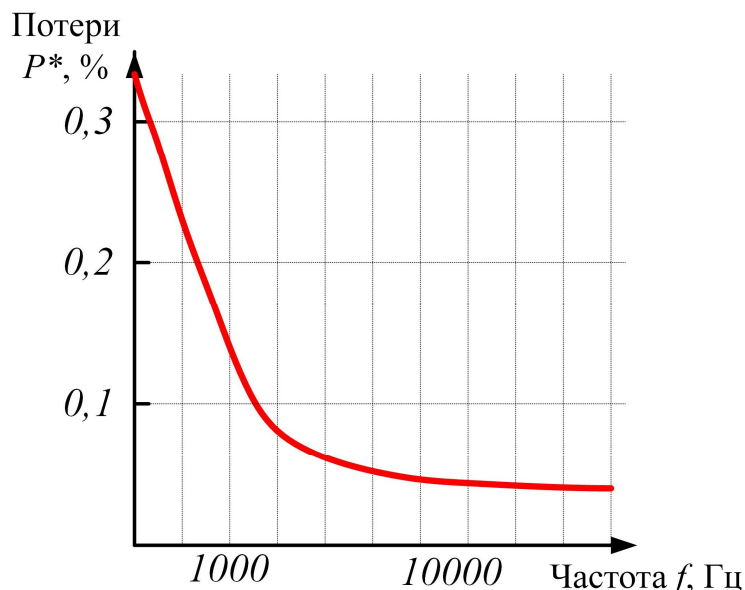


Рис. 8 – Зависимость относительных потерь в трансформаторе от частоты



**Выводы**

1. Разработана структура системы электроснабжения железной дороги постоянного тока, использующая установку солнечных генераторов, как распределенных генераторов электрической энергии, на земельной полосе отчуждения железной дороги. Она содержит дополнительную продольную линию постоянного тока с рабочим напряжением порядка 1 кВ и систему полупроводниковых преобразователей для присоединения продольной линии через согласующие модули к основной контактной сети.
2. Целесообразна последовательная организация цепи продольной линии по отношению к фотомодулям, что согласуется с их свойствами как источника тока, пропорционального интенсивности солнечного излучения.
3. В связи с односторонним направлением потока мощности полупроводниковые преобразователи можно исполнять с применением однотипной «прямоходовой» топологии, что позволяет упростить их электрические схемы.
4. Наиболее перспективным магнитным материалом для имеющихся в системе развязывающих трансформаторов являются аморфный сплав, но возможно использование и холоднокатаных электротехнических сталей при толщине ленты не более 0,08 мм.
5. Обосновано целесообразное значение рабочей частоты промежуточных звеньев переменного тока, которое имеет порядок 1 кГц.

**Список использованных источников:**

1. Electronic system with series organization for connection the distributed generators of renewable energy to low voltage industrial network / E.I. Sokol, Y.P. Goncharov, A.V. Eresko, V.V. Zamariuev, S.Y. Krivosheev, V.V. Ivakhno, O.V. Ilina, E.A. Malyarenko, B.A. Styslo, K.G. Upyrenko // Proc. of the 33<sup>th</sup> Int. Conf. «ELNANO'2013» (16.04-19.04.13). – Kyiv, 2013. – Pp. 335-338.
2. Интеграция объектов возобновляемой энергетики в низковольтные электрические сети / Е.И. Сокол, Ю.П. Гончаров, А.В. Ереско, В.В. Замаруев, В.В. Ивахно, С.Ю. Кривошеев, Е.А. Маляренко, Е.М. Зражевец, Б.А. Стысло // Відновлювальна енергетика ХХІ століття (10.09-14.09.12): тез. XIII міжн. наук.-практ. конф. / Інститут відновлюваної енергетики НАН України. – К., 2012. – С. 112-115.
3. Солнечная энергетика: учебное пособие для вузов / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 276 с.
4. Денисюк С.П. Оптимізація режимів електропостачання в локальних системах з роззосередженою генерацією / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янку, П.С. Колесник // Праці Інституту електродинаміки НАН України / ІЕД. – Київ, 2011. – Спец. Вип. – С. 30-37.
5. Крюков А.В. Использование технологий распределенной генерации на железнодорожном транспорте / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин, М.О. Арсентьев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / ИрГУПС. – Иркутск, 2008. – №3 (19). – С. 81-87.
6. Кириленко О.В. Технічні особливості функціонування енергосистем при інтеграції джерел розподіленої генерації / О.В. Кириленко, І.В. Трач // Праці Інституту електродинаміки НАН України / ІЕД. – Київ, 2009. – Вип. 24. – С. 3-7.
7. Перспективы и пути развития распределенной генерации в Украине / А.В. Праховник, В.А. Попов, Е.С. Ярмолюк, М.Т. Кокорина // Енергетика, економіка, технології, екологія: науковий журнал / НГУУ «КПП». – Київ, 2012. – № 2(31). – С. 7-14.
8. Яндутьський О.С. Моделювання і аналіз впливу сонячних електростанцій на режими роботи електричної мережі / О.С. Яндутьський, О.В. Хоменко, А.А. Марченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету / ДонНТУ. – Донецьк, 2013. – № 1(14). – С. 324-329.
9. Caldon R. Feasibility of adaptive intentional islanding operation of electric utility systems with distributed generation / R. Caldon, A. Stocco, R. Turri // Electric Power Systems Research. – 2008. – Vol. 78, iss. 12. – Pp. 2017-2023.
10. Conti S. Analysis of distribution network protection issues in presence of dispersed generation / S. Conti // Electric Power Systems Research. – 2009. – Vol. 79, iss. 1. – Pp. 49-56.
11. Аккумуляторные и солнечные источники питания для локомотивов и устройств сигнализации и связи // Железные дороги мира. – 2007. – № 5. – С. 62-64.
12. Применение возобновляемых источников энергии на железных дорогах // Железные дороги

- мира. – 2013. – № 1. – С. 43-48.
13. В Анапе открыли первый в России «умный» вокзал. Режим доступа: <http://pronedra.ru/alternative/2012/07/26/solnechnie-paneli-na-anapskom-zhd-vokzale/>.
  14. Повышение эффективности функционирования тягового электроснабжения при применении возобновляемых источников электрической энергии / Ю.П. Гончаров [и др.] // Problemy Kolejnictwa, czasopismo naukowe wydawane / Instytut Kolejnictwa. – Warszawa, 2014. – № 162. – С. 65-82.
  15. В Бельгии прошел испытания железнодорожный состав на солнечной энергии. Режим доступа: <http://www.1tv.ru/news/world/178100>.
  16. Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование / М. Браун. – К. : МК-Пресс, 2005. – 279 С.
  17. Максимизация электрической энергии, получаемой от фотогенератора / Е.И Сокол, Ю.П. Гончаров, В.В. Замаруев, С.Ю. Кривошеев, Е.М. Заржавец, Е.А. Маляренко, Б.А. Стысло, А.В. Ересько // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2012. – Ч. 4. – С. 110-116.
  18. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники / Р.Х. Бальян. – М. : Советское радио, 1971. – 720 с.

**Bibliography:**

1. Electronic system with series organization for connection the distributed generators of renewable energy to low voltage industrial network / E.I. Sokol, Y.P. Goncharov, A.V. Eresko, V.V. Zamaruiev, S.Y. Krivosheev, V.V. Ivakhno, O.V. Ilina, E.A. Malyarenko, B.A. Styslo, K.G. Upyrenko // Proc. of the 33<sup>th</sup> Int. Conf. «ELNANO'2013» (16.04-19.04.13). – Kyiv, 2013. – Pp. 335-338. (Eng.)
2. Integration of renewable energy facilities in low-voltage electrical network / E.I. Sokol, Yu.P. Goncharov, A.V. Eres'ko, V.V. Zamaruev, V.V. Ivakhno, S.Yu. Krivosheev, E.A. Malyarenko, E.M. Zrazhevets, B.A. Styslo // Proc. of the 13<sup>th</sup> Int. Scientific and Practical Conf. «Renewable Energy XXI Century» (10.09 – 14.09.12)». – Kyiv, 2012. – Pp. 112-115. (Rus.)
3. Solar energy: a manual for higher educational institutions / V.I. Vissarionov, G.V. Deryugina, V.A. Kuznetsova, N.K. Malinin. – М. : MEI pbl., 2008. – 276 p. (Rus.)
4. Denisyuk S.P. Modes optimization of power supply in local systems of decentralized generation / S.P. Denisyuk, D.G. Derev'yanko, P.S. Kolesnik // Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine / IED. – Kiyv, 2011. – Special relies – Pp. 30-37. (Ukr.)
5. Kryukov A.V. The use of distributed generation technologies in rail transport / A.V. Kryukov, V.P. Zakaryukin, M.O. Arsent'ev // Modern technology. System analysis. Modeling / IrGUPS. – Irkutsk, 2008. – №3 (19). – Pp. 81-87. (Rus.)
6. Kirilenko, O.V. The technical operation of power systems with integration of distributed generation sources / O.V. Kirilenko, I.V. Trach // Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine / IED. – Kiyv, 2009. – Issue 24. – Pp. 3-7. (Ukr.)
7. Perspectives and the development of distributed generation in Ukraine / A.V. Prakhovnik, V.A. Popov, E.S. Yarmolyuk, M.T. Kokorina // Energy, economy, technology, ecology: scientific journal / NTUU «KPI». – Kiyv, 2012. – № 2(31). – Pp. 7-14. (Rus.)
8. Yandul's'kiy O.S. Modeling and analysis of the impact of solar power to the electrical grid modes / O.S. Yandul's'kiy, O.V. Khomenko, A.A. Marchenko // Scientific works of Donetsk national technical university / DonNTU. – Donets'k, 2013. – № 1(14). – Pp. 324-329. (Ukr.)
9. Caldon R. Feasibility of adaptive intentional islanding operation of electric utility systems with distributed generation / R. Caldon, A. Stocco, R. Turri // Electric Power Systems Research. – 2008. – Vol. 78, iss. 12. – Pp. 2017-2023.
10. Conti S. Analysis of distribution network protection issues in presence of dispersed generation / S. Conti // Electric Power Systems Research. – 2009. – Vol. 79, iss. 1. – Pp. 49-56.
11. Claypool A. Battery and solar power supplies for locomotives and signaling and communication devices / A. Claypool // Railways of the world. – 2007. – № 5. – Pp. 62-64. (Rus.)
12. Goldenberg Ph. The use of renewable energy sources on the railways / Ph. Goldenberg // Railways of the world. – 2013. – № 1. – Pp. 43-48. (Rus.)

13. In Anapa opened the first in Russia «smart» station. Access: <http://pronedra.ru/alternative/2012/07/26/solnechnie-paneli-na-anapskom-zhd-vokzale/>.
14. Improving the efficiency of the traction power supply in the application of renewable electricity. / Yu.P. Goncharov [et al.] // Railway Problems, a scientific journal / Railway Institute. – Warszawa, 2014. – № 162. – Pp. 65-82. (Rus.)
15. In Belgium, has been tested train on solar energy. Access: <http://www.1tv.ru/news/world/178100>.
16. Braun M. Power sources. Calculation and design / M. Braun. – K. : МК-Press, 2005. – 279 p. (Rus.)
17. Maximization of electrical energy from photogenerator / E.I. Sokol, Yu.P. Goncharov, V.V. Zamaruev, S.Yu. Krivosheev, E.M. Zarzhavets, E.A. Malyarenko, B.A. Styslo, A.V. Eres'ko // Technical electrodynamics. Subjects. Issue «Power Electronics and Energy Efficiency». – 2012. – Part 4. – Pp. 110-116. (Rus.)
18. Bal'jan R.H. Transformers for electronics / R.H. Bal'jan. – Moscow : Sovetskoe radio, 1971. – 720 p. (Rus.)

Рецензент: В.Г. Кузнецов  
д-р техн. наук, проф., «ДНУЖТ им. ак. В. Лазаряна»

Статья поступила 03.04.2015

УДК 621.316.1.016

© Лежнюк П.Д.<sup>1</sup>, Демов О.Д.<sup>2</sup>, Півнюк Ю.Ю.<sup>3</sup>

### ПОЕТАПНИЙ РОЗРАХУНОК КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОСНИХ СПАДІВ НАПРУГИ

*Запропоновано метод поетапного установаження компенсуючих установок в розподільних електричних мережах з використанням відносних спадів напруги як інтегральних показників. Відносні спади напруги, як інтегральні показники, дозволяють одночасно оцінювати втрати активної потужності під час передачі реактивної і спади напруги. Розроблений метод дозволяє, на відміну від відомих, спростити процес оптимізації шляхом її лінеаризації.*

**Ключові слова:** компенсація реактивної потужності, розподільні електричні мережі, відносні спади напруги.

*Лежнюк П.Д., Демов О.Д., Півнюк Ю.Ю. Поэтапный расчет компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях с использованием относительных падений напряжения. Предложен метод поэтапного установаження компенсуючих установок в распределительные электрические сети с использованием относительных падений напряжения как интегральных показателей. Относительные падения напряжения, как интегральные показатели, позволяют одновременно оценивать потери активной мощности при передаче реактивной и спады напряжения. Разработанный метод позволяет, в отличие от известных, упростить процесс оптимизации путем ее линейзации.*

**Ключевые слова:** компенсація реактивної потужності, розподільні електричні мережі, відносні спади напруги.

**P.D. Lezhniuk, O.D. Demov, Yu.Yu. Pivniuk. Step-by-step calculation of reactive power**

<sup>1</sup> д-р техн. наук, професор, «Вінницький національний технічний університет», м. Вінниця, [lpd@inbox.ru](mailto:lpd@inbox.ru)  
<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, «Вінницький національний технічний університет», м. Вінниця, [demov@yandex.ua](mailto:demov@yandex.ua)

<sup>3</sup> аспірант, «Вінницький національний технічний університет», м. Вінниця, [pivnjuk-jurijj@rambler.ru](mailto:pivnjuk-jurijj@rambler.ru)