

В.Г. СИЧЕНКО, д-р техн. наук, с.н.с., зав. каф. «Електропостачання залізниць» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

ІНТЕГРАЦІЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У СИСТЕМУ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ. Сьогодні сучасної енергетики обумовлюється зростаючим обсягом електроенергії отриманої від відновлюваних джерел. В основі цього процесу є необхідність вирішення екологічних проблем, охорони довкілля і складної енергетичної політики у світі, обумовленої, серед іншого, і зростаючим дефіцитом традиційних енергетичних ресурсів. Нині альтернативні джерела електроенергії нестримно розвиваються, збільшується кількість постачальників і змінюються умови надання послуг з електропостачання. Україна за останні декілька років добилася значного прогресу в розвитку джерел альтернативної електричної енергії, зокрема, сонячних (СЕС) і вітрових (ВЕС) електростанцій. На сьогодні у світі існують приклади успішного впровадження використання електроенергії, отриманої від відновлювальних джерел, в системі електричної тяги. Так, наприклад, у 2011 році було відкрито рух поїздів за маршрутом Париж-Амстердам з використанням енергії сонця від фотобатарей, встановлених на маршруті руху поїзда. ВАТ «РЖД» також має намір використовувати альтернативні джерела енергії для залізниць Росії. На сьогодні електроенергія від фотобатарей забезпечує потреби станції Комсомольська (Краснодарський край). В подальшому передбачається, що використання енергії вітру дасть максимальний ефект на Північній залізниці та на Сахаліні, а сонячних батарей – на Північно-Кавказькій залізниці [1]. На сьогоднішній день в Україні також реалізовано пілотний проект паралельної роботи СЕС та зовнішньої системи електропостачання для живлення шин 10 кВ на тяговій підстанції Самбір.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Науково-практичні аспекти розробки і впровадження систем децентралізованого виробництва як традиційної, так і альтернативної енергетики малої і середньої потужності досліджені у багатьох наукових роботах відомих вітчизняних і зарубіжних вчених. Вагомий внесок у вирішення цієї проблеми внесли С. П. Денисюк, А.В. Кириленко, А.В. Крюков, А.В. Праховник, Є.І. Сокол, А.С. Яндульський, Caldop R., Conti S. та ін. [2-12]. На думку вчених, децентралізація виробництва електроенергії є важливою складовою інноваційно-технологічного забезпечення структурного реформування енергетичної галузі з метою підвищення її ефективності і дозволяє, серед іншого, зменшити втрати електроенергії при транспортуванні через максимальне наближення джерела до споживача, зменшити число і довжину магістральних ЛЕП, зменшити наслідки аварій на центральних електростанціях і головних ЛЕП, забезпечити взаємне багатократне резервування електрогенеруючих потужностей.

Сферами застосування джерел розподіленої генерації на залізничному транспорті, як слідує з аналізу наукових публікацій, можуть бути наступні напрями: об'єкти залізничного транспорту в регіонах з нестійким електропостачанням; створення транспортно-енергетичних коридорів, що поєднують траси залізниць і автомобільних доріг, високовольтні лінії електропередач і лінії зв'язку; підвищення якості електроенергії; живлення автономних об'єктів інфраструктури залізничного транспорту з використанням нетрадиційних поновлюваних джерел енергії. Установки розподіленої генерації можуть бути застосовані для зниження відхилень і несиметрії напруги в системах електропостачання нетягових споживачів. Реалізовані пілотні проекти по застосуванню сонячної енергії для потреб залізничного транспорту показують їх високу технологічність і ефективність.

Постановка задачі дослідження. У розрізі розвитку нетрадиційних джерел електричної енергії та інтеграції їх у загальну енергетичну систему держави, зокрема сонячних та вітрових електростанцій, виникає задача щодо погодження передпроектної та проектної документації суб'єктів господарювання та окремих компаній, а також технічних умов на приєднання названих типів генерації до електричних мереж Укрзалізниці. При цьому необхідно мати на увазі, що електричні мережі Укрзалізниці мають специфічні особливості функціонування пов'язані, в першу чергу, з необхідністю забезпечення безпеки руху поїздів та нестационарним характером електроспоживання.

Викладення основного матеріалу. Інтеграція сонячних електростанцій в систему тягового електропостачання постійного струму вимагає розробки нових принципів проектування, функціонування та керування режимами роботи тягового електропостачання. Необхідність їх розробки обумовлена наступними факторами: змінюється структура електричної системи, потужність генерації сонячних джерел електроенергії визначається зовнішніми факторами (в першу чергу інтенсивністю сонячного випромінювання) і мало залежить від режиму роботи електричної мережі, до якої вони під'єднанні, сонячні установки можуть мати коливальний або переривчастий характер генерації потужності, що може призвести до сильних коливань потужності в системі та впливати на режими її роботи, більшість сонячних генераторів під'єднанні до мережі за допомогою силових електронних перетворювачів (інверторів), які дуже чутливі до рівнів напруг [7]. Звідси, необхідно вирішувати низку питань: визначення впливу СЕС на стабільність роботи тягових підстанцій, тягових та інших споживачів, що приєднані до шин тягової підстанції з

урахуванням допустимих режимів роботи споживачів, розробка рекомендацій щодо особливостей приєднання даного типу генерації до електричних мереж залізниць, функціонування пристроїв релейного захисту та автоматики, забезпечення необхідного рівня надійності електропостачання споживачів з необхідними якісними характеристиками, тощо.

Розглянемо поставлені питання більш детально.

1. Рекомендації щодо приєднання СЕС до шин тягових підстанцій. Проведені на кафедрі Електропостачання залізниць ДНУЗТ дослідження дозволили виявити наступні лімітуючі фактори при підключенні відновлюваних джерел електричної енергії (ВДЕ) до систем тягового електропостачання залізниць України: встановлена потужність головних знижувальних трансформаторів тягових підстанцій, комутаційні розподільних вимикачів приєднань, наявність необхідних видів релейного захисту у складі відповідних розподільних установок тягових підстанцій та забезпечення їх чутливості.

Крім того, принципово різна фізична природа ВДЕ обумовлює відмінності у значеннях параметрів їх схем заміщення, що, в свою чергу, впливає на характер зміни струмів к.з. у приєднаних до них електроустановках.

З урахуванням викладеного вище, при розробці технічних умов на приєднання СЕС до об'єктів системи електропостачання залізниць України, за результатами проведених досліджень, пропонується наступне:

- при загальному аналізі можливості приєднання та формуванні Технічних умов на приєднання по технічним питанням необхідно керуватися вимогами чинних нормативних документів;

- враховуючи важливість забезпечення безперервного електропостачання тягових споживачів для гарантування безпеки руху, доцільну точку приєднання, пов'язаний з цим обсяг модернізації обладнання тягової підстанції та необхідність встановлення додаткових видів релейного захисту і автоматики необхідно визначати на основі техніко-економічного обґрунтування окремо для кожного нового об'єкта, що планується до підключення;

- з метою уникнення реверсного режиму роботи обладнання, забезпечення правильності та надійності роботи релейного захисту і автоматики тягових підстанцій електрифікованого залізничного транспорту, мінімізації витрат на реконструкцію електричних мереж та релейного захисту і автоматики при виборі точки приєднання до тягової підстанції перевагу слід надавати шинам вищої напруги (35 кВ, 110 кВ і вище).

- якщо на підставі техніко-економічного обґрунтування здійснюється приєднання до шин напруги 10 кВ тягової підстанції, рекомендовано здійснювати приєднання ВДЕ таким чином, щоб потужність приєданого джерела не перевищувала потужності споживачів, яка розподіляється на даному рівні напруги та забезпечувалась відсутність реверсного режиму роботи обладнання і гальванічний розв'язок електричних систем через трансформаторні підстанції районів електричних мереж.

- враховуючи різкозмінний характер тягового навантаження, великі пускові струми електровозів на фідерній зоні, приєднання ВДЕ безпосередньо до шин, від яких отримують живлення тягові агрегати (10 або 35 кВ) не допускається.

- не допускається також приєднання ВДЕ до ліній, комплектних трансформаторних підстанцій та шин розподільчих пристроїв 6-10 кВ станцій і перегонів, якщо вони мають електричний зв'язок із системами живлення пристроїв автоблокування та інших систем забезпечення безпеки руху поїздів;

- враховуючи те, що фотоелектрична панель має високий внутрішній опір і відповідно струм СЕС в режимі к.з. незначно відрізняється від струму робочого режиму і є суттєво нижчим за струм к.з., зумовлений дією джерела системи зовнішнього електропостачання, при приєднанні електростанцій цього типу необхідно передбачати струмовий захист, який унеможливує підживлення місця к.з. в системі тягового електропостачання за рахунок СЕС. Тому, для приєднань, через які підключена сонячна електростанція, доцільним є застосування струмового захисту з блокуванням по напрузі. Для унеможливлення підживлення точки к.з. на підстанції від ВДЕ доцільно доповнити діючу автоматику функцією відключення ВДЕ від шин тягової підстанції при виникненні к.з.;

- при приєднанні СЕС до шин ВН, СН або НН тягових підстанцій повинні бути перевірені на чутливість до струмів короткого замикання, що протікають по елементах електричної схеми від вітки живлення СЕС, що приєднується, релейні захисти, зокрема: відповідних секційних вимикачів; диференційних захистів силових трансформаторів; захистів основних фідерів, що відходять від шин, до яких приєднано СЕС; інші.

У випадку незабезпечення необхідної чутливості захисту, приймаються інші види захисту, або інші технічні рішення виконання приєднання. Повинна бути забезпечена чутливість струмових (або нових типів захистів) на лініях зв'язку СЕС з шиною тягових підстанцій при коротких замиканнях на цих лініях та на шинопроводах приєднання.

- при приєднанні СЕС до шин тягових підстанцій повинні бути забезпечені вимоги щодо якості електроенергії в місці балансового розмежування електричних мереж власника СЕС та залізниці. Якість електроенергії, яка генерується ВДЕ, повинна задовольняти вимогам чинних нормативних документів. Необхідно також забезпечити доцільні рівні генерації вищих гармонік і реактивної потужності та умови синхронної роботи для забезпечення стійкості роботи електричної мережі.

2. Підвищення якості напруги в тяговій мережі постійного струму. Існуюча система тягового електропостачання постійного струму не завжди в змозі забезпечити необхідні провізну та пропускну спроможності. Особливо гостро ця проблема проявляється при впровадженні швидкісного руху на лініях, освоєнні зростаючого об'єму вантажних і пасажирських перевезень. Тому важливим стає пошук сучасних

технічних рішень та перспективних напрямків розвитку систем тягового електропостачання [13].

Сучасний стан тягового електропостачання постійного струму характеризується зростаючим дефіцитом електричної енергії для забезпечення необхідного режиму напруги в тяговій мережі при впровадженні швидкісного та високошвидкісного руху. Використання існуючих засобів підсилення в багатьох випадках не забезпечує необхідних енергетичних показників і є досить дорогим. Зростаючий дефіцит енергоресурсів ставить задачу дослідити можливість використання незалежних джерел електричної енергії для живлення пунктів підсилення тягової мережі (ПП).

Перевага живлення ПП від сонячних батарей полягає в тому, що немає необхідності в монтажі додаткової живильної лінії від тягової підстанції і незалежність їх роботи від неї. До питань, підлягаючих вирішенню слід віднести: тип джерела поновлюваної електричної енергії; компенсація впливу погодних умов на рівень генерованої енергії; схемотехніка, компоновання і елементна база; техніко-економічне обґрунтування їх застосування з прив'язкою до надійності забезпечення живлення тягового навантаження з необхідними енергетичними характеристиками. Схема лінійного ПП складається з однофазного інвертора на IGBT транзисторах, перетворюючого трансформатора і випрямляча. Для зменшення вагогабаритних розмірів трансформатора використовується напруга підвищеної частоти (700 Гц), а сердечник трансформатора виконаний з аморфного сплаву [12].

Варіант структури системи електропостачання залізниці постійного струму, що використовує сонячні генератори електричної енергії, встановлені на земельній смузі відчуження залізниці приведений в [12]. Структурна схема пропонованого удосконалення тягової мережі представлена на рис. 1 для трьох ПП (ординати встановлення ПП, відповідно – 5, 10 та 15 км при відстані між тяговими підстанціями 20 км).

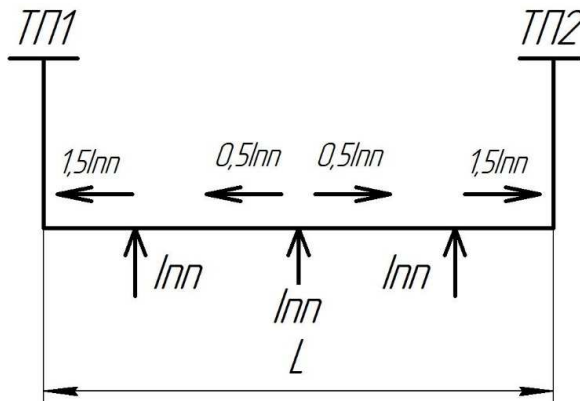


Рис. 1. Структурна схема живлення тягової мережі з трьома ПП: ТП1, ТП2 – тягові підстанції; Іпп1, Іпп2, Іпп3 – струми відповідно трьох підсилюючих пунктів; L - довжина міжпідстанційної зони.

Необхідно зазначити, що кількість і потужність ПП має визначатись за двома критеріями: компенсації втрат напруги та забезпечення нормативу необхідної питомої потужності тягової мережі. За умовами організації руху поїздів при нормальному режимі руху, в залежності від реальних довжин блок-діляниць, відстань між поїздами може складати 3,5-5 км, тому, в першому наближенні, розглянутий вище приклад (рис. 1) може бути прийнятий за основу для попередніх розрахунків, результати яких зведені в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунків

Показники	Існуюча система електропостачання	Система електропостачання з підсилюючими пунктами		
		Кількість перетворюючих пунктів		
		1	2	3
Витрата енергії E, кВт·год	1980	1620	1620	1590
Зниження витрати енергії ΔE, кВт·год	—	360	360	390
Втрати потужності ΔP, кВт	2018,25	1503,9	1307,5	900,9
Потужність ПП P, кВт	—	1800	900	650

Як показують виконані розрахунки, нормований рівень напруги для швидкісного руху витримується, при цьому втрати електричної енергії зменшуються до 50 % при зменшенні витрат на тягу майже на 20 %.

Звідси, зробимо висновок, що для забезпечення необхідного рівня напруги на струмоприймачі електровозу, зменшення втрат потужності та електроенергії доцільним є встановлення трьох підсилюючих пунктів на приведеній міжпідстанційній зоні. Потужність таких пунктів може знаходитись у межах 600-700

кВт. Кожен ПП може керуватися на основі закону, який формується в ході реального часу. Вид цього закону визначається значенням координати та струму електрорухомого складу, який розташовується в міжпідстанційній зоні. Проведемо розрахунок тягової мережі з ПП, які рівномірно розташовані на міжпідстанційній зоні, з метою забезпечення мінімальних втрат потужності в тяговій мережі згідно розрахункової схеми, представленої на рис. 1.

Для розрахунку використовуємо такі дані: довжина ділянки - 20 км; відстань між підсилюючими пунктами - 5 км; потужність підсилюючих пунктів - 650 кВт; струм електровоза при номінальній напрузі - 3000 А; питомий опір тягової мережі M120 +2 MФ100 + P65 - 0,069 Ом / км; схема живлення тягової мережі - двостороння.

У якості цільової функції приймаємо втрати потужності ΔP в тяговій мережі, які необхідно мінімізувати. В результаті отримуємо функцію чотирьох змінних:

$$\Delta P = f(I_{pp1}, I_{pp2}, I_{pp3}, x) \quad (1)$$

Таким чином, залежно від координати розташування поїзда, струми підсилюючих пунктів повинні мати таке значення, щоб забезпечувалася мінімум цільової функції ΔP , тобто відповідати критерію оптимізації.

Використовуючи розроблену методологію розрахунку [14], визначимо струми підсилюючих пунктів, при яких забезпечуються мінімальні втрати потужності. Результати розрахунків змін напруги і втрат потужності представлені на рис. 2., 3.

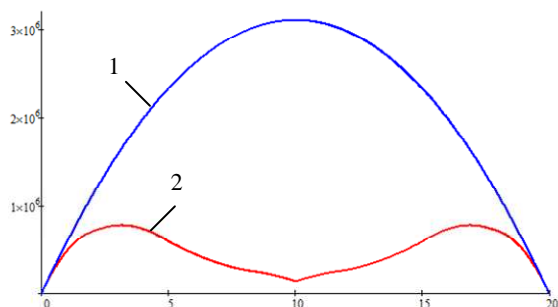


Рис. 2. Миттєві втрати потужності на ділянці з двостороннім живленням: 1 – без підсилення, 2 – з ПП

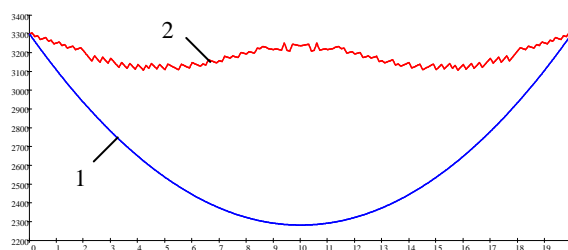


Рис. 3. Миттєві значення напруги на ділянці з двостороннім живленням: 1 – без підсилення, 2 – з ПП

Таким чином обрані підсилюючі пункти відповідають встановленим критеріям для впровадження високошвидкісного руху: забезпечують підтримання необхідного рівня напруги не нижче 2900 В, а також мінімальні втрати потужності у тяговій мережі.

Висновки.

1. Інтеграція сонячної генерації в систему тягового електропостачання постійного струму може здійснюватись по декільком напрямкам: паралельна робота СЕС з системою зовнішнього електропостачання за умови дотримання приведених рекомендацій; живлення власних потреб тягових підстанцій у буферному режимі по відношенню до існуючої схеми живлення; підсилення тягової мережі для забезпечення необхідного рівня напруги та зменшення втрат потужності.

2. Зважаючи на нестабільний рівень генерації СЕС та нестаціонарний характер тягового навантаження створення пропонувані пункти підсилення тягової мережі повинне передбачати застосування накопичувачів електричної енергії, здатних віддавати енергію в різкозмінних режимах.

3. Для підвищення ефективності функціонування системи тягового електропостачання постійного струму з пунктами підсилення, використовуваними сонячну енергію, необхідно розробити закони керування їх режимами в реальному часі у єдиній інтелектуальній системі тягового електропостачання.

Список літератури. 1. Сиченко В.Г. Аналіз впливу сонячної генерації на роботу тягових підстанцій електрифікованих залізниць. Сиченко В.Г., Бондар О.І., Прихода М.С. // Світлотехніка та електроенергетика, № 1, 2015, с. 10-18. 2. Интеграция объектов возобновляемой энергетики в низковольтные электрические сети. / Е.И. Сокол [и др.] // Відновлювальна енергетика XXI століття: XIII міжнародна науково-практична конференція. 2012. – С. 112-115. 3. Денисюк С.П. Оптимізація режимів електропостачання в локальних системах з розсосередженою генерацією / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янку, П.С. Колесник // Праці Інституту електродинаміки НАН України / ІЕД, – Київ, 2011. – Спец. Вип. – С. 30-37. 4. 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. 5. 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. – ISSN 1727–9895. 6. Праховник А.В. Перспективы и пути развития распределенной генерации в Украине / А.В. Праховник, В.А. Попов, Е.С. Ярмолюк, М.Т. Кокорина // Энергетика, економіка, технології, екологія: науковий журнал / НТУУ «КПІ». – Київ, 2012. – № 2(31). – С. 7-14. 7. Яндутьський О.С. Моделювання і аналіз впливу сонячних електростанцій

на режимі роботи електричної мережі/ О.С. Яндульський, О.В. Хоменко, А.А. Марченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету / ДонНТУ. – Донецьк, 2013. – № 1(14). – С. 324-329. 8. 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. 9. 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. 10. Claypool A. Аккумуляторные и солнечные источники питания для локомотивов и устройств сигнализации и связи / A. Claypool // Железные дороги мира/ 2007. – № 5. – С. 62-64. 11. Goldenberg Ph. Применение возобновляемых источников энергии на железных дорогах/ Ph. Goldenberg // Железные дороги мира/ 2013. – № 1. – С. 43-48. 12. Гончаров Ю.П. Система преобразования энергии, генерируемой в полосе отчуждения железной дороги с помощью солнечных панелей / Ю.П. Гончаров, Е.И. Сокол, В.В. Замаруев и др. // Вісник Приазовського державного технічного університету: Збірник наукових праць. - Маріуполь, 2015. - Випуск № 30. с. 200-211. 13. Сиченко В.Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць. Сиченко В.Г., Сасенко Ю.Л., Босий Д.О. / Дніпропетровськ. Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2015. - 344 с. 14. Сыченко В.Г. Усовершенствование методологии расчета распределенной системы тягового электроснабжения с усиливающими пунктами. Сыченко В.Г., Босий Д.А., Косарев Е.Н. // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. № 9, т. 2, 2014, с. 8-18

Bibliography. 1. Sychenko V., Bondar O., Prikhoda M. *Analysis of influence of solar generation to work traction substation of electrified railways*. Svitlotekhnika ta elektroenergetika, 2015. No. 1, pp. 10-18. 2. Sokol E.I. and others *Integration of renewable energy facilities in low-voltage electrical network*. Renewable Energy XXI Century: XIII International Scientific and Practical Conference. 2012. pp. 112-115. 3. Denisyuk S.P., Derevyanko D.G., Kolesnik P.S. *Modes optimization of power supply in local systems of decentralized generation*. Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. IED. Kyiv, 2011. Special issue. pp. 30-37. 4. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Arsent'ev M.O. *The use of distributed generation technologies in rail transport*. Modern technology. System analysis. Modeling. IrGUPS. – Irkutsk, 2008. No. 3 (19), pp. 81-87. 5. Kirilenko, O. V., Trach, I. V. *The technical operation of power systems with integration of distributed generation sources*. Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. IED. Kyiv, 2009. No. 24. pp. 3–7. ISSN 1727–9895. 6. Prakhovnik, A.V., Popov, V.A., Yarmolyuk, E.S., Kokorina, M.T. *Perspectives and the development of distributed generation in Ukraine*. Energy, economy, technology, ecology: scientific journal NTUU «KPI». Kyiv, 2012. No. 2(31). pp. 7-14. 7. Yandul'skiy, O.S. Khomenko, O.V., Marchenko, A.A. *Modeling and analysis of the impact of solar power to the electrical grid modes*. Proceedings of Donetsk National Technical University / DonNTU. – Donetsk, 2013. No. 1(14). pp. 324-329. 8. Caldon R., Stocco A., Turri R. *Feasibility of adaptive intentional islanding operation of electric utility systems with distributed generation*. Electric Power Systems Research / 2008, vol. 78, iss. 12, pp. 2017–2023. 9. Conti S. *Analysis of distribution network protection issues in presence of dispersed generation*. Electric Power Systems Research, 2009, vol. 79, iss. 1, pp. 49–56. 10. Claypool A. *Battery and solar power supplies for locomotives and signaling and communication devices*. Railways of the world, 2007. No. 5. pp. 62-64. 11. Goldenberg Ph. *The use of renewable energy sources on the railways*. Railways of the world, 2013. No. 1. pp. 43-48. 12. Goncharov, Yu.P., Sokol, E.I., Zamaruev V.V. i dr. *Sistema preobrazovaniya energii, generiruemoy v polose otchuzhdeniya zheleznoy dorogi s pomoshch'yu solnechnykh paneley*. Visnik Priazov'skogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu: Zbimik naukovikh prats. Mariupol, 2015. Iss. 30, pp. 200-211. 13. Sichenko, V. G., Saenko, Yu.L., Bosiy, D.O. *Yakist' elektrichnoi energii u tyagovikh merezakh elektrifikovanih zaliznits'*. Dnipropetrovsk: PF "Standard-Service", 2015. 344 p. 14. Sichenko V.G., Sayenko Yu.L., Bosiy D.O. *Usovershenstvovanie metodologii rascheta raspredelennoy sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya s usilivayushchimi punktami*. Energoberezhenie, energetika, energoaudit, 2014. No. 9. Vol. 2. pp. 8-18.

Поступила (receive) 28.08.2015