

АНАЛІЗ ВПЛИВУ СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ НА РОБОТУ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ.

Проаналізовано існуючі на сьогодні передумови використання електроенергії, отриманої від нетрадиційних джерел для живлення системи електричної тяги та нетягових споживачів. Розглянуто можливі варіанти приєднання відновлювальних джерел енергії до системи електропостачання залізниці, запропоновано схеми заміщення електротехнічного комплексу «сонячна електростанція – тягова підстанція», які призначені для визначення струмів короткого замикання в його розподільчих установках.

Ключові слова: електропостачання залізниць, схема заміщення, струми короткого замикання, сонячна електростанція.

Останнього часу в енергетичному секторі України набуває все більшої сили загальносвітова тенденція зростання обсягів електроенергії отриманих від відновлюваних джерел. Нині альтернативні джерела електроенергії нестримно розвиваються, збільшується кількість постачальників і змінюються умови надання послуг з електропостачання. Цей процес обумовлений важкою екологічною ситуацією, необхідністю охорони довкілля і складнощами енергетичної політики у світі. Україна за останні декілька років добила значного прогресу в розвитку джерел альтернативної електричної енергії, зокрема, сонячних (СЕС) і вітрових (ВЕС) електростанцій.

Аналіз можливостей використання альтернативної енергетики в системах тягового електропостачання показує декілька можливих напрямів:

- живлення системи тягового електропостачання від зовнішньої енергетичної системи, в якій, разом з традиційними, функціонують в паралельному режимі і альтернативні джерела електричної енергії;

- використання альтернативної енергії для посилення тягової мережі, живлення об'єктів інфраструктури і споживачів власних потреб (напрямку);

Особливо це має значення у регіонах, де зовнішнє електропостачання залізниць є нестійким, тому застосування незалежних джерел електричної енергії для забезпечення тяги потягів і потреб нетягових залізничних споживачів є важливим завданням. Для підвищення надійності електропостачання відповідальних споживачів в таких об'єктах інфраструктури також актуальне використання установок розподіленої генерації [1]. Останнім часом у зв'язку з розвитком

нетрадиційних джерел електричної енергії, зокрема сонячних та вітрових електростанцій, почастишали випадки звернення до залізниць України суб'єктів господарювання та окремих компаній щодо погодження перед проектною та проектною документацією, а також технічних умов на приєднання до електричних мереж Укрзалізниці названих типів генерації.

Сучасні сонячні електростанції мають потужності 80-100 і більше МВт, вітрові 10 і більше МВт та мають свої особливості і відмінності від звичайної генерації у конструкції, технічних параметрах, режимах роботи і, особливо, у перехідних режимах. Намагаючись знизити витрати на приєднання до електричних мереж, власники цих електростанцій прагнуть приєднати їх на рівні низької та середньої напруги тягових підстанцій, що проблематично з точки зору забезпечення надійності роботи тягових мереж, призводить до перевантаження та реверсних режимів силового обладнання тягових підстанцій, а також вимагає значних фінансових витрат залізниць на реконструкцію електричних мереж. Існуюча на сьогодні нормативна база електроенергетики у цьому питанні недосконала і не захищає споживачів від таких приєднань. Тому виникає необхідність проведення дослідження зазначеної проблеми для розробки технічної політики Укрзалізниці з урахуванням чинного законодавства.

Серед питань, які підлягають розгляду, можна відзначити: визначення впливу на стабільність роботи тягових підстанцій, тягових та інших споживачів, що приєднані до шин тягової підстанції, джерел сонячної та вітрової генерації при їх приєднанні до шин тягових підстанцій; з урахуванням допустимих режимів роботи споживачів, розробка рекомендацій щодо

особливостей приєднання даних типів генерації до електричних мереж залізниць.

Метою статті є дослідження зміни параметрів короткого замикання на приєднаннях тягових підстанцій при паралельній роботі з сонячною електростанцією.

Необхідно відзначити, що електричні мережі електрифікованих залізниць є важливою складовою енергетичної системи України. За наявною інформацією Головного управління електрифікації та електропостачання Укрзалізниці [2] власне споживання енергії (разом з не тяговими споживачами) становить порядку 6167 млн. кВт·год на рік. Отже Укрзалізниця є енергоємним споживачем, який потребує значних обсягів електроенергії, у тому числі, у перспективі, і від альтернативних джерел. Можливість їх використання в системі електричної тяги підтверджується існуючим світовим досвідом. Зокрема, ще у 2011 року було відкрито рух поїздів за маршрутом Париж-Амстердам з використанням енергії сонця від 16000 фотобатарей встановлених на шляху руху поїзда [3]. Річна генерація електроенергії при цьому становить близько 3,3 тис. МВт·год на рік, що приблизно відповідає річним витратам електроенергії на рух поїздів по цій лінії та на освітлення маршруту. ВАТ “РЖД” також має намір використовувати альтернативні джерела енергії для залізниць Росії [4]. 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 сонячні батареї – на Північно-Кавказькій залізниці.

Також додамо, що якщо в 2003 році роздрібні тарифи для промислових споживачів становили відповідно 13,35 коп/кВт·год (споживачі 1 класу напруги) та 19,45 коп/кВт·год (споживачі 2 класу напруги). Тобто, протягом останніх 10 років тарифи на електроенергію для промислових споживачів зросли більше ніж у 5 разів. За умови збереження такої динаміки на протязі наступних 10 років використання електроенергії від альтернативних джерел може стати економічно вигідним у промисловості та електричному транспорті.

В той же час розв’язання проблеми використання енергії цих джерел в системі електропостачання залізниць потребує проведення ряду досліджень [5]. Передусім, необхідно визначити обсяг інвестицій, які необхідно вкласти у заміну електрообладнання розподільчих установок (РУ) тягових підстанцій,

до яких мають приєднуватись відновлювані джерела. У свою чергу це потребує аналізу можливих варіантів приєднання відновлювальних джерел енергії до системи електропостачання залізниці та розрахунку струмів короткого замикання на тягових підстанціях для цього випадку на основі відповідних схем заміщення. Можна констатувати, що вищезазначені питання залишаються на сьогодні поки що поза увагою дослідників. Існуючі роботи [6-8] присвячені в основному питанням використання енергії відновлюваних джерел електроенергії в промисловості або для живлення автономних споживачів.

В цій роботі проведено розрахунки зміни параметрів аварійного режиму електротехнічного комплексу “сонячна електростанція – тягова підстанція” (СЕС-ТП) при різних варіантах приєднання сонячної електростанції. Розглянемо докладніше ці варіанти.

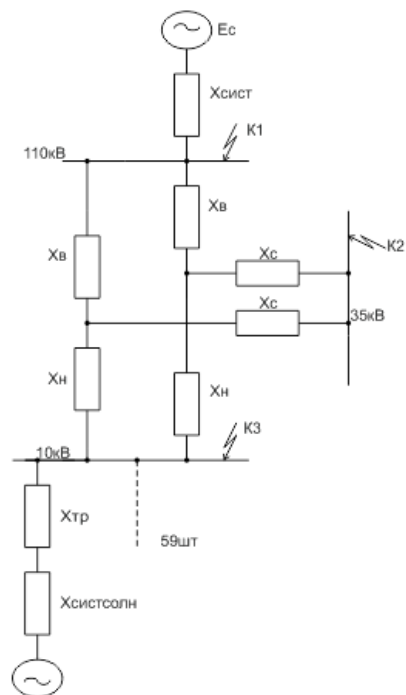


Рис. 1 - Схема заміщення електротехнічного комплексу СЕС-ТП при підключенні СЕС до шин РУ 10 кВ.

На схемі рис. 1 використано наступні позначення:

E_c , $E_{сон}$ – відповідно електрорушійні сили системи зовнішнього електропостачання та СЕС;

X_v , X_c , X_n – реактивні опори обмоток високої, середньої та низької напруги головного знижувального трансформатора (ГПТ) тягової підстанції;

$X_{тр}$ – еквівалентний реактивний опір підвищуючого трансформатора СЕС;

При побудові вказаної схеми заміщення використано наступні припущення:

1. Обидва ГПТ тягової підстанції працюють паралельно.

2. Активні опори схеми заміщення незначні у порівнянні з реактивними опорами її елементів.

3. СЕС розташовано достатньо близько до тягової підстанції для того, щоб не враховувати опори лінії електропередач.

4. Трансформація на СЕС одноступінчаста. Інвертори – автономні. До одного інвертора приєднано декілька фотобатарей, в свою чергу і до трансформатора приєднано декілька інверторів.

Аналогічно може бути побудована схема заміщення і у разі роботи одного ГПТ підстанції.

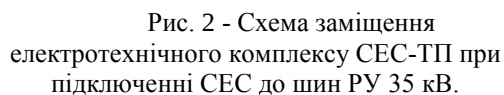


Рис. 2 - Схема заміщення
електротехнічного комплексу СЕС-ТП при
підключенні СЕС до шин РУ 35 кВ.

Позначення на схемі рис. 2 аналогічні позначенням на рис.1, але трансформація на СЕС двоступінчаста, 1 ступінь 0,4/10,5 кВ, 2 ступінь – 10,5/37,5 кВ.

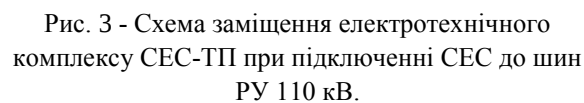


Рис. 3 - Схема заміщення електротехнічного комплексу СЕС-ТП при підключенні СЕС до шин РУ 110 кВ.

На основі запропонованих схем заміщення, в якості прикладу, оцінимо зміну значення струмів короткого замикання для тягової підстанції постійного струму ЕЧЕ “С” та ЕЧЕ “Д” змінного струму, у разі підключення до них сонячної електростанції різної потужності. Наведемо отримані результати розрахунків у таблицях та на основі цих даних побудуємо залежності значень струмів короткого замикання від потужності приєднаної до шин сонячної електростанції.

У таблицях 1, 2 та 3, відповідно, наведені результати розрахунків при приєднанні СЕС до шин 10, 35 та 110 кВ тягової підстанції постійного струму.

Таблиця 1 - результати розрахунків струмів короткого замикання при приєднанні СЕС до шин 10 кВ тягової підстанції постійного струму

Напряга на шинах	Потужність СЕС, МВт						
	0	4.1	30.1	60.1	120.1	240.1	480.1
Струм трифазного к.з., А							
10 кВ	6904	6940	7338	8106	10320	16010	28790
35 кВ	2743	2755	2867	3063	3622	5120	8639
110 кВ	2404	2414	2542	2734	3216	4333	6354
Струм однофазного к.з., А							
110 кВ	2452	2462	2579	2757	3210	4275	6225
Струм двофазного к.з., А							
10 кВ	5979	6010	6355	7020	8937	13870	24930
35 кВ	2376	2386	2483	2653	3137	4434	7482
110 кВ	2082	2091	2201	2368	2785	3752	5503

Таблиця 2 - результати розрахунків струмів короткого замикання при приєднанні СЕС до шин 35 кВ тягової підстанції постійного струму

Напруга на шинах	Потужність СЕС, МВт						
	0	15	30	60	120	240	480
Струми трифазного к.з., А							
10 кВ	7036	7170	7354	7855	9271	13040	21800
35 кВ	2741	2799	2876	3082	3655	5168	8715
110 кВ	2339	2370	2405	2482	2668	3132	4240
Струми однофазного к.з., А							
110 кВ	2410	2438	2469	2541	2713	3146	4197
Струми двофазного к.з., А							
10 кВ	6093	6209	6369	6803	8029	11290	18880
35 кВ	2374	2424	2491	2669	3165	4476	7547
110 кВ	2026	2052	2083	2149	2311	2712	3672

Таблиця 3 - результати розрахунків струмів короткого замикання при приєднанні СЕС до шин 110 кВ тягової підстанції постійного струму

Напруга на шинах	Потужність СЕС, МВт						
	0	15	30	60	120	240	480
Струми трифазного к.з., А							
10 кВ	6904	6989	7080	7280	7742	8860	11540
35 кВ	2743	2777	2814	2894	3080	3531	4615
110 кВ	2404	2435	2469	2543	2713	3127	4136
Струми однофазного к.з., А							
110 кВ	2453	2481	2512	2580	2737	3120	4067
Струми двофазного к.з., А							
10 кВ	5979	6053	6131	6305	6705	7673	9994
35 кВ	2376	2405	2437	2506	2667	3058	3997
110 кВ	2082	2109	2138	2202	2350	2708	3582

За даними таблиць побудуємо графіки залежності струму короткого замикання (Ік.з.) від потужності (Р), на яких вкажемо максимальні струми вимикання типових вимикачів підстанцій (Ік.з. max вимикача).

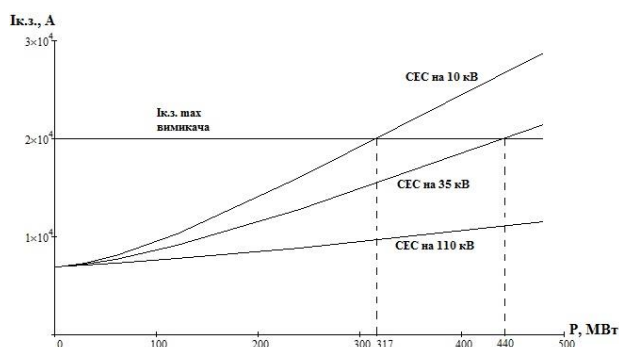


Рис. 4 - Графік залежності зміни струму к.з. на шинах 10 кВ підстанції постійного струму, при збільшенні потужності СЕС, підключеної до шин різної напруги

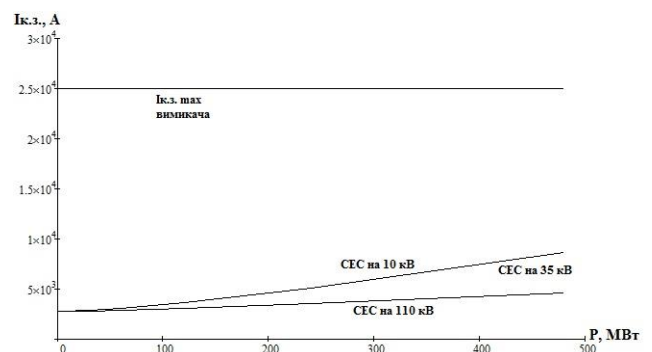


Рис. 5 - Графік залежності зміни струму к.з. на шинах 35 кВ підстанції постійного струму, при збільшенні потужності СЕС, підключеної до шин різної напруги

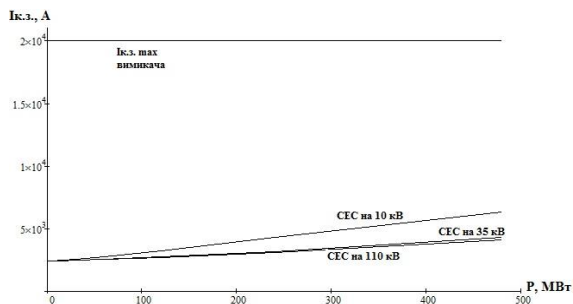


Рис. 6 - Графік залежності зміни струму к.з. на шинах 110 кВ підстанції постійного струму, при збільшенні потужності СЕС, підключеної до шин різної напруги

За аналогією приведемо для підстанції змінного струму лише графіки залежності струму короткого замикання від зміни величини потужності СЕС.

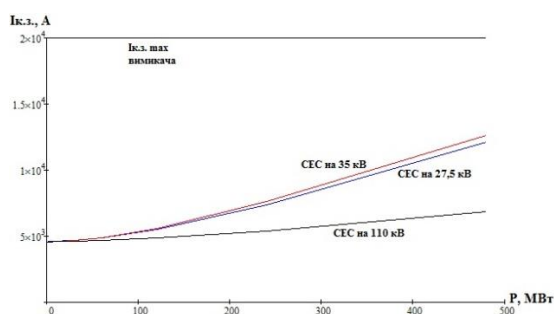


Рис. 7 - Графік залежності зміни струму к.з. на шинах 27,5 кВ підстанції змінного струму, при збільшенні потужності СЕС, підключеної до шин різної напруги

Згідно з принципом накладання струм короткого замикання на шинах тягової підстанції може бути представлений, як сума двох часткових струмів к.з.

$$\underline{I}_{к\ ВДЕ} = \underline{I}_{к} - \underline{I}_{зовн}$$

де: $\underline{I}_{к\ ВДЕ}$ - струм, що протікає внаслідок дії відновлюваного джерела енергії (СЕС);

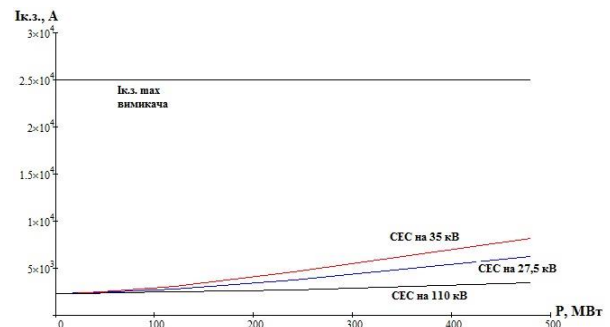


Рис. 8 - Графік залежності зміни струму к.з. на шинах 35 кВ підстанції змінного струму, при збільшенні потужності СЕС, підключеної до шин різної напруги

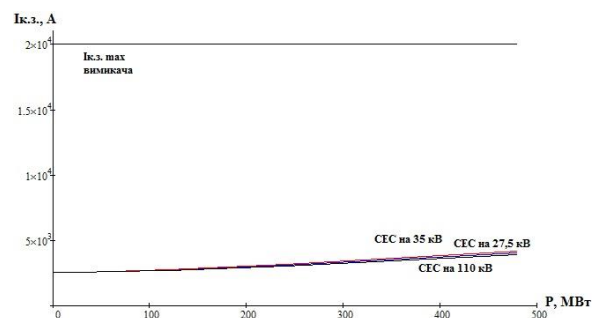


Рис. 9 - Графік залежності зміни струму к.з. на шинах 110 кВ підстанції змінного струму, при збільшенні потужності СЕС, підключеної до шин різної напруги

$\underline{I}_{зовн}$ - викликаний живленням місця к.з джерелом системи зовнішнього електропостачання;

$\underline{I}_{к}$ - струм короткого замикання на шинах тягової підстанції.

На основі цього представимо таблиці отриманих результатів для підстанції постійного струму:

Таблиця 4 - результати розрахунків часткових струмів від дії СЕС при приєднанні СЕС до шин 10 кВ тягової підстанції постійного струму.

Струми трифазного к.з. на шинах 10 кВ	Потужність СЕС, МВт						
	0	4	30	60	120	240	480
Струм к.з., А	6904	6940	7338	8106	10320	16010	28790
Частина струму к.з. від дії СЕС, А	0	230	1692	3378	6750	13490	26980

Таблиця 5 - результати розрахунків часткових струмів від дії СЕС при приєднанні СЕС до шин 35 кВ тягової підстанції постійного струму.

Струми трифазного к.з. на шинах 35 кВ	Потужність СЕС, МВт						
	0	15	30	60	120	240	480
Струм к.з., А	2743	2800	2876	3079	3645	5144	8663
Частина струму к.з. від дії СЕС, А	0	242	484	968	1936	3872	7744

Таблиця 6 - результати розрахунків часткових струмів від дії СЕС при приєднанні СЕС до шин 110 кВ тягової підстанції постійного струму.

Струми трифазного к.з. на шинах 110 кВ	Потужність СЕС, МВт						
	0	15	30	60	120	240	480
Струм к.з., А	2404	2435	2469	2543	2713	3127	4136
Частина струму к.з. від дії СЕС, А	0	81	161	323	647	1294	2588

Висновки

Проведені у роботі дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. На сьогодні у світі існують приклади успішного впровадження використання електроенергії, отриманої від відновлювальних джерел в системі електричної тяги. Протягом наступного десятиріччя в Україні також можуть виникнути передумови економічної доцільності для реалізації таких проєктів.

2. Необхідний обсяг інвестицій буде напряму залежати від переліку електричного обладнання тягових підстанцій яке потребуватиме заміни, що в свою чергу визначається на основі розрахунку струмів короткого замикання в системі «сонячна електростанція – тягова підстанція».

3. Результати розрахунків наведені в табл.3 показують, що приєднання СЕС до шин 110 кВ в найменшому ступені впливає на струми короткого замикання в системі, отже і обсяг модернізації тягової підстанції буде мінімальним. Найгіршим в цьому плані є приєднання СЕС до шин 10, 5 кВ.

Література

1. Vijay D., Mansoor A., Soma S., Robert C., Douglas N., Craig N. (2013) Solar energy: Trends and enabling technologies [Text] / D. Vijay, A. Mansoor etc. // Renewable and Sustainable Energy Reviews / vol. 19, pp. 555-564.
2. Ryoichi K., Yasumasa F. (2014) Assessment of massive integration of photovoltaic system considering rechargeable battery in Japan with high time-resolution optimal power generation mix model [Text] / K. Ryoichi, F. Yasumasa // Energy Policy / vol. 66, pp. 73-89.
3. Takaki K., Jamal U., Hiroshi K., Genji S., Hidetoshi K. (2014) Demonstration Experiment for Energy Storage and Rapid Charge System for the Solar Light Rail [Text] / K. Takaki, U. Jamal, K. Hiroshi, S. Genji, K. Hidetoshi // Energy Procedia / vol. 57, pp. 906-915.
4. Гончаров Ю.П., Сиченко В.Г., Босий Д.О., Пастушенко М.С., Косарев Є.М. Повышение эффективности функционирования тягового электроснабжения при применении возобновляемых источников электрической энергии [Текст].// Problemy Kolejnictwa, czasopismo naukowe wydawane przez Instytut Kolejnictwa, Zeszyt nr 162, 2014c. 65-82
5. Humberto E., Amit M., Wen-Chiao L., Robert S. (2013) Dynamic analysis of hybrid energy systems under flexible operation and variable renewable generation – Part I: Dynamic performance analysis [Text] / E. Humberto, M. Amit, L. Wen-Chiao, S. Robert // Energy / vol. 52, pp. 1-16.

6. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2013 році [Текст] / – К. : ТОВ «ВД «Мануфактура», 2014. - 256 с.

7. Первый в Европе поезд на солнечной энергии запущен по маршруту Париж-Амстердам [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://fakty.ua/134203-ppp>.

8. Jason P. (2013) Determining the sustainability of large-scale photovoltaic solar power plants [Text] / P. Jason // Renewable and Sustainable Energy Reviews / vol. 27, pp. 435-444.

9. Сайт ОАО РЖД про перспективы альтернативных джерел. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rzd.ru/>

10. Величко С.А. Энергетика навоколишнього середовища України (з електронними картами) [Текст] / Навчально-методичний посібник для магістрантів. Харків: Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна. – 2003. – 52с.

11. Ильин А.К. Нетрадиционные источники энергии для автономных потребителей [Текст] / А.К. Ильин, В.В. Пермяков – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 1997. – 36 с.

12. Ковалев О.П. Возобновляемые источники энергии и энергообеспечение автономных потребителей [Текст] // Труды ДВГТУ. Вып. 134. Теплоэнергетика. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003. – С. 16 – 20.

13. Peng-hua G., Jing-yin L., Yuan W. (2014) Annual performance analysis of the solar chimney power plant in Sinkiang, China [Text] / G. Peng-hua, L. Jing-yin, W. Yuan // Energy Conversion and Management, vol. 87, pp. 392–399.

References

1. Vijay D., Mansoor A., Soma S., Robert C., Douglas N., Craig N. (2013) Solar energy: Trends and enabling technologies / D. Vijay, A. Mansoor etc. // Renewable and Sustainable Energy Reviews / vol. 19, pp. 555-564.
2. Ryoichi K., Yasumasa F. (2014) Assessment of massive integration of photovoltaic system considering rechargeable battery in Japan with high time-resolution optimal power generation mix model / K. Ryoichi, F. Yasumasa // Energy Policy / vol. 66, pp. 73-89.
3. Takaki K., Jamal U., Hiroshi K., Genji S., Hidetoshi K. (2014) Demonstration Experiment for Energy Storage and Rapid Charge System for the Solar Light Rail / K. Takaki, U. Jamal, K. Hiroshi, S. Genji, K. Hidetoshi // Energy Procedia / vol. 57, pp. 906-915.
4. Goncharov Ju.P., Sichenko V.G., Bosij D.O., Pastushenko M.S., Kosarev Є.M. Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovanija tjagovogo jelektrrosnabzhenija pri primenenii vozobnovljaemyh istochnikov jelektricheskoy jenerгии [Tekst].// Problemy Kolejnictwa, czasopismo naukowe wydawane przez Instytut Kolejnictwa, Zeszyt nr 162, 2014s. 65-82
5. Humberto E., Amit M., Wen-Chiao L., Robert S. (2013) Dynamic analysis of hybrid energy systems under flexible operation and variable renewable generation – Part I:

Dynamic performance analysis / E. Humberto, M. Amit, L. Wen-Chiao, S. Robert // *Energy* / vol. 52, pp. 1-16.

6. Analiz roboti gospodarstva elektrifikacii ta elektropostachannja v 2013 roci [Tekst] / – K. : TOV «VD «Manufaktura», 2014. - 256 s.

7. Pervyj v Evrope poezd na solnechnoj jenerгии zapushhen po marshrutu Parizh-Amsterdam [Elektronnij resurs]. Rezhim dostupa: <http://fakty.ua/134203-ppp>.

8. Jason P. (2013) Determining the sustainability of large-scale photovoltaic solar power plants / P. Jason // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* / vol. 27, pp. 435-444.

9. Sajt OAO RZhD pro perspektivi al'ternativnih dzherel. [Elektronnij resurs]. Rezhim dostupa: <http://rzd.ru/>

10. Velichko S.A. Energetika navkolishn'ogo seredovishha Ukraïni (z elektronnimi kartami) [Tekst] / Navchal'no-metodichnij posibnik dlja magistrantiv. Harkiv: Harkivs'kij nacional'nij universitet imeni V.N.Karazina. – 2003. – 52s.

11. Il'in A.K. Netradicionnye istochniki jenerгии dlja avtonomnyh potrebitelej [Tekst] / A.K. Il'in, V.V. Permjakov – Vladivostok: Izd-vo VGUJeS, 1997. – 36 s.

12. Kovalev O.P. Vozobnovljaemye istochniki jenerгии i jenergoobespechenie avtonomnyh potrebitelej [Tekst] // *Trudy DVG TU. Vyp. 134. Teplojenergetika.* – Vladivostok: Izd-vo DVG TU, 2003. – S. 16 – 20.

13. Peng-hua G., Jing-yin L., Yuan W. (2014) Annual performance analysis of the solar chimney power plant in Sinkiang, China / G. Peng-hua, L. Jing-yin, W. Yuan // *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 392–399.