

О.Л. Радченко, канд. техн. наук
Інститут загальної енергетики НАН України

РОЗРАХУНОК КОМПЛЕКСУ «ВІДНОВЛЮВАНЕ ДЖЕРЕЛО – АКУМУЛЯТОР» З МАКСИМАЛЬНИМ ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕРОВАНОЇ ЕНЕРГІЇ

В роботі представлено алгоритм розрахунку ємності акумуляторної батареї в процесі експлуатації. Для усунення впливу зміни значення ємності акумулятора розроблено порядок її розрахунку, в якому використано в якості головного показника акумулятора значення енергії, яку він має в процесі роботи комплексу «відновлюване джерело – акумулятор».

Ключові слова: акумулятор, відновлюване джерело енергії, максимальне використання енергії.

Вступ. Використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), які перетворюють енергію вітру, випромінювання Сонця та інших джерел, зокрема, в електричну енергію є досить актуальним. ВДЕ мають як позитивні властивості – відсутність шкідливих викидів, можливість використання майже без обмежень та інші, так і певні недоліки. Найбільш відомим недоліком ВДЕ є їх недостатньо прогнозована потужність в залежності від часу. Для послаблення цього недоліку вдаються, зокрема, до спільного з ВДЕ застосування накопичувачів енергії (НЕ). Дія НЕ полягає в акумуляванні електричної енергії, коли обсяги її споживання менші від генерації ВДЕ, та живленні споживачів в разі недостатнього обсягу генерації ВДЕ. Застосування НЕ дозволяє виключити або послабити коливання напруги в електричній мережі при використанні ВДЕ.

За результатами аналізу властивостей сучасних НЕ, акумулятори (АБ) різних типів з урахуванням їх питомих показників (5÷110 Вт·год/кг, 40÷1100 Вт/кг) можна вважати найбільш придатними для тривалого в часі використання спільно з ВДЕ [1]. Кращі показники за питомою потужністю мають суперконденсатори. Проте, суперконденсатори мають більший рівень саморозряду порівняно з АБ [2]. Застосування саме АБ, як НЕ що можуть споруджуватись за короткий час та практично без обмежень щодо розташування, є одним з перспективних напрямів підвищення ефективності використання ВДЕ. Виходячи з зазначених позитивних властивостей АБ в якості НЕ розглянемо їх використання для спільної роботи з ВДЕ.

Недостатня передбачуваність в часі обсягу надходження енергії від Сонця, вітру та інших відновлюваних джерел, яку використовують для перетворення у ВДЕ, зокрема, в електричну енергію, ставить задачі максимального використання цієї енергії безпосередньо та/або її збереження для використання в майбутньому. Забезпечення одночасного розв'язання цих задач підвищує ефективність застосування ВДЕ. Одним з шляхів розв'язання зазначених задач є такий вибір НЕ, що забезпечить накопичення всього надлишку енергії, який утворюється як різниця між виробленою ВДЕ та спожитою енергіями [3, 4]. Постійна наявність певного запасу енергії у НЕ, яку можна використовувати в разі недостатнього обсягу генерації ВДЕ, є важливою властивістю роботи комплексу «ВДЕ – НЕ». Визначення параметрів НЕ, який може забезпечити постійну наявність потрібного обсягу енергії при спільній роботі з ВДЕ, є ще недостатньо опрацьованим питанням.

Мета та завдання. Необхідним є визначення умов, за яких можливе максимальне використання виробленої ВДЕ енергії за умови забезпечення постійно зарядженого стану АБ в складі НЕ. Для цього необхідно отримати залежність параметрів НЕ від режиму виробництва енергії ВДЕ та її споживання/акумулявання.

В якості ВДЕ обрано фотоелектричну батарею як таку, що не має властивостей акумулявання енергії. Її застосування потребує виключно зовнішнього НЕ.

Управління процесом заряду/розряду АБ найбільш часто виконують за фактом наявності/відсутності позитивної різниці між енергією генерованою ВДЕ та спожитою навантаженням [5]. При цьому, в загальному випадку, може як не вистачити ємності НЕ для збереження надлишку енергії виробленої ВДЕ, так і енергії акумуляованої в НЕ для використання його як необхідного додаткового джерела енергії для живлення навантаження.

Слід зазначити, що в разі застосування АБ в якості НЕ, обсяг відбору енергії обмежений. Це обумовлено особливостями роботи АБ в режимі розряду. Для більшості АБ не рекомендовано відбирати в режимі розряду обсяг енергії більше 30% від номінального. Перевищення цього обсягу призводить до

значного скорочення терміну використання АБ. Тому актуальною є задача визначення таких параметрів НЕ при безпечній його експлуатації, які б забезпечили як максимальне використання енергії виробленої ВДЕ, так і безперебійне живлення споживачів.

Матеріал і результати досліджень. В чисельному вимірі енергію, яку містить АБ, можна визначити як результат множення значення напруги між клемми АБ на значення її ємності. Звичним для АБ є визначення номінального значення ємності. Тому далі, для характеристики АБ, яка вже не є повністю зарядженою в процесі експлуатації, будемо замість терміну «ємність» використовувати термін «заряд». АБ в залежності від режимів заряд/розряд, що вже відбулись, в кожний момент часу має певний електричний заряд (вимірюється у А·год), який можна чисельно виразити з використанням безрозмірної величини SOC (state of charge) – відношення значення поточного електричного заряду АБ до її номінальної ємності. Якщо розглядати роботу АБ на послідовних інтервалах часу протягом періоду певної тривалості, зв'язок між значеннями $SOC(t)$ на поточному інтервалі часу та $SOC(t-1)$ на попередньому інтервалі часу можна визначити за залежністю:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{E_{RES}(t) - (E_{load}^{DC}(t) + E_{load}^{AC}(t) / \eta_{inv})}{V_{bat} C_{bat}} \quad (1)$$

де $E_{RES}(t)$ - обсяг енергії, виробленої ВДЕ;

E_{load} - обсяг енергії, спожитий навантаженням (верхній індекс DC стосується постійного струму, AC – змінного);

η_{inv} - коефіцієнт що враховує процеси перетворення електричної енергії постійного струму в змінний;

V_{bat} - напруга на клеммах АБ;

C_{bat} - ємність АБ.

Повне використання енергії ВДЕ за умови безперебійного постачання навантаження споживачів відповідає зарядженому стану АБ на кожному з послідовних інтервалів часу $t_0, t_1, t_2, \dots, t_T$ всього періоду роботи ВДЕ. Цей стан можна описати залежністю (критерій інваріантності SOC):

$$SOC(t_0) = SOC(t_T) \quad (2)$$

У залежності (2) t_0 – початок періоду роботи ВДЕ (початок розрахункового циклу). З урахуванням (2) залежність (1) має вигляд:

$$SOC(t_T) = SOC(t_0) + \sum_{t=t_1}^{t_T} \frac{E_{RES}(t) - (E_{load}^{DC}(t) + E_{load}^{AC}(t) / \eta_{inv})}{V_{bat} C_{bat}} \quad (3)$$

При цьому умова, яку відображає формула (2), з урахуванням (3), дає залежність:

$$\sum_{t=t_1}^{t_T} [E_{RES}(t) - (E_{load}^{DC}(t) + E_{load}^{AC}(t) / \eta_{inv})] = 0 \quad (4)$$

Залежність (4) дозволяє визначити необхідне значення $E_{RES}(t)$ для ВДЕ та обрати відповідні технічні засоби його реалізації відповідно до потреб живлення навантаження споживачів електричною енергією. Тобто з використанням залежності (4) можна визначити в даному випадку кількість фотоелектричних панелей певного типу, які забезпечать виробництво електричної енергії, обсяг якої обумовлює її споживання.

Оскільки $E_{RES}(t)$ змінюється випадковим чином, енергія, яку накопичує/відає АБ може бути визначена, коли рівність 0 в залежності (4) не виконується, тобто утворюється надлишок/дефіцит електричної енергії виробленої ВДЕ. Енергія $E_{bat}(t)$, яку накопичує/відає АБ, може бути визначена відповідно до (4) залежністю

$$E_{bat}(t) = E_{RES}(t) - (E_{load}^{DC}(t) + E_{load}^{AC}(t) / \eta_{inv}) \quad (5)$$

Залежність (5) дає можливість визначити ємність АБ, якщо вона є постійною величиною, шляхом ділення правої та лівої частин цієї залежності на V_{bat} . Проте, за результатами досліджень [6] показано, що ємність АБ може залежати, зокрема, від струму розряду, що відображено на рис. 1.

На рис.1 відображено результати експериментальних досліджень, у яких розглянуто наступні величини: C – поточне значення ємності АБ, i – струм розряду, C_m - максимальне значення ємності АБ. Криві 1, 2, 3 на рис. 1 відображають залежність ємності АБ від струму розряду для номінальних ємностей АБ 7,5 А·год, 47 А·год та 110 А·год відповідно.

Змінюється ємність АБ також під дією температури навколишнього середовища та тривалості експлуатації.

Для подальшого використання залежності (5) необхідно уникнути впливу на результат непостійності значення ємності АБ. Для цього замість ємності АБ будемо розглядати енергією, яку містить АБ. Будемо оцінювати цю енергію шляхом визначення заряду АБ $Q(t)$ (вимірюється у А год).

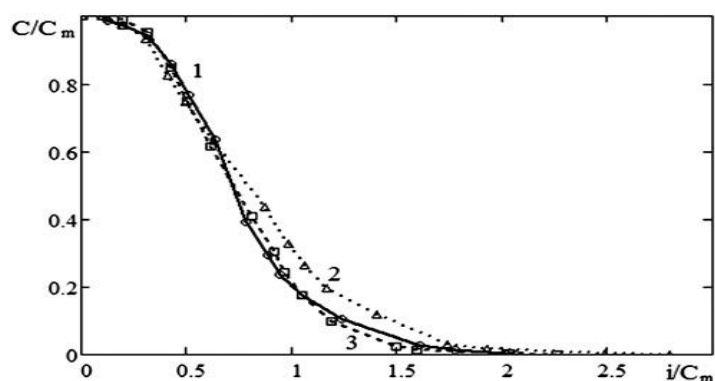


Рисунок 1 – Залежність ємності АБ типу SBLE фірми SAFT від значення струму розряду

Обсяг енергії, яку містить АБ в кожний момент часу, можна розглядати як залежний від величини SOC. При цьому в чисельному виразі $Q(t) = C_{bat} SOC(t)$, де C_{bat} поточне значення ємності АБ, яке неможливо визначити в процесі роботи.

В кожний момент часу заряд АБ буде визначати сума двох складових – заряду АБ на початку роботи $Q(t)_0$ та всієї енергії, яку накопичено АБ на поточний момент часу. При цьому з урахуванням формул (3) та (5) можна отримати наступну залежність:

$$Q(t) = Q(t)_0 + \sum_{t=t_1}^t E_{bat}(t) / V_{bat} \quad (6)$$

Значення $Q(t)$ в залежності (6) має бути більше 0, що відповідає виключно зарядженому стану АБ. Досягти виконання цієї умови можна відповідним чином вибираючи значення $Q(t)_0$.

Ілюстрацію виконання цієї умови можна пояснити з використанням кількісної різниці між енергіями, яку виробляє ВДЕ та споживає навантаження. Для ВДЕ – фотоелектричної батареї, застосовано розрахунковий графік виробництва енергії, характерний для сонячного дня. Максимум виробництва енергії припадає на інтервал часу доби 12÷14 годин. Для навантаження споживачів застосовано розрахунковий графік споживання енергії з максимумами в інтервалах часу доби 10÷12 годин та 15÷17 годин. З використанням цих графіків отримано графік споживання енергії $E_{bat}(t)$ відповідно до формули (5), який представлено на рисунку 2. Значення енергії по вісі ординат представлено у Вт год.

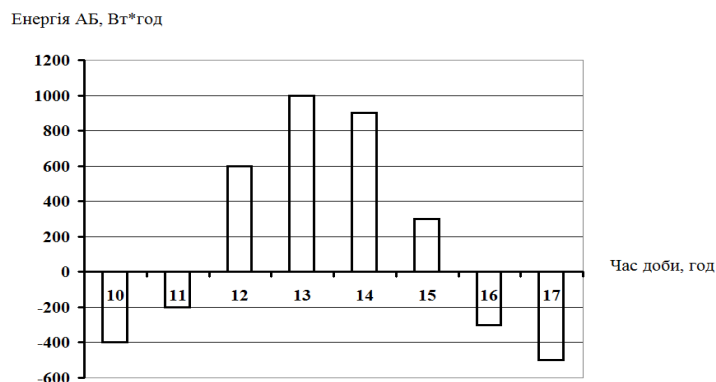


Рисунок 2 – Розрахункові значення $E_{bat}(t)$

На рисунку 3 представлено розрахунковий графік, який відображає значення $Q(t)$ відповідно до залежності (6) за умови $Q(t)_0 = 0$ з використанням числових значень, наведених на рисунку 2. При цьому обрано значення $V_{bat} = 12$ В. По вісі ординат значення заряду вимірюються в А·год.

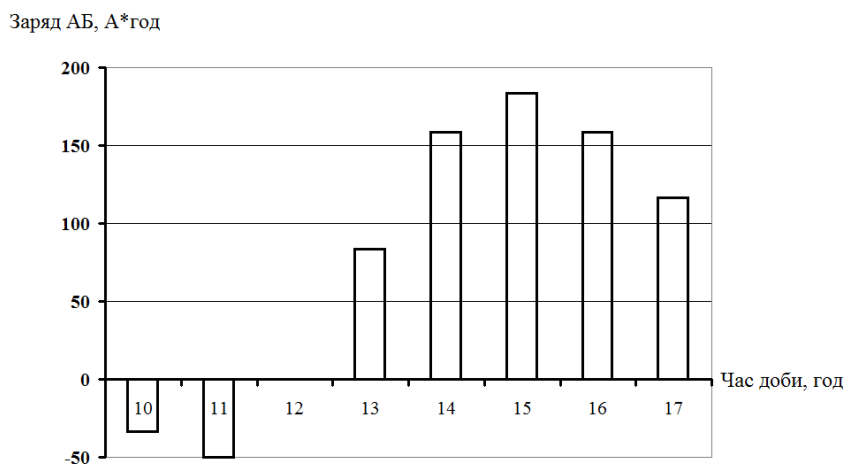


Рисунок 3 - Розрахункові значення $Q(t)$

З рисунку 3 видно, що значення $Q(t)_0$ повинно мати числове значення ≥ 50 А·год (відповідає значенню часу доби 11 годин) для забезпечення отримання виключно позитивних значень $Q(t)$ при його обчисленні згідно з формулою (6).

Протягом всього періоду роботи ВДЕ, залежно від обсягу виробленого ним обсягу енергії, значення заряду АБ згідно з формулою (6) може змінюватись від мінімального Q_{\min} до максимального Q_{\max} . Ці значення можна визначити з всього обчисленого ряду значень наступним чином:

$$Q_{\min} = \min(Q(t)), \quad Q_{\max} = \max(Q(t)), \quad t = t_1, t_2, \dots, t_T$$

Оскільки значення Q_{\min} має бути позитивним (умова постійно зарядженого АБ), значення ємності АБ в чисельному виразі повинно відповідати наступній умові:

$$C_{bat} \geq Q_{\max} - Q_{\min} \quad (7)$$

Ще однією умовою роботи НЕ має бути обмеження значення електричного струму АБ на визначеному виробником рівні в процесі її заряду чи розряду. Значення цього струму може бути визначено з використанням значення енергії, яку накопичує/віддає АБ. Цю умову можна записати наступним чином:

$$C_{bat} \geq |E_{bat}(t)| / V_{bat}, \quad t = t_1, t_2, \dots, t_T \quad (8)$$

Відомо, що АБ мають певні обмеження щодо глибини розряду (цю величину позначають DOD – depth of discharge) – відношення відданої в навантаження енергії до результату множення номінальної ємності АБ на номінальне значення напруги на її клеммах. При цьому повинно виконуватись співвідношення $SOC + DOD = 1$.

Максимальне значення DOD для більшості типів АБ становить 0,2 – 0,3. Перевищення припустимого значення DOD може суттєво скоротити термін експлуатації АБ.

З урахуванням залежностей (7), (8) та значення DOD можна визначити значення потрібної ємності АБ для роботи в комплексі «ВДЕ – АБ» за умови її постійної зарядженості:

$$C_{bat} = \max \left[(Q_{\max} - Q_{\min}), |E_{bat}(t)| / V_{bat} \right] \frac{1}{DOD}, \quad t = t_1, t_2, \dots, t_T \quad (9)$$

Розрахунок відповідно до залежності (9) можливо виконати за наявності графіка електричного навантаження споживачів та прогнозних даних щодо виробітку електричної енергії ВДЕ. Розрахунок необхідно виконати для характерних періодів використання комплексу ВДЕ-АБ - залежно від пори року, робочого та вихідного днів тощо. Особливу увагу слід приділити забезпеченню умови обмеження значення струму розряду АБ. Значення ємності АБ за результатами проведених розрахунків має задовольняти всім обраним періодам використання комплексу ВДЕ-АБ.

Висновки

1. Дієвим заходом для підвищення ефективності використання ВДЕ є максимальне використання виробленої ним енергії за рахунок одночасно як живлення навантаження споживачів, так і акумулювання надлишку виробленої енергії.

2. Запропонований порядок розрахунку ємності електричного акумулятора для комплексу «відновлюване джерело енергії – акумулятор» дозволяє не враховувати зміну цієї ємності в процесі експлуатації.

3. Вибір ємності акумулятора (відповідно до запропонованого порядку розрахунку) забезпечує його тривалу експлуатацію, завдяки постійно зарядженому стану акумулятора, на рівні не нижче визначеного виробником.

Список літератури

1. ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES: REVIEW [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.ip.simr.pw.edu.pl/zn/artykuly/zn2\(102\)2015/013_021.pdf](http://www.ip.simr.pw.edu.pl/zn/artykuly/zn2(102)2015/013_021.pdf)

2. Electricity Storage in the Power Sector [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.iphe.net/docs/Events/Seville_11-12/Workshop/Background%20Materials/Extract%20SET%20Plan_electricity%20storage%20in%20power%20sector.pdf

3. Jing Li J., Wei W., Xiang J.A Simple Sizing Algorithm for Stand-Alone PV/Wind/Battery Hybrid Microgrids // Energies, 2012. – V.5, p. 5307-5323. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.mdpi.com/journal/energies.

4. Костюк В.О., Ханицька О.О. Поєднання вимог щодо керування й надійності в задачах вибору раціональної конфігурації гібридної електро-постачальної системи з використанням ВДЕ // Збірник тез доповідей XII Міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014)». – Вінниця, ВНТУ. – 2014. – С.145.

5. Bernal-Agustin J.L. Dufo-Lopez R. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems 2009 // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. –V.13, p. 2111–2118

6. Галушкин Н.Е., Язвинская Н.Н., Галушкина И.А. Анализ использования эмпирических соотношений для оценки емкости никель-кадмиевых аккумуляторов фирмы SAFT длительного режима разряда [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=9999946

O.L. Radchenko

Institute of General Energy of National Academy of Sciences of Ukraine CALCULATION OF COMPLEX "RENEWABLE ENERGY SOURCE- BATTERY" WITH MAXIMUM USE OF THE ENERGY GENERATED

Distribution renewable sources such as electrical energy due to their good qualities absence of harmful emissions, almost no possibility of placing limitations and others. Thus renewable energy sources have disadvantages, among which the most prominent insufficient target power vs. time. To reduce or eliminate this drawback, electric energy accumulators are used, in particular, batteries.

Using the battery as energy storage at a secure and long-term of its operation, together with renewable energy sources should ensure uninterrupted power load consumers. To fulfill these conditions developed procedure for calculating complex "renewable source - battery" of electrical energy.

The system for calculating complex "renewable source - battery," which provided the use of all generated electricity. The conditions under which the battery is charged to the required level, providing both permanent operation and uninterrupted power load consumers.

Keywords: battery, renewable energy, maximum utilization of energy.

References

1. ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES: REVIEW [Electronic Source]. – Access mode: [http://www.ip.simr.pw.edu.pl/zn/artykuly/zn2\(102\)2015/013_021.pdf](http://www.ip.simr.pw.edu.pl/zn/artykuly/zn2(102)2015/013_021.pdf)

2. Electricity Storage in the Power Sector [Electronic Source]. – Access mode: http://www.iphe.net/docs/Events/Seville_11-12/Workshop/Background%20Materials/Extract%20SET%20Plan_electricity%20storage%20in%20power%20sector.pdf

3. Jing Li J., Wei W., Xiang J.A Simple Sizing Algorithm for Stand-Alone PV/Wind/Battery Hybrid Microgrids // *Energies*, 2012. – V.5, p. 5307-5323. [Electronic Source]. – Access mode: www.mdpi.com/journal/energies.

4. Kostiuk V.O., Khanytska O.O. The combination of requirements management and reliability problems in the rational configuration of the hybrid electric provider systems using renewable // *Zbirnyk tez dopovidei XII Mizhnarodnoi konferentsii "Kontrol i upravlinnia v skladnykh systemakh (KUSS-2014)"*. – Vinnytsia, VNTU. – 2014. – p.145.

5. Bernal-Agustin J.L. Dufo-Lopez R. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems 2009 // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2009. –V.13, p. 2111–2118

6. Galushkin N.E., Yazvinskaya N.N., Galushkina I.A. Analysis of the use of empirical relations to estimate the capacity of nickel-cadmium batteries the company SAFT long discharge mode [Electronic Source]. – Access mode: http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=9999946

УДК 620.92 + 621.31

А.Л. Радченко, канд. техн. наук

Институт общей энергетики НАН Украины

РАСЧЕТ КОМПЛЕКСА «ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЙ ИСТОЧНИК - АККУМУЛЯТОР» С МАКСИМАЛЬНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРИРУЕМОЙ ЭНЕРГИИ

В работе представлен алгоритм расчета емкости аккумуляторной батареи в процессе эксплуатации.

Для устранения влияния изменения значения емкости аккумулятора разработан порядок ее расчета, в котором использован в качестве главного показателя аккумулятора значение энергии, которую он содержит в процессе работы комплекса «возобновляемый источник - аккумулятор».

Ключевые слова: аккумулятор, возобновляемые источники энергии, максимальное использование энергии.

Надійшла 18.10.2015

Received 18.10.2015

УДК 621.331:621.311.4-047.38

Д. В. Міронов, асистент кафедри Електропостачання залізниць

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені ак. В. Лазаряна

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ТО І Р ОБЛАДНАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ УЗАГАЛЬНЕНИХ КРИТЕРІЇВ

Дані, отримані в процесі діагностування технічного стану силового обладнання, важко порівняти між собою, і вони не завжди задовольняють умовам, які дозволили б обґрунтовано застосувати для їх аналізу статистичні методи оцінки експлуатаційних показників. Складність постановки висновку полягає в тому, що за окремими технічними показниками устаткування або параметрами роботи дати суб'єктивну оцінку його стану практично неможливо. Необхідно визначити узагальнені характеристики рівня експлуатації силового обладнання та проводити їх багатофакторний аналіз. Для вирішення цього завдання розглянуто можливість застосування функції бажаності Харінгтона для оцінки технічного стану обладнання тягових підстанцій з урахуванням багатофакторності процесу. На прикладі швидкодіючого вимикача постійного струму ВАБ-43 проведено розрахунок узагальненого критерію якості об'єкта діагностування.

Запропоновано методіку оцінки технічного стану обладнання тягових підстанцій, яка передбачає використання сучасних методів діагностики та кваліметрії і дозволяє створити систему управління якістю процесу діагностування, що підвищує ефективність існуючої системи ТО і Р електрообладнання. Використання узагальненого критерію якості об'єкта діагностування може служити основою нового методу обробки діагностичної інформації.

Ключові слова: тягова підстанція, діагностування, технічне обслуговування, функція бажаності Харінгтона, багатофакторний аналіз, стратегія ТО і Р.