УДК 621.311.243; 621.311.245

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ЧЕРГ ДЛЯ ОПИСУВАННЯ ІМОВІРНІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ВІД ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

В.І.Будько, канд.техн.наук, доцент,
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", 03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37,
тел./факс +380442048191, e-mail: solar_budko@ukr.net,
Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 02094, м. Київ, вул. Гната Хоткевича, 20А,
тел./факс +38-044-206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net
Orcid: 0000-0002-6219-4221

В роботі розглянуті питання визначення імовірнісних параметрів процесу зарядження електромобілів на автономних зарядних станціях на основі відновлюваних джерел енергії. Запропоновано використання теорії масового обслуговування для визначення ймовірності випадкового настання заряду електромобіля та часу зарядження, які прямо пропорційно залежать від залишкової ємності акумуляторних батарей електромобіля. Відмічена необхідність проведення подальших наукових досліджень для розроблення узагальненої математичної моделі, що описуватиме роботу нашої системи з урахуванням специфіки роботи установок на основі відновлюваних джерел енергії. Бібл. 4, рис. 2.
Ключові слова: *відновлювані джерела енергії, електромобіль, акумуляторна батарея, автономна зарядна станція.*

APPLICATION OF THEORY CHERK FOR DESCRIPTION OF IMPORTANT PARAMETERS OF THE CHARGING OF ELECTRIC MOBILS FROM RESTORED ENERGY SOURCES

Budko V., candidate of technical sciences, docent,
National Technical University of Ukraine "Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic Institute", 03056, c. Kiyv, ave. Peremogy, 37, tel./fax +380442048191, e-mail: solar_budko@ukr.net,
Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Hnata Khotkevycha, 20A, 02094, Kyiv-94, Ukraine,
Phone/fax: +38-044-206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net
Orcid: 0000-0002-6219-4221

The paper considers determining the probabilistic parameters of the charging process of electric vehicles in autonomous charging stations on the basis of renewable energy sources is considered. The use of the theory of mass service to determine the probability of a random charge of an electric vehicle charge and charging time, which is directly proportional to the residual capacity of the batteries of the electric vehicle, is proposed. The necessity of conducting further scientific researches for the development of a generalized mathematical model that describes the work of our system with regard to the specifics of the operation of installations on the basis of renewable energy sources. Referenses 4, fig. 2.
Keywords: *renewable energy sources, electric vehicle, battery, autonomous charging station.*

Будько В.І.
Budko V.

Відомості про автора: докторант факультету електроенерготехніки та автоматики Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", доцент кафедри відновлюваних джерел енергії КПІ ім. Ігоря Сікорського, старший науковий співробітник відділу вітроенергетики Інституту відновлюваної енергетики НАН України.
Освіта: Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",

Information about the author: Doctoral student of the Faculty of Electrical Engineering and Automation the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute" (Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute), associate professor of the Renewable Energy Sources Department of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Senior Researcher of Wind Energy Department of the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine.

інженер-технолог за фахом "Технічна електрохімія".
Основне коло наукових інтересів: Системи накопичення і зберігання енергії на основі електрохімічних акумуляторів; комплексні системи енергозабезпечення на основі відновлюваних джерел енергії; підвищення ефективності роботи автономних вузлів енергопостачання на основі відновлюваних джерел енергії.
Публікації: 42. **Патенти**: 3.

Education: National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", engineer-technologist in the specialty "Technical Electrochemistry".
Research area: Systems of accumulation and storage of energy based on electrochemical battery; Integrated energy supply systems based on renewable energy sources; Increasing the efficiency of autonomous power supply units on the basis of renewable energy sources.
Publications: 42. Patents: 3.

Враховуючи стрімкий розвиток ринку електромобілів з однієї сторони [1] та необхідність збільшення мережі автозаправних станцій (АЗС), в тому числі і автономних на основі ВДЕ, з іншої [2], постає актуальне питання побудови математичної моделі роботи АЗС на основі ВДЕ, яка враховуватиме специфіку виробітку електроенергії з відновлюваних джерел, проміжне (буферне) зберігання енергії та випадковий характер процесів зарядки електромобілів (ЕМ).

Згідно запропонованої моделі [3] АЗС ЕМ від ВЕУ невизначеною залишається функція $\psi(c)$, що враховує випадковий характер та частоту настання процесу заряду акумуляторної батареї (АБ ЕМ).

Розглянемо можливість застосування теорії масового обслуговування для описання функції $\psi(c)$.

Теорія масового обслуговування призначена для вирішення ймовірнісних задач, що пов’язані з роботою систем масового обслуговування (СМО), до яких можна віднести обслуговування ЕМ на зарядній станції. Дана система складається з певного числа обслуговуючих одиниць, які називаються каналами обслуговування [4]. В нашому випадку зарядні пристрої (ЗП) розташовані на одній АЗС ЕМ. Системи масового обслуговування можуть бути одно- (1-зарядний пристрій) та багатоканальними.

Робота системи масового обслуговування полягає у виконанні потоку вимог або заявок, що поступають на неї. При цьому заявки поступають одна за іншою в деякі випадкові моменти часу.

Обслуговування отриманої заявки (наприклад, заряд електромобіля) триває певний час, після чого канал звільняється та знову готовий для приймання наступної заявки (заряду наступного ЕМ). Оскільки предметом теорії масового обслуговування є встановлення залежності між характером потоку заявок (як часто ЕМ заїжджають на АЗС ЕМ та на який проміжок часу), продуктивність каналу (спроможністю одного ЗП зарядити певну кількість електромобілів за одиницю часу), кількістю каналів (ЗП на АЗС ЕМ) та ефективністю обслуговування (пропускною здатністю).

Пропускна здатність у загальному випадку залежить не тільки від параметрів системи, але й від характеру заявок. Якби заявки на заряд електромобілів поступали регулярно через задані проміжки часу і обслуговування такої заявки мало б визначену (постійну) тривалість, то розрахунок пропускної здатності системи не викликав би ніяких складностей. На практиці зазвичай власники електромобілів не домовляються між собою, коли вони заряджатимуть свій електромобіль, моменти надходження заявок є випадковими, а в більшості випадків випадковою є і тривалість обслуговування заявки (що визначатиметься рівнем залишкового заряду АБ ЕМ). В зв’язку з цим процес роботи системи (а в нашому випадку АЗС ЕМ від ВДЕ) протікає нерегулярно, і в потоці заявок на заряд електромобілів утворюються місцеві скупчення і розрідження. Скупчення ЕМ на заряд можуть призвести або до відмов в обслуговуванні (через обмеження кількості ЗП), або до утворення черг. Розрідження можуть призвести до невиробничих простоїв окремих каналів (ЗП) або систем (АЗС в цілому).

Таким чином, функціонування системи АЗС ЕМ від ВДЕ являє собою випадковий процес. Для надання рекомендацій щодо раціональної організації системи АЗС ЕМ від ВДЕ, з’ясування її пропускної здатності та встановлення вимог до її роботи необхідно вивчити випадковий процес, що протікає в системі, та описати його математично.

Отже, випадковий процес, що протікає в системі масового обслуговування (АЗС ЕМ від ВДЕ) полягає в тому, що система у випадкові моменти часу переходить з одного стану в інший: змінюється число зайнятих каналів (ЗП), число заявок, що стоять у черзі (ЕМ в черзі) і так далі. СМО являє собою фізичну систему дискретного типу з кінцевою кількістю станів, а перехід системи з одного стану в інший відбувається стрибкоподібно в момент, коли відбувається якась подія (приїзд нового електромобіля на АЗС, звільнення ЗП, виїзд ЕМ з черги і т.д.).

Розглянемо нашу фізичну систему (АЗСЕМ від ВДЕ) X зі скінченною кількістю станів: $X_1, X_2 \ldots X_n$.

В будь-який момент часу t система X може бути в якомусь із цих станів. Якщо позначити $P_k(t)$, $k = 1, 2, \ldots$ як імовірність того, що в момент часу t система буде знаходитися в стані x_k, то для будь-якого t:

$$\sum_k p_k(t) = 1 . \qquad (1)$$

Сукупність імовірностей $P_k(t)$ для кожного моменту часу t характеризує даний переріз випадкового процесу, що протікає в системі. Ця сукупність не є вичерпною характеристикою процесу, але досить добре його описує.

Для системи масового обслуговування (в тому числі і нашого випадку) основним фактором, що обумовлює процеси в ній, є потік заявок (у даному випадку на заряд електромобіля). Тому математичне описання починається з описання потоку заявок.

Під потоком подій у теорії ймовірності розуміють послідовність подій, що відбуваються одна за іншою в певні моменти часу (випадок потоку заявок на заряд електромобілів повністю підпадає під дане визначення). Потік однорідних подій можна відобразити як послідовність точок t_1, t_2, $\ldots t_k$ на числовій осі (рис. 1), що відповідають моментам появи подій.

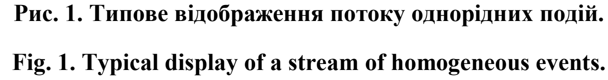

Рис. 1. Типове відображення потоку однорідних подій.

Fig. 1. Typical display of a stream of homogeneous events.

Потік подій називається регулярним, якщо події відбуваються одна за одною через чітко визначені (задані) проміжки часу. Однак такий потік не є характерним для системи масового обслуговування на АЗС ЕМ від ВДЕ. Для нашого випадку типовим є випадковий потік заявок.

Для розгляду потоку подій, що володіють певними простими властивостями, вводять ряд визначень.

1. Потік подій називається стаціонарним, якщо ймовірність попадання того чи іншого числа подій на ділянку часу довжиною τ (рис. 1) залежить лише від довжини ділянки і не залежить від того, де саме на осі $0t$ розміщена дана ділянка.

2. Потік подій називається потоком без післядії, якою для будь-яких ділянок часу, що не перекриваються, число подій, які попадають на одну з них, не залежить від числа подій, що потрапляють на інші ділянки.

3. Потік подій називається ординарним, якщо ймовірність попадання на елементарну ділянку Δt двох або більше подій настільки мала, що нею можна знехтувати у порівнянні з імовірністю попадання однієї події.

Якщо потік подій володіє усіма трьома властивостями, то він називається простим потоком (або стаціонарним пуасонівським потоком). Це пояснюється тим, що при дотриманні умов 1÷3 число подій, що потрапляють на будь-який фіксований інтервал часу, буде розподілене по закону Пуасона. Випадкова величина X (яка може приймати тільки цілі невід'ємні значення: 0, 1, 2, … m) розподілена по закону Пуасона, якщо ймовірність того, що вона прийме певне значення m, виражається формулою:

$$P_m = \frac{a^m}{m!} \cdot e^{-a} (m = 0, 1 \ldots) , \qquad (2)$$

де a – певна позитивна величина, що називається параметром закону Пуасона, яку ще називають математичним очікуванням випадкової величини X, оскільки:

$$m_x = a \cdot e^{-a} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{a^k}{k!} = a \cdot e^{-a} \cdot e^{a} = a . \qquad (3)$$

Дисперсія випадкової величини X:

$$D_x = a_2 - m_x^2 = a^2 + a - a^2 = a , \qquad (4)$$

тобто дисперсія випадкової величини, розподіленої по закону Пуасона, дорівнює її математичному очікуванню a.

Розглянемо більш детально умови 1-3 для розуміння, чому вони відповідають властивостям потоку заявок і за рахунок чого вони можуть порушуватись.

1. Умові стаціонарності відповідає потік заявок, ймовірнісні характеристики якого не залежать від часу. Для стаціонарного потоку характерна постійна густина (середнє число заявок на одиницю часу). На практиці часто зустрічаються потоки заявок, які можуть розглядатись як стаціонарні. Наприклад, потік заявок на заряд електромобілів на відрізку часу з 12 до 13 години може вважатись стаціонарним, однак цей же самий потік, але протягом доби, вже не може вважатися стаціонарним (оскільки в нічний час кількість рухомих електромобілів скорочується і, відповідно, кількість заявок на заряд буде значно меншою). Використання умови стаціонарності потоку заявок на АЗС ЕМ є доцільною при аналізі роботи системи в стаціонарних умовах або на окремих часових інтервалах.

2. Умова відсутності післядії означає, що заявки поступають у систему незалежно одна від одної. Наприклад, приїзд певного одиночного в даний конкретний момент часу електромобіля на АЗС ЕМ не залежить від інших електромобілів, які приїхали до того (для вхідного потоку). Однак слід відмітити, що вихідний потік (від'їзд електромобіля від зарядного пристрою) зазвичай має післядію, навіть якщо вхідний потік її не має. Наприклад, для СМО АЗС ЕМ від ВДЕ час обслуговування (заряду) однієї заявки становить $t_{зар}$. Тоді в потоці виконаних заявок мінімальний час між заявками, що залишають АЗС ЕМ, буде становити $t_{зар}$. Досить просто переконатись, що наявність такого мінімального інтервалу неминуче призводить до післядії.

3. Умова ординарності означає, що заявки приходять одиничними, а не спареними чи потрійними. Наприклад, потік одиничних електромобілів, що заїжджають на АЗС ЕМ при довільному русі по дорозі, буде ординарним. І потік даного прикладу не буде ординарним, якщо електромобілі їдуть у колоні з двох і більше транспортних засобів і які одночасно заїдуть на АЗС ЕМ.

Оскільки:

$$a = \lambda \bullet \tau , \qquad (5)$$

де λ – густина потоку (середнє число подій, що приходиться на одиницю часу), то ймовірність того, що за час τ відбувається рівно m подій (замовлень на заряд електромобілів) становить:

$$P_m(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^m}{m!} e^{-\lambda\tau} . \qquad (6)$$

Ймовірність того, що ділянка виявиться пустою (не відбудеться жодної події), становить:

$$P_0(\tau) = e^{-\lambda\tau} . \qquad (7)$$

Щільність розподілу визначається як:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda\tau} \text{ при } (t > 0) . \qquad (8)$$

Закон розподілу з щільністю (8) називається показниковим (або експоненційним).

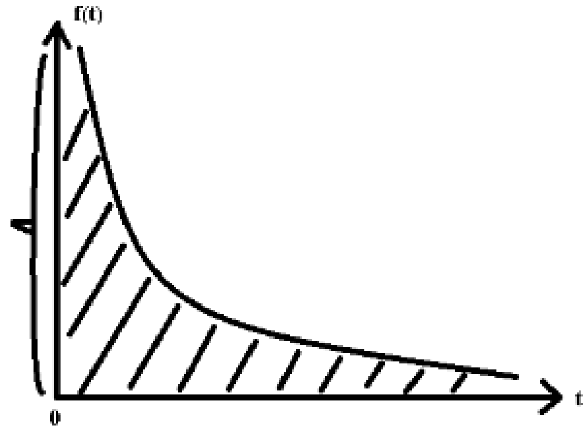

Рис. 2. Показниковий закон розподілу з густиною потоку λ.

Fig. 2 - Indicative distribution law with flux density λ.

Якщо потік подій нестаціонарний, то його основною характеристикою є миттєва густина $\lambda(t)$. Миттєва густина потоку являє собою границю відношення середнього числа подій, що надходять на елементарну ділянку часу $(t, t+\Delta t)$, до довжини цієї ділянки, коли остання прямує до нуля:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{m(t+\Delta t) - m(t)}{\Delta t} = m(t) , \qquad (9)$$

де $m(t)$ – математичне очікування числа подій на ділянці (*0, t*).

Такий потік називається нестаціонарним пуасонівським потоком. Для такого потоку число подій, що потрапляють на ділянку довжини τ з початком у точці t_0, підпорядковується закону Пуасона:

$$P_m(\tau, t_0) = \frac{a^m}{m!} e^{-a} (m = 0,1,2...) , \qquad (10)$$

де *a* – математичне очікування числа подій на ділянці від t_0 до $t_0 + \tau$, рівне:

$$a = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \lambda(t) \cdot dt . \qquad (11)$$

В даному випадку величина *a* залежить не тільки від довжини *τ* ділянки, але й від її розташування на осі *0t*.

Густина розподілу для нестаціонарного потоку подій визначається як:

$$f_{t_0}(t) = \lambda(t_0 + t) e^{-\int_{t_0}^{t_0+t} \lambda(t)dt} \quad (t > 0) . \qquad (12)$$

Не дивлячись на те, що структура нестаціонарного пуасонівського потоку дещо складніша, ніж найпростішого, він дуже зручний у практичних застосуваннях: головна властивість найпростішого потоку – відсутність наслідку – в ньому збережена. А саме, якщо ми зафіксуємо на осі *0t* довільну точку t_0, то закон розподілення $f_{t_0}(t)$ часу *T*, що визначає цю точку від найближчої по часу майбутньої події, не залежить від того, що відбувалося на проміжку часу, що передує t_0 та в самій точці t_0 (тобто, чи з'явилися раніше інші події і коли саме).

Ще один важливий параметр, який необхідно врахувати при описанні СМО на прикладі АЗСЕМ від ВДЕ, є час обслуговування електромобілів, який визначатиме продуктивність самої СМО. Час обслуговування СМО визначається зазвичай кількістю каналів *n* (кількість зарядних пристроїв на одній АЗСЕМ) та швидкодією кожного каналу (швидкістю заряду кожного ЗП). Як правило, час обслуговування однієї заявки позначають як $T_{об}$ і цей параметр є однією з найважливіших величин СМО.

При розгляді випадкової величини $T_{об}$ її виражають через функцію розподілу *G*(*t*).

$$G(t) = P(T_{об} < t) , \qquad (13)$$

а *g*(*t*) – щільність розподілу:

$$g(t) = G^{'}(t) . \qquad (14)$$

Для вирішення практичних задач особливий інтерес являє випадок, коли величина $T_{об}$ має показниковий розподіл:

$$g(t) = \mu e^{-\mu t} \text{ при } (t > 0) , \qquad (15)$$

де μ – величина, обернена середньому часу обслуговування однієї заявки:

$$\mu = \frac{1}{m_{t_{об}}} , \; m_{t_{об}} = M\left[T_{об}\right] . \qquad (16)$$

Роль, яку відіграє в ТМО показниковий закон розподілу величини $T_{об}$, пов'язана із властивістю даного закону. В даному випадку ця властивість (особливість) формулюється наступним чином: якщо в якийсь момент часу t_0 відбувається обслуговування заявки, то закон розподілу решти часу обслуговування не залежить від того, скільки часу обслуговування вже продовжувалось.

Показниковим законом добре описувати ті випадки, коли щільність розподілу часу обслуговування по тим або іншим причинам спадає при зростанні аргументу *t*. Наприклад, основна маса автомобілів заряджається швидко (достатньо заряду в акумуляторі, чи прогресивна технологія заряду, чи малі авто), рідше бувають затримки (дуже розряджені, великі авто, застарілі тощо), і дуже рідко – ті, що потребують складної тривалої процедури (переналаштування, дрібний ремонт тощо). Інший варіант – окремі зарядні пристрої працюють із замовниками, які потребують мало часу, тому їх пропускна можливість вища.

Показниковий закон не є універсальним законом розподілу часу обслуговування. Досить часто час обслуговування краще описується законом Ерланга. Однак пропускна здатність та інші характеристики СМО порівняно мало залежать від виду закону розподілу часу обслуговування, а залежать від його середнього значення $m_{t_{об}}$. Тому в ТМО частіше за все користуються припущенням, що час обслуговування розподілений за показниковим законом. Ця гіпотеза дозволяє сильно спростити математичний апарат, що застосовується для вирішення задач масового обслуговування, і в ряді випадків отримати прості аналітичні формули для характеристик пропускної здатності системи.

Висновки. 1. Розглянуто теоретичні основи стаціонарного та нестаціонарного процесів СМО на прикладі АЗСЕМ та отримані математичні вирази ймовірності настання випадкового процесу заряду електромобілів, що визначатимуть потребу в електричній енергії, отриманій від відновлюваних джерел.

2. На основі існуючих підходів до описання продуктивності СМО розглянуто час обслуговування заявки та обґрунтовано застосування показникового закону до його описання.

3. На основі отриманих результатів теоретичного описання випадкового процесу заряду електромобілів на АЗСЕМ необхідно розробити узагальнену математичну модель, що описуватиме роботу нашої системи з урахуванням специфіки роботи установок ВДЕ.

1. Інтернет ресурс – Global EV outlook 2017. Режим доступу: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook2017.pdf

2. Будько В. І. Аналіз доцільності впровадження зарядних станцій електромобілів на основі відновлюваних джерел енергії в україні / В. І. Будько // Відновлювана енергетика. – 2016. – № 4. – С. 32 – 41.

3. Будько В. І. Розроблення математичної моделі роботи автономної зарядної станції електромобілів від вітроелектричних установок // Відновлювана енергетика. – 2017. – №3. – с. 6-13.

4. Вентцель Е.С. Теория вероятности: Учеб. для вузов. – 7-е изд. стер. М.: Высшая школа. 2001, 575с.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ОЧЕРЕДЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ ОТ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

В.И.Будько, канд.техн.наук, доцент,
Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского", 03056, г. Киев, пр-т Победы, 37,
тел./факс +380442048191, e-mail: solar_budko@ukr.net,
Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, 02094, г. Киев, ул. Гната Хоткевича, 20А,
тел./факс +38-044-206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net
Orcid: 0000-0002-6219-4221

В работе рассмотрены вопросы определения вероятностных параметров процесса заряда электромобилей на автономных зарядных станциях на основе возобновляемых источников энергии. Предложено использование теории массового обслуживания для определения вероятности случайного наступления заряда электромобиля и времени заряда, которые прямо пропорционально зависят от остаточной емкости аккумуляторных батарей электромобиля. Отмечена необходимость проведения дальнейших научных исследований для разработки обобщенной математической модели, описания работы нашей системы с учетом специфики работы установок на основе возобновляемых источников энергии. Библ. 4, рис. 2.

Ключевые слова: *возобновляемые источники энергии, электромобиль, аккумуляторная батарея, автономная зарядная станция.*

REFERENSES

1. Online resource - Global EV outlook 2017. Access mode: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook2017.pdf

2. Budko V.I. Analisis of the feasibility of the introduction of electric vehicle charging stations based on renewable energy sources in Ukraine / V. I. Budko // Renewable energy. - 2016. - No. 4. - P. 32 - 41.

3. Budko V. I. Development of the mathematical model of operation of the autonomous charging station of electric vehicles from wind power plants / V. I. Budko // Renewable energy. - 2017 - №3. - P. 6-13.

4. Ventsel E.S. Probability Theory: Textbook. for high schools. - 7th ed. rub M .: Higher school. 2001, 575p.

SYNOPSES

Given the rapid development of the market for electric vehicles on the one hand [1] and the need to increase the network of gas stations (gas stations), including autonomous ones on the basis of RES on the other [2], the urgent question arises of the construction of a mathematical model of operation of the filling station on the basis of RES, which takes into account the specifics power generation from renewable sources, intermediate (buffer) energy storage and the random nature of electromotive charging processes (EV).

The possibility of using the theory of mass service for describing the function $\psi(c)$ is considered. The theory of mass service is intended to solve probabilistic problems related to the operation of mass-maintenance systems (MMS), which include the maintenance of EV in the charging station.

The theoretical bases of stationary and non-stationary MMS processes on the example of ACSEV are considered and mathematical expressions of the probability of accidental charge process of electric vehicles occurring, which determine the need for electric energy received from renewable sources, are obtained.

On the basis of existing approaches to describing the productivity of MMS, the time of service of the application is considered and the application of the indicator law to its description is substantiated.

Стаття надійшла до редакції 29.11.17
Остаточна версія 05.12.17