

Вплив похибки прогнозування швидкості вітру на вибір кількості акумуляторів системи балансування

Яременко^f М. К., ORCID [0000-0001-8782-1642](https://orcid.org/0000-0001-8782-1642)

Клен^s К. С., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)

Жуйков^s В. Я., д.т.н. проф., [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)

Кафедра електронних пристроїв та систем <https://eds.kpi.ua/>

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" ROR [00syn5v21](https://orcid.org/00syn5v21)

Київ, Україна

Анотація—У статті наведено методику врахування залежності кількості акумуляторних батарей, що призначені для балансування енергії у системах розосередженої генерації з вітрогенераторами, від похибки прогнозування параметрів вітрового потоку (швидкості вітру) та температури навколишнього середовища. Для опису співвідношення між розрядним струмом і ємністю у заданому діапазоні розрядних струмів використано формулу Пейкерта. Проведено розрахунок залежності коефіцієнта Пейкерта для свинцево-кислотної акумуляторної батареї HZB12-180FA. Наведено залежність зони керованої роботи акумулятора від похибки прогнозування швидкості вітру. Побудовано сімейство кривих залежності кількості акумуляторних батарей системи балансування від температури навколишнього середовища та похибки прогнозування швидкості вітру. Показано, що зі збільшенням похибки прогнозування швидкості вітру з 0 до 15% та зниженні температури з 20°C до -20°C кількість акумуляторних батарей має бути збільшена приблизно у 2,81 рази.

Ключові слова — акумуляторні батареї; формула Пейкерта; прогнозування; зона керованої роботи акумулятора.

I. ВСТУП

У системі балансування енергії систем розосередженої генерації з ВДЕ (відновлюваними джерелами енергії), зокрема з вітрогенераторами, ефективне використання акумуляторної батареї системи балансування залежить від режимів заряду-розряду, які реалізуються у процесі експлуатації [1]. Для ефективного використання у системі балансування енергії акумуляторна батарея має знаходитися у стані керованості, спостережуваності та ідентифікованості [2-3], що забезпечується датчиками струму (А), напруги (В) та ємності (А·год) і відповідними зв'язками системи. Розширення зони керованої роботи забезпечується зменшенням тривалості повного розряду/заряду батареї. При знаходженні батареї в проміжному стані можливо керувати балансом енергії в граничних режимах. Оскільки для невеликих ВДЕ використовуються свинцево-кислотні акумуляторні батареї, у зв'язку з низькою ціною та простотою обслуговування [4], то доцільно оцінити енергію, яка може бути витрачена на заряд акумуляторної батареї у системі прогнозного керування ВДЕ з метою розширення зони керованої роботи. Тому актуальним є завдання вибору ємності батареї або кількості акумуляторних батарей, що забезпечить заданий діапазон керування (зону керованої роботи), у залежності від характеристик акумуляторної батареї і точності

вимірювання швидкості вітру та температури навколишнього середовища.

II. ФОРМУЛА ПЕЙКЕРТА

Врахуванню залежності ємності батареї від струму розряду присвячені роботи, що описані емпіричними співвідношеннями: закон Пейкерта [5], рівняння Лібенова [6], рівняння Агуфа [7]; врахуванню зміни напруги на клеммах акумуляторної батареї при розряді постійним струмом присвячені наступні емпіричні залежності: рівняння Коровіна-Скундіна [8], рівняння Хаскіної-Даниленко [9], рівняння Шеферда [10], рівняння Романова [11], [12], інтеграл імовірностей [13-14], рівняння залежності ємності від струму розряду по глибині пористого електроду [15-18] та інші. Усе перераховане вище може бути використано у цілях вирішення поставленої задачі, при цьому закон Пейкерта є основним.

В. Пейкертом в 1897 році представлена формула залежності ємності від струму розряду у свинцево-кислотних акумуляторах. Закон Пейкерта описує співвідношення між розрядним струмом (нормованим до деякого номінального струму) і ємністю (нормованою до деякого номінального значення) у заданому діапазоні розрядних струмів [19]:

$$C_{II} = t^k \cdot t,$$



де C_{II} – ємність Пейкерта, k – константа Пейкерта ($k = 1, 2, \dots, 7$), i – струм розряду, t – час розряду.

Ємність Пейкерта C_{II} та ємність акумуляторної батареї C при заданому часі розряду t пов'язані залежністю:

$$\frac{t_{II}}{t} = \frac{C_{II}}{C},$$

де t_{II} – час розряду, що відповідає ємності C_{II} .

Загальний вигляд залежності ємності батареї від розрядного струму і для свинцево-кислотного акумулятора показаний на рис.1 [20].

Константа (коефіцієнт) Пейкерта розраховується за формулою:

$$k = \log \frac{C_1 \cdot t_2}{C_2 \cdot t_1}, \quad (1)$$

де C_1 і C_2 – величини ємності, на які зменшується вихідна ємність за час розряду t_1 і t_2 відповідно.

Значення константи має постійне значення для однієї і тієї ж акумуляторної батареї і залежить не тільки від типу акумулятора, але й від його конструкції та змінюється при старінні батареї.

Закон Пейкерта має обмеження, серед яких:

- 1) оскільки закон Пейкерта був розроблений для свинцево-кислотних акумуляторів, а літій-іонні батареї мають тенденцію до самонагріву під час швидкого заряду, і, згідно з рівнянням Нернста [21], напруга батареї буде збільшуватися зі збільшенням температури, то літій-іонна батарея може мати приблизно однакову ємність при розрядних струмах 5 А та 50 А, що робить неможливим використання закону Пейкерта в його початковому вигляді; джерело [22] наводить закон Пейкерта для нікель-кадмієвих батарей. Тому надалі розглядається застосування для свинцево-кислотних батарей;
- 2) швидкість саморозряду не враховується;

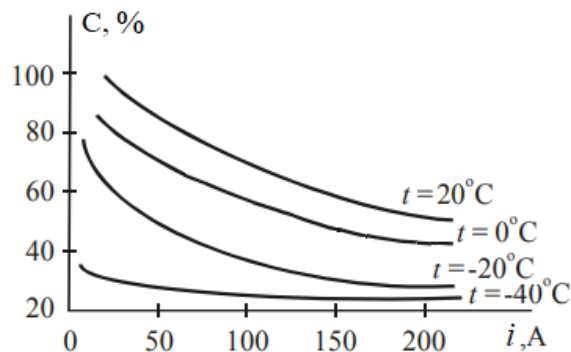


Рис. 1. Загальний вигляд залежності ємності батареї у відсотках відносно максимальної від розрядного струму [20]

- 3) вплив температури на батарею не враховується, тому в подальшому буде врахований окремо;
- 4) вік батареї не враховується, однак слід зауважити, що коефіцієнт Пейкерта збільшується з віком батареї;
- 5) врахування конструктивних властивостей акумуляторів зосереджується у єдиному параметрі – константі Пейкерта, яка не є константою для різних акумуляторів і розраховується окремо для кожного типу акумуляторів.

III. ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ГЛИБИНИ РОЗРЯДУ

Акумуляторні батареї загального призначення не рекомендується розряджати глибше 45%, глибокорозрядні батареї глибше 75% [23]. На рис. 2 [24] наведено зміну терміну служби акумуляторної батареї у залежності від циклів заряду-розряду. При збільшенні глибини розряду кількість циклів суттєво зменшується, що впливає на величину коефіцієнту Пейкерта.

Вплив глибини заряду-розряду на ємність батареї та число її циклів, а також крива розрядного струму наводяться виробником, наприклад [25]. Типові акумуляторні батареї рекомендуються розряджати постійним струмом одного рівня. При відсутності інформації, наданої виробником, рівень рекомендується вибирати пропорційним струму заряду.

З врахуванням глибини заряду, кількість акумуляторних батарей може бути вирахована наступним чином [26]:

$$n \geq k \sqrt{\frac{t}{D \cdot \tau}} \cdot \left(\frac{i \cdot \tau}{C_a} \right), \quad (2)$$

де n – кількість батарей, що забезпечує роботу при тривалості t та струму i з глибиною розряду D при умові, що батарея була заряджена до 100% ємності однієї акумуляторної батареї C_a при часі повного розряду батареї τ .

Кількість циклів розряду має вплив на ємність, що відповідає часу розряду t_1 і t_2 .

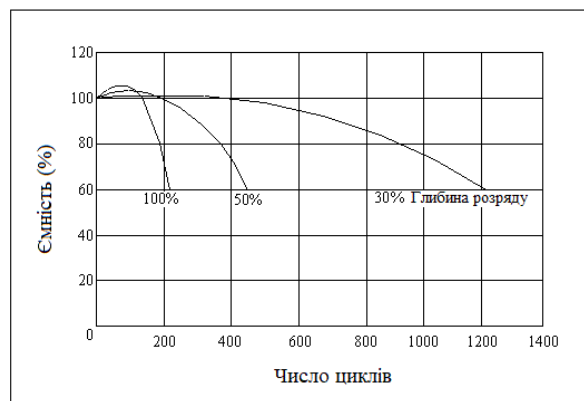


Рис. 2. Залежність ємності акумуляторної батареї від терміну служби в циклах заряду-розряду [24]

IV. ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ

Врахуємо залежність ємності акумулятора від температури:

$$C_{II}(T) = i^{k(T)} \cdot t, \tag{3}$$

де T – температура навколишнього середовища.

При цьому і ємність Пейкерта, і коефіцієнт Пейкерта залежать від температури, оскільки коефіцієнт Пейкерта залежить від величини, на яку зменшується вихідна ємність:

$$k(T) = \log \frac{C_1(T)}{C_2(T)} \cdot \frac{t_2}{t_1} \tag{4}$$

Тоді кількість акумуляторних батарей:

$$n(T) \geq k(T) \sqrt{\frac{t}{D \cdot \tau}} \cdot \left(\frac{i \cdot \tau}{C_a(T)} \right) \tag{5}$$

Для прикладу оберемо акумуляторну батарею серії HZB12-180FA виробника HAZE Battery Company Ltd [27].

У роботах [28-30] врахування температури відбувається на основі емпіричних залежностей. На рис. 3 [27] наведено сімейство емпіричних графіків залежності температура-ємність в залежності від струму розряду для заданої акумуляторної батареї.

Для подальших розрахунків необхідно провести апроксимацію емпіричної залежності (рис. 3). Апроксимація проводиться поліномами 3-го порядку. Графічні результати апроксимації наведені на рис. 4.

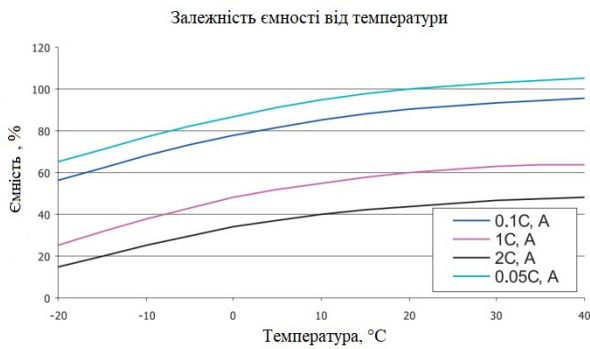


Рис. 3. Графіки залежності ємності від температури при різних струмах розряду акумуляторної батареї HZB12-180FA [27]

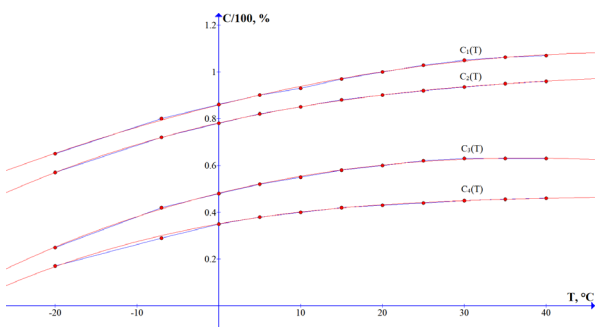


Рис. 4. Апроксимовані емпіричні залежності з рис. 3

Аналітичні вирази апроксимації мають наступний вигляд:

$$C_1(T) = C_{ном}(i = 0,05C) \cdot (-0,07 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 - 80,1 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 8,7 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,86),$$

$$C_2(T) = C_{ном}(i = 0,1C) \cdot (0,67 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 - 115 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 8 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,78),$$

$$C_3(T) = C_{ном}(i = 1C) \cdot (0,4 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 - 136,8 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 8,6 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,48),$$

$$C_4(T) = C_{ном}(i = 2C) \cdot (0,97 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 - 126,3 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 6,2 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,35),$$

де $C_{ном}$ – номінальна ємність при деякому постійному струмі розряду i та температурі $20^\circ C$.

Для розрахунку коефіцієнта Пейкерта з врахуванням залежностей $C(T)$, виберемо наступні вихідні дані (при температурі $T = 20^\circ C$ за час розряду t_i ємність акумуляторної батареї зменшується на значення C_i при струмі i_i): $t_1 = 0,5 год$, $C_1 = 98,9 A \cdot год$, $i_1 = 198 A \approx 2C$, $t_2 = 10 год$, $C_2 = 179 A \cdot год$, $i_2 = 17,9 A = 0,1C$, мінімальна напруга при цьому рівна $U_{min} = 1,85 B$, максимальна ємність, яку можна відібрати, – $C_{max} = 202 A \cdot год$. Дані розрахунку коефіцієнта Пейкерта наведені у табл. 1, а графік залежності коефіцієнта Пейкерта – на рис. 5.

ТАБЛИЦЯ 1 КОЕФІЦІЄНТ ПЕЙКЕРТА

Температура T	$-20^\circ C$	$-7^\circ C$	$0^\circ C$	$5^\circ C$	$10^\circ C$
$k(T)$	2,54	1,96	1,87	1,84	1,81
Температура T	$15^\circ C$	$20^\circ C$	$25^\circ C$	$30^\circ C$	$40^\circ C$
$k(T)$	1,80	1,80	1,79	1,80	1,80

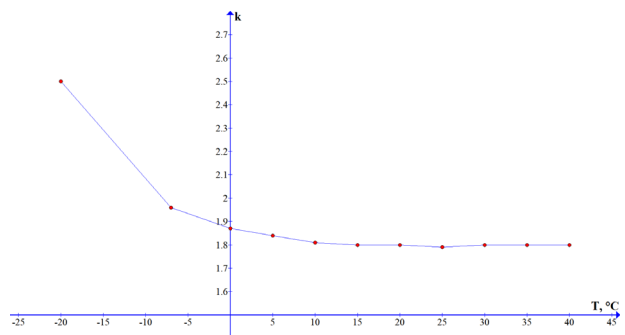


Рис. 5. Графік залежності коефіцієнта Пейкерта від температури



Таким чином, врахування температури за емпіричними залежностями дозволяє точніше розрахувати значення коефіцієнту Пейкерта.

V. ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ

Потужність на виході вітрогенератора описується наступною залежністю від швидкості вітру [31]:

$$P = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3, \quad (6)$$

де v – швидкість вітру, ρ – щільність повітря, C_p – коефіцієнт використання вітру, $A = \frac{\pi d^2}{4}$, d – діаметр вітроколеса. Наприклад, для вітрогенератора СВ-3,1 [32], за умови, що щільність повітря $\rho = 1,25$, а коефіцієнт використання вітру $C_p = 0,5$, потужність на виході дорівнює $P = 3,77 \cdot v^3$.

Для оцінки рівня енергії для заряду/розряду накопичувача необхідно розрахувати величину потужності на виході вітрогенератора за прогнозованими значеннями швидкості вітру. Якщо умовно прийняти, що швидкість вітру $v = 1$ н.о. (нормована одиниця), то потужність, що може бути отримана від вітрогенератора $P = 3,77$ н.о. Наприклад, якщо похибка прогнозування складає $\Delta v = 0,85$ н.о., тобто, потужність $P = 2,32$ н.о., і похибка розрахунку потужності складає $\delta_P = 38\%$:

$$\begin{aligned} \delta_P &= \left(1 - \frac{P(\Delta v)}{P(v)}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{\Delta v^3}{v^3}\right) \cdot 100\% = \\ &= \left(1 - \frac{0,85^3}{1^3}\right) \cdot 100\% \approx 38\% \end{aligned}$$

Це означає, що у межах $\pm 31\%$ ($(100 - 38) / 2 = 31$) від середнього значення енергії можна керувати заряджати або розряджати накопичувач (рис. 6).

При досягненні похибки прогнозування швидкості вітру значення у 20%, зона керованої роботи накопичувача зникає. Якщо необхідно забезпечити керовану область роботи накопичувача у 80%, то потрібно, щоб похибка прогнозування швидкості вітру не перевищувала 7%.



Рис. 6. Зона керованої роботи накопичувача

Для врахування впливу температури та похибки прогнозування на кількість акумуляторів задамося наступною формулою:

$$\delta n(T) = n(T) \cdot \delta_P(T), \quad (7)$$

де $n(T)$ – кількість акумуляторів з врахуванням температури, $\delta_P(T)$ – кількість акумуляторів з врахуванням похибки прогнозування.

Враховуючи, що при збільшенні зони керованої роботи зменшується δ_P і необхідна кількість акумуляторних батарей, то:

$$\delta_P(T) = \frac{1}{1 - \delta_P},$$

Таким чином, для розрахунку кількості акумуляторних батарей, потрібно враховувати глибину розряду, температуру та похибку вимірювання [33].

VI. РОЗРАХУНОК КІЛЬКОСТІ БАТАРЕЙ У ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ПАРАМЕТРІВ

Підставляючи у формулу (5) значення вихідних даних: час розряду $t = 10 \text{ год}$, струм розряду $i = 17,9 \text{ А}$, номінальна ємність $C_{ном} = 179 \text{ А} \cdot \text{год}$, необхідний час роботи акумулятора $\tau = 20 \text{ год}$, глибина розряду

$$D = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{202 - (202 - 179)}{202} = 88,6\%,$$

отримаємо залежність кількості акумуляторних батарей від температури та коефіцієнту Пейкерта:

$$\begin{aligned} n(T) &\geq k(T) \sqrt{\frac{t}{D \cdot \tau}} \cdot \left(\frac{i \cdot \tau}{C_a(T)}\right) = k(T) \sqrt{\frac{10}{0,886 \cdot 20}} \cdot \left(\frac{17,9 \cdot 20}{C_a(T)}\right) = \\ &= k(T) \sqrt{0,56} \cdot \left(\frac{358}{C_a(T)}\right). \end{aligned}$$

Коефіцієнт Пейкерта у свою чергу також залежить від температури. У табл. 2 наведено значення коефіцієнту Пейкерта для конкретних температур, а графік залежності кількості необхідних акумуляторів від температури наведено на рис. 7.

Виконавши інтерполяцію поліномом 3-го степеня, можна знайти кількість акумуляторних батарей:

$$n(T) = -9,8 \cdot 10^{-6} T^3 + 0,79 \cdot 10^{-3} T^2 - 0,025 T + 1,89.$$

ТАБЛИЦЯ 2 ЗАЛЕЖНІСТЬ КІЛЬКОСТІ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ

Температура T	-20°C	-7°C	0°C	5°C	10°C
$n(T)$	2,8	2,08	1,89	1,79	1,72
Температура T	15°C	20°C	25°C	30°C	40°C
$n(T)$	1,66	1,62	1,58	1,56	1,52



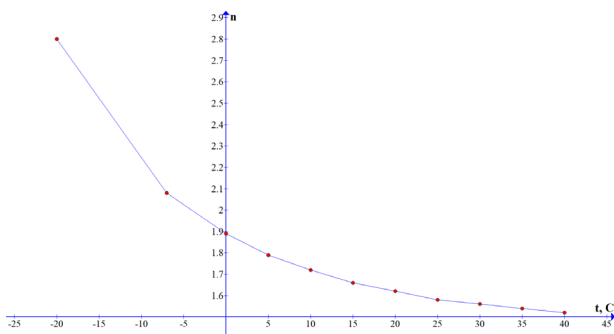


Рис. 7. Графік залежності кількості необхідних акумуляторів від температури

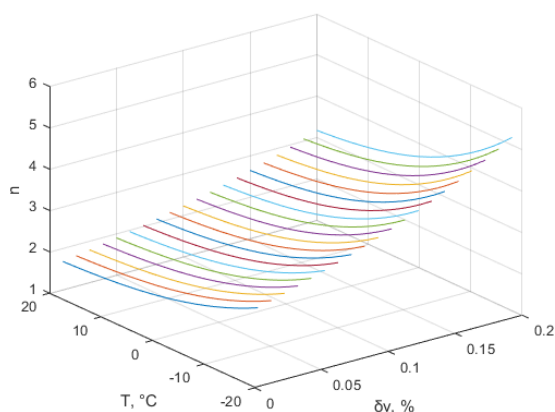


Рис. 8. Сімейство кривих залежності кількості акумуляторних батарей від температури навколишнього середовища та похибки прогнозування швидкості вітру

ТАБЛИЦЯ 3 Залежності кількості акумуляторів від похибки прогнозування швидкості вітру при температурі -20°C

δ_v	0%	5%	10%	15%
δ_P	100%	86%	73%	38%
$\delta n(T)$	2,8	3,27	3,84	4,56

ТАБЛИЦЯ 4 Залежності кількості акумуляторів від похибки прогнозування швидкості вітру при температурі 0°C

δ_v	0%	5%	10%	15%
δ_P	100%	86%	73%	38%
$\delta n(T)$	1,89	2,21	2,59	3,08

ТАБЛИЦЯ 5 Залежності кількості акумуляторів від похибки прогнозування швидкості вітру при температурі 20°C

δ_v	0%	5%	10%	15%
δ_P	100%	86%	73%	38%
$\delta n(T)$	1,62	1,89	2,22	2,64

В табл. 3 - 5 наведено залежності кількості акумуляторних батарей від похибки прогнозування швидкості вітру при температурах -20°C (табл. 3), 0°C (табл. 4), 20°C (табл. 5).

На рис. 8 показано сімейство кривих залежності кількості n акумуляторних батарей системи балансування від температури T навколишнього середовища та похибки прогнозування швидкості вітру δv .

Наприклад, при збільшенні похибки прогнозування з 10% до 15% кількість акумуляторних батарей має бути збільшена в 1,17 разів, а при зниженні температури з 20°C до 0°C кількість акумуляторних батарей має бути збільшена в 1,48 разів.

ВИСНОВКИ

У роботі показано вплив величини похибки прогнозування швидкості вітру та робочої температури на кількість акумуляторів системи балансування. Методику розрахунку необхідної кількості акумуляторів наведено на прикладі свинцево-кислотних акумуляторів серії HZB12-180FA виробника HAZE Battery Company Ltd. Показано, що зі збільшенням похибки прогнозування та зі зниженням температури кількість акумуляторів, що необхідна для підтримання тієї ж самої керованої зони роботи акумулятора, збільшується: при збільшенні похибки прогнозування з 10% до 15% кількість акумуляторних батарей має бути збільшена в 1,17 разів, а при зниженні температури з 20°C до 0°C – збільшена в 1,48 разів. Це необхідно враховувати при проектуванні системи балансування ВДЕ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] D. Midlton and R. Paredes, "Obsluzhivanie batarey dlya avtonomnykh fotoelektricheskikh sistem." [Online]. Available: https://invertory.ru/help/VIE_RE.pdf [Accessed : 10 July 2021].
- [2] V. I. Korniyenko, O. Y. Husyev, O. V. Herasina, and V. P. Shchokin, Teoriya system keruvannya: pidruchnyk. Dnipro: Nats. hirn. un-t., 2017. ISBN 978-966-350-650-0
- [3] K. Shen and K. A. Neusylin, "Study of the Criteria for the Degrees of Observability, Controllability and Identifiability of the Linear Dynamical Systems," МЕНАТРОНИКА, Avtom. Upr., vol. 17, no. 11, pp. 723–731, Nov. 2016 DOI: [10.17587/mau.17.723-731](https://doi.org/10.17587/mau.17.723-731).
- [4] L. YAO, B. YANG, H. CUI, J. ZHUANG, J. YE, and J. XUE, "Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems," J. Mod. Power Syst. Clean Energy, vol. 4, no. 4, pp. 519–528, Oct. 2016, DOI: [10.1007/s40565-016-0248-x](https://doi.org/10.1007/s40565-016-0248-x).
- [5] W. Peukert, "About the dependence of the capacity on the discharge current in lead-acid batteries," Elektrotechnische Zeitschrift, vol. 18, p. 289, 1897.
- [6] C. Liebenow, "Über den Elektrischen Widerstand der Metalle," Zeitschrift für Elektrotechnik und Elektrochemie, vol. 4, no. 8, pp. 201–211, Oct. 1897 DOI: [10.1002/bbpc.18970040802](https://doi.org/10.1002/bbpc.18970040802).
- [7] I. A. Aguf, "Nekotorye voprosy teorii poristogo elektroda i protsessy, protekayushchie v svintsovom akkumulyatore," in Sb. rabot po HIT. L., Leningrad: Energiya, 1968, pp. 87–100.
- [8] N. V. Korovin and A. M. Skundin, Himicheskoe istochniki toka: spravochnik. Moskva: Mosk. energ. in-ta, 2003.
- [9] S. M. Haskina and I. F. Danilenko, "Matematicheskoe modelirovanie razryadnykh krivykh himicheskikh istochnikov toka," in Sb. rabot po himicheskim istochnikam toka, Energoatomizdat, 1981, pp. 34–38.
- [10] C. M. Shepherd, "Design of Primary and Secondary Cells—Part 2. An Equation Describing Battery Discharge.," Journal of Electrochemical Society, vol. 112, p. 657, 1965.
- [11] V. V. Tenkovtsev and B. I. Tsenter, Osnovyi teorii ekspluatatsii germetichnykh NK akkumulyatorov. Leningrad: Energoatomizdat, 1985.



- [12] V. V. Romanov and Y. M. Hashev, *Himicheskie istochniki toka*. Moskva: Sov. radio, 1978.
- [13] I. A. Galushkin, N. E. Yazvinskaya, N. N. Galushkina, "Analiz ispolzovaniya empiricheskikh sootnosheniy dlya otsenki emkosti nikelkadmiyevykh akkumulyatorov firmy SAFT dlitel'nogo rezhima razryada," *Fundam. Issled.*, vol. 11, no. 5, pp. 1180–1184, 2012.
- [14] N. E. Galushkin, N. N. Yazvinskaya, and D. N. Galushkin, "Kompyuternoe modelirovaniye zavisimosti emkosti nikelkadmiyevykh akkumulyatorov firmy SAFT srednego rezhima razryada ot tokov razryada," *Izv. vuzov Sev.-Kavkaz. Reg. Teh. Nauk.*, vol. 6, pp. 123–126, 2012.
- [15] N. E. Galushkin and Y. D. Kudryavtsev, "Issledovanie glubiny proniknoveniya elektrohimicheskogo protsessa v poristykh elektrodah," *Elektrokhimiya*, vol. 30, no. 3, p. 382–387, 1994.
- [16] N. E. Galushkin, "Modelirovaniye protsessov raspredeleniya v poristom elektrode pri polyarizatsii asimmetrichnyim peremennym tokom," 1989.
- [17] Y. D. Kudryavtsev and N. E. Galushkin, "Raspredeleniye toka po glubine poristogo oksidno-nikelevogo elektroda," *Elektrokhimiya*, vol. 33, no. 5, pp. 605–606, 1997.
- [18] N. E. Galushkin and L. N. Fesenko, "Modelirovaniye protsessa razlozheniya serovodoroda v ob'emnom elektrofiltre," *Elektrokhimiya*, vol. 33, no. 8, pp. 924–929, 1997.
- [19] Peukert's law [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Peukert%27s_law [Accessed Jul. 10, 2021].
- [20] "Faktyory, vliyayushchie na emkost' akkumulyatornoj batarei" [Online]. Available: <https://studopedia.org/index.php?vol=1&post=1677> [Accessed: 28 July 2021].
- [21] "Nernst equation" [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Nernst_equation [Accessed: 28 July 2021].
- [22] N. E. Galushkin, "Peukert's Generalized Equation Taking into Account the Temperature for Nickel-Cadmium Batteries," *Int. J. Electrochem. Sci.*, pp. 2874–2882, Mar. 2019, DOI: 10.20964/2019.03.76
- [23] "Osnovnyye karakteristiki akkumulyatorov." [Online]. Available: <https://www.solarhome.ru/basics/bas-batteries/ab-params.htm> [Accessed: 10 July 2021].
- [24] "Ekspluatatsiya gelevykh akkumulyatorov", [Online]. Available: <https://realsolar.ru/article/blog-akkumbattery/ekspluatatsiya-gelevykh-akkumulyatorov/> [Accessed: 24 June 2021].
- [25] OOO "PAUERKONTsEPT", «Neobsluzhivaemye svintsovo-kislotnyye akkumulyatoryi Ventura VG.», [Online]. Available: http://www.powerconcept.ru/upload/iblock/65b/Ventura_VG_ins_tr_po_ekspl_low.pdf [Accessed: 24 June 2021].
- [26] K. S. Morenko, S. A. Morenko, and G. V. Stepanchuk, *Dvuhrotornyyi vtrogenerator s upravlyaemyim uglom M79 ataki lopasti: monografiya*. Zernograd: Azovo-Chernomorskiy inzhenernyy institut FGBOU VO Donskoy GAU, 2019. ISBN 978-5-91833-183-5
- [27] HAZE Battery Company Ltd, «HAZE catalogue 2014,» 2014. [Online]. Available: https://inventory.ru/help/Каталог_HAZE_2014_fin_18.11.148s.pdf [Accessed: 10 July 2021].
- [28] H. Yang, "Dependence of Supercapacitor Peukert Constant on Voltage, Aging, and Temperature," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 10, pp. 9978–9992, Oct. 2019, DOI: 10.1109/TPEL.2018.2890392
- [29] G. Wu, R. Lu, C. Zhu, and C. C. Chan, "Apply a Piece-wise Peukert's Equation with Temperature Correction Factor to NiMH Battery State of Charge Estimation," *J. Asian Electr. Veh.*, vol. 8, no. 2, pp. 1419–1423, 2010, DOI: 10.4130/jaev.8.1419
- [30] Q. Zhang, N. Cui, Y. Shang, B. Duan, and C. Zhang, "An improved Peukert battery model of nonlinear capacity considering temperature effect," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 31, pp. 665–669, 2018, DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.10.154
- [31] A. M. Oleynikov, V. S. Krivtsov, and A. I. Yakovlev, *Neischerpaemaya energiya. Kn. 1. Vetroelektrogeneratoryi. Harkov: Natsionalnyy aerokosmicheskyy universitet "Kharkovskiy avtsionnyy institut"*, 2003.
- [32] MegaWatt Technology - Wind turbine SV-3.1. [Online] Available: <https://megawatt-technology.all.biz/vtrogenerator-sv-3-1-g17708723>
- [33] K. S. Klen, M. K. Yaremenko, and V. Y. Zhuykov, "THE INFLUENCE OF THE WIND SPEED PREDICTION ERROR ON THE SIZE OF THE STORAGE CONTROLLED OPERATION ZONE IN THE SYSTEM WITH THE WIND GENERATOR," *Pr. Elektroin. Nac. Akad. Nauk Ukr. Inst.*, vol. 2020, no. 57, pp. 35–41, Dec. 2020, DOI: 10.15407/publishing2020.57.035.

Надійшла до редакції 13 липня 2021 р.

Прийнята до друку 30 вересня 2021 р.



Influence of Wind Speed Forecasting Error on the Choice of the Number of Balancing System Batteries

M. K. Yaremenko^f, ORCID [0000-0001-8782-1642](https://orcid.org/0000-0001-8782-1642)

K. S. Klen^s, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)

V. Ya. Zhuikov^s, Dr.Sc.(Eng.) Prof., [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)

Department of Electronic Devices and Systems <https://eds.kpi.ua/>

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)

Kyiv, Ukraine

Abstract—In the energy balancing system of distributed generation systems with RES (renewable energy sources), in particular with wind turbines, the effective use of the battery of the balancing system depends on the charge-discharge modes that are implemented. To be effectively used in an energy balancing system, the RES control system should coordinate the processes of energy generation and accumulation in the system through the implementation of operational management with forecasting. Depending on the characteristics of the battery and the accuracy of the measurement or prediction of the energy the battery capacity (or the number of batteries) that will provide the specified control range (controlled operation area) needs to be chosen.

Empirical relations (equations) devoted to the dependence of the battery capacity on the discharge current and to the change of voltage at the terminals of the battery during direct current discharge were listed. Among the equations Peukert's law was chosen. A general view of the dependence of the battery capacity on the discharge current was shown. The formula for Peukert's constant (coefficient) was given. 5 Peukert's law limitations were listed including the fact that the effect of temperature on the battery is not taken into account.

The influence of depth charge-discharge and the number of discharge cycles on the capacitance was shown. In the process of using the battery and increasing the number of charge-discharge cycles, the capacity decreases.

Peukert's formula was extended to be influenced by temperature: both the Peukert's capacity and the Peukert's coefficient depend on the temperature because the Peukert's coefficient depends on the capacity.

For further calculations, a rechargeable battery HZB12-180FA from manufacturer HAZE Battery Company Ltd was chosen.

The temperature was taken into account by empirical dependences from the manufacturer and then they were approximated by 3rd order polynomials. Graphical results of the approximation were shown.

The formula of dependency between the power of the wind turbine and the wind speed was shown.

The connection between wind speed prediction error, amount of power that could not be obtained because of that and the number of batteries that would provide the specified control range (controlled operation area) was shown.

Thus, for calculation of the number of batteries the depth of discharge, temperature and prediction (measurement) error were taken into account. Example dependences of the number of batteries on the wind speed error at temperatures of -20 °C, 0 °C and 20 °C were shown. Curves of dependence of the number of batteries of the balancing system on the ambient temperature and the error of wind speed forecasting was constructed. As an example, when the prediction error increases from 10% to 15%, the number of batteries needs to be increased by 1.17 times, and when the temperature decreases from 20 °C to 0 °C, the number of batteries needs to be increased by 1.48 times.

The results of the work can be used at the stage of planning the wind turbine when choosing the number and capacity of the batteries to be installed. Possible areas of further research are using Peukert's formulas, generalized for other or different types of batteries, using other formulas, except for Peukert's one, for taking into account the dependence of battery capacity on discharge current, using a non-empirical approach to include dependency on temperature.

Keywords — rechargeable batteries; Peukert's equation; forecasting; area of controlled work of battery.

