

ВПЛИВ СТАТИСТИЧНОГО ХАРАКТЕРУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ НА РІВЕНЬ ЗАРЯДУ НАКОПИЧУВАЧА

К.С. Осипенко*, канд.техн.наук, В.Я. Жуйков**, докт.техн.наук
 Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,
 пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.
 E-mail: ekateryna.osypenko@gmail.com

Представлено спрощену еквівалентну схему системи з вітрогенератором. Зазначено, що для реалізації умови відбору максимальної енергії необхідно визначити значення струму заряду накопичувача, мінімальну енергію заряду та максимальне значення ємності, які залежать від статистичних характеристик енергії на виході вітрогенератора та навантаження. Наведено формули для розрахунку цих характеристик. Показано, що застосування додаткового накопичувача, який реалізує детерміновану зміну величини енергії навантаження, дає змогу зменшити ємність основного накопичувача. Бібл. 8, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: вітрогенератор, відбір максимальної енергії, накопичувач, випадкові процеси.

Вступ. Одним із факторів зміни парадигми розвитку та керування енергосистемою України є масштабне впровадження електростанцій, що використовують відновлювані джерела енергії, частка виробленої електроенергії яких складає близько 2% від загальної [1]. За наближеними оцінками встановлена потужність відновлюваних джерел в Україні сягає 10 ГВт, з яких близько 420 МВт припадає на вітроелектростанції. Стохастична зміна рівнів енергії на виході вітрогенераторів та навантаження вказує на необхідність розробки системи керування, яка б враховувала цей випадковий характер і забезпечувала роботу вітрогенераторів у режимі відбору максимальної енергії [2]. Включення в систему розосередженої генерації накопичувача електричної енергії забезпечує реалізацію умови відбору максимальної енергії від вітрогенератора шляхом виконання умови рівності внутрішнього опору еквівалентного джерела та опору навантаження [3]. **Метою роботи** є оцінка рівня мінімального заряду накопичувача у системі та його необхідної ємності для забезпечення неперервної роботи навантаження з врахуванням стохастичного характеру параметрів вітрогенераторів та навантажень.

Спрощена еквівалентна схема системи з вітрогенератором. У зв'язку з тим, що потік первинної енергії у системах розосередженої генерації з вітрогенераторами є нерівномірним, для компенсації цієї нерівномірності накопичувач електроенергії з пристроєм заряду/розряду зазвичай інтегрується в систему (рис. 1, накопичувач H_1) [4], однак окремі навантаження або групи навантажень підключаються сумісно з джерелами безперебійного живлення, які містять накопичувачі (H_2 – еквівалентний накопичувач джерел безперебійного живлення). Тому у загальній системі може бути присутній як один, так і декілька накопичувачів, кількість яких

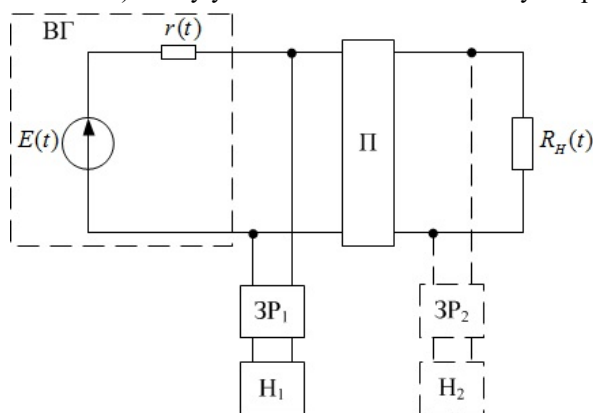


Рис. 1

обумовлюється потребами споживачів. На рис. 1 показано спрощену еквівалентну схему системи з вітрогенератором, де $E(t)$ – еквівалентне джерело напруги; $r(t)$ – внутрішній опір вітрогенератора, який враховує еквівалентний аеродинамічний опір лопатей та гондоли; H_1 та H_2 – накопичувачі електричної енергії з пристроями заряду/розряду $ЗР_1$ та $ЗР_2$; Π – перетворювач для стабілізації напруги на виході еквівалентного джерела вітрогенератора, що забезпечує відбір максимальної енергії; $R_H(t)$ – опір навантаження. При зміні потоку первинної енергії на вході вітрогенератора змінюється як напруга, так і внутрішній опір еквівалентного джерела, які використовуються при розрахунку умов відбору максимальної енергії. Зокрема, цю зміну можна вважати

лінійною [5]. При врахуванні лінійної зміни напруги $E(t)$ і внутрішнього опору $r(t)$ еквівалентного джерела перетворювач спільно з пристроєм заряду/розряду $3P_1$ накопичувача H_1 формують струм у вихідному колі вітрогенератора за виразом [5]

$$I(t) = k_I \left[t - \sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\sqrt{\beta}t) / 2\sqrt{\beta} \right]$$

незалежно від характеру навантаження, де k_I , $[A/c]$ – коефіцієнт масштабування, який чисельно дорівнює тангенсу кута нахилу при лінійній зміні струму у часі; β , $[1/c^2]$ – величина, обернена квадрату сталої часу, і визначається дисперсією гаусівського перехідного процесу.

Для забезпечення формування такого струму необхідно реалізувати упереджувальне керування потужністю $P_{BG}(t)$ на виході вітрогенератора в наступний t_{k+1} момент часу, для чого необхідно визначити в t_k момент часу потужність $P_{BG}(t_{k+1})$ за формулою [6]

$$P_{BG}(t_{k+1}) = P_{BG}(t_k) + \Delta P_{BG}(t_{k+1}).$$

За розрахованими значеннями $P_{BG}(t_{k+1})$ визначаються величини $E(t_{k+1}) = k_E t_{k+1}$ та $r(t_{k+1}) = k_r t_{k+1}$, k_E та k_r – коефіцієнти масштабування з розмірностями $[B/c]$ та $[Om/c]$ відповідно.

Умова відбору максимальної енергії $R_H(t) = r(t)$ при різних значеннях опору навантаження $R_H(t)$ забезпечується шляхом керування струмом заряду накопичувача H_1 . Величини струму заряду, мінімальної енергії заряду та необхідної ємності накопичувача залежать від статистичних характеристик розподілу потужності на виході вітрогенератора та навантаження: математичних очікувань $M[P_{BG}(t)]$ та $M[P_H(t)]$; дисперсій $D[P_{BG}(t)]$ та $D[P_H(t)]$; та кореляційного моменту $K_{BG, H}$ між потужностями на виході вітрогенератора та навантаження.

Визначення статистичних характеристик енергії вітрогенератора. Оскільки швидкість вітрового потоку є випадковою величиною в кожний момент часу, то потужність на виході вітрогенератора $P_{BG}(t)$ вважатимемо випадковою функцією з певним набором випадкових реалізацій $p_{BG_i}(t)$. Для випадкової функції статистичні характеристики є випадковими величинами, які залежать від часу і визначаються наступним чином:

- 1) математичне очікування $M[P_{BG}(t_k)] = \sum_{i=1}^n p_{BG_i}(t_k) / n$;
- 2) дисперсія $D[P_{BG}(t_k)] = \sum_{i=1}^n [p_{BG_i}(t_k) - M[P_{BG}(t_k)]]^2 / (n-1)$;
- 3) кореляційний момент $K_{BG}(t_k, t_l) = \sum_{i=1}^n [p_{BG_i}(t_k) - M[P_{BG}(t_k)]] [p_{BG_i}(t_l) - M[P_{BG}(t_l)]] / (n-1)$,

за значеннями якого визначається максимальний інтервал $(t_l - t_k)$, на якому функція вважається стаціонарною; n – кількість значень випадкової функції.

Як приклад авторами розраховувалися математичне очікування, дисперсія та кореляційний момент потужності $P_{BG}(t)$ на виході вітрогенератора WindElectric WE10 потужністю 10 кВт щодня у грудні 2016 року ($n = 31$):

$$P_{BG}(t) = C_p \frac{\rho \pi R_{BK}^2 v^3}{2} \cdot t,$$

де v – швидкість вітру, ρ – густина повітря, R_{BK} – радіус вітроколеса, C_p – коефіцієнт потужності. Для розрахунку використано дані швидкості вітру для моментів часу t_1, t_2, \dots, t_m , що отримують із метеостанції в аеропорту Бориспіль протягом доби кожні 30 хвилин ($m = 48$) [7]. У таблиці наведено декілька реалізацій випадкової функції $P_{BG}(t)$, математичне очікування, дисперсію та значення кореляційного моменту $K_{BG}(t_k, t_l)$ для інтервалу $(t_l - t_k)$, $l = \overline{1, m}$.

На рис. 2 показано графік зміни функції $M[P_{BG}(t_k)]$, яка при кожному значенні аргумента t_k дорівнює математичному очікуванню відповідного перерізу випадкової функції $P_{BG}(t)$. Знаючи графік зміни функції математичного очікування $M[P_{BG}(t_k)]$, виділяємо інтервали стаціонарності функції $P_{BG}(t)$, на яких функцію вважатимемо однорідною з незначними випадковими коливаннями в околі деякого середнього значення. Причому ні середня амплітуда, ні характер цих коливань не зазнають суттєвих змін на обраному інтервалі стаціонарності.

	t									
$P_{BG}(t)$	t_1	t_2	t_3	t_4	...	t_{45}	t_{46}	t_{47}	t_{48}	
$P_{BG1}(t)$	640	1250	640	270	...	270	640	270	270	
$P_{BG2}(t)$	270	270	270	270	...	3430	2160	3430	3430	
$P_{BG3}(t)$	3430	5120	5120	5120	...	1250	2160	1250	1250	
...	
$P_{BG29}(t)$	2160	2160	1250	640	...	1250	1250	640	640	
$P_{BG30}(t)$	640	640	270	270	...	270	270	270	270	
$P_{BG31}(t)$	270	270	80	270	...	80	80	80	80	
$M[P_{BG}(t_k)]$	1036,452	1132,581	1070,645	1115,484	...	1101,29	1181,613	1131,29	1207,742	
$D[P_{BG}(t_k)]$	2069236	2665546	2588179	3692465	...	2866665	3125288	2738221	3085102	
$K_{BG}(t_1, t_l)$	2069236	1063653	1023066	1225834	...	25901,53	262756,2	31978,2	116292,1	

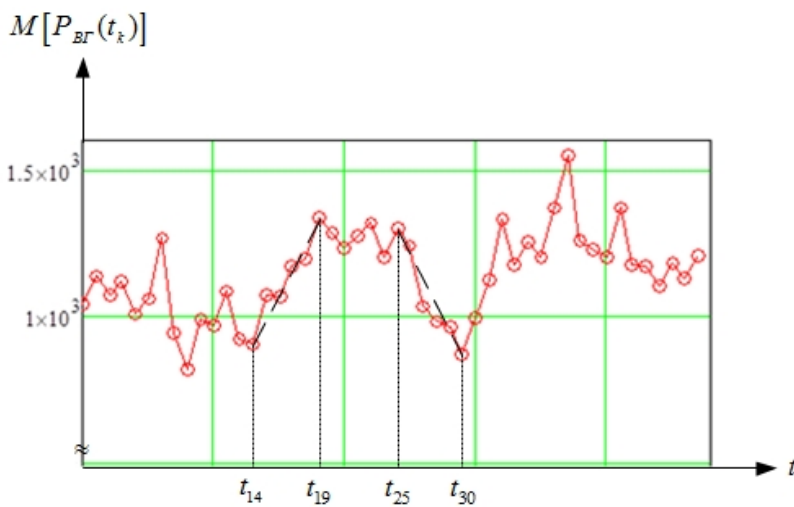


Рис. 2

Наприклад, на інтервалі $(t_{19} - t_{14})$ функція $P_{BG}(t)$ лінійно зростаюча, а на інтервалі $(t_{30} - t_{25})$ – лінійно спадна. Якщо б керування проводилося для моменту часу t_{15} , то для визначення струму $I(t)$ у вихідному колі вітрогенератора, який повинен бути сформований у момент t_{16} , необхідно визначити потужність $P_{BG}(t_{16})$, і відповідно напругу $E(t_{16})$ та внутрішній опір $r(t_{16})$. Оскільки значення потужності $P_{BG}(t_{15})$ відоме, достатньо розрахувати приріст потужності $\Delta P_{BG}(t_{16})$ на інтервалі $\Delta t \leq (t_{16} - t_{15})$, тобто

$P_{BG}(t_{15} + \Delta t) = P_{BG}(t_{15}) + \Delta P_{BG}(t_{15} + \Delta t) \Big|_{\Delta t \leq (t_{16} - t_{15})}$. Вважаючи відхилення потужності від середнього значення вінеровським процесом [8], приріст потужності $\Delta P_{BG}(t_{15} + \Delta t)$ визначається як

$$\Delta P_{BG}(t_{15} + \Delta t) = M[P_{BG}(t_{15})]\Delta t + P_{BG}(t_{15})\sqrt{D[P_{BG}(t_{15})]}\sqrt{\Delta t}.$$

За даними розрахунку $\Delta P_{BG}(t_{15} + \Delta t)$ визначаємо прирости напруги $\Delta E(t_{15} + \Delta t)$ та внутрішнього опору $\Delta r(t_{15} + \Delta t)$ і відповідно приріст струму $\Delta I(t_{15} + \Delta t)$.

Реалізація запропонованого розрахунку у алгоритмі керування струмом у вихідному колі вітрогенератора дає змогу забезпечити відбір максимальної енергії з визначеними математичним очікуванням та дисперсією.

Оцінка заряду та ємності накопичувача. Попередні міркування справедливі без врахування статистичного характеру навантаження. Для випадку, коли потужність навантаження $P_H(t)$ є також випадковою функцією з певним набором випадкових реалізацій $p_H(t)$, необхідно розглядати сумісний вплив двох випадкових функцій та визначити їхні статистичні характеристики. При цьому мінімальна необхідна енергія заряду накопичувача H_1 визначається нижньою границею довірчого інтервалу закону розподілу потужності на виході вітрогенератора, а необхідна ємність накопичувача – верхньою границею довірчого інтервалу.

Математичне очікування суми двох випадкових функцій потужності на виході вітрогенератора $P_{BG}(t)$ та навантаження $P_H(t)$ з відповідними випадковими реалізаціями визначається сумою математичних очікувань кожної функції: $M[P_{BG}(t) + P_H(t)] = M[P_{BG}(t)] + M[P_H(t)]$, а дисперсія – сумою їхніх дисперсій плюс подвоєний кореляційний момент: $D[P_{BG}(t) + P_H(t)] = D[P_{BG}(t)] + D[P_H(t)] + 2K_{BG,H}$.

Навьяність доданка у вигляді подвійного кореляційного моменту збільшує величину довірчого інтервалу, що вказує на необхідність збільшення необхідної ємності накопичувача H_1 . Усунення доданка у вигляді подвійного кореляційного моменту можливе шляхом забезпечення детермінованого значення струму навантаження за рахунок формування відповідного струму заряду еквівалентного накопичувача H_2 , що забезпечує детерміноване значення потужності навантаження (яке визначається або значенням математичного очікування, або максимальним значенням довірчого інтервалу) та нульовий кореляційний момент $K_{BF,H}$. Для наведеного прикладу ($M[P_{BF}(t_{48})] \approx 1,2$ кВт, $\sigma[P_{BF}(t_{48})] \approx 1,7$ кВт) за правилом 3σ врахування статистичного характеру навантаження вказує на необхідність збільшення необхідної ємності накопичувача H_1 на 50% (з 2500 А·год до 5000 А·год), а забезпечення детермінованого режиму роботи накопичувача джерел безперебійного живлення H_2 дає змогу зменшити на 20% необхідну ємність накопичувача H_1 (до 4000 А·год).

При керуванні загальним струмом заряду накопичувачів H_1 та H_2 детерміноване значення струму навантаження, що формується відповідним струмом заряду еквівалентного накопичувача H_2 , може бути перенесене на накопичувач H_1 .

Таким чином, вважаючи, що відхилення потужності на виході вітрогенератора від середнього значення на інтервалі Δt є вінеровським процесом, реалізується упереджувальне керування відбором максимальної енергії від вітрогенератора, а застосування додаткового накопичувача, який забезпечує детерміноване значення енергії навантаження, зменшує величину довірчого інтервалу та дає змогу підвищити мінімальну необхідну енергію заряду та обрати меншу ємність основного накопичувача.

1. Базюк Т.М., Блінов І.В., Буткевич О.Ф., Гончаренко І.С., Денисюк С.П., Жуйков В.Я., Кириленко О.В., Лук'яненко Л.М., Миколаєць Д.А., Осипенко К.С., Павловський В.В., Рибіна О.Б., Стелюк А.О., Танкевич С.Є., Трач І.В. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.

2. G. Madhusudhana Rao, S. Sundeeep, B.V. Sanker Ram. Maximum power point tracking for wind generators using an expert systems. International conference on *Signal Processing, Communication, Power and Embedded System* (SCOPE5). Paralakhemundi, India, 3-5 Oct. 2016. Pp. 302-308.

3. S. X. Chen, H. B. Gooi, M. Q. Wang. Sizing of energy storage for microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012. Vol. 3. No 1. Pp. 142–151.

4. Buasarello T.D.C., Pomilio J.A. Battery storage system with active filtering function based on the conservative power theory for wind generators. IEEE International Conference on *Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems* (IESES). Hamilton, New Zealand, 31 Jan. – 2 Feb. 2018. Pp. 21-26.

5. Zhuikov V., Osypenko K. Compensator currents form determination considering wind generator aerodynamic resistance. IEEE International conference on *intelligent energy and power systems* (IEPS), Kyiv, Ukraine, 2-6 June 2014. Pp. 168-170.

6. Жуйков В.Я., Павлов В.Б., Стжелецки Р.Г. Системы упрещающего управления вентиляльными преобразователями. Киев: Наук. думка, 1991. 237 с.

7. Архів метеорологічних спостережень. Дані по аеродромах Європи. URL: <http://www.pogoda.by/zip-avia/index.php?Year=2015&sortBy=country>

8. Kashima K., Aoyama H., Ohta Y. Modeling and linearization of systems under heavy-tailed stochastic noise with application to renewable energy assessment. IEEE 54th Annual Conference on *Decision and Control* (CDC). Osaka, Japan, 15-18 Dec. 2015. Pp. 1852-1857.

УДК 621.314

ВЛИЯНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ НА УРОВЕНЬ ЗАРЯДА НАКОПИТЕЛЯ

Е.С. Осипенко, канд.техн.наук, **В.Я. Жуйков**, докт.техн.наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

E-mail: ekateryna.osypenko@gmail.com

Представлена упрощенная эквивалентная схема системы с ветрогенератором. Отмечено, что для реализации условия отбора максимальной энергии необходимо определять значение тока заряда накопителя, минимальную

енергію заряду і максимальне значення ємкості, які залежать від статистических характеристик енергії на виході ветрогенератора і навантаження. Приведені формули для розрахунку цих характеристик. Показано, що підключення додаткового накопичувача, який забезпечує детерміноване змінення величини енергії навантаження, дозволяє зменшити ємкість основного накопичувача. Бібл. 8, табл. 1, рис. 2.
Ключевые слова: ветрогенератор, отбор максимальной энергии, накопитель, случайные процессы.

THE INFLUENCE OF THE STATISTICAL CHARACTER OF SYSTEM ELEMENTS PARAMETERS ON THE LEVEL OF STORAGE CHARGE

K.S. Osypenko, V.J. Zhuikov

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: ekateryna.osypenko@gmail.com

A simplified equivalent block diagram of a system with a wind generator is presented. It is noted that in order to fulfill the maximum energy selection condition, it is necessary to determine the value of the storage charge current, the minimum charge energy and the maximum capacitance value, which depend on the statistical characteristics of the energy at the output of the wind generator and the load. Equations for calculating these characteristics are given. It is shown that the connection of an additional storage, which provides a deterministic change of the load energy value, makes it possible to reduce the capacity of the main storage. References 8, table 1, figures 2.

Keywords: wind generator, maximum energy selection, storage, random processes.

1. Baziuk T.M., Blinov I.V., Butkevych O.F., Honcharenko I.S., Denysiuk S.P., Zhuikov V.Ia., Kyrylenko O.V., Lukianenko L.M., Mykolaiets D.A., Osypenko K.S., Pavlovskiy V.V., Rybina O.B., Steliuk A.O., Tankevych S.Ie., Trach I.V. Intelligent power systems: elements and modes. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, 2016. 400 p. (Ukr)

2. G. Madhusudhana Rao, S. Sundeep, B.V. Sanker Ram. Maximum power point tracking for wind generators using an expert systems. International conference on *Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPE)*. Paralakhemundi, India, 3-5 Oct. 2016. Pp. 302-308.

3. S. X. Chen, H.B. Gooi, M.Q. Wang. Sizing of energy storage for microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012. Vol. 3. No 1. Pp. 142-151.

4. Buasarello T.D.C., Pomilio J.A. Battery storage system with active filtering function based on the conservative power theory for wind generators. IEEE International Conference on *Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES)*. Hamilton, New Zealand, 31 Jan.-2 Feb. 2018. Pp. 21-26.

5. Zhuikov V., Osypenko K. Compensator currents form determination considering wind generator aerodynamic resistance. IEEE International conference on *intelligent energy and power systems (IEPS)*. Kyiv, Ukraine, 2-6 June 2014. Pp. 168-170.

6. Zhuikov V.Ia., Pavlov V.B., Stzheletsky R.H. Systems of anticipatory control of gate converters. Kyiv: Naukova dumka, 1991. 237 p. (Rus)

7. Archive of meteorological observations. Data on airfields in Europe URL: <http://www.pogoda.by/zip-avia/index.php?Year=2015&sortBy=country>

8. Kashima K., Aoyama H., Ohta Y. Modeling and linearization of systems under heavy-tailed stochastic noise with application to renewable energy assessment. IEEE 54th Annual Conference on *Decision and Control (CDC)*. Osaka, Japan, 15-18 Dec. 2015. Pp. 1852-1857.

Надійшла 02.03.2018
Остаточний варіант 27.06.2018