

УДК 621.314

В.Я. ЖУЙКОВ, д-р техн. наук, К.С. ОСИПЕНКО, ст. викладач  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## ОСОБЛИВОСТІ ВІДБОРУ ЕНЕРГІЇ ВІД ВІТРОГЕНЕРАТОРА В ПЕРЕХІДНОМУ РЕЖИМІ ОРІЄНТАЦІЇ НА ВЕКТОР ВІТРОВОГО ПОТОКУ

В статті розглянуто забезпечення ефективної роботи Micro Grid за рахунок реалізації відбору максимальної енергії від вітрогенератора. Наведено еквівалентну схему системи електроживлення.

Показано, що в процесі повороту лопатей і гондоли вітрогенератора необхідно узгоджувати еквівалентний внутрішній опір вітрогенератора, який складається з опору втрат вітрового потоку та внутрішнього опору електричного генератора, з опором навантаження. Для уточнення рівня енергії, яка може бути відібрана від вітрогенератора в процесі повороту лопатей та гондоли, запропонована еквівалентна схема джерела, в якій напруга еквівалентного джерела представляється лінійною функцією, а реакція ланки внутрішній опір-навантаження є функцією Гауса.

При цьому величина еквівалентної напруги визначається з рівності потужності, яка може бути відібрана від вітрового потоку, та потужності джерела за умови роботи в режимі відбору максимальної енергії.

Показано, що врахування лінійної зміни рівня енергії вітрового потоку і, відповідно, напруги еквівалентного джерела вітрогенератора в процесі повороту лопатей та гондоли дозволяє підвищити рівень енергії, що може бути відібрана від вітрогенератора.

**Ключові слова:** системи електроживлення, розподілена генерація, Micro Grid, вітрогенератор, відбір максимальної енергії, закон Гауса.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Одним з факторів зміни парадигми розвитку та керування європейської системоутворюючої мережі є масштабне впровадження електростанцій, що використовують відновлювані джерела енергії з неконтрольованими та нестабільними рівнями генерації та наявністю гармонічних спотворень [1].

На сьогодні намічені основні напрямки інтеграції відновлюваних джерел енергії та розосереджених енергоресурсів, організації активної участі споживачів та створення нових інфраструктур, одним з прикладів яких є система Micro Grid, забезпечення ефективної роботи якої передбачає відбір максимальної енергії від джерел розосередженої генерації [2].

Зокрема, при наявності в системі вітрогенератора відбір максимальної енергії забезпечується найбільш ефективним функціонуванням його конструктивних вузлів, основними з яких є вітроколесо та синхронний генератор [3].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Залежність потужності  $P$  вітроколеса від швидкості вітрового потоку та інших параметрів описується формулою [3]

$$P = C_p \frac{\rho \pi R_{BK}^2 v^3}{2}, \quad (1)$$

де  $v$  - швидкість вітрового потоку;  $\rho$  - густина повітря;  $R_{BK}$  - радіус вітроколеса;  $C_p$  - коефіцієнт потужності.

Оскільки зі зміною швидкості вітрового потоку змінюється швидкість обертання вітроколеса, за якої потужність на валу вітроколеса є максимальною, необхідно узгодити характеристики зміни потужності вітроколеса та синхронного генератора залежно від швидкості обертання, загальний вигляд яких наведено на рис. 1, та з яких можна зробити висновок, що найсприятливіший режим роботи вітроколеса та генератора досягається для системи вітроколесо-генератор за кривою потужності  $A$ , яка відповідає максимально можливим значенням потужності для різних швидкостей вітру  $v_1 \div v_5$ .

При повороті лопатей і гондоли вітрогенератора відбувається перехідний процес зміни режиму генерації, що потребує узгодження еквівалентного внутрішнього опору вітрогенератора, який враховує втрати у вітроколесі, та опору навантаження, але для забезпечення відбору максимальної енергії від вітрового потоку необхідно здійснювати поворот лопатей та гондоли вітрогенератора так, щоб значення швидкості та тиску потоку вітру відповідали максимальному рівню енергії.

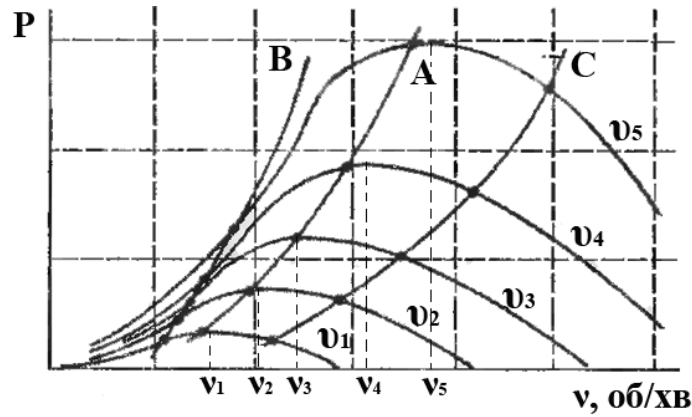


Рис. 1. Характеристики потужності вітроколеса та синхронного генератора

**Постановка завдання.** Енергія вітрового потоку  $W_{ВП}$ , яка описується рівнянням Бернуллі [4] перетворюється в енергію  $W_B$  на валу електричного генератора та відповідний момент на валу та в електричну енергію  $W_{\Sigma}$ . Розрахунок втрат енергії при її перетворенні проводиться по спрощеній еквівалентній схемі системи електроживлення з вітрогенератором (ВГ), яка представляється у вигляді  $RL$ -кола з залежним від часу опором [5], наведеної на рис. 2, де ВГ<sub>ЕКВ</sub> - еквівалентна схема вітрогенератора; ВК - вітроколесо; П - перетворювач;  $E$  - еквівалентне джерело напруги;  $R_i$  - внутрішній опір вітрогенератора, який залежить від часу та враховує еквівалентний аеродинамічний опір та його зміну при зміні положення лопатей та гондоли;  $L$  - індуктивність ліній;  $R_H$  - опір навантаження. На рис. 2 стрілкою позначено перехід від системи вітроколесо-синхронний генератор до її еквівалентної схеми.

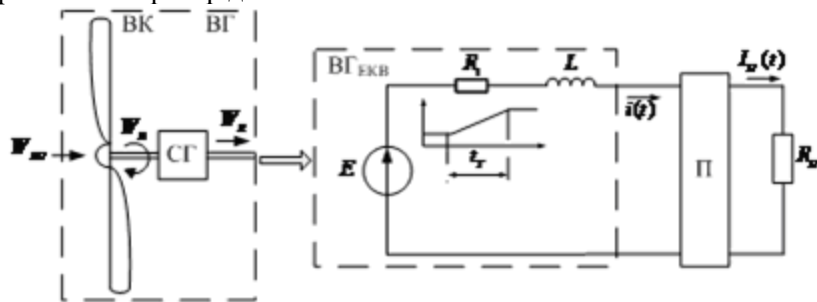


Рис. 2. Еквівалентна схема системи електроживлення з вітрогенератором

Умовою початку повороту лопаті або гондоли є розбіжність напрямку потоку вітру з віссю обертання. Як тільки напрямок потоку вітру зміниться так, що між його вектором та віссю обертання утворюється деякий кут, на систему керування надійде сигнал про необхідність повороту лопаті або гондоли. За умови, що проекція вектора швидкості вітру на вісь обертання гондоли буде дорівнювати нулю, аеродинамічний опір лопаті буде приймати мінімальне значення, а рівень енергії вітру, що надходить для перетворення в електроенергію, буде максимальним. Аналогічно й для гондоли - аеродинамічний опір буде мінімальним за умови, що проекція вектора швидкості вітру на вісь обертання лопаті буде дорівнювати нулю. При зміні кута атаки аеродинамічний опір буде зростати, а рівень енергії зменшуватися.

Потужність еквівалентного джерела напруги визначається за формулою

$$P_{ДЖ} = \frac{E^2}{R_{ЕКВ}}, \tag{2}$$

де  $R_{ЕКВ} = R_i + R_H$ , при умові роботи у режимі відбору максимальної потужності внутрішній опір еквівалентного джерела та опір навантаження рівні між собою  $R_i = R_H$ .

З рівності виразів (1) та (2) знаходиться значення напруги еквівалентного джерела

$$E = R_{ВК} v^{3/2} \sqrt{\frac{\pi}{2} \rho C_P R_{ЕКВ}}.$$

Для вітрогенератора проекція вектора швидкості вітру на вісь обертання пропорційна косинусу кута атаки, і при малих приростах кута при постійній швидкості обертання виконуючих механізмів, внутрішній опір вітрогенератора можна вважати лінійною функцією часу

$$R_i = k_R \cdot t,$$

де  $k_R$  - коефіцієнт масштабування, який має розмірність  $[Om/c]$ .

Оскільки, для роботи вітрогенератора в режимі відбору максимальної потужності необхідно, щоб виконувалася умова  $R_i = R_H$ , то опір навантаження повинен змінюватися за таким же лінійним законом, що й внутрішній опір:  $R_H = k_R \cdot t$ .

При стрибкоподібній зміні напруги еквівалентного джерела струм перехідного процесу у вихідному колі еквівалентної схеми вітрогенератора за умови, що опір змінюється за лінійним законом, описується законом Гауса

$$i(t) = A(1 - e^{-t^2/\sigma}),$$

де  $A = \frac{E}{L} \sqrt{\frac{\pi}{2}} / \sqrt{\frac{2k_R}{L}} = const$  - постійне значення струму у колі,  $\sigma = \sqrt{\frac{2k_R}{L}}$  - характеризує тривалість перехідного процесу.

Таке значення струму перехідного процесу отримане за умови, що напруга еквівалентного джерела вітрогенератора є величиною постійною.

Для уточнення рівня енергії, яка може бути відібрана від вітрогенератора в процесі повороту лопатей та гондоли, покладемо, що напруга еквівалентного джерела змінюється лінійно від 0 до  $E$  за законом  $E(t) = k_E t$ , де  $k_E$  - коефіцієнт масштабування, який має розмірність  $[B/c]$ .

**Викладення матеріалу та результати.** При зміні швидкості вітрового потоку з  $v_1$  до  $v_2$  напруга еквівалентного джерела також змінюються зі значення  $E_1 = R_{BK} v_1^{3/2} \sqrt{\frac{\pi}{2} \rho C_P R_{EKB1}}$  до значення  $E_2 = R_{BK} v_2^{3/2} \sqrt{\frac{\pi}{2} \rho C_P R_{EKB2}}$ , де  $R_{EKB1}$  та  $R_{EKB2}$  - еквівалентні опори електричного кола, що відповідають швидкостям  $v_1$  та  $v_2$ .

Знайдемо реакцію системи на вхідну дію за умови, що напруга еквівалентного джерела змінюється лінійно: 1) за умови, що внутрішній опір вітрогенератора постійний (передавальна функція перетворювача  $W_{П1} = \alpha e^{-\alpha t}$ ); 2) за умови, що внутрішній опір вітрогенератора змінюється за лінійним законом (передавальна функція перетворювача  $W_{П2} = 2\beta t e^{-\beta t^2}$ ). Для розрахунку використаємо інтеграл згортки. Тоді, для першого випадку

$$I_1 = \int_0^{\infty} f_1(t-\tau) f_2(\tau) d\tau = \int_0^t k_E(t-\tau) \cdot \alpha e^{-\alpha \tau} = k_E t + \frac{k_E}{\alpha} (e^{-\alpha t} - 1),$$

для другого випадку

$$I_2 = \int_0^{\infty} f_1(t-\tau) f_2(\tau) d\tau = \int_0^t k_E(t-\tau) \cdot 2\beta \tau e^{-\beta \tau^2} = t - \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\sqrt{\beta} t)}{2\sqrt{\beta}},$$

де  $\alpha$  - величина, обернена постійній часу,  $\beta$  - параметр, що характеризує коло з Гаусівським перехідним процесом.

На рис. 3 показані дві інтегральні криві зміни струму перехідного процесу у вихідному колі еквівалентної схеми вітрогенератора на інтервалі зміни параметрів вітрового потоку (швидкості та напрямку):  $I_1(t)$  за умови, що напруга еквівалентного джерела постійна;  $I_2(t)$  за умови, що напруга еквівалентного джерела змінюється за лінійним законом.

Рівні енергії, яку можна відібрати від вітрогенератора визначається:

за умови, що напруга еквівалентного джерела постійна на інтервалі  $0 \dots 3\tau$

$$W_1 = \int_0^{3\tau} I_1^2(t) \cdot R_H(t) dt,$$

за умови, що напруга еквівалентного джерела змінюється лінійно

$$W_2 = \int_0^{3r} I_2^2(t) \cdot R_H(t) dt .$$

Розрахувавши площі, обмежені інтегральними кривими  $I_1(t)$  та  $I_2(t)$  отримаємо різницю між рівнями енергії

$$\int_0^{3r} I_2(t) dt - \int_0^{3r} I_1(t) dt \Big/ \int_0^{3r} I_2(t) dt = 6,97\% \approx 7\% .$$

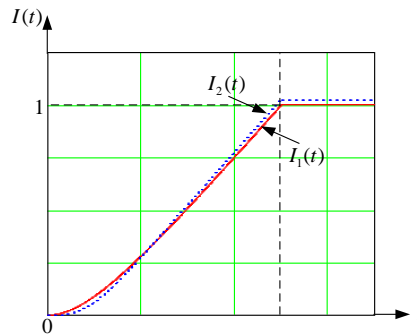


Рис. 3 - Графіки інтегральних кривих

У динамічному режимі роботи вітрогенератора при зміні кутів атаки лопатей та гондоли та врахуванні лінійної залежності еквівалентного внутрішнього опору вітрогенератора від часу врахування лінійної залежності напруги еквівалентного джерела в перехідному процесі дозволяє збільшити рівень енергії, яка може бути відібрана від вітрогенератора щонайменше на 7%.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Таким чином, врахування лінійної зміни рівня енергії вітрового потоку і, відповідно, напруги еквівалентного джерела вітрогенератора в процесі повороту лопатей та гондоли дозволяє підвищити рівень енергії, що може бути відібрана від вітрогенератора щонайменше на 7%.

#### Список літератури

1. Блинов И.В., Денисюк С.П., Жуйков В.Я., Кириленко А.В., Киселева А.Г., Лукьяненко Л.Н., Осипенко Е.С., Павловский В.В., Парус Е.В., Сопель М.Ф., Стелюк А.О., Танкевич С.Е. Интеллектуальные электроэнергетические системы: элементы и режимы: Под общ. ред. акад. НАН Украины А.В. Кириленко / Институт электродинамики НАН Украины. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2014. – 408 с.
  2. D. Heman Investigation of the Technical and Economic Feasibility of Micro-Grid-Based Power Systems. Final Report, December 2001. – 107 p.
  3. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт», 2003. – 400 с.
  4. L. J. Clancy Aerodynamics. Pitman Publishing Limited, London ISBN 0 273 01120 0. 1960.
  5. Zhuikov V. Compensator currents form determination considering wind generator aerodynamic resistance / V. Zhuikov, K. Osypenko // 2014 IEEE International conference on intelligent energy and power systems (IEPS) Conference Proceedings. 2014. – P. 168-170.
- Рукопис подано до редакції 30.03.16

УДК 621.311.086.5:621.3.001

И.О. СИНЧУК, Э.С. ГУЗОВ, кандидаты техн. наук, доц., М.А. ВИННИК, соискатель  
Криворожский национальный университет

### О ПЕРСПЕКТИВАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА: «ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ – ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ» ПОДЗЕМНЫХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В статье приведены результаты исследований по анализу графиков электрических нагрузок приемников горно-рудных предприятий с подземными способами добычи железорудного сырья. Показано различие и причины, порождающие разницу форм графиков для тех или иных конкретных предприятий анализируемой отрасли промышленно-