

УДК 621.1

## АНАЛІЗ ОБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ПАРАЛЕЛЬНІЙ РОБОТІ ДВОХ ТРИФАЗНИХ ВІТРОУСТАНОВОК

С.П. Денисюк, доктор технічних наук, Д.С. Горенко.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»  
03056 м. Київ, вул. Борщагівська, 115, корпус 22.

*Виділено проблеми електромагнітної сумісності в Smart Grid. Проведено порівняльний аналіз різних типів електричних машин змінного струму, що входять до складу вітроустановок. Розглянуто обмінні процеси при паралельній роботі двох трифазних джерел електроенергії. На основі попередніх досліджень живлення одним трифазним генератором несиметричного несинусоїдального навантаження проаналізовано перетоки енергії через відповідні перетини системи. Наведено узагальнений розрахунок для  $i$ -го перетину системи. Побудовано залежності обмінних процесів двох трифазних генераторів різної потужності, що працюють синхронно один відносно одного, та не синхронно. Бібл. 17, рис. 8.*

**Ключові слова:** Smart Grid, автономні системи електроживлення, електромагнітна сумісність, вітрові електроустановки, трифазні системи електроживлення, обмінні процеси, обмінна потужність.

## ANALYSIS OF EXCHANGE PROCESSES IN PARALLEL WORK OF TWO THREE-PHASE WIND TURBINES

S.P. Denysiuk, doctor of technical sciences, D.S. Horenko.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»  
03056, 115 Borshchagovsky Street, building 22, Kyiv, Ukraine.

*The problems of electromagnetic compatibility in Smart Grid are highlighted. A comparative analysis of different types of electric AC machines, which are part of wind turbines, is carried out. The paper deals with the exchange processes in parallel operation of two three-phase power sources. On the basis of previous studies of power supply by a three-phase generator of asymmetric non-sinusoidal load, the energy flows through the corresponding sections of the system are analyzed. The generalized calculation for the  $i$ -th section of the system is given. The dependence of the exchange processes of two three-phase generators of different power, working synchronously with respect to one another, and not synchronous, is constructed. References 17, fig. 8.*

**Keywords:** Smart Grid, autonomous power systems, wind power installations, electromagnetic compatibility, three-phase power supply systems, exchange processes, exchange power.



С.П. Денисюк  
S. Denysiuk

**Відомості про автора:** директор Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського».

**Освіта:** Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», факультет електроніки, кафедра промислової електроніки (1981 р.).

**Наукова діяльність:** електроенергетика, силова електроніка, енергоефективність, Smart Grid.

**Публікації:** 337.

ORCID: 0000-0002-6299-3680

**Контакти:** тел. +38 (050) 440-69-89

e-mail: spdens@ukr.net

**Information about the author:** director of the Institute of Energy Saving and Energy Management of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

**Education:** National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Faculty of Electronics, Department of Industrial Electronics (1981).

**Research area:** power engineering, power electronics, energy efficiency, Smart Grid.

**Publications:** 337.

ORCID: 0000-0002-6299-3680

**Contacts:** phone +38 (050) 440-69-89

e-mail: spdens@ukr.net



Д.С. Горенко  
D. Horenko

**Відомості про автора:** аспірант кафедри електропостачання Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського».

**Освіта:** Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», Інститут енергозбереження та енергоменеджменту за спеціальністю «Електротехнічні системи електропостачання» (2010 р.).

**Наукова діяльність:** відновлювальні джерела енергії.

**Публікації:** 7.

ORCID: 0000-0002-7879-7801

**Контакти:** тел. +38 (097) 948-53-50

e-mail: gorenko.darya@gmail.com

**Information about the author:** post-graduate student of the department of electric power supply of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

**Education:** National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Institute of energy conservation and energy management, with a degree on electrotechnical systems of power supply (2010).

**Research area:** renewable energy sources.

**Publications:** 7.

ORCID: 0000-0002-7879-7801

**Contacts:** phone +38 (097) 948-53-50

e-mail: gorenko.darya@gmail.com

#### Перелік використаних позначень та скорочень:

$Q_{об}$	– обмінна потужність;
$u(t), i(t)$	– миттєві значення напруги та струму;
$\psi_k^i, \psi_k^u$	– кут струму та кут напруги вищих гармонік;
$i_a(t), i_p(t)$	– активна та реактивна складова струму;
$U_D$	– діюче значення напруги;
$P$	– активна потужність;
$g$	– електрична провідність;
$Z, R, X$	– загальний опір, активна та реактивна складова опору;
Індекси:	
$A, B, C$	– позначення фаз.

**Вступ.** У Smart Grid є потенціал для поліпшення якості та надійності постачання електроенергії багатьма способами. Але завдяки своїй підвищеній складності та залежності від технологій, які раніше не були включені в мережу, Smart Grid також може бути сприйнятливим до факторів, які можуть негативно вплинути на надійність постачання електроенергії [1, 2]. Проблеми EMC пов'язані, головним чином, із забезпеченням коректної роботи електричних та електронних апаратів. Оскільки ступінь впливу електромагнітних завад залежить від відстані між елементами електроенергетичної системи, то актуальність питання EMC в автономних системах електроживлення (рис. 1) не викликає сумніву. Основні напрямки вирішення проблеми EMC: визначення електромагнітних завад, що створюються різними джерелами, визначення рівня чутливості елементів та систем в цілому на дію електромагнітних завад, розрахунок та прогнозування електромагнітних завад, розробка ефективних мір для зниження електромагнітних завад. До основних методів

забезпечення EMC можна віднести: зниження несиметрії напруги, націнка та компенсація реактивної потужності при наявності вищих гармонік, використання фільтро-компенсуючих пристроїв, розділення навантажень, використання безперебійних джерел живлення [3–5].

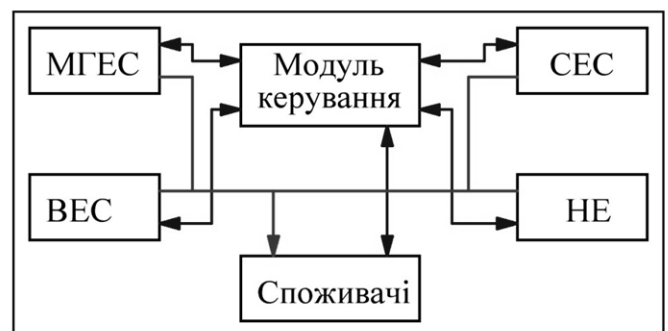


Рис. 1. Спрощена модель автономної системи: – енергетичні потоки; – інформаційні потоки.

Fig. 1. Simplified model of autonomous system: – energy flows; – information flows.

Єдиних вимог щодо оцінки можливостей паралельної роботи вітрових електростанцій (ВЕС)

з мережею не обрано, але можна виділити такі: підтримка якості електричної енергії; зниження втрат в мережах, що містять вітроенергетичні установки (ВЕУ); вирішення проблеми компенсації реактивної потужності; усунення вищих гармонік; гасіння радіоперешкод [6, 7].

Для генерації електроенергії в вітрових установках застосовують електричні машини змінного струму, як асинхронні так і синхронні [8]. У асинхронних генераторів є кілька переваг перед синхронними: простота конструкції; невеликі габарити і маса при досить великій потужності; немає необхідності в напрузі збудження; надійність; високий ККД; на виході генераторів йде відразу 220 /380 В змінного струму, який можна використовувати безпосередньо для живлення споживачів, для зарядки акумуляторів, а також для паралельної роботи з традиційною мережею; висока стабільність напруги на виході; вихідна частота практично не залежить від швидкості обертання ротора генератора. Недоліки асинх-

ронного генератора: не витримує перевантаження; складно регулювати вихідну напругу; для оптимального використання в автономному режимі, ємність конденсаторних батарей повинна змінюватися в залежності від індуктивності навантаження; через надмірну громіздкість (масу конденсаторів порівнюємо з масою генератора) і високу вартість конденсаторних батарей асинхронні генератори з самозбудженням не набули поширення (рис. 2). Асинхронні генератори застосовуються лише на електростанціях допоміжного значення малої потужності, наприклад у вітросилових установках; чим менше оборотність генератора, тим вище його маса при однаковій потужності. В якості синхронних генераторів велику популярність отримали тихохідні синхронні генератори з постійними магнітами. Для таких генераторів не потрібно використовувати підвищуючий редуктор, за рахунок чого зменшуються габарити вітроустановки. Також відсутність електромагнітного збудження підвищує ККД генератора [9, 10].

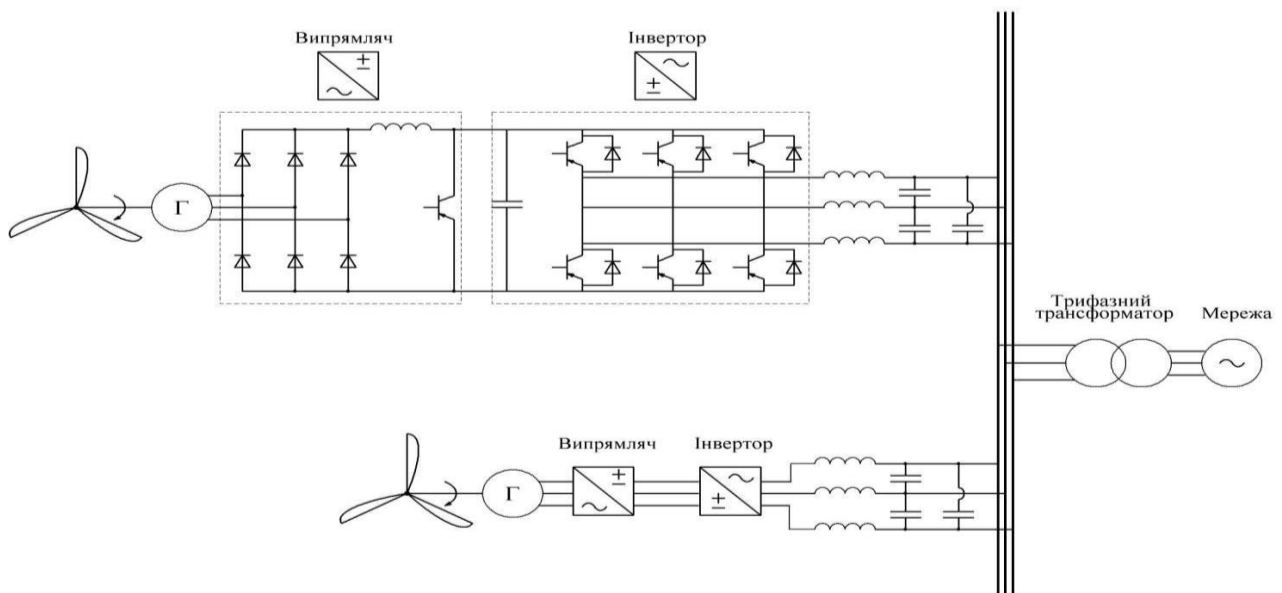


Рис. 2. Схема підключення вітрогенераторів.

Fig. 2. Connection scheme of wind turbines.

**Мета та завдання.** Метою цього дослідження є аналіз обмінних процесів в автономних трифазних системах електроживлення на базі ВЕУ різної потужності. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- побудувати аналітичні залежності власних та взаємних впливів окремих елементів моделі автономної системи живлення з двома вітрогенераторами в довільному перетині;
- проаналізувати обмінні процеси при паралельній роботі двох вітрогенераторів однакової потужності включених несинхронно;
- провести аналіз обмінних процесів при паралельній роботі двох вітрогенераторів різної потужності включених синхронно, що живлять несиметричне навантаження.

**Матеріали та результати дослідження.** Використання обмінної потужності  $Q_{об}$  дозволяє: однозначне відображення обмінних процесів (індикація умови  $W \neq 0$ ); накопичення енергії в реактивних елементах (характеристика енергоємності та екстремальних режимів роботи реактивних елементів); відображення енергообміну при наявності різномірних гармонік струму та напруги в перетині кола; відображення обмінних процесів між генераторами струму та напруги; оцінювати обмінні процеси у перехідних режимах; співставлення обмінних процесів у різних перетинах кола; оцінювати взаємний вплив елементів кола, які характеризуються різним гармонічним складом напруги  $u(t)$  та струму  $i(t)$ ; оцінювати стійкість режимів роботи за рахунок введення граничних значень величини характеристик; врахування значень кутів струму  $\psi_{ki}$  та напруги  $\psi_{ku}$  ( $k > 1$ ) для вищих гармонік; однозначне усунення зворотних потоків енергії при компенсації відповідної характеристики [11–13].

Під час аналізу енергетичних процесів через загальні перетини (рис. 4) неможливо повноцінно

оцінити перетоки енергії від кожної фази генератора до навантаження і другого генератора. Оскільки тотожність (1) була доведена в [12, 13] і є фактично підтвердженою, то подальше використання запропонованих методик, що є справедливими для трифазних мереж, будемо використовувати і під час аналізу системи «два трифазних генератора – одне трифазне несиметричне навантаження».

$$Q_{Обi} = \frac{1}{T} \int_0^{T^*} u_i(t) i_{pi}(t) dt, \quad (1)$$

де  $i_{pi}(t) = i_i(t) - i_{ai}(t)$  – реактивна складова струму, що протікає через  $i$ -й перетин;  $i_{ai}(t) = u_i(t) P_i / U_{Di}^2$  – активна складова струму, що протікає через  $i$ -й перетин;  $U_D$  – діюче значення напруги в  $i$ -му перетині;  $P_i$  – активна потужність, що передається через  $i$ -й перетин за період  $T$ .

$$Q_{Об,П} \leq \sum_{i=1}^{n_\phi} Q_{Об,Ф_i} \quad (2)$$

Для аналізу обмінних процесів у трифазних системах необхідно використовувати обмінні потужності через окремі перетини кожної фази як навантаження, так і кожного генератора [4, 3].

Для роботи автономних систем електроживлення з вітровими установками (рис. 1) використовуються пристрої силової електроніки, такі як інвертори, випрямлячі і т. п. Оскільки вихідний сигнал таких пристроїв є спотвореним то виникає проблема несинусоїдальності. Також велика кількість споживачів є джерелом імпульсних завад в системі. Завади можуть бути викликані комутаціями джерел електроенергії, які працюють паралельно, підключенням та відключенням споживачів. Для прикладу вплив періодичних завад різної тривалості на обмінні процеси наведено на рисунку 3 [14, 15].

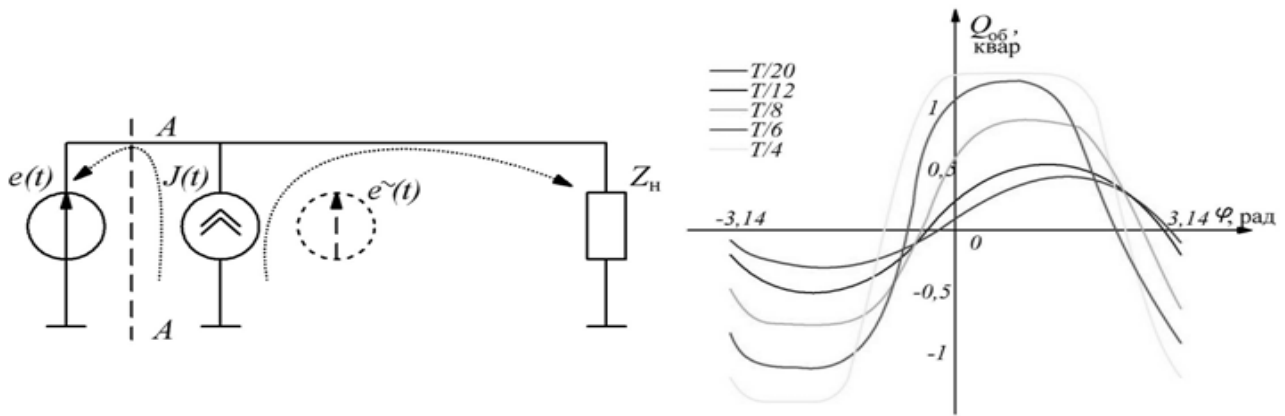


Рис. 3. Обмінна потужність під дію імпульсної завади різної тривалості.

Fig. 3. Exchange power under impulse interference of different durations.

Аналіз роботи кількох однофазних генераторів, що живлять одне навантаження, з точки зору обмінних процесів проводився, проте потужність генераторів була однаковою. Також під час аналізу несинусоїдальності генератори мали лише відхилення кута між струмом та напругою. Тому постало питання, як будуть протікати енергетичні процеси під час роботи двох трифазних генераторів різної потужності при живленні одного несиметричного навантаження (навантаження характеризується як фазною, так і амплітудною несиметрією). Схему заміщення системи (рис. 1) представлено на рис. 2, а також виокремлено пофазно перетини кожного генератора та навантаження [11–13, 15, 16].

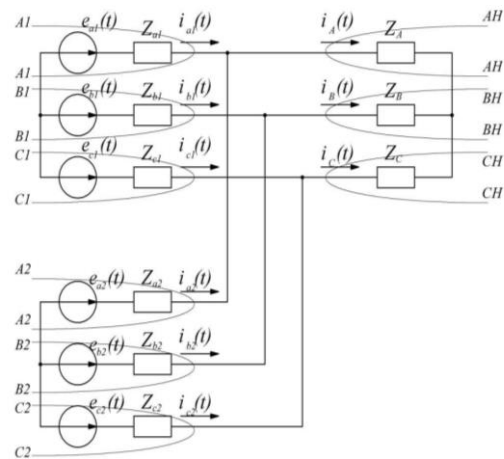


Рис. 5. Спрощена модель трифазної системи двох генераторів, що живлять одне навантаження.

Fig. 5. Simplified model of a three-phase system of two generators that feed one load.

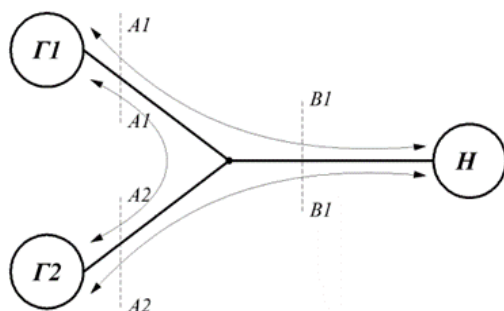


Рис. 4. Модель системи два генератори одне навантаження.

Fig. 4. Model system of two generators of one load.

Перший генератор обрано базовим, його параметри не будуть змінюватися під час аналізу. Потужність другого генератора буде змінюватися в межах від  $0,5P_1$  до  $1,5P_2$ .

Для визначення взаємних перетоків потужності між двома генераторами, що живлять одне навантаження (3), було використано метод накладання та правило чужого опору [17]:

$$Q_{об.A1-A1} = \frac{1}{T} \int_0^{T^+} [u_{A1}^2(t) \cdot g_{A11} - u_{A1}(t)u_{A2}(t) \cdot g_{A12}] dt, \quad (3)$$

$$Q_{об.A2-A2} = \frac{1}{T} \int_0^{T^+} [u_{A2}^2(t) \cdot g_{A22} - u_{A1}(t)u_{A2}(t) \cdot g_{A21}] dt,$$

де  $g_{A11} = (Z_A + Z_{a2}) / (Z_A Z_{a1} + Z_{a1} Z_{a2} + Z_A Z_{a2}) - P_{A1} / U_{D.A1}^2$  – власна провідність фази A першого генератора;

$g_{A22} = (Z_A + Z_{a1}) / (Z_A Z_{a1} + Z_{a1} Z_{a2} + Z_A Z_{a2}) - P_{A2} / U_{D.A2}^2$  – власна провідність фази A другого генератора;  
 $g_{A12} = (Z_A) / (Z_A Z_{a1} + Z_{a1} Z_{a2} + Z_A Z_{a2})$  – взаємна

провідність між фазами першого та другого генератора.

Аналогічно розраховуються взаємні потоки потужності через перетини  $B1-B1$ ,  $B2-B2$ ,  $C1-C1$  та  $C2-C2$ :

$$\begin{aligned}
 Q_{OB.B1-B1} &= \frac{1}{T} \int_0^{t^+} [u_{B1}^2(t) \cdot g_{B11} - u_{B1}(t)u_{B2}(t) \cdot g_{A12}] dt; \\
 Q_{OB.B2-B2} &= \frac{1}{T} \int_0^{t^+} [u_{B2}^2(t) \cdot g_{B22} - u_{B21}(t)u_{B2}(t) \cdot g_{A12}] dt; \\
 Q_{OB.C1-C1} &= \frac{1}{T} \int_0^{t^+} [u_{C1}^2(t) \cdot g_{C11} - u_{C1}(t)u_{C2}(t) \cdot g_{C12}] dt; \\
 Q_{OB.C2-C2} &= \frac{1}{T} \int_0^{t^+} [u_{C2}^2(t) \cdot g_{C22} - u_{C1}(t)u_{C2}(t) \cdot g_{C21}] dt.
 \end{aligned} \tag{4}$$

З формул (3), (4) та (5) видно, як окремі параметри електричної системи здійснюють вплив на фази генератора. Аналогічно виводиться взаємний вплив не лише навантаження та між фазами генератора, а також вплив окремих фаз трифазного вітрогенератора одна на одну.

$$\begin{aligned}
 Q_{OB.A} &= \frac{1}{T} \int_0^{t^+} [u_A^2(t) (g_{AA} - g_A)(1 - Z_A g_{AA}) - \\
 &\quad - (u_B(t)g_{BA} + u_C(t)g_{CA})^2 Z_A - \\
 &\quad - (u_A(t)u_B(t)g_{BA} + u_A(t)u_C(t)g_{CA})(1 + g_A Z_A)] dt; \\
 Q_{OB.B} &= \frac{1}{T} \int_0^{t^+} [u_B^2(t) (g_{BB} - g_B)(1 - Z_B g_{BB}) - \\
 &\quad - (u_A(t)g_{AB} + u_C(t)g_{CB})^2 Z_B - \\
 &\quad - (u_A(t)u_B(t)g_{AB} + u_B(t)u_C(t)g_{CB})(1 + g_B Z_B)] dt; \\
 Q_{OB.C} &= \frac{1}{T} \int_0^{t^+} [u_C^2(t) (g_{CC} - g_C)(1 - Z_C g_{CC}) - \\
 &\quad - (u_B(t)g_{BC} + u_A(t)g_{AC})^2 Z_C - \\
 &\quad - (u_C(t)u_B(t)g_{BC} + u_A(t)u_C(t)g_{AC})(1 + g_C Z_C)] dt,
 \end{aligned}$$

де  $g_{AA} = (Z_B + Z_b + Z_c + Z_C)/Z_{ABC}$  – власна провідність фази  $A$  при еквівалентуванні трифазної системи для визначення струму методом накладання;  $g_{BB} = (Z_A + Z_a + Z_c + Z_C)/Z_{ABC}$  – власна провідність фази  $B$  при еквівалентуванні трифазної системи для визначення струму методом накладання;  $g_{CC} = (Z_B + Z_b + Z_a + Z_A)/Z_{ABC}$  – власна провідність фази  $C$  при еквівалентуванні трифазної системи для визначення струму методом накладання;  $g_{BA} = g_{AB} = (Z_c + Z_C)/Z_{ABC}$  –

взаємна провідність фаз  $A$  та  $B$  при еквівалентуванні трифазної системи для визначення струму методом накладання;

$g_{CA} = g_{AC} = (Z_b + Z_B)/Z_{ABC}$  – взаємна провідність фаз  $A$  та  $C$  при еквівалентуванні трифазної системи для визначення струму методом накладання;  $g_{CB} = g_{BC} = (Z_a + Z_A)/Z_{ABC}$  – взаємна провідність фаз  $B$  та  $C$  при еквівалентуванні трифазної системи для визначення струму методом накладання;

$$\begin{aligned}
 Z_{ABC} &= (Z_A + Z_a)(Z_B + Z_b + Z_c + Z_C) + \\
 &\quad + (Z_B + Z_b)(Z_c + Z_C);
 \end{aligned}$$

$g_A = \int_0^T (u_A(t)Z_{AA} - u_B(t)Z_{BA} - u_C(t)Z_{CA})/u_A(t) dt$  – власна провідність фази  $A$ , що характеризує активну складову струму;

$g_B = \int_0^E (u_B(t)Z_{BB} - u_A(t)Z_{AB} - u_C(t)Z_{CB})/u_B(t) dt$  – власна провідність фази  $B$ , що характеризує активну складову струму;

$g_C = \int_0^T (u_C(t)Z_{CC} - u_B(t)Z_{BC} - u_A(t)Z_{AC})/u_C(t) dt$  – власна провідність фази  $C$ , що характеризує активну складову струму.

Враховуючи, що інтеграл різниці рівний різниці інтегралів, розділимо попередній вираз на дві частини та винесемо за знак інтегрування постійні параметри, а також виконаємо заміну,  $g'_A = g_{AA} - g_A$ ,  $g'_B = g_{BB} - g_B$ ,  $g'_C = g_{CC} - g_C$ , для спрощення запису:

$$\begin{aligned}
 Q_{OB.A} &= \frac{(1 - Z_A g_{AA})g'_A}{T} \int_0^{t^+} u_A^2(t) dt - \\
 &\quad - \frac{1}{T} \int_0^{t^+} [(u_B(t)g_{BA} + u_C(t)g_{CA})^2 Z_A + (u_A(t)u_B(t)g_{BA} + \\
 &\quad + u_A(t)u_C(t)g_{CA})(1 + g_A Z_A)] dt; \\
 Q_{OB.B} &= \frac{(1 - Z_B g_{BB})g'_B}{T} \int_0^{t^+} u_B^2(t) dt - \\
 &\quad - \frac{1}{T} \int_0^{t^+} [(u_A(t)g_{BA} + u_C(t)g_{CB})^2 Z_B + (u_B(t)u_A(t)g_{BA} + \\
 &\quad + u_B(t)u_C(t)g_{CB})(1 + g_B Z_B)] dt; \\
 Q_{OB.C} &= \frac{(1 - Z_C g_{CC})g'_C}{T} \int_0^{t^+} u_C^2(t) dt -
 \end{aligned}$$

$$-\frac{1}{T} \int_0^{t^+} [(u_B(t)g_{BC} + u_A(t)g_{CA})^2 Z_C + (u_C(t)u_B(t)g_{BC} + u_A(t)u_C(t)g_{CA})(1 + g_C Z_C)] dt.$$

Ввівши позначення складових обмінної потужності, що характеризують власний вплив окремих фаз, як  $Q_{OB.AA}$ ,  $Q_{OB.BB}$ ,  $Q_{OB.CC}$ , а складові обмінної потужності, що характеризують взаємний вплив трифазної системи на відповідну фазу як  $Q_{OB.AB}$ ,  $Q_{OB.BC}$ ,  $Q_{OB.AC}$ , запишемо:

$$\begin{aligned} Q_{OB.A} &= Q_{OB.AA} - Q_{OB.BC}; \\ Q_{OB.B} &= Q_{OB.BB} - Q_{OB.AC}; \\ Q_{OB.C} &= Q_{OB.CC} - Q_{OB.AB}. \end{aligned} \tag{6}$$

Отже, обмінна потужність трифазної системи через загальний перетин двох генераторів, що живлять одне навантаження, матиме вигляд:

$$Q_{OB} = \sum_{i=1}^m Q_{OB,i} = Q_{OB.A} + Q_{OB.B} + Q_{OB.C},$$

$$Q_{OB} = Q_{OB.AA} + Q_{OB.BB} + Q_{OB.CC} - (Q_{OB.AB} + Q_{OB.BC} + Q_{OB.AC}).$$

Проведені розрахунки дозволяють формально розділити перетоки потужності між фазами, між основним генератором та навантаженням, між допоміжним генератором та навантаженням та між генераторами в цілому.

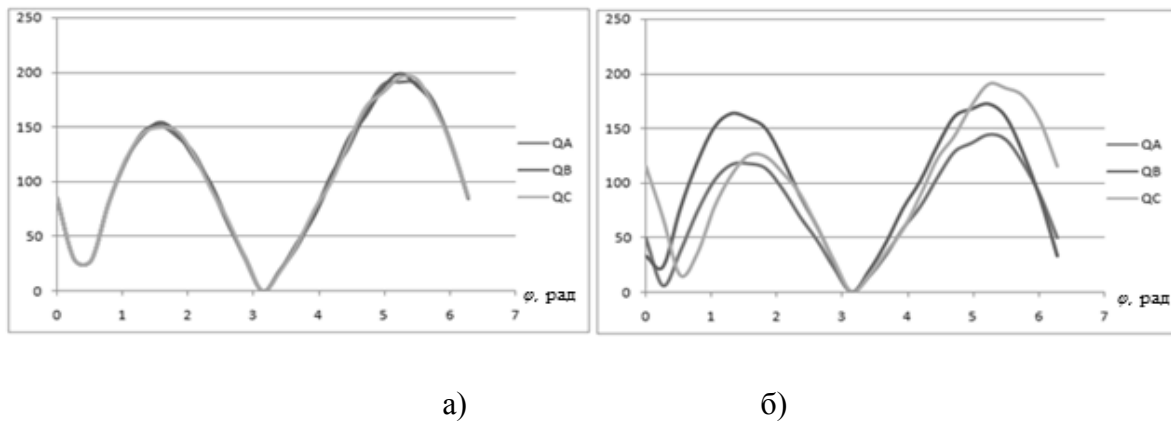


Рис. 6. Обмінна потужність через перетини навантаження при зміні фази включення другого генератора при несиметричному навантаженні.

Fig. 6. Exchange power through the load cross-section when the phase of the second generator is switched on with asymmetric load.

На рис. 6 наведено залежність обмінної потужності при несинхронному включенні двох однакових вітрогенераторів при роботі – на симетричне навантаження, та б – на несиметричне навантаження в перетинах відповідних фаз А, В та С. Для конкретного виду навантаження при куті відхилення напруги генераторів в  $\pi$  обмінна потужність через всі перетини є мінімальною та рівною нулю, що пояснюється взаємокомпенсацією при включенні в трифазну. Максимальні екстремуми обмінної потужності спостерігаються

при кутах  $\pi/2$  та  $5\pi/3$  як при симетричному навантаженні, так і при несиметричному. Проте, при несиметрії їхнього значення в фазі, що є джерелом несиметрії значно менше. Такий характер графіків пояснюється впливом не лише суміжних фаз генераторів, а і несиметричного навантаження.

Обмінна потужність через відповідні перетини генераторів та навантаження залежно від потужності другого генератора представлено на рис. 7 і рис. 8.

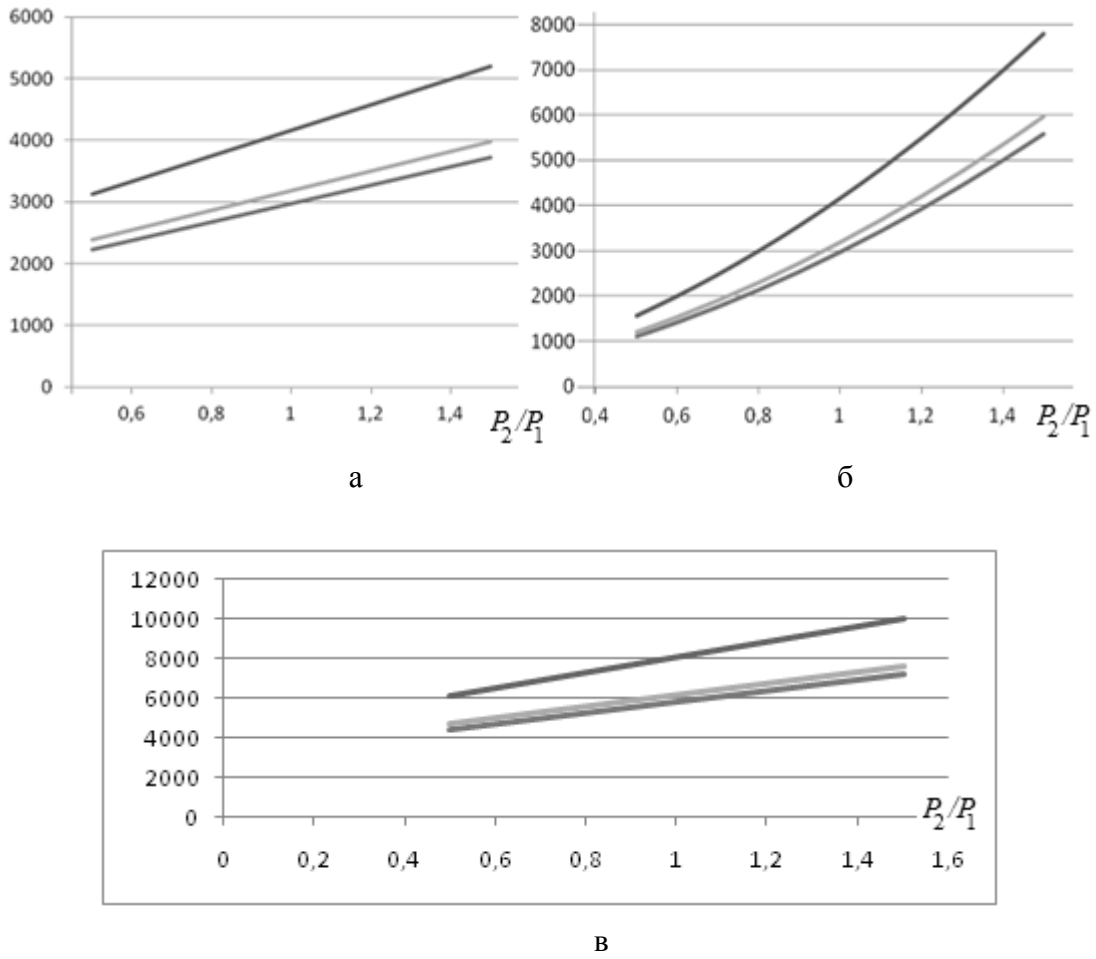


Рис. 7. Залежності  $Q_{OB.i} = f(P_2)$  через перетини базового генератора (а), другого генератора (б), через перетини на навантаженні (в).

Fig. 7. Dependencies  $Q_{OB.i} = f(P_2)$  of the intersection of the base generator (а), the second generator (б), through the section on the load (в).

$$- Q_{OB.Ai} = f(P_2); - Q_{OB.Bi} = f(P_2); - Q_{OB.Ci} = f(P_2)$$

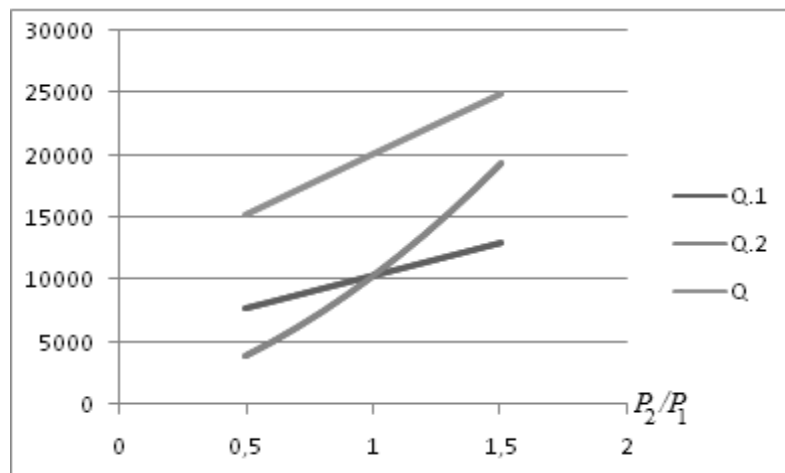


Рис. 8. Обмінні потужності через загальні перетини генераторів та навантаження.

Fig. 8. Exchange power through generators and load cross sections.



Як видно з рис. 7а обмінна потужність через відповідні перетини фаз залежно від потужності допоміжного генератора є лінійною. Для перетинів допоміжного генератора (рис. 7б), обмінна потужність змінюється також майже лінійно, але з більшою крутизною. Тому в перетинах фаз навантаження, ця залежність є лінійною (рис. 7в). На рис. 7в положення залежностей обмінної потужності в перетині навантаження пофазно відповідає генерації. Крутизна нахилу кривих залежить від потужності допоміжного вітрогенератора, а лінійність залежності – від потужності основного вітрогенератора. Оскільки обидва генератора є симетричними, використавши формули (6), отримасмо рис. 7в, який демонструє режими паралельної роботи вітрогенераторів та вивід їх із синхронізму. Порушення умов синхронної роботи двох вітрогенераторів може призвести до: виникнення в обмотках статора обох генераторів зрівнювального струму, що призведе до навантаження обмоток статорів обох генераторів, нагріваючи їх і лінії електропередачі між генераторами і не дозволяючи використовувати генератори за струмом повністю; виникнення перехідного процесу, характер якого залежить від значення різниці частот обох генераторів та кута зсуву фаз між ЕРС генераторів; створення на валах обох генераторів динамічних моментів (гальмівного та розганяльного); виникнення резонансу [9, 10]. Під час зростання потужності допоміжного генератора від  $0,5P_I$  до  $1,5P_I$  зростає і обмінна потужність (рис. 8). Швидкість зростання відрізняється через вплив несиметричного навантаження. Кут  $\psi$ , що характеризується відношенням індуктивної складової опору до активної, є найменшим у фазі *B*, а найбільшим у фазі *C*. Складова опору, що характеризує амплітудну несиметрію навантаження *Z*, найбільша в фазі *C* і найменша в фазі *B*. Отже фазна несиметрія здійснює суттєвий вплив на обмінні процеси в системі, в той час як амплітудна несиметрія призводить до зменшення швидкості зростання обмінної потужності. Точка перетину залежностей першого та другого генератора характеризує синхронну роботу двох однакових за потужністю генераторів.

**Висновки.** 1. Побудовано аналітичні залежності та уточнено формули для визначення об-

мінної потужності багатогенераторних систем, що характеризують власний та взаємний впливи окремих елементів автономної системи електроживлення на базі паралельно працюючих вітрогенераторів в довільному перетині системи, отримали змогу визначити вплив будь-якого елемента системи (споживача, перетворювача, генератора тощо) на інші елементи системи. Ці залежності можна використовувати для кількісної оцінки перетоків у трифазних автономних системах з двома генераторами та відтворити данні формули для *n* генераторів підключених до одного споживача.

2. Проведено оцінювання обмінних процесів під час паралельної роботи двох вітрогенераторів однакової потужності включених несинхронно при різному характері навантаження. Це дозволило обрати оптимальний момент включення або відключення генераторів та здійснити оцінку ймовірного взаємного впливу вітрогенераторів при об'єднанні їх для живлення одного навантаження в конкретний момент часу.

3. Проведено аналіз обмінних процесів при паралельній роботі двох вітрогенераторів різної потужності, що живлять несиметричне навантаження. Виявлено лінійність залежності обмінної потужності від різниці потужностей генераторів, що, в свою чергу, дозволяє виконувати прогнозування поведінки системи, що живиться від кількох вітрогенераторів з урахуванням різниці умов їхньої експлуатації.

1. Journals, B., EMC and Smart Grid Applications / B. Journals // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. – 2010.

2. Verma, S.P. Smart Grid, Its Power Quality and Electromagnetic Compatibility [Текст] / S.P. Verma, P. Kumar, Noor-ul-Islam. // MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering. – 2012. – №1. – С. 55–64.

3. Саенко Ю.Л. Проблемы электромагнитной совместимости в системах электроснабжения с мощными преобразователями частоты [Текст] / Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко // Приазовский государственный технический университет. – С. 57–62.

4. Кириленко О.В. Особливості забезпечення електромагнітної сумісності в електричних мережах України [Текст] / О.В. Кириленко, С.П. Денисюк, О.Б. Рибіна // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – №1(16), Частина 1. – С. 27–30.

5. Жежеленко И.В. Электромагнитная совместимость

потребителей [Текст]: монография / И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк и др. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.

6. Денисюк С.П. Анализ проблем впровадження віртуальних електростанцій [Текст] / С.П. Денисюк, Д.С. Горенко // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – №2. – С. 25–33.

7. Дерев'яно Д.Г. Особливості побудови та функціонування віртуальних електростанцій в умовах розвитку ОЕС України [Текст] / Д.С. Горенко, Д.Г. Дерев'яно // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – №3. – С. 61–69.

8. Жаркин А.Ф. Системы электроснабжения с источниками распределенной генерации [Текст]: [науч. изд.] / А.Ф. Жаркин, С.П. Денисюк, В.А. Попов; НАН Украины, Ин-т электродинамики. – К.: Наукова думка, – 2017. – 232 с.

9. Ермолин Н.П. Электрические машины [Текст] / Н.П. Ермолин. – М.: Высш. школа, 1975. – 295 с.

10. Кононенко Е.В. Электрические машины (спец. курс) [Текст] / Е.В. Кононенко, Г.А. Сипайлов, К.А. Харьков. – М.: Высш. школа, 1975. – 279 с.

11. Жуйков В.Я. Энергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами [Текст] / В.Я. Жуйков, С.П. Денисюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 264 с.

12. Денисюк С.П. Обмінні процеси в трифазних автономних системах електроживлення [Текст] / С.П. Денисюк, Д.С. Горенко // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2016. – №45. – С. 9–15.

13. Denysiuk S. Analysis of exchange processes during parallel operation of wind electric units [Текст] / S. Denysiuk, D. Horenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – 4/8 (82). С. 26–32.

14. Kramer W. Advanced Power Electronics Interfaces for Distributed Energy System / W. Kramer, S. Chakraborty, B. Kroposki, H. Thomas // NREL / TP-581-42672. – March 2008. – 132 p.

15. Горенко Д.С. Анализ влияния кондуктивных завод на систему з нетрадиційними джерелами електроенергії [Текст] / Д.С. Горенко, Г.В. Мельничук // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – №2. – С. 72–81.

16. Staniulis R. Reactive Power Valuation [Текст] / R. Staniulis. // TEIE-5150. – 2001. – С. 1–42.

17. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи [Текст] / Л.А. Бессонов. – М.: Высш. школа, 1978. – 528 с.

#### АНАЛИЗ ОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ДВУХ ТРЕХФАЗНЫХ ВЕТРОУСТАНОВОК

**С.П. Денисюк**, доктор технических наук, **Д.С. Горенко**.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»  
03056 г. Киев, ул. Борщаговская, 115, корпус 22.

*Выделены проблемы электромагнитной совместимости в Smart Grid. Проведен сравнительный анализ различных типов электрических машин переменного тока, входящих в*

*состав ветровых установок. Рассмотрены обменные процессы при параллельной работе двух трехфазных источников электроэнергии. На основе предыдущих исследований питания одним трехфазным генератором несимметричной несинусоидальной нагрузки проанализированы перетоки энергии через соответствующие сечения системы. Приведен обобщенный расчет для i-го сечения системы. Построены зависимости обменных процессов двух трехфазных генераторов различной мощности, работающих синхронно друг друга, но не синхронно. Библ. 17, рис. 8.*

**Ключевые слова:** Smart Grid, автономные системы электропитания, ветровые электроустановки, электромагнитная совместимость, трехфазные системы электропитания, обменные процессы, обменная мощность.

#### REFERENCES

1. Journals, B. (2010) EMC and Smart Grid applications. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine.

2. Verma, S.P., Kumar P., Noor-ul-Islam (2012) Smart Grid, Its Power Quality and Electromagnetic Compatibility. MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering, 1, 55–64.

3. Sayenko Yu.L., Baranenko T.K. Problemy elektromagnitnoy sovmestivosti v sistemakh elektrosnabzheniya s moshchnymi preobrazovatelyami chastoty [Problems of electromagnetic compatibility in power supply systems with powerful frequency converters]. Priazovsky State Technical University, 57–62. [in Russian]

4. Kirilenko O.V., Denysiuk S.P., Ribina O.B. (2007) Osoblyvosti zabezpechennia elektromagnitnoi sumisnosti v elektrychnykh merezhakh Ukrainy [Especially in the electricity supply of Ukraine] Pr. Inst. Elektrodynamiky NASU [Works of the Institute of Electrodynamics], 16, 27–30. [in Ukrainian]

5. Zhezhelenko I.V., Shidlovsky A.K., Pivnyak G.G., etc. (2012) Elektromagnitnaya sovmestimost potrebiteley [Electromagnetic Compatibility of Consumers]. Machinostroenie [Mechanical Engineering] 351. [in Russian]

6. Denysiuk S.P., Horenko D.S. (2016) Analiz Problem vprovadzhennya virtualnyh elektrostanciy [Analysis of problems in the field of virtual electric power]. Energetika: ekonomika, tehnologii, ekologiya, [Power engineering: economics, technology, ecology], 2, 25–33. [in Ukrainian]

7. Derevyanko D.G., Horenko D.S. (2016) Osoblyvosti pobudovy ta funkcionuvannya virtualnyh elektrostanciy v umovah OES Ukraini. [Particular attention is paid to the function of the virtual electric power in the development of the OEC of Ukraine]. Energetika: ekonomika, tehnologii, ekologiya, [Power engineering: economics, technology, ecology], 3, 61–69. [in Ukrainian]

8. Zharkin A.F., Denysiuk S.P., Popov V.A. (2017) Sistemy elektrosnabzheniya s istochnikami raspredeleynoy generacii [Power supply systems with sources of distributed generation], Naukova dumka, 232. [in Russian]

9. Ermolin N.P. (1975) Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Vysshaya shkola [Higher education. school] 295. [in Russian]

10. Kononenko E.V., Sipailov G.A., Kharkiv K.A. (1975) *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Vysshaya shkola [Higher education. school] 279. [in Russian]
11. Zhuikov V.Ya., Denisyuk S.P. (2010) *Enerhetychni protsesy v elektrychnykh kolakh z kliuchovymy elementamy*. [Energetic processes in power supplies with key elements]. NTUU «KPI» 264. [in Ukrainian]
12. Denysiuk S.P., Horenko D.S. (2016) *Obminni protsesy v tryfaznykh avtonomnykh systemakh elektrozhivlennia* [Exchange processes in three-phase autonomous electric power systems]. Pr. Inst. Elektrodynamiky NASU [Works of the Institute of Electrodynamics], 45, 9–15. [in Ukrainian]
13. Denysiuk S.P., Horenko D.S. (2016) Analysis of Exchange Processes During Parallel Operation of Wind Electric Units. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 82, 26–32.
14. Kramer W., Chakraborty S., Kroposki B., Thomas H. (2008) *Advanced Power Electronics Interfaces for Distributed Energy System*. NREL TP-581-42672, 132.
15. Horenko D.S., Melnychuk G.V. (2016) *Analiz vplyvu konduktivnykh zavad na systemu z netradytsiinymy dzherelamy elektroenerhii*. [Analiz vplyvu conductive zavad on the system with unconventional electric jerkers]. *Energetika: ekonomika, tehnologii, ekologiya*, [Power engineering: economics, technology, ecology], 4, 72-81. [in Ukrainian]
16. Staniulis, R. (2010) *Reactive Power Valuation*. TEIE-5150, 42.
17. Bessonov L.A. (1978) *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: Elektricheskie tsepi*. [Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Electric Circuit]. Vishya shkola [Higher education. school], 528. [in Russian]

## SYNOPSIS

An extended analysis of electromagnetic compatibility problems in the Smart Grid and the use of wind turbines in them is carried out. A comparative analysis of different types of electric AC machines, which are part of wind turbines, is carried out. The purpose of the study is to analyze the exchange processes in autonomous three-phase power supply systems based on wind power plants of different capacities. The authors set forth the following tasks: construction of analytical dependencies of own and mutual influences of separate elements of the autonomous power supply system model with two wind turbines in an arbitrary intersection, analysis of exchange processes in parallel operation of two wind turbines of the same power included non-synchronously and analysis of exchange processes in parallel operation of two wind turbines of different power included synchronously, feeding the asymmetric load. The analytical dependences have been constructed and the formulas for determining the exchange power of many generator systems characterizing the own and mutual influences of separate elements of the autonomous power supply system on the basis of parallel operating wind turbines at an arbitrary section of the system have been able to determine the influence of any element of the system (consumer, converter, generator

etc.) to other elements of the system. These dependencies can be used to quantify the flows in three-phase autonomous systems with two generators and to reproduce the given formula for  $n$  generators connected to one user. It was carried out to evaluate the exchange processes in parallel operation of two wind turbines of the same power included non-synchronously with different loading. This allowed us to choose the optimal moment of switching on or off the generators and to evaluate the likely mutual influence of the wind turbines when combined to feed one load at a specific time. The analysis of exchange processes during the parallel work of two wind turbines of different power, feeding the asymmetric load is carried out. The linearity of the exchange power depends on the power generators' difference, which in turn allows us to predict the behavior of a system powered by several wind turbines, taking into account the difference in conditions of their operation.

## РЕФЕРАТ

Проведено розширений аналіз проблем електромагнітної сумісності в Smart Grid при використанні вітрових генераторів. Проведено порівняльний аналіз різних типів електричних машин змінного струму, які є частиною вітрових генераторів. Метою дослідження обрано аналіз процесів обміну в автономних трифазних системах електропостачання на основі вітрових електростанцій різної потужності. Розглянуто такі завдання: побудова аналітичних залежностей власного та взаємного впливу окремих елементів моделі автономної електроенергосистеми з двома вітровими генераторами в довільному перетині; аналіз обмінних процесів при паралельній роботі двох вітрових генераторів однакової потужності включених несинхронно; аналіз обмінних процесів при паралельній роботі двох вітрогенераторів різної потужності, включених синхронно, що живлять несиметричне навантаження. Побудовано аналітичні залежності для визначення обмінної потужності багатогенераторних систем, що характеризують власні та взаємні впливи окремих елементів автономної системи електропостачання на базі паралельних працюючих вітрових генераторів. Наведено формули за допомогою яких в довільному перетині системи можна визначити вплив будь-якого елемента (споживача, перетворювач, генератор тощо) на інші елементи системи. Ці залежності можуть бути використані для кількісної оцінки потоків у трифазних автономних системах з двома генераторами та відтворювати задану формулу для  $n$  генераторів, що живлять спільне навантаження. Також було проведено оцінку обмінних процесів при паралельній експлуатації двох вітрових генераторів однієї і тієї ж потужності включених синхронно, що живлять несиметричне навантаженням. Це дозволило вибрати оптимальний момент включення або вимкнення генераторів та оцінити імовірний взаємний вплив вітрових генераторів, коли вони сумісно живлять одне навантаження. Лінійність обмінної потужності залежить від різниці потужності генераторів, що, в свою чергу, дозволяє прогнозувати поведінку системи, яка працює на декількох вітрових генераторів, з урахуванням різниці в умовах їх експлуатації.

Стаття надійшла до редакції 01.11.2017

Остаточна версія 04.06.18