

УДК 621.316.716.2

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288179

© Постіл А.О.¹, Бялобржеський О.В.²

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ
АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ФАЗНИМ РОТОРОМ
ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ГЕНЕРАЦІЇ
З НЕСИМЕТРІЄЮ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАШИНИ**

За результатами аналізу систем з використанням генераторів подвійного живлення виявлено різноманіття моделей, більшість з яких побудовані у α - β та d - q системах координат. Моделі та системи керування виконані з урахуванням несиметрії напруги електричної мережі. Синтезовано модель трифазного генератора подвійного живлення з можливістю введення несиметрії електричних параметрів статора та ротора. Проведено моделювання режимів із симетричними та несиметричними параметрами обмоток машини. Несиметрію реалізовано шляхом зміни індуктивності та опору однієї з фаз статора та/або ротора. В обох випадках отримано необхідний режим генерації як за частотою напруги, так і за її діючим значенням. У разі несиметричних параметрів обмоток відмічена несиметрія генерованої напруги та виникнення пульсації електромагнітного моменту з частотою 100 Гц. Використовуючи підхід до аналізу електричної потужності, зумовленої напругою та струмом прямої, зворотної та нульової послідовностей, за результатами моделювання відмічено, що у разі несиметрії разом із виникненням складових потужності зворотної послідовності відбуваються зміни у складових потужності прямої послідовності. Зазначені складові потужності зростають із збільшенням несиметрії параметрів машини.

Ключові слова: асинхронний генератор з фазним ротором, несиметрія електричних параметрів, генерація, активна та реактивна потужності, пряма, зворотня та нульова послідовності.

A.O. Postil, O.V. Bialobrzheskyi. Double feed inductor generator mathematical model for studying generation modes with unbalance of electrical machine parameters. The analysis of systems using dual power generators revealed a variety of models, most of which are built in the α - β and d - q coordinate systems. Models and control systems are made taking into account the unbalance of the voltage of the electrical network. A model of a three-phase dual-supply generator with the possibility of introducing asymmetry of the electrical parameters of the stator and rotor has been synthesized. Modes with symmetric and asymmetric parameters of the machine windings were modeled. Unbalance is implemented by changing the inductance and resistance of one of the stators and/or rotor phases. In both cases, the required generation mode was obtained both in terms of voltage frequency and its effective value. In the case of unbalance parameters of the windings, asymmetry of the generated voltage and the occurrence of pulsations of the electromagnetic moment with a frequency of 100 Hz were noted. Using the approach to the analysis of the electric power caused by the voltage and current of positive, negative and zero sequences, according to the simulation results, it was noted that in the case of asymmetry, along with the appearance of the components of the negative sequence power, changes in the components of the positive sequence power occur. The indicated power components increase with increasing asymmetry of machine parameters.

¹ аспірант, «Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського», м. Кременчук, ORCID: 0000-0001-9411-7047, arturpostil9@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, «Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського», м. Кременчук, ORCID: 0000-0003-1669-4580, seemal@kdu.edu.ua

Keywords: double feed inductor generator, electrical parameters unbalance, generation, active and reactive power, positive, negative and zero sequences.

Постановка проблеми. Розповсюдження альтернативних джерел енергії разом із рішенням задач формування додаткових розосереджених джерел ставить ряд інших задач, які виникають. По-перше, це баланс електричної потужності, по-друге, це стабільність напруги за частотою та діючим значенням, по-третє, це якість електричної енергії в умовах несиметрії та несинусоїдальності струму та/або напруги.

У разі використання вітроенергетичних установок одним з критичних питань оптимальної генерації електричної енергії є дотримання частоти електромагнітного поля статора та підтримка необхідного електромагнітного моменту в умовах нестабільного вітрового потоку. Одним з варіантів вирішення цього завдання є використання асинхронних генераторів з фазним ротором. В такому випадку забезпечення якості електричної енергії залишається пов'язаним із режимами електричної машини – генератора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Покращення стратегії управління асинхронним генератором з подвійним живленням в умовах незбалансованої напруги мережі є актуальним предметом дослідження. Стратегія, запропонована в [1], застосовувалася за умов синхронізації і у умовах підключення до мережі. Процес синхронізації здійснюється шляхом управління компонентами прямої та зворотної послідовності напруги по осі статора q , щоб вони слідували за напругою по осі q напруги мережі. Це реалізується шляхом управління компонентами прямої та зворотної послідовності струму осі d ротора. Формуючи струм осі d ротора, формують ЕРС статора, яка відповідає напрузі мережі. Пропонована стратегія управління фокусується на регулюванні середньої активної та реактивної потужності статора шляхом управління позитивними складовими струмів по осі q і d відповідно. Також реалізується мінімізація пульсацій крутного моменту генератора шляхом керування компонентами зворотної послідовності ротора.

Модульна стратегія управління системою асинхронного генератора з подвійним живленням, включаючи перетворювач з боку мережі та перетворювач з боку ротора, при несиметричній та гармонійній напрузі мережі представлена у статті [2]. У запропонованій стратегії управління можна уникнути процесу декомпозиції послідовності та складного обчислення управляючого сигналу. Авторами сформовано два напрями керування: плавна подача активної та реактивної потужності в електромережу; формування збалансованого та синусоїдального струму, що вводиться в електричну мережу. За рахунок керування роторним перетворювачем формується третя гармоніка струму ротора, яка зменшує пульсації електромагнітного моменту.

Використовують стратегію прямого управління потужністю в режимі ковзання для асинхронного генератора з подвійним живленням як в збалансованих, так і в незбалансованих умовах мережі з використанням розширеної активної потужності [3]. Пропонується розширена активна потужність, яка ефективна як у збалансованих, так і в незбалансованих умовах мережі із простою стратегією управління. Зазначена стратегія дозволяє отримувати синусоїдальні струми статора та стримувати пульсації електромагнітного моменту в умовах незбалансованої мережі без необхідності процесу декомпозиції та контуру фазового автопідстроювання частоти. Подібні рішення застосовано в роботі [4], де також використане спільне управління перетворювачем з боку ротора та перетворювачем з боку мережі системи генерації асинхронного генератора з подвійним живленням в умовах небалансу мережі. Перетворювач з боку ротора керується для зменшення пульсацій крутного моменту. Визначено напрям управління мережевим перетворювачем, тобто збалансовані повні струми і постійна повна активна або реактивна потужність, щоб зменшити вплив напруги зворотної послідовності на продуктивність системи.

Робота системи перетворення енергії вітру на основі асинхронного генератора з подвійним живленням за дослідженням [5] виявилася надзвичайно чутливою до невірніважених напруг мережі. Авторами представлена вдосконалена стратегія управління, що працює при незбалансованих напругах мережі, з використанням змішаного узагальненого інтегратора. Він являє собою гібридну форму узагальнених інтеграторів другого та третього порядку та використовується для розрахунку позитивної та негативної послідовності. Стратегія розширеного управління на основі такого інтегратора використовує управління по смузі гістерезису струмами ротора та струмами мережі для створення послідовностей перемикання для перетворювача з боку ротора і

перетворювача з боку мережі відповідно. Автори відзначають покращення синхронізації мережі в системі з генератором за наявності небалансу напруги живлення. Узгоджена схема прямого управління потужністю для перетворювача з боку ротора [6] та перетворювача з боку мережі асинхронного генератора з подвійним живленням за умов незбалансованої напруги мережі. Для усунення взаємодій зв'язку між контуром фазового автопідстроювання частоти та локальною незбалансованою мережею використовується віртуальний фазовий кут замість фактичного. Під час дисбалансу мережі перетворювач ротора керується для зменшення пульсацій крутного моменту. Односторонній резонансний регулятор із частотною розв'язкою між сигналами прямої та зворотної послідовності однієї й тієї ж частоти використовується у узгодженій схемі прямого керування потужністю, щоб уникнути складних розрахунків компонентів компенсації потужності. Автори досліджують межі напруги у ланці постійного струму, коливання потужності постійного струму конденсатора, вплив відхилень частоти і мережеву синхронізацію запропонованої стратегії.

В роботі [7] пропонують гнучку стратегію компенсації для паралельно з'єднаних асинхронних генераторів з подвійним живленням при підключенні до несиметричної слабкої мережі. Пропонована стратегія має дві основні переваги: коефіцієнт несиметрії напруги в точці загального зв'язку можна безперервно контролювати, таким чином, може бути досягнутий гнучкий компроміс між балансом вихідним струмом генератора і збалансованою напругою. При цьому зворотна послідовність струму, яка необхідна для компенсації, може бути належним чином розподілена між паралельними генераторами та їх перетворювачами з боку мережі відповідно до їх відповідних умов роботи без необхідності зв'язку в реальному часі. Проаналізовано продуктивність та стійкість запропонованої стратегії.

Максимальний відбір потужності та постійне вироблення енергії плавним і безперервним чином є складними завданнями управління для надійної роботи генератора подвійного живлення при провалах напруги в мережі через сильні пульсації потужності та крутного моменту [8]. Суть роботи полягає в тому, щоб обчислити кутову частоту потоку статора для точного еталонного вироблення електроенергії та управління генератором, схильним до асиметрії напруги мережі. Кутова частота потоку статора розраховується за компонентами напруги та струму статора у стаціонарній системі відліку прямої послідовності α - β без необхідності використання автоналаштування частоти та диференціювання вектора напруги статора. Обчислений сигнал частоти магнітного потоку статора використовується для розрахунку швидкості обертання ротора та вироблення еталонної потужності для отримання максимальної потужності генератора.

Щоб безперешкодно підключати до постійно обурених мереж вітряні турбіни на основі генераторів подвійного живлення, потрібно точно синхронізувати напругу, індуковану на їхньому статорі, з напругою мережі [9]. З метою вирішення задачі синхронізації генераторів з одночасно незбалансованими і гармонійно спотвореними мережами пропонується алгоритм керування ковзним режимом без фазового автопідстроювання частоти та природно без вібрацій. Автори розробили рішення на основі стаціонарної системи відліку, що дозволяє уникнути розкладання на позитивні та негативні послідовності та гармонійні складові. У статті [10] представлена еталонна схема генерації струму для покращення динамічних характеристик асинхронного генератора з подвійним живленням, який підключений до несиметричної напруги мережі. Коливання потужності і крутного моменту, викликані дисбалансом напруги в мережі, мінімізуються за допомогою додаткових компенсаційних складових в опорних струмах. Основна увага приділяється оцінці опорних струмів та реалізації керування без необхідності подвійного векторного керування. Управління активною та реактивною потужністю реалізовано у позитивній системі відліку d - q з використанням векторного управління, орієнтованого на потік статора. Перетворювач на стороні ротора управляється для забезпечення ефективного зниження коливань крутного моменту, активної і реактивної потужності. Коливання напруги у ланці постійного струму зведено до мінімуму, а коефіцієнт потужності з боку мережі підтримується рівним одиниці за допомогою перетворювача з боку мережі. На відміну від раніше описаних методів, запропонована схема дозволяє ефективно зменшити коливання моменту, що крутить, активної і реактивної потужності, а також напруги у ланці постійного струму.

Але в усіх перелічених випадках автори покладають, що електрична машина симетрична як у колах статора, так і у колах ротора. В деяких випадках виникає несиметрія електричних

параметрів ротора та/або статора, що викликає необхідність дослідження впливу несиметрії електричних параметрів машини на режим генерації.

Мета статті – розробка моделі асинхронного генератора з фазним ротором для дослідження режимів генерації із несиметрією електричних параметрів машини.

Виклад основного матеріалу. Залежно від задач дослідження використовується декілька способів представлення електромеханічних процесів асинхронного генератора. Відносно простий та досить адекватний, з позиції авторів [11], є спосіб, в якому покладають вектор потоку взаємодукації і відповідний йому вектор потокозчеплення колінеарними вектору струму намагнічування; самоіндукція розсіювання обмоток статора і ротора вважається незмінною; розподіл потоку намагнічування рівномірний; несиметрія має місце виключно у зовнішніх колах. Поширюючи такий спосіб на асинхронний генератор з фазним ротором, рівняння електричного балансу для статора:

$$\frac{d\psi_A}{dt} = -i_A R_1 + u_A; \quad \frac{d\psi_B}{dt} = -i_B R_1 + u_B; \quad \frac{d\psi_C}{dt} = -i_C R_1 + u_C, \quad (1)$$

де ψ_A, ψ_B, ψ_C – потокозчеплення фаз статора; i_A, i_B, i_C – струм фаз статора; u_A, u_B, u_C – напруга фаз статора; R_1 – опір статора. Рівнянь електричного балансу для ротора:

$$\frac{d\psi_a}{dt} = -i_a R_2 - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} (\psi_b - \psi_c) + u_a; \quad \frac{d\psi_b}{dt} = -i_b R_2 - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} (\psi_c - \psi_a) + u_b; \quad \frac{d\psi_c}{dt} = -i_c R_2 - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} (\psi_a - \psi_b) + u_c, \quad (2)$$

де ψ_a, ψ_b, ψ_c – потокозчеплення фаз ротора; i_a, i_b, i_c – струм фаз ротора; u_a, u_b, u_c – напруга фаз ротора; R_2 – опір ротора, ω – частота обертання ротора; p_n – кількість пар полюсів.

Відповідно струми статора та ротора визначають з урахуванням само- та взаємодукації наступним чином:

$$i_{A,B,C} = c_1 \psi_{A,B,C} - c_2 \psi_{a,b,c}; \quad i_{a,b,c} = -c_2 \psi_{A,B,C} + c_3 \psi_{a,b,c}, \quad (3)$$

де $c_1 = (L_1 - L_{ек})/L_1^2$; $c_2 = L_{ек}/L_1 L_2$; $c_3 = (L_2 - L_{ек})/L_2^2$; $L_{ек} = L_1 L_2 L_{\mu} / (L_1 L_{\mu} + L_2 L_{\mu} + L_1 L_2)$.

Виконуючи підставлення, отримують рівняння для потокозчеплення статора та ротора в наступному вигляді:

$$\frac{d\psi_A}{dt} = -c_1 R_1 \psi_A + c_2 R_1 \psi_a + u_A; \quad \frac{d\psi_B}{dt} = -c_1 R_1 \psi_B + c_2 R_1 \psi_b + u_B; \quad \frac{d\psi_C}{dt} = -c_1 R_1 \psi_C + c_2 R_1 \psi_c + u_C; \quad (4)$$

$$\frac{d\psi_a}{dt} = -c_2 R_2 \psi_A - c_3 R_2 \psi_a - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_b + \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_c + u_a; \quad \frac{d\psi_b}{dt} = -c_2 R_2 \psi_B - c_3 R_2 \psi_b - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_c + \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_a + u_b; \quad (5)$$

$$\frac{d\psi_c}{dt} = -c_2 R_2 \psi_C - c_3 R_2 \psi_c - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_a + \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_b + u_c.$$

Відповідно вводячи заміну $L_1 \rightarrow L_A, L_B, L_C$, $L_2 \rightarrow L_a, L_b, L_c$ та $R_1 \rightarrow R_A, R_B, R_C$, $R_2 \rightarrow R_a, R_b, R_c$, можливо отримати рівняння для несиметричних параметрів машини, але дані рівняння не враховують взаємну несиметричну індукцію між фазами. Тому більш раціональним є використання способу моделювання асинхронного генератора з фазним ротором, що представлений у [12]. В такому рівняння електричного балансу статора та ротора записують наступним чином:

$$u_A = -i_A R_A + \frac{d\psi_A}{dt}; \quad u_B = -i_B R_B + \frac{d\psi_B}{dt}; \quad u_C = -i_C R_C + \frac{d\psi_C}{dt}; \quad (6)$$

$$u_a = i_a R_a + \frac{d\psi_a}{dt}; \quad u_b = i_b R_b + \frac{d\psi_b}{dt}; \quad u_c = i_c R_c + \frac{d\psi_c}{dt}. \quad (7)$$

Але потокозчеплення в такому випадку розглядаються в більш складній формі з урахуванням кута положення ротора:

$$\psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Aa} i_a \cos \gamma + M_{Ab} i_b \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + M_{Ac} i_c \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right); \quad (8)$$

$$\psi_B = L_B i_B + M_{BA} i_A + M_{BC} i_C + M_{Ba} i_a \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + M_{Bb} i_b \cos \gamma + M_{Bc} i_c \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right); \quad (9)$$

$$\psi_C = L_C i_C + M_{CB} i_B + M_{CA} i_A + M_{Ca} i_a \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + M_{Cb} i_b \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + M_{Cc} i_c \cos \gamma; \quad (10)$$

$$\psi_a = L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c + M_{aA} i_A \cos \gamma + M_{aB} i_B \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + M_{aC} i_C \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right); \quad (11)$$

$$\psi_b = L_b i_b + M_{ba} i_a + M_{bc} i_c + M_{bA} i_A \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + M_{bB} i_B \cos \gamma + M_{bC} i_C \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right); \quad (12)$$

$$\psi_c = L_c i_c + M_{cb} i_b + M_{ca} i_a + M_{cA} i_A \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + M_{cB} i_B \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + M_{cC} i_C \cos \gamma, \quad (13)$$

де γ – кут положення ротора відносно статора; $L_{PH} = L_{\sigma PH} + L_{\mu}$ – індуктивність фази статора; $L_{\sigma PH}$ – індуктивність, зумовлена потоком розсіювання статора; L_{μ} – індуктивність, зумовлена потоком намагнічування; $M_{PHPH} = M_{phph} = -0.5L_{\mu}$ – взаємна індуктивність між фазами статора, ротора; $M_{PHph} = M_{phPH} = L_{\mu}$ – взаємна індуктивність між фазами ротора та статора.

В такому випадку електромагнітний момент електричної машини визначається наступним чином:

$$M_{em} = -\frac{1}{2} L_{\mu} p_n \left[i_A (i_a - 0.5i_b - 0.5i_c) + i_B (i_b - 0.5i_a - 0.5i_c) + i_C (i_c - 0.5i_a - 0.5i_b) \right] \sin \gamma + \\ -\frac{\sqrt{3}}{4} L_{\mu} p_n \left[i_A (i_b - i_c) + i_B (i_c - i_a) + i_C (i_a - i_b) \right] \cos \gamma. \quad (14)$$

Електромагнітний момент та зовнішній механічний момент M_m пов'язані з частотою обертання ротора відомим чином:

$$J \frac{d\omega}{dt} + M_{em} = M_m, \quad (15)$$

де J – момент інерції обертових частин.

Кут положення ротора відносно статора визначається інтегруванням частоти обертання з урахуванням кількості пар полюсів p_n :

$$\gamma = p_n \int \omega dt. \quad (16)$$

Зважаючи на велику кількість рівнянь, таку модель раціонально представити декількома підсистемами. Визначимо як вхідні змінні частоту обертання ротора та напругу ротора, вихідними змінними є напруга статора, струм ротора та електромагнітний момент. Збудуючою дією будемо покладати струм статора. Для підсистеми статора будемо вважати вхідними параметрами струм ротора, кут положення ротора та струм навантаження (струм статора). Зважаючи на велику кількість рівнянь, раціонально скористатись матричною формою. Попередньо введемо відповідні матриці параметрів режиму та параметрів машини:

- струм статора він же струм навантаження асинхронного генератора:

$$\mathbf{i}_s = [i_A \quad i_B \quad i_C]^T = \mathbf{i}_{ld}; \quad (17)$$

- струм ротора:

$$\mathbf{i}_r = [i_a \quad i_b \quad i_c]^T; \quad (18)$$

- напруга статора:

$$\mathbf{u}_s = [u_A \quad u_B \quad u_C]^T; \quad (19)$$

- напруга ротора:

$$\mathbf{u}_r = [u_a \quad u_b \quad u_c]^T; \quad (20)$$

- опір статора:

$$\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} R_A & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 \\ 0 & 0 & R_C \end{bmatrix}; \quad (21)$$

- опір ротора:

$$\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix}; \quad (22)$$

- індуктивність статора:

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{\sigma A} + L_{\mu} & -0.5L_{\mu} & -0.5L_{\mu} \\ -0.5L_{\mu} & L_{\sigma B} + L_{\mu} & -0.5L_{\mu} \\ -0.5L_{\mu} & -0.5L_{\mu} & L_{\sigma C} + L_{\mu} \end{bmatrix}; \quad (23)$$

- індуктивність ротора:

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_{\sigma a} + L_{\mu} & -0.5L_{\mu} & -0.5L_{\mu} \\ -0.5L_{\mu} & L_{\sigma b} + L_{\mu} & -0.5L_{\mu} \\ -0.5L_{\mu} & -0.5L_{\mu} & L_{\sigma c} + L_{\mu} \end{bmatrix}; \quad (24)$$

- взаємна індуктивність ротора та статора:

$$\mathbf{M}_{rs} = L_{\mu} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \gamma & \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \gamma \end{bmatrix}; \quad (25)$$

- взаємна індуктивність статора та ротора:

$$\mathbf{M}_{sr} = \mathbf{M}_{rs}^T. \quad (26)$$

Відповідно напруга статора:

$$\mathbf{u}_s = \frac{d}{dt} \mathbf{M}_{rs} \mathbf{i}_r - \frac{d}{dt} \mathbf{L}_s \mathbf{i}_s - \mathbf{R}_s \mathbf{i}_s. \quad (27)$$

Струм ротора:

$$\mathbf{i}_r = \mathbf{L}_r^{-1} \left[\int \mathbf{u}_r dt - \int \mathbf{R}_r \mathbf{i}_r dt - \mathbf{M}_{sr} \mathbf{i}_s \right]. \quad (28)$$

Таким чином загальну структуру моделі доцільно розглядати за схемою, наведеною на рис. 1а. Відповідно до формул (14-18) реалізовано механічну частину (*Mechanical part*) машини, наведену на рисунку 1б. Статорну частину (*Stator part*) моделі (рис. 2а) реалізовано за формулами (16-19, 21, 23, 25), роторну частину (*Rotor part*) моделі (рис. 2б) реалізовано за формулами (17, 18, 20, 22, 24, 26).

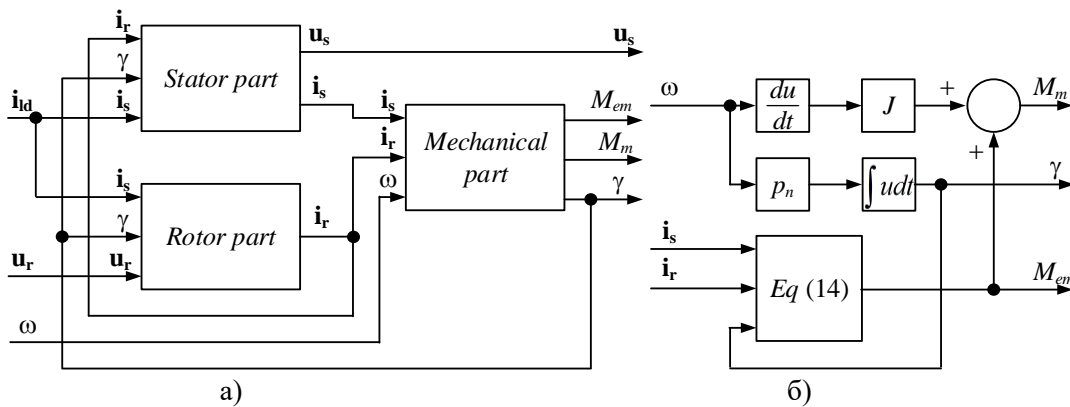


Рис. 1 – Схема моделі: а – загальна; б – механічна частини

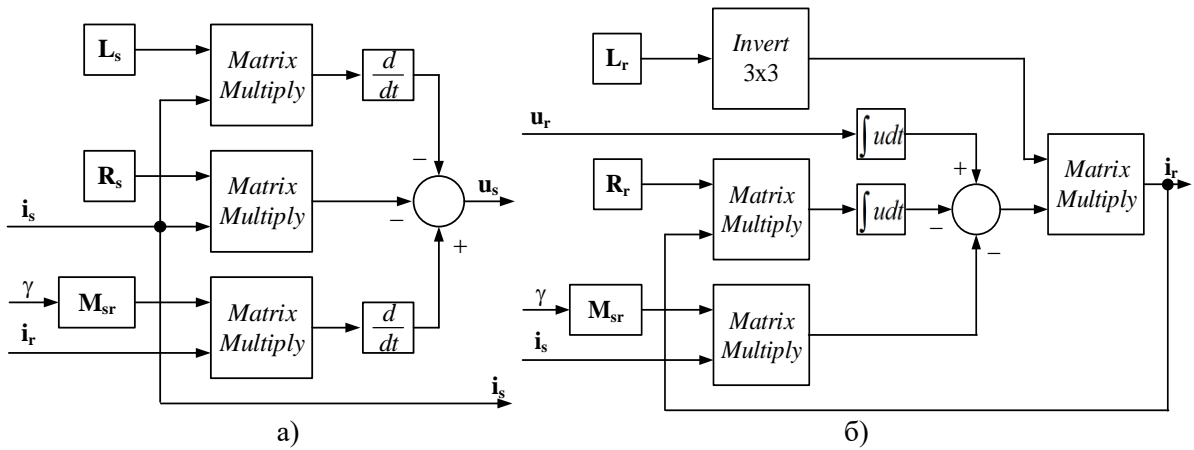


Рис. 2 – Схема моделі: а – статорна частина; б – роторна частина

Зазначену модель синтезовано в пакеті візуального програмування. Використані наступні параметри машини: $L_{\mu} = 0.1 \text{ Гн}$; $L_{\sigma s} = 2 \text{ мГн}$; $L_{\sigma r} = 0.7 \text{ мГн}$; $R_s = 0.435 \text{ Ом}$; $R_r = 0.816 \text{ Ом}$; $p_n = 4$; $J = 0.089 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. За умови дії наступних параметрів режиму: $U_{r,DC} = 5 \text{ В}$; $\omega = 79 \text{ с}^{-1}$ та підтримується незмінною. До статора машини підключене навантаження потужністю $P_{ld} = 4 \text{ кВт}$; $Q_{ld} = 2 \text{ кВАр}$. Проведено дослідження часових діаграм струму, напруги та електромагнітного моменту для двох режимів із симетричними параметрами обмоток (рис. 3а) та несиметричними (рис. 3б). Несиметричний режим реалізовано зміною на -5% параметрів однієї з обмоток статора та ротора. В обох випадках відбувається стала генерація, але у другому випадку, за умови наявності несиметрії параметрів обмоток, наявна несиметрія напруги та струму.

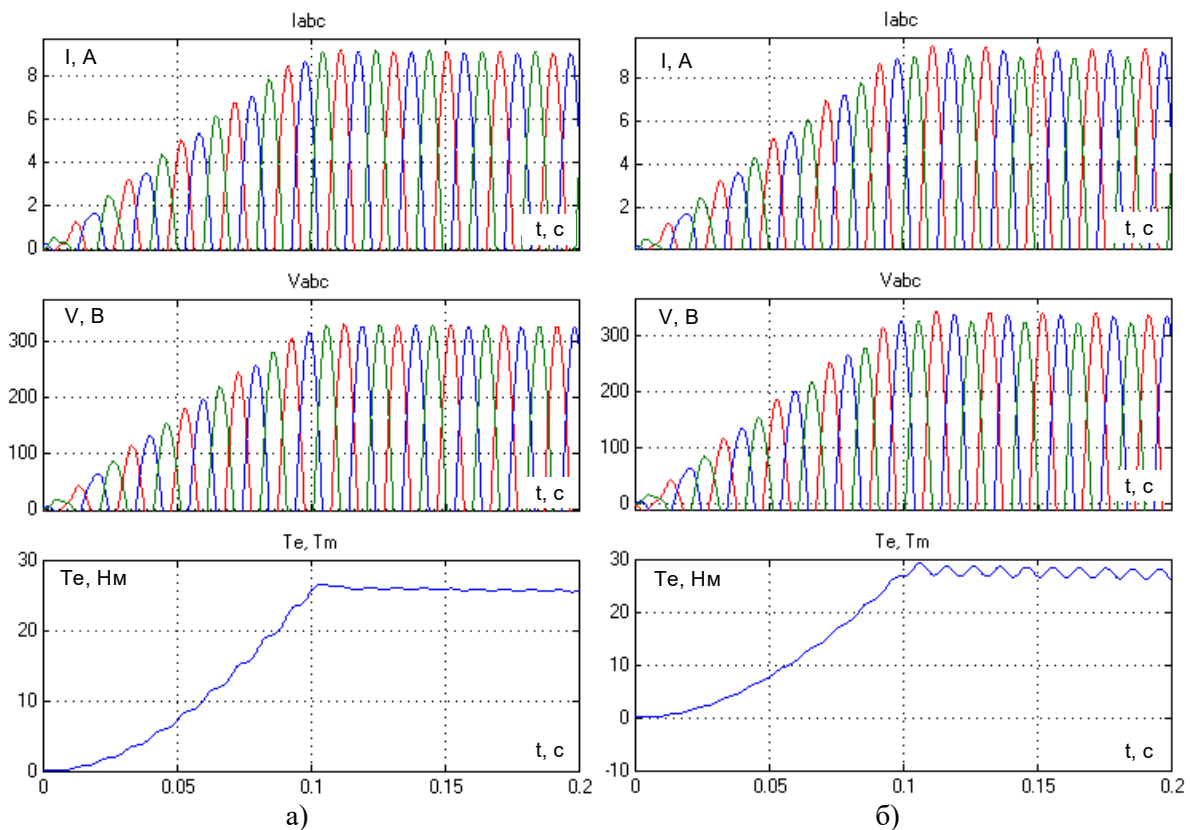


Рис. 3 – Часові діаграми струму, напруги навантаження та електромагнітного моменту: а – симетричний режим; б – несиметричний режим

Задля розширення спектру дослідження розглянемо активні та реактивні потужності прямої та зворотної послідовностей. Розглянемо несиметричну систему, в якій протікає синусоїдальний струм та діє синусоїдальна напруга, які представлені нульовою (0), прямою (+) та зворотною (-) послідовностями [13]:

$$\begin{cases} u_A = \sqrt{2}U_1^0 \sin(\omega t + \psi_{u1^0}) + \sqrt{2}U_1^+ \sin(\omega t + \psi_{u1^+}) + \sqrt{2}U_1^- \sin(\omega t + \psi_{u1^-}); \\ u_B = \sqrt{2}U_1^0 \sin(\omega t + \psi_{u1^0}) + \sqrt{2}U_1^+ \sin(\omega t + \psi_{u1^+} - 2\pi/3) + \sqrt{2}U_1^- \sin(\omega t + \psi_{u1^-} - 4\pi/3); \\ u_C = \sqrt{2}U_1^0 \sin(\omega t + \psi_{u1^0}) + \sqrt{2}U_1^+ \sin(\omega t + \psi_{u1^+} - 4\pi/3) + \sqrt{2}U_1^- \sin(\omega t + \psi_{u1^-} - 2\pi/3); \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} i_A = \sqrt{2}I_1^0 \sin(\omega t + \psi_{i1^0}) + \sqrt{2}I_1^+ \sin(\omega t + \psi_{i1^+}) + \sqrt{2}I_1^- \sin(\omega t + \psi_{i1^-}); \\ i_B = \sqrt{2}I_1^0 \sin(\omega t + \psi_{i1^0}) + \sqrt{2}I_1^+ \sin(\omega t + \psi_{i1^+} - 2\pi/3) + \sqrt{2}I_1^- \sin(\omega t + \psi_{i1^-} - 4\pi/3); \\ i_C = \sqrt{2}I_1^0 \sin(\omega t + \psi_{i1^0}) + \sqrt{2}I_1^+ \sin(\omega t + \psi_{i1^+} - 4\pi/3) + \sqrt{2}I_1^- \sin(\omega t + \psi_{i1^-} - 2\pi/3), \end{cases} \quad (30)$$

де $U_1^0, U_1^+, U_1^-, I_1^0, I_1^+, I_1^-$ – діючі значення напруги та струму нульової, прямої та зворотної послідовностей, відповідно; $\psi_{u1^0}, \psi_{u1^+}, \psi_{u1^-}, \psi_{i1^0}, \psi_{i1^+}, \psi_{i1^-}$ – фазовий зсув напруги та струму нульової, прямої та зворотної послідовностей, відповідно; ω – кутова частота; t – час.

Потужність такої трифазної системи має загальний вигляд відповідно до [14]:

$$P_{3ph} = P_{a,1-1} \cos(0) + P_{b,1-1} \sin(0) + P_{a,1+1} \cos(2\omega t) + P_{b,1+1} \sin(2\omega t). \quad (31)$$

Амплітуди ортогональних складових потужностей нульової частоти трифазної системи:

$$\begin{aligned} P_{a,1-1} &= 3U_1^0 I_1^0 \cos(\psi_{u1^0} - \psi_{i1^0}) + 3U_1^+ I_1^+ \cos(\psi_{u1^+} - \psi_{i1^+}) + \\ &+ 3U_1^- I_1^- \cos(\psi_{u1^-} - \psi_{i1^-}) = P_{a,1-1}^{00} + P_{a,1-1}^{++} + P_{a,1-1}^{--} = P_{3ph} \end{aligned} \quad (32)$$

- активна потужність трифазної несиметричної системи, яка складається з активних потужностей відповідних послідовностей;

$$\begin{aligned} P_{b,1-1} &= -3U_1^0 I_1^0 \sin(\psi_{u1^0} - \psi_{i1^0}) - 3U_1^+ I_1^+ \sin(\psi_{u1^+} - \psi_{i1^+}) - \\ &- 3U_1^- I_1^- \sin(\psi_{u1^-} - \psi_{i1^-}) = P_{b,1-1}^{00} + P_{b,1-1}^{++} + P_{b,1-1}^{--} = Q_{3ph} \end{aligned} \quad (33)$$

- реактивна потужність трифазної несиметричної системи, яка складається з реактивних потужностей відповідних послідовностей.

Амплітуди ортогональних складових потужностей подвоєної частоти трифазної системи:

$$\begin{aligned} P_{a,1+1} &= -3U_1^0 I_1^0 \cos(\psi_{u1^0} + \psi_{i1^0}) - 3U_1^+ I_1^+ \cos(\psi_{u1^+} + \psi_{i1^+}) - \\ &- 3U_1^- I_1^- \cos(\psi_{u1^-} + \psi_{i1^-}) = P_{a,1+1}^{00} + P_{a,1+1}^{++} + P_{a,1+1}^{--} \end{aligned} \quad (34)$$

- амплітуда косинусної компоненти осцилюючої складової трифазної системи;

$$\begin{aligned} P_{b,1+1} &= 3U_1^0 I_1^0 \sin(\psi_{u1^0} + \psi_{i1^0}) + 3U_1^+ I_1^+ \sin(\psi_{u1^+} + \psi_{i1^+}) + \\ &+ 3U_1^- I_1^- \sin(\psi_{u1^-} + \psi_{i1^-}) = P_{b,1+1}^{00} + P_{b,1+1}^{++} + P_{b,1+1}^{--} \end{aligned} \quad (35)$$

- амплітуда синусної компоненти осцилюючої складової трифазної системи.

Тобто в симетричній системі ортогональні складові подвоєної частоти відсутні. Нульову послідовність до уваги не приймаємо, бо генератор не має нульового виводу, тому генерувати нульову послідовність не може. Проведемо дослідження для чотирьох режимів: симетричного, несиметричного з несиметрією статора; несиметричного з несиметрією ротора; несиметричного з несиметрією статора та ротора.

Зважаючи на те, що за умови несиметрії в сумарній потужності виникають коливання подвоєної частоти [15] (в даному випадку $100\Gamma\upsilon$), визначимо відносне значення коливань електромагнітного моменту відносно його постійної складової таким чином:

$$M_{100/DC} = \frac{M_{100}}{M_{DC}} 100\%, \quad (36)$$

де M_{DC} – постійна складова електромагнітного моменту; M_{100} – складова моменту пульсуюча з частотою $100\Gamma\upsilon$.

Узагальнені результати дослідження зведені у таблицю. За умови несиметрії параметрів обмотки спостерігається виникнення потужностей зворотної послідовності, але значення цих

потужностей невеликі. У разі несиметрії параметрів статора це викликає зменшення потужностей прямої послідовності. При цьому спостерігається найбільше значення змінної складової електромагнітного моменту $M_{100/DC} = 3.3\%$. За умови несиметрії параметрів обмоток ротора спостерігаються найбільші значення активної та реактивної потужностей прямої послідовності. Несиметрія параметрів обмотки ротора і статора призводить до найсуттєвішої несиметрії напруг та зростання складових потужностей зворотної послідовності.

Таблиця

Показники режиму роботи асинхронного генератора з фазним ротором.

Режим	U_A, B	U_B, B	U_C, B	$P_{a.1-1}^{++} = P^+$, Bm	$P_{a.1-1}^{--} = P^-$, Bm	$P_{b.1-1}^{++} = Q^+$, BAp	$P_{b.1-1}^{--} = Q^-$, BAp	$M_{100/DC}, \%$
сим.	231,1	231,5	229,9	3966	0	1968	0	0,5
несим. стат.	231,1	234,1	226,5	3955	1,4	1963	0,4	3,3
несим. рот.	239,4	235,4	230,4	4109	2,23	2039	0,7	0,5
несим. стат.рот.	239,4	237,7	226,8	4094	4,6	2031	1,68	3,2

Висновки

1. Розроблено структуру динамічної моделі асинхронного генератора з фазним ротором в трифазній системі координат, яка передбачає потокозчеплення обмоток через потоки розсіювання, потоки обмоток статора та потоки обмоток статора та ротора. Взаєміндукція статора та ротора враховує кут положення ротора. Розроблена структура реалізована в матричній формі та дозволяє проводити дослідження в тому числі режимів з несиметрією електричних параметрів машини.

2. Проведено моделювання режимів із симетричними та несиметричними параметрами обмоток машини. Несиметрію реалізовано шляхом зміни індуктивності та опору однієї з фаз статора та/або ротора. В обох випадках отримано необхідний режим генерації як за частотою напруги, так і за її діючим значенням. У разі несиметричних параметрів обмоток відмічено несиметрію генерованої напруги та виникнення пульсацій електромагнітного моменту з частотою 100 Гц.

3. Використовуючи підхід до аналізу електричної потужності, зумовленої напругою та струмом прямої, зворотної та нульової послідовностей, за результатами моделювання відмічено, що у разі несиметрії разом із виникненням складових потужності зворотної послідовності відбуваються зміни у складових потужності прямої послідовності. Зазначені складові потужності зростають із збільшенням несиметрії параметрів машини.

Перелік використаних джерел:

1. Eltamaly A.M., Al-Saud M.S., Abo-Khalil A.G. Dynamic Control of a DFIG Wind Power Generation System to Mitigate Unbalanced Grid Voltage. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 39091-39103. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976195>.
2. Song Y., Nian H. Modularized Control Strategy and Performance Analysis of DFIG System Under Unbalanced and Harmonic Grid Voltage. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015. Vol. 30, № 9. Pp. 4831-4842. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2366494>.
3. A Sliding-Mode Direct Power Control Strategy for DFIG Under Both Balanced and Unbalanced Grid Conditions Using Extended Active Power / D. Sun, X. Wang, H. Nian, Z.Q. Zhu. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018. Vol. 33, № 2. Pp. 1313-1322. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2686980>.
4. Cheng P., Nian H. Collaborative Control of DFIG System During Network Unbalance Using Reduced-Order Generalized Integrators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2015. Vol. 30, № 2. Pp. 453-464. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2014.2363671>.
5. Das S., Singh B. Enhanced Control of DFIG Based Wind Energy Conversion System Under

- Unbalanced Grid Voltages Using Mixed Generalized Integrator. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*. 2022. Vol. 3, № 2. Pp. 308-320. DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTIE.2022.3143821>.
6. Nian H., Cheng P., Zhu Z.Q. Coordinated Direct Power Control of DFIG System Without Phase-Locked Loop Under Unbalanced Grid Voltage Conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016. Vol. 31, № 4. Pp. 2905-2918. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2453127>.
 7. Flexible PCC Voltage Unbalance Compensation Strategy for Autonomous Operation of Parallel DFIGs / T. Wang, H. Nian, Z.Q. Zhu, H. Huang, X. Huang. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. Vol. 53, № 5. Pp. 4807-4820. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2696491>.
 8. An Improved Angular Stator Flux Frequency Computation Method for Robust MPPT Operation of DFIG Under Unbalanced Grid Voltage / M.A.A. Rani, M. Chakkarapani, C. Nagamani, G.S. Ilango. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2023. Vol. 59, № 1. Pp. 1162-1174. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3211912>.
 9. Sliding-Mode Control Algorithm for DFIG Synchronization to Unbalanced and Harmonically Distorted Grids / A. Susperregui, M.I. Martinez, G. Tapia-Otaegui, A. Etxeberria. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2022. Vol. 13, № 3. Pp. 1566-1579. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2022.3166217>.
 10. An Effective Reference Generation Scheme for DFIG With Unbalanced Grid Voltage / M.A. Asha Rani, C. Nagamani, G. Saravana Ilango, A. Karthikeyan. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2014. Vol. 5, № 3. Pp. 1010-1018. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2014.2322672>.
 11. Мазуренко Л.І., Романенко В.І. Математична модель асинхронного генератора з вентильним збудженням з використанням методу припасовування. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 4. С. 19-24.
 12. Model of the induction machine including saturation / J.M. Aller, D. Delgado, A. Bueno, J.C. Viola, J.A. Restrepo. *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille, France. 2013. Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6631883>.
 13. Bialobrzheskyi O.V., Vlasenko R.V. Interrelation of a clarke and fortescue transformation for the three-phase asymmetrical electrical network. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2016. № 5. Pp. 67-74.
 14. Bialobrzheskyi O.V., Rod'Kin D. A positive, negative and zero sequences electric power, to improve upon the standard IEEE 1459-2010. *COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 2023. Vol. 42(2). Pp. 402-424. DOI: <https://doi.org/10.1108/COMPEL-03-2022-0109>.
 15. Bialobrzheskyi O., Nozhenko V., Todorov O. Influence of misalignment of connection of electrical machine shafts on the nature of electric power of the induction motor. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022. № 6. Pp. 90-96. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/090>.

References:

1. Eltamaly A.M., Al-Saud M.S., Abo-Khalil A.G. Dynamic Control of a DFIG Wind Power Generation System to Mitigate Unbalanced Grid Voltage. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 39091-39103. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976195>.
2. Song Y., Nian H. Modularized Control Strategy and Performance Analysis of DFIG System Under Unbalanced and Harmonic Grid Voltage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, vol. 30, № 9, pp. 4831-4842. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2366494>.
3. Sun D., Wang X., Nian H., Zhu Z.Q. A Sliding-Mode Direct Power Control Strategy for DFIG Under Both Balanced and Unbalanced Grid Conditions Using Extended Active Power. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol. 33, № 2, pp. 1313-1322. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2686980>.
4. Cheng P., Nian H. Collaborative Control of DFIG System During Network Unbalance Using Reduced-Order Generalized Integrators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2015, vol. 30, № 2, pp. 453-464. doi: <https://doi.org/10.1109/TEC.2014.2363671>.
5. Das S., Singh B. Enhanced Control of DFIG Based Wind Energy Conversion System Under Unbalanced Grid Voltages Using Mixed Generalized Integrator. *IEEE Journal of Emerging and Selected*

- Topics in Industrial Electronics*, 2022, vol. 3, № 2, pp. 308-320. doi: <https://doi.org/10.1109/JESTIE.2022.3143821>.
6. Nian H., Cheng P., Zhu Z.Q. Coordinated Direct Power Control of DFIG System Without Phase-Locked Loop Under Unbalanced Grid Voltage Conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol. 31, № 4, pp. 2905-2918. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2453127>.
 7. Wang T., Nian H., Zhu Z.Q., Huang H., Huang X. Flexible PCC Voltage Unbalance Compensation Strategy for Autonomous Operation of Parallel DFIGs. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, vol. 53, № 5, pp. 4807-4820. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2696491>.
 8. Rani M.A.A., Chakkarapani M., Nagamani C., Ilango G.S. An Improved Angular Stator Flux Frequency Computation Method for Robust MPPT Operation of DFIG Under Unbalanced Grid Voltage. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2023, vol. 59, № 1, pp. 1162-1174. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3211912>.
 9. Susperregui A., Martinez M.I., Tapia-Otaegui G., Etxeberria A. Sliding-Mode Control Algorithm for DFIG Synchronization to Unbalanced and Harmonically Distorted Grids. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, vol. 13, № 3, pp. 1566-1579. doi: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2022.3166217>.
 10. Asha Rani M.A., Nagamani C., Saravana Ilango G., Karthikeyan A. An Effective Reference Generation Scheme for DFIG With Unbalanced Grid Voltage. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014, vol. 5, № 3, pp. 1010-1018. doi: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2014.2322672>.
 11. Mazurenko L.I., Romanenko V.I. Mathematical model of asynchronous generator with gate excitation using the matching method. *Technical Electrodynamics*, 2010, № 4, pp. 19-24. (Ukr.)
 12. Aller J.M., Delgado D., Bueno A., Viola J.C., Restrepo J.A. Model of the induction machine including saturation. *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille, France, 2013, pp. 1-8. doi: <https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6631883>.
 13. Bialobrzheskyi O.V., Vlasenko R.V. Interrelation of a clarke and fortescue transformation for the three-phase asymmetrical electrical network. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2016, № 5, pp. 67-74.
 14. Bialobrzheskyi O.V., Rod'Kin D. A positive, negative and zero sequences electric power, to improve upon the standard IEEE 1459-2010. *COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2023, vol. 42(2), pp. 402-424. doi: <https://doi.org/10.1108/COMPEL-03-2022-0109>.
 15. Bialobrzheskyi O., Nozhenko V., Todorov O. Influence of misalignment of connection of electrical machine shafts on the nature of electric power of the induction motor. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2022, № 6, pp. 90-96. doi: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/090>.

Рецензент: О.П. Чорний
д-р техн. наук, проф., КрНУ ім. Михайла Остроградського

Стаття надійшла 13.02.2023
Стаття прийнята 02.04.2023