

О.Б. Єгоров, М.П. Кунденко, О.Ю. Єгорова, В.А. Мардзявко, А.Ю. Руденко

Вплив конструкції обмотки статора синхронно-реактивного генератора на підвищення його енергоефективності

Вступ. Підвищення енергоефективності електричних генераторів є актуальною задачею для різних сфер енергетики, зокрема для автономних систем та транспорту. Синхронно-реактивні генератори (СРГ) завдяки простій конструкції, відсутності магнітів та механічних контактів, а також високій надійності набувають все більшого поширення. **Задача** даної роботи полягає у дослідженні впливу конструкції подвійної обмотки статора СРГ на його енергетичні характеристики, визначенні оптимальних параметрів взаємного розташування обмоток та розробці рекомендацій для підвищення ефективності генератора.

Мета. Аналіз впливу конструкції подвійної обмотки статора СРГ на вихідні енергетичні характеристики та визначення рекомендацій при проектуванні такого типу електричних машин. **Методологія.** Аналіз проводився за допомогою чисельного моделювання методом скінченних елементів у середовищі ANSYS Maxwell. Розглянуто різні варіанти взаємного розташування головної та збуджуючої обмоток у статорі генератора. **Результати.** Досліджено вплив одношарової та двошарової конструкції обмотки на вихідні характеристики генератора. Встановлено, що двошарове розташування з фазовим зміщенням на 2 пази забезпечує мінімальні пульсації крутного моменту, покращує стабільність роботи генератора та сприяє підвищенню ККД до 92,5 %. **Наукова новизна.** Вперше детально досліджено вплив фазового зміщення обмоток на електромагнітні процеси в СРГ, що дозволяє оптимізувати його конструкцію та покращити експлуатаційні показники. **Практична значимість.** Результати можуть бути використані при проектуванні нових генераторів з покращеними характеристиками для застосування у вітроенергетиці, дизельних генераторних установках та автономних електричних системах. Бібл. 19, табл. 1, рис. 12.

Ключові слова: синхронно-реактивний генератор, обмотка, ротор, частота обертання, обертовий момент, енергоефективність.

Вступ. В даний час зростає потреба у створенні енергоефективних електричних генераторів змінної напруги. Вони широко застосовуються в багатьох енергетичних пристроях та об'єктах, таких як вітроелектричні станції, дизельні електрогенератори, як джерела електроенергії в залізничному, авіаційному та автомобільному транспорті [1].

Найбільшого поширення набули генератори з самозбуджувальною системою, а саме синхронні генератори з постійними магнітами, асинхронні генератори з подвійним живленням і фазним ротором, асинхронні генератори з конденсаторами збудження, синхронні генератори з обмотками збудження на якорі.

Синхронні генератори з постійними магнітами мають більш високу ефективність, більш високу щільність потужності, що не вимагає додаткового джерела живлення для збудження магнітного поля і більш високу надійність через відсутність механічних компонентів, таких як вугільні щітки та контактні кільця [2] і включає рідкоземельні магнітні матеріали, а саме неодим-залізо-бор (NdFeB). Останнім часом збільшений попит на електромобілі призвів до різкого збільшення попиту та вартості таких магнітів [3].

Асинхронні генератори з подвійним живленням і фазним ротором мають непогані енергетичні характеристики, проте наявність механічного щіткового контакту для подачі збудження на обмотку ротора знижує їх експлуатаційні характеристики [4].

Генератори з конденсаторами збудження мають переваги в порівнянні з традиційним генераторами змінного струму, які полягає в тому, що в їх конструкції відсутні щіткові контактні системи, а також у простоті конструкції самої машини [5]. Однак робота цих генераторів відрізняється крайньою нестійкістю, залежністю напруги, що індукуються, від значення підключеного навантаження і частоти обертання ротора генератора.

Синхронні генератори з обмотками збудження на якорі є на сьогоднішній день найбільш дослідженими електричними машинами. Вони мають гарні регулю-

вальні та зовнішні характеристики. Однак основним недоліком є механічний щітковий контакт для живлення обмотки збудження.

Синхронно-реактивний генератор (СРГ) з подвійною обмоткою на статорі є перспективним джерелом електроенергії, здатним ефективно працювати у багатьох енергетичних об'єктах та системах.

Мета роботи – аналіз впливу конструкції подвійної обмотки статора СРГ на вихідні енергетичні характеристики та визначення рекомендацій при проектуванні такого типу електричних машин.

Огляд літератури. СРГ в останні роки становить велику конкуренцію синхронним генераторам з постійними магнітами і асинхронним генераторам завдяки своїй надійності, простій конструкції ротора, відсутності втрат в обмотці ротора, відсутності магнітів (тим самим усуваючи проблему розмагнічування), меншою вартістю [6]. Дослідженню СРГ присвячено численні наукові роботи. У [7] наведено результати досліджень СРГ з подвійною обмоткою статора з різними варіантами повітряних бар'єрів у роторі. Показано, що застосування СРГ із сердечником щільного ротора дозволяє індукувати напругу холостого ходу на 10 % вище, ніж для СРГ із ротором звичайних повітряних бар'єрів. У [8] повідомляється про роботу СРГ з послідовним і шунтуючим з'єднанням і його впливом на перехідні процеси в генераторі.

Роботи [9, 10] представляють результати досліджень вібраційних характеристик синхронно-реактивних машин залежно від конструкції повітряних бар'єрів ротора. В [11–13] проведено динамічний і аналіз продуктивності трифазного СРГ для перевірки роботи генератора в різних умовах навантаження. Представлені залежності вихідної напруги та потужності генератора від струму збудження, що подається в обмотку, розташовану на статорі. Робота [14] представляє результати аналізу методом скінченних елементів для визначення продуктивності генератора в залежності від його конструкції. Моделювання впли-

ву електромагнітного поля на елементи конструкцій також розглянуто в [15].

Проведений аналіз літературних джерел свідчить про те, що інтерес до СРГ є значним, але залишаються питання, щодо впливу конструкції обмотки статора та взаємовпливу робочої обмотки та обмотки збудження на його енергетичні характеристики. Тому саме цьому питанню присвячено дослідження, результати якого представлені в даній роботі.

Виклад основного матеріалу. Аналітичні та умовно-аналітичні залежності, які використовуються при проектуванні та оцінці робочих властивостей електричної машини на основі її електричних параметрів (опору, індуктивності) та змінних (напруг, струмів), мають достатню збіжність результатів розрахунків та випробувань. В даний час при проектуванні СРГ великого поширення набули також способи визначення оптимальної конструкції та енергетичних параметрів з використанням розрахунку поля методом скінченних елементів [12, 16]. Зокрема, дослідження з використанням мультисфероїдальних моделей подано у [17]. При моделюванні СРГ у фіксованій системі координат виникають труднощі з урахуванням зміни параметрів (індуктивності) фаз статора при обертанні ротора.

Для отримання найбільш прийняттого результату рівняння синхронних машин краще розглядати у системі d - q координат, що обертається разом із ротором [18]. Вісь d – вісь найбільшої провідності магнітного ротора (магнітна вісь ротора), вісь q – вісь найменшої провідності ротора (рис. 1).

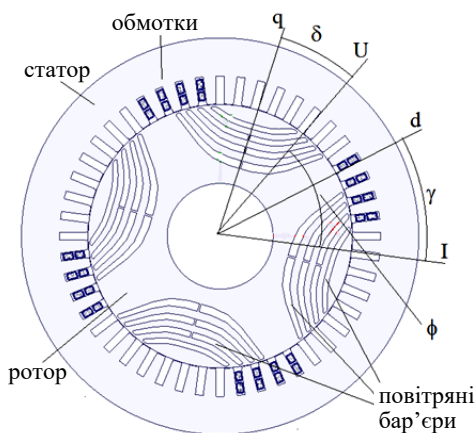


Рис. 1. Визначення співвідношення між кутами ϕ , δ , γ

При записі рівнянь встановленого режиму СРГ необхідно визначити коефіцієнт електричного навантаження, який повинен визначати зовнішній обертовий момент, наприклад, від вітрогенератора або дизельного двигуна внутрішнього згоряння. Як коефіцієнт навантаження використовується кут δ або кут γ . Баланс фазових кутів генератора можна представити як:

$$\phi = \pi/2 - \delta + \gamma, \quad (1)$$

де ϕ – фазовий кут між векторами струму та напруги; δ – фазовий кут між віссю q та вектором напруги; γ – фазовий кут між віссю d та вектором струму.

Енергетичні параметри СРГ залежать від значення кута γ . Збільшення електричного навантаження, яке підключається до обмотки статора генератора, призводить до зростання значення цього кута.

В [6] розглядався вплив фазового кута між магнітною віссю ротора та вектором струму обмотки статора на характеристики синхронного реактивного двигуна. Так як синхронно-реактивна машина є оборотною машиною, то і при роботі її в режимі генератора можна говорити про залежність параметрів генератора від кута γ . У номінальному режимі роботи двигуна рівняння поздовжньої та поперечної напруг мають вигляд:

$$\dot{U}_d = (r + jx)i_d + jL_q\omega i_q; \quad (2)$$

$$\dot{U}_q = (r + jx)i_q + jL_d\omega i_d, \quad (3)$$

де L_d , L_q – повні індуктивності статора за осями d і q ; i_d , i_q – струми обмотки статора за осями d і q ; r – активний опір фази статора; x – реактивний опір розсіювання фаз статора; ω – кутова частота обертання валу генератора.

У режимі роботи рівняння електричної рівноваги на синхронній частоті для однієї фази статора СРГ можна записати у вигляді:

$$\dot{U} = I(r + jx) + jI_d x_d + jI_q x_q. \quad (4)$$

Залежність поздовжнього та поперечного опорів від індуктивностей L_d та L_q можна виразити так:

$$x_d = 2\pi f L_d; \quad (5)$$

$$x_q = 2\pi f L_q. \quad (6)$$

Струми поздовжньої та поперечної складових обмотки генератора можна знайти як:

$$I_d = \frac{U_i}{x_d} \cos \delta; \quad (7)$$

$$I_q = \frac{U_i}{x_q} \cos \delta. \quad (8)$$

Вираз для струму статора можна записати [6] як:

$$i = \frac{U_i}{r + j(x + x_d)} + \frac{U_i}{\frac{r_\gamma}{\tan \gamma} + jx_\gamma}. \quad (9)$$

Змінні значення кута γ можна змоделювати, обертуючи ротор відносно статора при постійному значенні навантаження на обмотці статора у фіксованій системі координат, що відповідає постійній амплітуді фазного струму. При цьому в стаціонарній системі координат напрямки і значення вектору МРС статора залишаються незмінними, а положення осі d зміниться. Це було покладено в основу досліджень СРГ з різними варіантами конструкцій та взаєморозташуванням робочої обмотки та обмотки збудження статора.

Дослідження проводилися при проектуванні СРГ потужністю 160 кВт із частотою обертання ротора 1500 об/хв та лінійною напругою на виході 380 В для дизельної генераторної установки. Дизельний двигун, що передбачається використовувати зі СРГ, розвиває обертовий момент 1100 Н·м, при частоті обертання валу 1500 об/хв. Механічна вихідна потужність з дизельного двигуна буде складати 172,8 кВт. Тому корисна електрична потужність генератора з урахуванням втрат буде дорівнювати ≈ 160 кВт. Зовнішній діаметр статора становить 450 мм, ротору – 299 мм, довжина пакетів статора та ротору – 265 мм. Незмінними залишалися геометрія повітряних бар'єрів ротора та електричне симетричне навантаження на фазах головної обмотки, яке мало суто активний характер.

Це дозволило провести порівняльну оцінку варіантів та вибрати, на думку авторів, найбільш оптимальний за ККД та динамічними характеристиками генератор. Звичайно, розміри повітряних бар'єрів ротору, геометрія ротора та статора, матеріали статора чи ротора впливають на характеристики СРГ, але мета цього дослідження саме визначити вплив обмоток статора та їх розташування на вихідні характеристики. Тому досліджувалися СРГ з однаковою геометрією статора, ротору і незмінними матеріалами магнітопроводів.

У першому випадку розглядалася конструкція СРГ з рівним розподілом головної обмотки та обмотки збудження у 48 пазах статора (рис. 2).

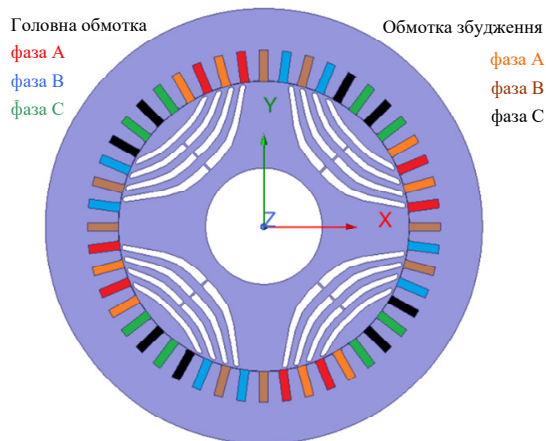


Рис. 2. Одношарове розташування головної та збуджуючої обмотки статора СРГ

Моделювання та результати. Як було зазначено вище, змінюючи кут γ , тобто повертаючи ротор відносно статора, можна змоделювати зміну режиму роботи СРГ при постійних значеннях навантаження і збудження. Результати цього дослідження показані на рис. 3.

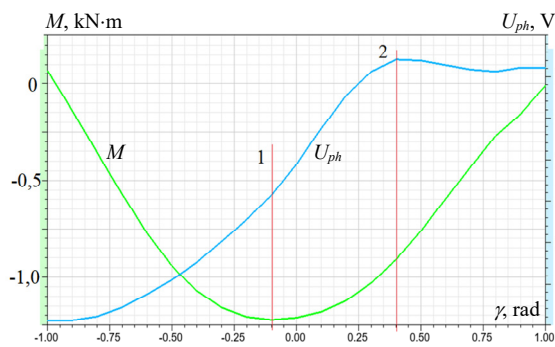


Рис. 3. Залежності зовнішнього крутного моменту та вихідної фазної напруги від кута γ

Лінії 1 та 2 показують значення кута γ для максимального значення крутного моменту (а, отже, для максимальної вхідної потужності генератора) і для максимального значення вихідної напруги. Видно, що значення цих максимумів не збігаються, що знижує характеристики генератора.

На рис. 4 показано розподіл індукції в магнітопроводі при одношаровому розташуванні головної та збуджуючої обмоток статора. Значення індукції в зубцевих зонах статора становить 2 Тл, що приводить до підвищення втрат в магнітопроводі. Подібний аналіз розподілу струмів в обмотці представлено в [19].

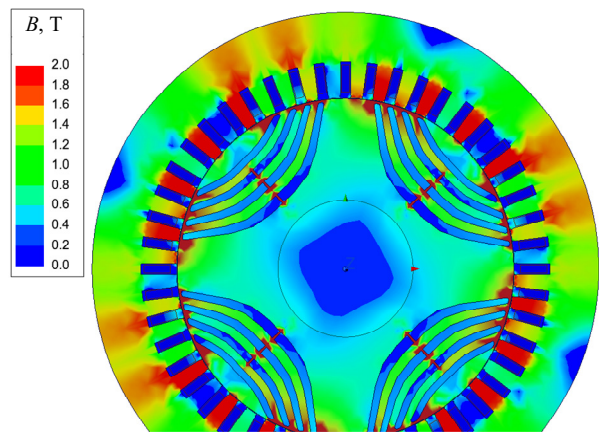


Рис. 4. Розподіл індукції в магнітопроводі при одношаровому розташуванні головної та збуджуючої обмоток статора СРГ

На рис. 5 наведено графіки крутного моменту СРГ та вихідної фазної напруги.

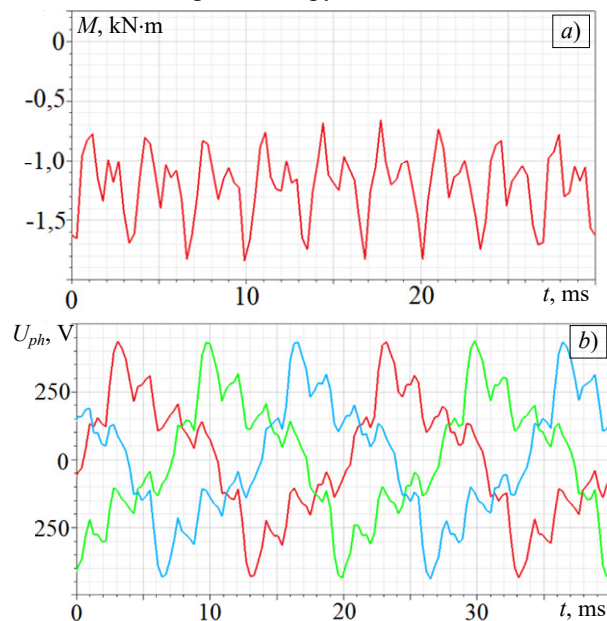


Рис. 5. Крутний момент (a) та вихідна фазна напруга (b)

Знак «-» моменту вказує на те, що він є зовнішнім моментом від дизельного двигуна, що обертає ротор генератора. Можна спостерігати великі пульсації моменту, які говорять про значну зміну індуктивностей статора за осями d і q при обертанні ротора.

Підшипники механічної системи генератора будуть відчувати великі пульсуючі навантаження, що позначиться на їх працездатності. Діюче значення вихідної фазної напруги становить 222 В, що відповідає 385 В лінійної напруги при електричному навантаженні 158 кВт. ККД генератора з такою обмоткою статора склав 91,2 %.

Розглянуто варіант двошарової обмотки статора (рис. 6). Двошарові обмотки в якості обмоток статора в сучасному виробництві електричних двигунів великої потужності використовуються дуже широко та процес їх виготовлення технологічно вдосконалений.

Ближче до зовнішнього діаметру статора розташовується головна трифазна обмотка, ближче до поверхні ротора – обмотка збудження. Проведено дослідження чотирьох варіантів взаємного розташування

фаз головної та збуджуючої обмоток при їх двошаровому розташуванні (рис. 7,а-d).

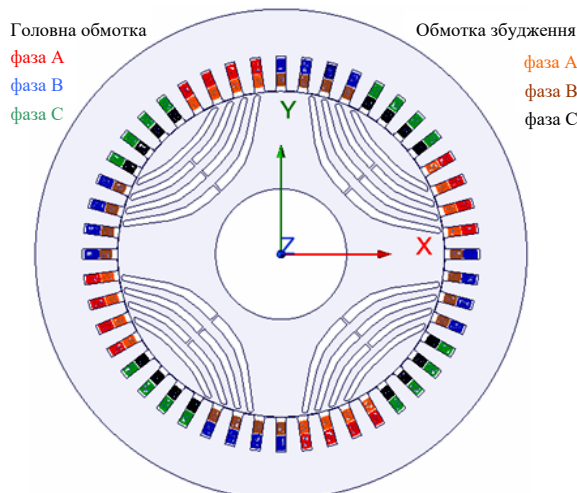


Рис. 6. Двошарове розташування головної та збуджуючої обмоток статора СРГ

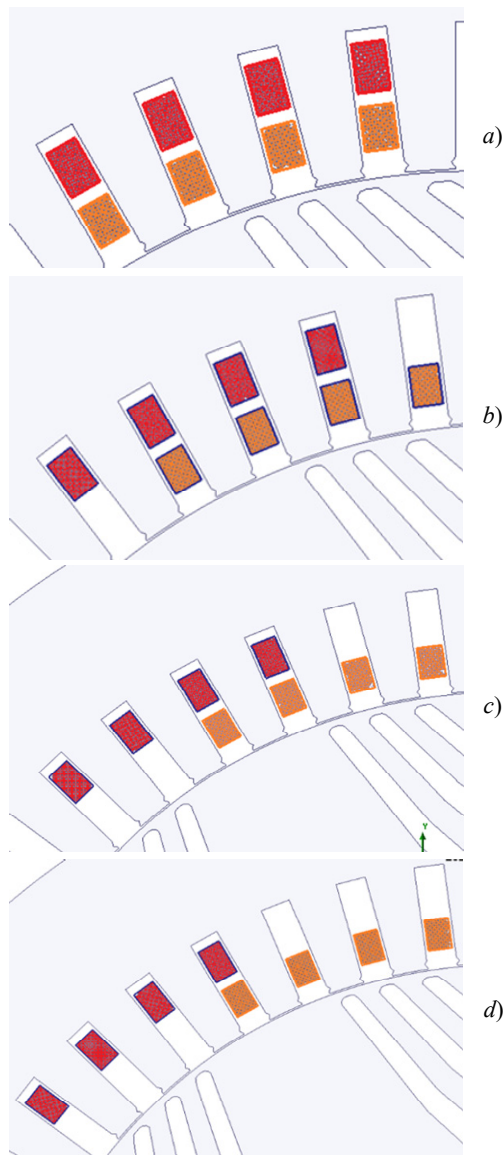


Рис. 7. Варіанти взаємного розташування фаз головної та збуджуючої обмоток статора СРГ: а) без зміщення фаз; б) зміщення на 1 паз; в) зміщення на 2 паз; г) зміщення на 3 паз

Результати досліджень характеристик СРГ із двошаровим розташуванням обмоток статора наведені на рис. 8,а-d.

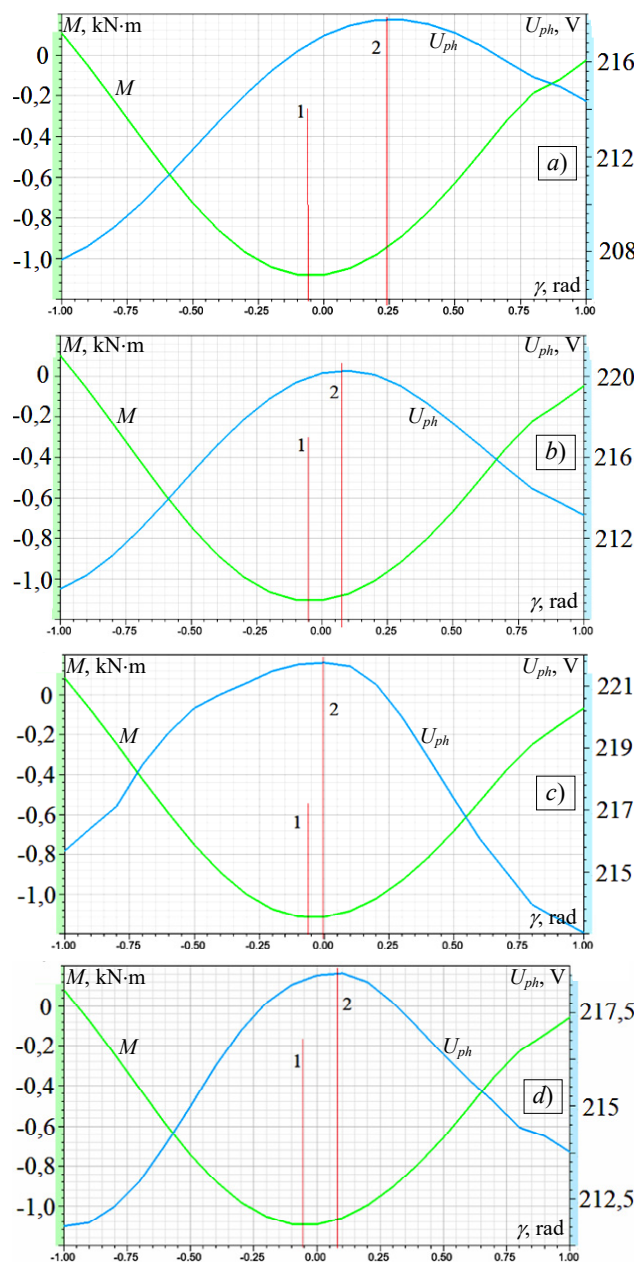


Рис. 8. Залежності зовнішнього крутного моменту та вихідної фазної напруги від кута γ при різних взаємних розташуваннях обмоток: а) без зміщення фаз; б) зміщення на 1 паз; в) зміщення на 2 паз; г) зміщення на 3 паз

СРГ зі зміщенням фаз головної і збуджуючої обмоток на 2 паз практично має збіг максимуму напруги, що індуктується, і крутного моменту за кутом γ (рис. 8,с). При такому виконанні обмоток статора також спостерігається найбільша фазна напруга на виході генератора (221,7 В) порівняно з іншими варіантами.

Розподіл індукції в магнітопроводі при зміщенні фаз головної і збуджуючої обмоток на 2 паз наведено на рис. 9.

Зниження індукції в зубцевих зонах та ярмі статору у порівнянні з варіантом одношарової обмотки дає зниження втрат в магнітопроводі на 24 % (рис. 10).

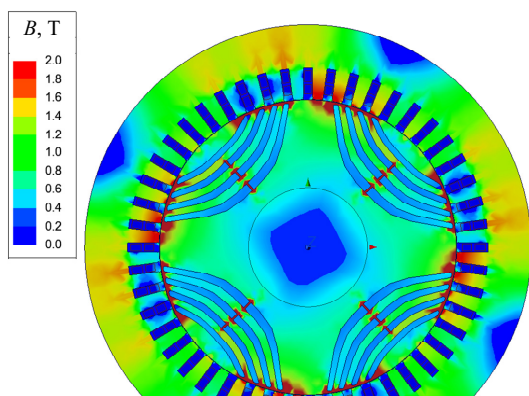


Рис. 9. Розподіл індукції в магнітопроводі при зміщенні фаз головної і збуджуючої обмоток на 2 пази

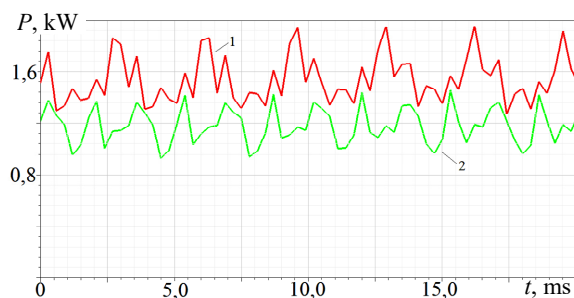


Рис. 10. Втрати в магнітопроводі статора при одношаровій обмотці статора (1) та при двошаровій обмотці при зміщенні фаз головної і збуджуючої обмоток на 2 пази (2)

Проведені дослідження крутного моменту на роторі СРГ та форми вихідної напруги для найкращого варіанта двошарового виконання обмоток статора показують зниження пульсацій порівняно з одношаровою конструкцією (рис. 11).

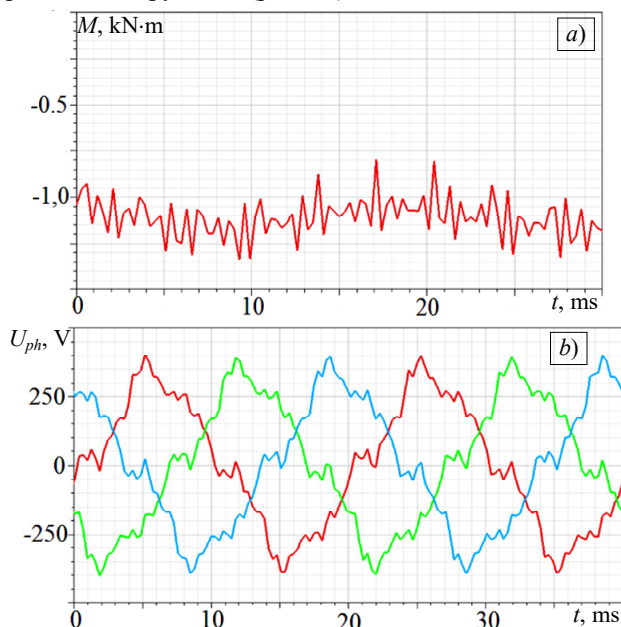


Рис. 11. Крутний момент (a) і вихідна фазна напруга (b) для СРГ з двошаровим розташуванням головної та збуджуючої обмоток та взаємним зміщенням на 2 пази

Для порівняння коливань моменту СРГ з одношаровою обмоткою статора та з двошаровою обмоткою при зміщенні фаз головної і збуджуючої обмоток на 2 пази створені спектрограми з визначенням амплітуд в діапазоні частот 0 – 1 кГц (рис. 12).

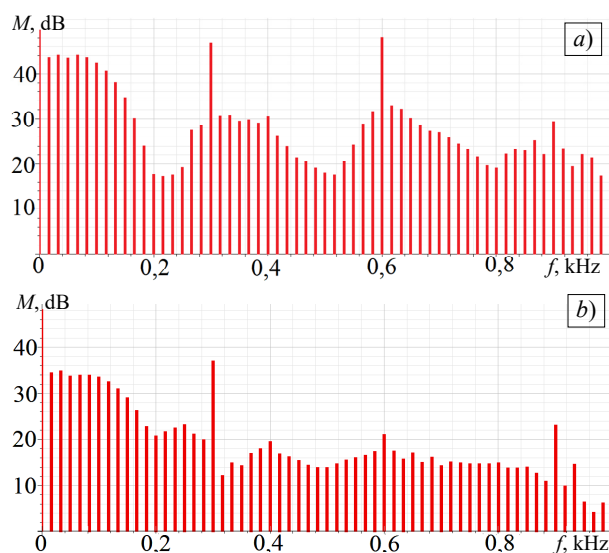


Рис. 12. Спектрограми моменту при одношаровій обмотці статора (a) та при двошаровій обмотці при зміщенні фаз головної і збуджуючої обмоток на 2 пази (b)

Порівняння спектрограм СРГ з одношаровою обмоткою та двошаровою обмоткою статора показали зниження амплітуди на частоті 100 Гц на 26 %; для частоти 150 Гц – на 14 %. Для обох варіантів на частоті 300 Гц спостерігається різке збільшення амплітуди, але для СРГ з двошаровою обмоткою амплітуда менша на 53 % ніж для варіанту СРГ з одношаровою обмоткою. Зниження пульсацій моменту позитивно позначиться на працездатності підшипникових вузлів, призведе до зниження вібрацій під час роботи СРГ.

Результати визначення втрат та ККД для обраного варіанту СРГ з двошаровою обмоткою статора при зміщенні фаз на 2 пази наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Втрати та ККД СРГ з двошаровою обмоткою статора при зміщенні фаз на 2 пази

№	Параметр	Значення
1	Електричні втрати в обмотках статора, Вт	7152
2	Втрати в сталі магнітопроводу, Вт	1621
3	Механічні втрати, Вт	2600
4	Додаткові втрати, Вт	1600
5	Сума втрат, Вт	12973
6	ККД, %	92,5

Висновки. Проведені дослідження СРГ з головною та збуджуючими обмотками статора показали, що є значна залежність характеристик від конструктивного виконання цих обмоток. Розглянутий варіант з одношаровим розташуванням обох обмоток в пазах статора характеризується тим, що мають місце великі пульсації моменту (з амплітудою 0,6 кН·м) та менший, ніж у інших розглянутих варіантах, ККД.

Двошарове розташування головної та збуджуючої обмоток статора показало найкращі результати при аналізі СРГ. Однак дослідження встановили, що і взаємне розташування фаз головної та збуджуючої обмоток має значний вплив на параметри СРГ. Результати розрахункових експериментів визначили найкращий варіант виконання двошарової обмотки СРГ, а саме зі зміщенням фаз на 2 пази один одного. Це дає значне зниження коливань моменту та підвищення енергетичних характеристик СРГ та дозволяє

отримати високе ККД (92,5 %) при корисній електричній потужності 160 кВт на виході СРГ.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мазуренко Л.І., Джура О.В., Попович О.М., Гребеніков В.В., Головань І. В. Електричні генератори і двигуни змінного струму. Електромеханотронні перетворювачі енергії. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, 2013, № 35, С. 58-66.
2. Choe Wei Chang C., Jian Ding T., Jian Ping T., Chia Chao K., Bhuiyan M.A.S. Getting more from the wind: Recent advancements and challenges in generators development for wind turbines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, vol. 53, art. no. 102731. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102731>.
3. Wang H., Lamichhane T.N., Paranthaman M.P. Review of additive manufacturing of permanent magnets for electrical machines: A prospective on wind turbine. *Materials Today Physics*, 2022, vol. 24, art. no. 100675. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100675>.
4. Tezcan M.M., Ayaz M. Performance analysis of aluminium wound double fed induction generator for cost-efficient wind energy conversion systems. *Engineering Research Express*, 2023, vol. 5, no. 4, art. no. 045037. doi: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad061b>.
5. Zachepa I., Zachepa N., Khrebtova O., Serhiienko I., Shokarov D., Mykhalchenko G. Guaranteed and Reliable Excitation of Asynchronous Generator Coupled to Shaft of Vehicle. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2021, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598649>.
6. Iegorov O., Iegorova O., Kundenko M., Andriy M. The Influence of the Phase Angle Between the Rotor Magnetic Axis and the Stator Winding Current Vector on the Synchronous Reluctance Motor Efficiency. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2019, pp. 62-65. doi: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896480>.
7. Adjei-Frimpong S., Muteba M. Performance Analysis of a Synchronous Reluctance Generator with a Slitted-Rotor Core for Off-Grid Wind Power Generation. *Electricity*, 2025, vol. 6, no. 1, art. no. 2. doi: <https://doi.org/10.3390/electricity6010002>.
8. Livutse Amuhaya L., Simon Obe E., Murtala Zungeru A., Ijeoma Obe P. Performance of Synchronous Reluctance Generators with Series and Shunt Stator Connections. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, 2023, vol. 14, no. 5, pp. 589-592. doi: <https://doi.org/10.32985/ijeces.14.5.10>.
9. Iegorov O., Iegorova O., Kundenko M., Potryvaieva N. Ripple Torque Synchronous Reluctance Motor with Different Rotor Designs. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, 2020, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240820>.
10. Enemor C.G., Idoniboyeobu D.C., Braide S.L. Performance Analysis of Synchronous Reluctance Generator. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 2022, vol. 10, no. 5, pp. 765-774. doi: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.41501>.
11. Štumberger B., Igrc D., Chowdhury A., Hadžiselimovic M. Design of synchronous reluctance generator with dual stator windings and anisotropic rotor with flux barriers. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2012, vol. 88, no. 12 B, pp. 16-19.
12. Cupertino F., Pellegrino G., Gerada C. Design of Synchronous Reluctance Motors With Multiobjective Optimization Algorithms. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 3617-3627. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2312540>.
13. Iegorov O., Iegorova O. Influence of the geometric parameters of a synchronous reluctance motor rotor on its energy characteris-

tics. *Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Peter Vasylenko*, 2019, vol. 161, pp. 99-101.

14. Cui J. Optimal control of maximum torque current ratio for synchronous reluctance motor based on virtual signal injection algorithm. *Archives of Electrical Engineering*, 2024, vol. 73, no. 2, pp. 451-466. doi: <https://doi.org/10.24425/ae.2024.149926>.

15. Lavinsky D.V., Zaitsev Y.I. Computational studies of electromagnetic field propagation and deforming of structural elements for a thin-walled curved workpiece and an inductor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 2, pp. 55-60. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.2.08>.

16. Mynar Z., Vaclavek P., Blaha P. Synchronous Reluctance Motor Parameter and State Estimation Using Extended Kalman Filter and Current Derivative Measurement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, vol. 68, no. 3, pp. 1972-1981. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2973897>.

17. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Chunikhin K.V., Kolomiets V.V., Kobylanskyi B.B. Method for reduction of magnetic field of uncertain extended technical objects based on their multispheroidal model and compensating magnetic dipoles. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025, no. 2, pp. 48-58. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.2.07>.

18. Kuznetsov B.I., Kutsenko A.S., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Chunikhin K.V., Kolomiets V.V. Method for prediction magnetic silencing of uncertain energy-saturated extended technical objects in prolate spheroidal coordinate system. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 6, pp. 57-66. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.6.08>.

19. Milykh V.I. Numerical-field analysis of differential leakage reactance of stator winding in three-phase induction motors. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025, no. 2, pp. 7-18. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.2.02>.

REFERENCES

1. Mazurenko L.I., Dzhura O.V., Popovych O.M., Hrebenikov V.V., Holovan I.V. Electric generators and AC motors. Electromechatronic energy converters. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2013, no. 35, pp. 58-66. (Ukr).
2. Choe Wei Chang C., Jian Ding T., Jian Ping T., Chia Chao K., Bhuiyan M.A.S. Getting more from the wind: Recent advancements and challenges in generators development for wind turbines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, vol. 53, art. no. 102731. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102731>.
3. Wang H., Lamichhane T.N., Paranthaman M.P. Review of additive manufacturing of permanent magnets for electrical machines: A prospective on wind turbine. *Materials Today Physics*, 2022, vol. 24, art. no. 100675. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100675>.
4. Tezcan M.M., Ayaz M. Performance analysis of aluminium wound double fed induction generator for cost-efficient wind energy conversion systems. *Engineering Research Express*, 2023, vol. 5, no. 4, art. no. 045037. doi: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad061b>.
5. Zachepa I., Zachepa N., Khrebtova O., Serhiienko I., Shokarov D., Mykhalchenko G. Guaranteed and Reliable Excitation of Asynchronous Generator Coupled to Shaft of Vehicle. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2021, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598649>.
6. Iegorov O., Iegorova O., Kundenko M., Andriy M. The Influence of the Phase Angle Between the Rotor Magnetic Axis and the Stator Winding Current Vector on the Synchronous Reluctance Motor Efficiency. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2019, pp. 62-65. doi: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896480>.
7. Adjei-Frimpong S., Muteba M. Performance Analysis of a Synchronous Reluctance Generator with a Slitted-Rotor Core for

- Off-Grid Wind Power Generation. *Electricity*, 2025, vol. 6, no. 1, art. no. 2. doi: <https://doi.org/10.3390/electricity6010002>.
8. Livutse Amuhaya L., Simon Obe E., Murtala Zungeru A., Ijeoma Obe P. Performance of Synchronous Reluctance Generators with Series and Shunt Stator Connections. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, 2023, vol. 14, no. 5, pp. 589-592. doi: <https://doi.org/10.32985/ijeces.14.5.10>.
9. Iegorov O., Iegorova O., Kundenko M., Potryvaieva N. Ripple Torque Synchronous Reluctance Motor with Different Rotor Designs. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, 2020, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240820>.
10. Enemor C.G., Idoniboyeobu D.C., Braide S.L. Performance Analysis of Synchronous Reluctance Generator. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 2022, vol. 10, no. 5, pp. 765-774. doi: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.41501>.
11. Štumberger B., Igrac D., Chowdhury A., Hadžiselimovic M. Design of synchronous reluctance generator with dual stator windings and anisotropic rotor with flux barriers. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2012, vol. 88, no. 12 B, pp. 16-19.
12. Cupertino F., Pellegrino G., Gerada C. Design of Synchronous Reluctance Motors With Multiobjective Optimization Algorithms. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 3617-3627. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2312540>.
13. Iegorov O., Iegorova O. Influence of the geometric parameters of a synchronous reluctance motor rotor on its energy characteristics. *Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Peter Vasylenko*, 2019, vol. 161, pp. 99-101.
14. Cui J. Optimal control of maximum torque current ratio for synchronous reluctance motor based on virtual signal injection algorithm. *Archives of Electrical Engineering*, 2024, vol. 73, no. 2, pp. 451-466. doi: <https://doi.org/10.24425/ae.2024.149926>.
15. Lavinsky D.V., Zaitsev Y.I. Computational studies of electromagnetic field propagation and deforming of structural elements for a thin-walled curved workpiece and an inductor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 2, pp. 55-60. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.2.08>.
16. Mynar Z., Vaclavak P., Blaha P. Synchronous Reluctance Motor Parameter and State Estimation Using Extended Kalman Filter and Current Derivative Measurement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, vol. 68, no. 3, pp. 1972-1981. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2973897>.
17. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Chunikhin K.V., Kolomiets V.V., Kobylanskyi B.B. Method for reduction of magnetic field of uncertain extended technical objects based on their multispheroidal model and compensating magnetic dipoles. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025, no. 2, pp. 48-58. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.2.07>.
18. Kuznetsov B.I., Kutsenko A.S., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Chunikhin K.V., Kolomiets V.V. Method for prediction magnetic silencing of uncertain energy-saturated extended technical objects in prolate spheroidal coordinate system. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 6, pp. 57-66. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.6.08>.
19. Milykh V.I. Numerical-field analysis of differential leakage reactance of stator winding in three-phase induction motors. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025, no. 2, pp. 7-18. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.2.02>.

How to cite this article:

Iegorov O.B., Kundenko M.P., Iegorova O.Yu., Mardziavko V.A., Rudenko A.Yu. The influence of the design of the stator winding of a synchronous-reactive generator on increasing its energy efficiency. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025, no. 5, pp. 3-9. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.5.01>

Надійшла (Received) 23.02.2025
 Прийнята (Accepted) 29.04.2025
 Опублікована (Published) 02.09.2025

О.Б. Єгоров¹, к.т.н., доцент,
 М.П. Кунденко², д.т.н., професор,
 О.Ю. Єгорова², к.т.н., доцент,
 В.А. Мардзявко³, асистент,
 А.Ю. Руденко³, асистент,

¹ Харківський національний університет
 міського господарства ім. О.М. Бекетова,
 61002, Харків, вул. Черноглазівська, 17.

² Національний технічний університет
 «Харківський політехнічний інститут»,
 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

³ Миколаївський національний аграрний університет,
 54000, Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9,
 e-mail: vitalijmardzavko@gmail.com (Corresponding Author)

O.B. Iegorov¹, PhD, Associate Professor,
 M.P. Kundenko², Doctor of Technical Science, Professor,
 O.Yu. Iegorova², PhD, Associate Professor,
 V.A. Mardziavko³, Assistant Lecturer,
 A.Yu. Rudenko³, Assistant Lecturer,

¹ O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,
 17, Chornoglazivska Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

² National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

³ Mykolaiv National Agrarian University,
 9, Georgy Gongadze Str., Mykolaiv, 54000, Ukraine.

The influence of the design of the stator winding of a synchronous-reactive generator on increasing its energy efficiency.

Introduction. Increasing the energy efficiency of electric generators is a pressing task for various areas of energy, in particular for autonomous systems and transport. Synchronous-reactive generators (SRGs) are becoming increasingly widespread due to their simple design, absence of magnets and mechanical contacts, and high reliability. The task of the proposed work is to study the influence of the design of the double winding of the stator of a SRG on its energy characteristics, determine the optimal parameters of the mutual arrangement of the windings, and develop recommendations for increasing the generator efficiency. **Goal.** Analysis of the influence of the design of the double winding of the stator of a SRG on the output energy characteristics and determine recommendations when designing this type of electrical machines. **Methodology.** The analysis was carried out using numerical modeling by the finite element method in the ANSYS Maxwell environment. Various options for the mutual arrangement of the main and excitation windings in the generator stator were considered. **Results.** The influence of the single-layer and double-layer winding design on the output characteristics of the generator was studied. It was found that a two-layer arrangement with a phase shift of 2 slots provides minimal torque ripple, improves the stability of the generator operation and helps to increase the efficiency to 92.5 %. **Scientific novelty.** For the first time, the effect of the phase shift of the windings on electromagnetic processes in the SRG has been studied in detail, which allows optimizing its design and improving operational performance. **Practical value.** The results can be used in the design of new generators with improved characteristics for use in wind power, diesel generator sets and autonomous electrical systems. References 19, table 1, figures 12.

Key words: synchronous-reactive generator, winding, rotor, speed, torque, energy efficiency.