

DOI: 10.31319/2519-2884.46.2025.14

УДК 621.313.323

Чугунов Д.В.¹, асистент, ORCID: 0009-0001-9227-8717, e-mail: davidchugunov00@gmail.com

Шрамко Ю.Ю.², к.т.н, ORCID: 0000-0002-8141-260X,

email: yurii.shramko@mipolytech.education

Нізімов В.Б.¹, докт. техн. наук, ORCID: 0000-0002-4580-5262, email: vikbor36@gmail.com

Росенко Ю.С.¹, ст. викладач, ORCID: 0000-0001-9408-2171, e-mail: efim.mail@gmail.com

Коваленко А.Є.³, викладач, email: kovalenko1965@i.ua

Черніков М.В.¹, здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

¹Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

²ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка», м. Запоріжжя

³Донбаський фаховий коледж технологій та управління, м. Кам'янське

Chuhunov David¹, Assistant of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Shramko Yuriy², Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation, Electrical, and Robotic Systems

Nizimov Victor¹, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Roienko Yukhym¹, Senior Lecturer of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Kovalenko Artem³, Lecturer of the Donbass Applied College of technology and management

Chernikov Mykhailo¹, master's degree student

¹Dniprovsky State Technical University, Kamyanske

²Technical University «Metinvest Polytechnic», Zaporizhzhia

³Donbass Applied College of technology and management, Kamyanske

ПРИСТРІЙ ДЛЯ АСИНХРОННОГО ПУСКУ СИНХРОННОГО ДВИГУНА З НЕЛІНІЙНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ В КОНТУРІ ЗБУДЖЕННЯ

Ефективними методами успішного пуску навантажених синхронних двигунів є методи, що ґрунтуються на компенсації електромагнітної інерційності контурів збудження шляхом підключення резисторів, накопичувачів енергії, компенсуючої електрорушійної сили, а також розчеплення обмотки збудження з ємностями. Визначені оптимальна величина ємності нелінійного накопичувача енергії та електромагнітний момент в режимі асинхронного пуску. Досліджені та розраховані динамічні характеристики асинхронного пуску синхронного двигуна. Здійснена порівняльна оцінка режимів асинхронного пуску дискретного накопичувача у порівнянні із запропонованим пристроєм.

Ключові слова: асинхронний пуск; синхронний двигун; накопичувач енергії; ємнісні стрижні.

Effective methods of successful starting of loaded synchronous motors are those based on compensation of electromagnetic inertia of excitation circuits by connecting resistors, energy storage devices, compensating electromotive force, and decoupling of excitation winding from capacitors. The optimum value of the nonlinear energy storage capacitance and electromagnetic torque in the asynchronous starting mode are determined. The dynamic characteristics of the asynchronous starting of a synchronous motor are investigated and calculated. A comparative assessment of the asynchronous starting modes of a discrete energy storage device in comparison with the proposed device is made.

Keywords: asynchronous starting; synchronous motor; energy storage; capacitive rods.

Постановка проблеми

Синхронні двигуни (СД) широко застосовуються в промисловості там, де необхідна висока потужність і жорсткість механічних характеристик. Ці двигуни забезпечують стабільність обертання навіть за значних змін навантаження, що робить їх незамінними для механізмів із

великим моментом опору та високою інерційністю. З конструктивної точки зору, синхронні двигуни умовно можна поділити на три основні групи:

1. Класичні електричні машини — ці двигуни мають обмотку збудження (ОЗ) та короткозамкнену обмотку, які забезпечують стабільність і надійність роботи. Такий тип двигунів є найбільш розповсюдженим, завдяки відносно простій конструкції та перевіреним технологіям виробництва та експлуатації.

2. Двигуни з постійними магнітами — містять постійні магніти, що забезпечують високу ефективність роботи, однак їх впровадження обмежується високою вартістю матеріалів, зокрема рідкоземельних постійних магнітів, а також чутливістю таких двигунів до перемагнічування.

3. Синхронно-реактивні двигуни — мають особливу будову ротора, яка дозволяє знизити втрати та покращити енергетичну ефективність. Вони поки що перебувають на етапі впровадження для застосувань із великими потужностями.

Велика кількість синхронних двигунів (СД) використовується у механізмах із підвищеним моментом опору та значною інерційністю, зокрема в промислових установках, насосних агрегатах, компресорах, дробарках тощо. Пуск таких двигунів ускладнюється необхідністю забезпечення високого пускового моменту за умови обмеження пускових струмів, що зумовлено як технічними, так і економічними чинниками.

Недоліками більшості існуючих СД є недостатній пусковий момент без спеціальних пристроїв або систем збудження, високі пускові струми, а також складність керування пусковими режимами. Це призводить до перевантажень у мережі, зниження надійності електропостачання та скорочення ресурсу обладнання.

Таким чином, розробка та впровадження ефективних способів покращення пускових характеристик синхронних двигунів є важливим науково-технічним завданням, що має значний практичний інтерес для багатьох галузей промисловості.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Унаслідок широкого розповсюдження СД другої та третьої груп, які характеризуються підвищеними вимогами до умов пуску, значна увага зосереджена на вирішенні проблеми забезпечення ефективного запуску таких електричних машин. Цій задачі присвячено низку наукових досліджень, що охоплюють різні підходи: прямий пуск від мережі [1—4], пуск із застосуванням додаткових технічних заходів, включаючи модернізацію конструктивних елементів двигуна [5—7], а також використання напівпровідникових перетворювачів частоти та інших засобів керованого електроприводу.

Незважаючи на розвиток та популяризацію двигунів другої і третьої груп, класичні СД залишаються найбільш використовуваними, що пояснюється їх відносною доступністю, досконалістю технології, а також меншими витратами на впровадження в промислові процеси. Ситуацію ускладнює той факт, що двигуни з постійними магнітами мають високу вартість і чутливість до робочих умов, а синхронно-реактивні двигуни поки що не можуть повністю конкурувати з класичними СД за потужністю.

Велика кількість СД використовується в механізмах, де необхідно підтримувати постійну швидкість без її регулювання в певному діапазоні. У таких випадках найпростішим і найпоширенішим методом пуску залишається прямий пуск від мережі. Для запуску механізмів із великим статичним моментом опору необхідний високий пусковий момент. Найпростішим способом його збільшення є включення пускового резистора або ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ) в контур збудження. Ці елементи дозволяють перерозподілити струми й моменти між контурами двигуна.

Існуючі способи асинхронного пуску СД спрямовані на компенсацію електромагнітної інерційності контурів збудження шляхом застосування резисторів, накопичувачів енергії, розчеплення обмоток збудження з ємностями, а також введення компенсуючої електрорушійної сили [8—13].

Підвищення середнього значення моменту в режимі асинхронного пуску може бути досягнуто збільшенням активного опору в контурі збудження. Однак зі збільшенням кратності пускового резистора фаза струму наближається до оптимального, а його амплітуда зменшується.

ся. Тому найбільше значення середнього моменту при фіксованому ковзанні забезпечується при пусковому опорі, коли фаза струму складає $\pi/4$, але при цьому амплітуда струму зменшується в $\pi/8$ разів у порівнянні з її значенням при короткозамкненій ОЗ, що обмежує подальше підвищення середнього моменту цієї обмотки.

Підключення до контуру збудження ЄНЕ з незмінною ємністю дозволяє покращувати асинхронну характеристику СД в деякому обмеженому діапазоні ковзання, а в інших зонах ковзання може статися значне погіршення пускових властивостей двигуна, аж до появи гальмівних моментів в області напівсинхронної швидкості. Для покращення характеристик застосовується багатоступеневий накопичувач енергії, що ускладнює конструкцію. Тому необхідно визначити таку величину ємності ЄНЕ залежно від параметрів двигуна і ковзання, яка забезпечить здобуття максимально можливого електромагнітного моменту протягом всього пуску СД. Точне аналітичне визначення цієї величини ємності представляє складне завдання, зважаючи на електричну та магнітну несиметрію СД. Проте проведені розрахункові дослідження показують, що максимум моменту двигуна досягається при повній компенсації ємністю опору розсіювання контурів ротора за прямою віссю полюсів [1].

Для реалізації безперервної зміни ємнісного опору відповідно до ковзання та параметрів двигуна необхідно розробити спрощені методи керування, які забезпечують надійність і ефективність роботи синхронних двигунів в умовах великих навантажень.

У наведених роботах недостатньо визначено вплив ємнісного накопичувача енергії на моменти і струми контурів СД.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розробка та дослідження нового пристрою для асинхронного пуску СД, який використовує нелінійний накопичувач енергії (НЕ) в контурі збудження. Це дає можливість оптимізувати пускові режими двигуна шляхом підвищення ефективності компенсації електромагнітної інерційності контурів збудження. Особлива увага приділена визначенню оптимальної ЄНЕ для забезпечення максимального електромагнітного моменту у широкому діапазоні ковзання, а також оцінці динамічних характеристик пуску та порівнянню ефективності запропонованого пристрою з існуючими методами.

Виклад основного матеріалу

1. Визначення оптимальної величини ємності нелінійного накопичувача енергії.

Дослідження виконувалося для СД типу СДСЗ — 2000–100 з наступними параметрами: $U_{1N} = 6000$ В; $U_N = 3464,2$ В; $I_{1N} = 229$ А; $P_N = 20000$ кВт; $n_N = 100$ об/хв; $\omega_0 = 314$ 1/с; $p = 30$; $\cos\varphi_N = 0,9$; $S_N = 2300$ кВА; $i_{fN} = 276$ А; $U_{fN} = 184$ В; $J_{дв} = 37500$ кг·м²; $J_{бар} = 11500$ кг·м²; $J_M = 7000$ кг·м²; $r_{120\sigma} = 0,165$ Ом; $X_{1\sigma} = 1,92$ Ом; $X_{f\sigma} = 2,29$ Ом; $X_d = 10,18$ Ом; $X_q = 7,1$ Ом; $X_{ad} = 8,26$ Ом; $X_{aq} = 5,18$ Ом; $r_{f20\sigma} = 0,419$ Ом; $K_i = 0,307$; $K_U = 0,204$; $r_f' = 0,0308$ Ом; $r_{ud}' = 1,148$ Ом; $r_{uq}' = 0,877$ Ом.

Значення у відносних одиницях: $r_1^* = 0,0109$ Ом; $x_1^* = 0,127$; $x_{ad}^* = 0,546$; $x_{aq}^* = 0,342$; $r_f^* = 0,0204$; $x_{f\sigma}^* = 0,151$; $r_{kd}^* = 0,0759$; $r_{kq}^* = 0,058$; $x_{kd\sigma}^* = 0,0642$; $x_{kq\sigma}^* = 0,0491$.

$$i_{fn}^* = \frac{i_{fN}}{\sqrt{2} \cdot I_{1N} \cdot K_i} = 2,776.$$

$$u_{fn}^* = \frac{K_u \cdot U_{fN}}{\sqrt{2} \cdot U_N} = 0,00766.$$

Знаходимо ємнісний опір у в.о. системи x_{ad} [2]:

$$X_c = \frac{A}{2} - \sqrt{\frac{A^2}{4} - B}, \quad (1)$$

де

$$A = x_{\sigma kd} s^2 + 2x_{\sigma f} s^2 + \frac{r_{kd}^2}{x_{\sigma kd}}; \quad (2)$$

$$B = x_{\sigma f} x_{\sigma kd} s^4 + x_{\sigma f}^2 s^4 + \frac{r_{kd}^2}{x_{\sigma kd}} x_{\sigma f} s^2 + R_f^2 s^2.$$

Визначаємо залежність відносного ємнісного опору у функції ковзання та параметрів двигуна, що забезпечує повну компенсацію опору розсіювання контурів ротора на основі виразів (1)–(2), а також вплив кратності пускового резистора.

Відносне значення ємності ЄНЕ може бути отримане для будь-якого ковзання у відповідності з розрахунковою залежністю за формулою:

$$c = \frac{1}{2\pi f x_c}. \quad (3)$$

Значення ємності в іменованих одиницях (мкФ) визначається за виразом:

$$C = \frac{K_{\text{ПР}}}{2\pi f x_c}, \quad (4)$$

де

$$K_{\text{ПР}} = \frac{K_i K_u I_n 10^6}{U_n},$$

$K_{\text{ПР}}$ — коефіцієнт приведення для ємнісного опору; K_i , K_u — відповідно коефіцієнти приведення струму та напруги контуру збудження СД; U_n , I_n — номінальні значення фазної напруги та струму статора; f — частота мережі живлення.

Отриману залежність $x_c = f(s)$ апроксимовано емпіричним виразом:

$$x_c = \frac{ab + cs^d}{b + s^d}, \quad (5)$$

де a , b , c , d — коефіцієнти апроксимації параметрів СД.

Залежність x_c для досліджуваного двигуна наведено на рис. 1.

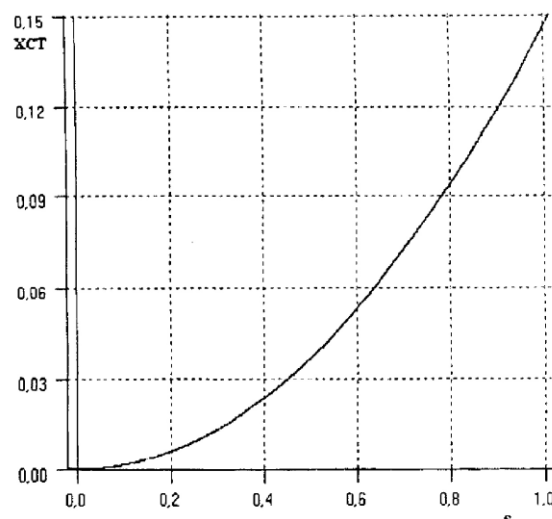


Рис. 1. Залежність x_c для досліджуваного двигуна

2. Дослідження динаміки асинхронного пуску з ємнісними стрижнями.

На рис. 2 приведено принципову схему пристрою для реалізації пуску синхронного двигуна (а) та схему розташування ємнісних стрижнів накопичувача енергії (б).

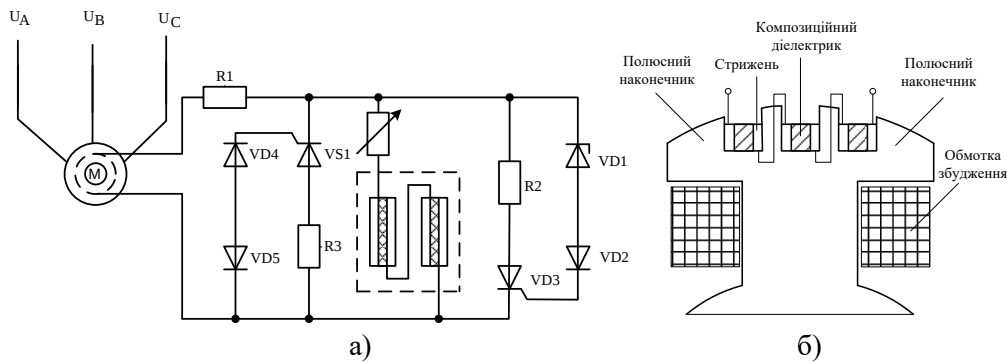


Рис. 2. Принципова схема пристрою для реалізації пуску СД та схема розташування ємнісних стрижнів НЕ

У початковий момент пуску через явище витіснення струму у шини ємнісного стрижня ефективна площа останнього є мінімальною. Це обумовлено тим, що високочастотні складові струму концентруються на поверхні провідника, знижуючи площу поперечного перерізу, через яку протікає струм. Як наслідок, початкове значення ємності накопичувача енергії визначається саме цією зменшеною ефективною площею. У цей момент опір пускового резистора досягає свого максимального значення, що сприяє обмеженню струму в контурі збудження і захищає обмотки від перевантажень.

У процесі розгону синхронного двигуна частота струму, індукованого в роторі, поступово знижується, що призводить до зменшення ефекту витіснення струму. Це дозволяє більшій частині струму проникати у внутрішні шари стрижня, збільшуючи ефективну площу його поперечного перерізу. В результаті цього відбувається поступове збільшення величини ємності накопичувача енергії, оскільки ємність прямо залежить від площі провідника. Одночасно зі збільшенням ефективною площею стрижня відбувається також збільшення його поперечного перерізу, що зменшує активний опір стрижня [14, 15].

Зниження опору ємнісного стрижня позитивно впливає на розподіл струмів у контурі збудження, покращуючи пускові характеристики двигуна. Це сприяє досягненню більшого середнього електромагнітного моменту, що є важливим для забезпечення плавного та ефективного запуску двигуна, особливо в умовах високого статичного моменту опору. Таким чином, динамічна зміна параметрів накопичувача енергії є ключовим фактором для оптимізації режиму пуску синхронного двигуна.

3. Розрахунок динамічних характеристик асинхронного пуску СД.

Динаміка описується системою диференціальних рівнянь СД в системі координат d, q та системі відносних одиниць (о.е.):

$$\begin{cases} p\psi_d = -U \sin \theta - r_1 i_d - \psi_q (1-s)\omega_0; \\ p\psi_q = -U \cos \theta - r_1 i_q + \psi_d (1-s)\omega_0; \\ p\psi_f = U_f - U_c - i_f R_f; \\ p\psi_{kd} = -r_{kd} i_{kd}; \\ p\psi_{kq} = -r_{kq} i_{kq}; \\ p\theta = S; \\ pS = (M_c + \psi_d i_q - \psi_q i_d) / H_j; \\ pU_c = x_c \cdot i_f. \end{cases} \quad (6)$$

де $H_j = \omega_0 T_i = \frac{J \omega_0^3}{p^2 P_6}$ — стала агрегату.

Обчислення струмів контурів здійснюється за виразами:

$$\begin{cases} i_d = \Delta_{ID}/\Delta_{AD}; \\ i_q = \Delta_{IQ}/\Delta_{AQ}; \\ i_f = \Delta_{IF}/\Delta_{AD}; \\ i_{kd} = \Delta_{IKD}/\Delta_{AD}; \\ i_{kq} = \Delta_{IKQ}/\Delta_{AQ}. \end{cases} \quad (7)$$

Обчислення значень $\Delta_{ID}, \Delta_{IQ}, \Delta_{IF}, \Delta_{IKD}, \Delta_{IKQ}, \Delta_{AD}, \Delta_{AQ}$ здійснюється за співвідношенням

$$\begin{cases} \Delta_{AD} = x_{\sigma}(x_{\sigma f} x_{\sigma kd}) + x_{ad}(x_{\sigma f} x_{\sigma kd} + x_{\sigma} x_{\sigma kd} + x_{\sigma} x_{\sigma f}); \\ \Delta_{AQ} = x_{\sigma} x_{\sigma kq} + x_{aq} x_{\sigma kq} + x_{aq} x_{\sigma}; \\ \Delta_{ID} = (x_{\sigma f} x_{\sigma kd} + x_{ad} x_{\sigma kd} + x_{\sigma f} x_{ad}) \psi_d - x_{ad} x_{\sigma kd} \psi_f - x_{ad} x_{\sigma f} \psi_{kd}; \\ \Delta_{IQ} = (x_{\sigma kq} + x_{aq}) \psi_q - x_{aq} \psi_q; \\ \Delta_{IF} = -x_{ad} x_{\sigma kd} \psi_d + (x_{\sigma} x_{\sigma kd} + x_{ad} x_{\sigma kd} + x_{\sigma} x_{ad}) \psi_f - x_{ad} x_{\sigma} \psi_{kd}; \\ \Delta_{IKD} = -x_{ad} x_{\sigma f} \psi_d - x_{\sigma} x_{ad} \psi_f + (x_{\sigma} x_{\sigma f} + x_{ad} x_{\sigma f} + x_{\sigma} x_{ad}) \psi_{kd}; \\ \Delta_{IKQ} = -x_{aq} \psi_q + (x_{\sigma} x_{aq}) \psi_{kq}. \end{cases} \quad (8)$$

Розрахункові залежності пускових характеристик при ступінчастій зміні величини ємності СНЕ наведені на рис. 3, а при безперервній зміні величини ємності СНЕ — на рис. 4.

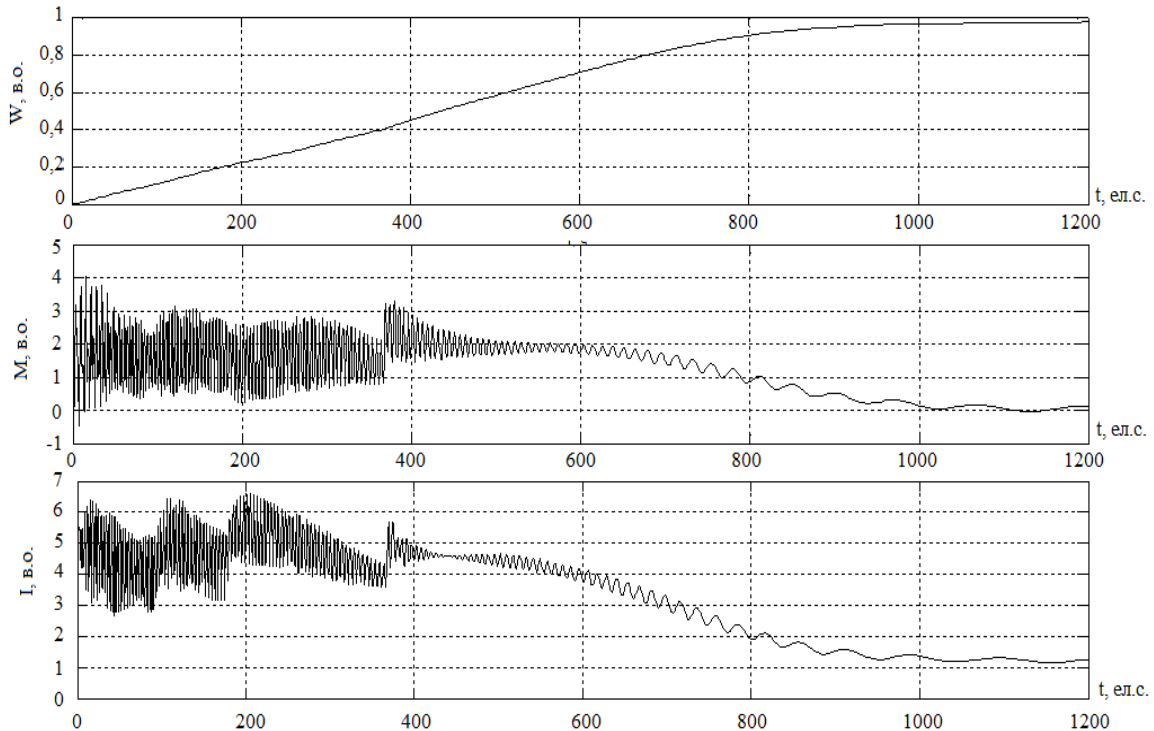


Рис. 3. Залежності пускових характеристик при ступінчастій зміні величини ємності СНЕ

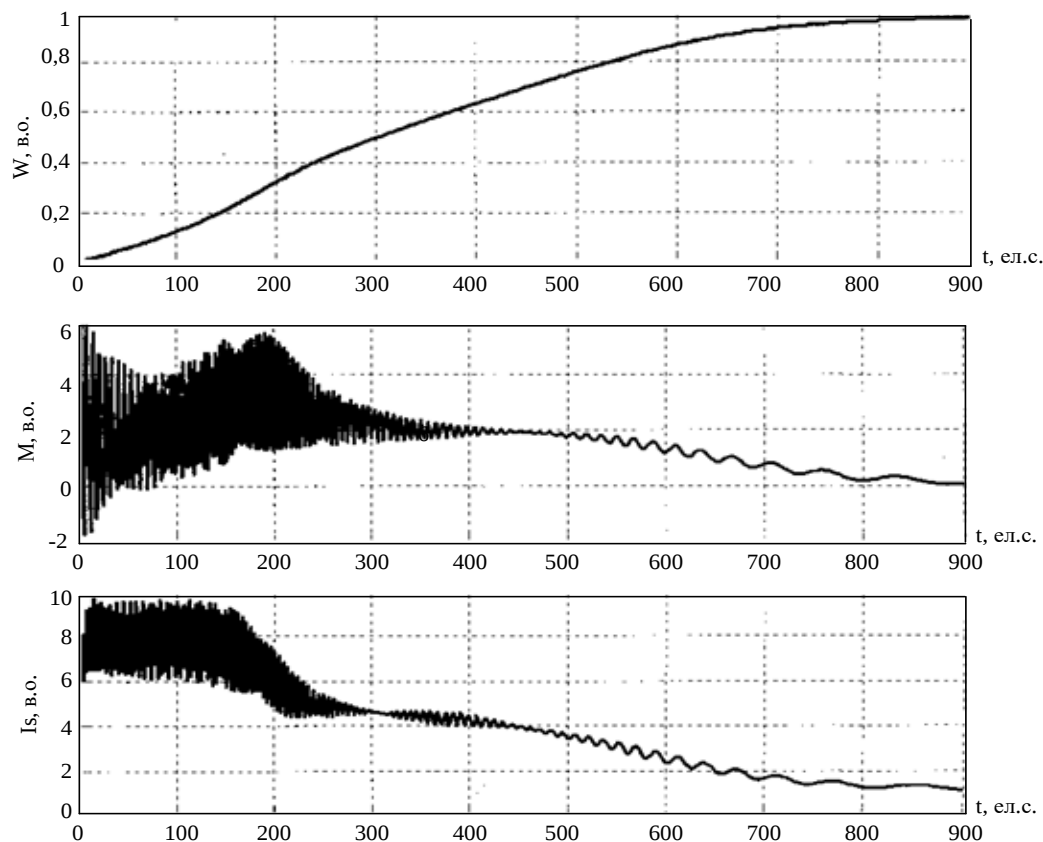


Рис. 4. Залежності при безперервній зміні величини ємності СНЕ

Висновки

1. Запропоновано новий пристрій для асинхронного пуску синхронного двигуна (СД), який використовує нелінійний накопичувач енергії у контурі збудження, що змінює свої параметри залежно від ковзання ротора.
2. Розроблено математичний опис роботи пристрою, який дозволяє оцінити пускові режими СД. Визначено залежності між параметрами накопичувача енергії, ковзанням і електромагнітним моментом.
3. Проведено розрахунки динамічних характеристик пуску для різних режимів зміни ємності накопичувача, зокрема для ступінчастого та безперервного варіантів. Результати показали, що використання запропонованого пристрою забезпечує більш ефективний пуск.
4. Використання накопичувача енергії з нелінійною залежністю ємності дозволяє уникнути погіршення пускових характеристик у зоні напівсинхронної швидкості, що покращує стабільність та ефективність роботи СД.
5. Запропонований пристрій має потенціал для практичного застосування в промисловості, особливо в механізмах із високим моментом опору та інерційністю, забезпечуючи оптимізацію енергоспоживання та покращення пускових характеристик.
6. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на технічну реалізацію пристрою для широкого спектра двигунів та розробку спрощених методів налаштування параметрів накопичувача енергії під конкретні умови роботи.

Список використаної літератури

1. Villani M., Fabri G., Credo A., Di Leonardo L., Parasiliti Collazzo F. Line-Start Synchronous Reluctance Motor: A Reduced Manufacturing Cost Avenue to Achieve IE4 Efficiency Class // IEEE Access. 2022. T. 10. C. 100094–100103.
2. Park H.J., Hong H.B., Lee K.D. A Study on a Design Considering the Transient State of a Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor Satisfying the Requirements of the IE4 Efficiency Class // Energies. 2022. T. 15. C. 9644.
3. SARAC V. Comparative Analysis of Line-start Synchronous Motor and Asynchronous Motor // Electrotehnica, Electronica, Automatica. 2021. T. 69. C. 11–18.
4. Šarac V. LINE-START SYNCHRONOUS MOTOR A VIABLE ALTERNATIVE TO ASYNCHRONOUS MOTOR // Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics. 2020. T. 19. C. 039.
5. Knypiński Ł., Gillon F. Sizing by optimization of line-start synchronous motor // COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. 2021. T. 41. C. 690–702.
6. Muteba M. Transient Analysis of a Line-Start Synchronous Reluctance Motor with Symmetrical Distributed Brass Rotor Bars // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. 2020. T. 5. C. 94–102.
7. Ogbuka C., Nwosu C., Agu M. Dynamic and steady state performance comparison of line-start permanent magnet synchronous motors with interior and surface rotor magnets. *Archives of Electrical Engineering*. 2016. Vol. 65, no. 1. P. 105–116. URL: <https://doi.org/10.1515/ae-2016-0008>.
8. Grycmacher M., Lyskawinski W., Szelag W. Comparison analysis of induction and line-start synchronous reluctance motors. *ITM Web of Conferences*. 2019. Vol. 28. P. 01005. URL: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20192801005>.
9. Jung T.-U., Nam H. Rotor Design to Improve Starting Performance of the Line-start Synchronous Reluctance Motor. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2006. Vol. 1, no. 3. P. 320–326. URL: <https://doi.org/10.5370/jeeet.2006.1.3.320>.
10. Гладирь А. І., Гомілко В. І. Система формування пускових характеристик електроприводів змінного струму з важкими умовами пуску. *Електроінформ*. 2003. № 1. С. 17–19.
11. Пускові системи нерегульованих електроприводів: монографія. / О. П. Чорний та ін. Кременчук : ПП А. В. Щербатих, 2006. 280 с.
12. Нізімов В. Б. Застосування накопичувачів енергії для асинхронного пуску синхронних двигунів. *Науковий вісник НДА України*. 2000. № 1. С. 49–51.
13. Півняк Г. Г., Кириченко В. І., Бородай В. А. Про новий напрямок удосконалення крупних синхронних електродвигунів. *НАН України. Технічна електродинаміка. Тематичний випуск*. 2002. Ч. 2. С. 62–55.
14. Спосіб пуску синхронного двигуна : пат. 98412 Україна. № 201103138 ; заявл. 17.03.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. 8 с.
15. Спосіб пуску синхронного двигуна та пристрій для його реалізації : пат. 106667 Україна : Н02Р 1/50, Н02Р 1/46. № 201300459 ; заявл. 14.01.2013 ; опубл. 29.09.2014, Бюл. № 18. 9 с.

DEVICE FOR ASYNCHRONOUS STARTING OF A SYNCHRONOUS MOTOR WITH A NONLINEAR ENERGY ACCUMULATOR IN THE EXCITATION CIRCUIT**Abstract**

The article addresses the urgent task of ensuring effective asynchronous starting of loaded synchronous motors (SM), which are widely used in mechanisms with high torque resistance and inertia. A novel device is proposed, based on the application of a nonlinear energy accumulator (EA) in

the excitation circuit. The study aims to enhance the efficiency of asynchronous starting by optimizing the device's parameters.

The paper presents an analysis of existing methods and devices for asynchronous starting, which include the use of starting resistors, capacitive energy accumulators, and other compensating elements. The authors propose a method for determining the optimal capacitance of the EA that ensures the maximum electromagnetic torque throughout the starting process.

The research was conducted for motors of the SDS3 — 2000 — 100 type. The dependencies between the parameters of the capacitive accumulator and the motor characteristics under different starting modes were established. In particular, the methodology for determining the relative capacitive resistance that fully compensates for the leakage resistance of the rotor circuits is described. For simplified engineering calculations, the dependencies of the accumulator parameters are approximated using empirical formulas.

A key feature of the study is the proposed device design, which employs a multistage energy accumulator with nonlinear capacitance dependence on slip. This design avoids performance deterioration in the semi-synchronous speed zone. The article includes the schematic diagram of the device and describes its operation at various starting stages.

The dynamics of asynchronous starting are also explored through mathematical modeling, which includes a system of differential equations. Numerical calculations were carried out to evaluate the starting characteristics under conditions of stepped and continuous variation of the accumulator's capacitance. The results are presented as graphical dependencies.

In the conclusions, the authors highlight the advantages of the developed device for asynchronous starting of SMs and its practical industrial applications. The development ensures an increase in starting torque and optimization of dynamic characteristics, making the device competitive compared to existing analogs.

References

- [1] Villani, M., Fabri, G., Credo, A., Di Leonardo, L., & Parasiliti Collazzo, F. (2022). Line-start synchronous reluctance motor: A reduced manufacturing cost avenue to achieve IE4 efficiency class. *IEEE Access*, 10, 100094—100103.
- [2] Park, H. J., Hong, H. B., & Lee, K. D. (2022). A study on a design considering the transient state of a line-start permanent magnet synchronous motor satisfying the requirements of the IE4 efficiency class. *Energies*, 15, 9644.
- [3] Sarac, V. (2021). Comparative analysis of line-start synchronous motor and asynchronous motor. *Electrotehnica, Electronica, Automatica*, 69, 11–18.
- [4] Šarac, V. (2020). LINE-START SYNCHRONOUS MOTOR A VIABLE ALTERNATIVE TO ASYNCHRONOUS MOTOR. *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics*, 19, 039.
- [5] Knypiński, Ł., & Gillon, F. (2021). Sizing by optimization of line-start synchronous motor. *COMPEL. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 41, 690–702.
- [6] Muteba, M. (2020). Transient analysis of a line-start synchronous reluctance motor with symmetrical distributed brass rotor bars. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 5, 94–102.
- [7] Ogbuka, C., Nwosu, C., & Agu, M. (2016). Dynamic and steady state performance comparison of line-start permanent magnet synchronous motors with interior and surface rotor magnets. *Archives of Electrical Engineering*, 65(1), 105–116. Retrieved from <https://doi.org/10.1515/aee-2016-0008>
- [8] Grycmacher, M., Lyskawinski, W., & Szelag, W. (2019). Comparison analysis of induction and line-start synchronous reluctance motor. *ITM Web of Conferences*, 28, 01005. Retrieved from <https://doi.org/10.1051/itmconf/20192801005>
- [9] Jung, T.-U., & Nam, H. (2006). Rotor design to improve starting performance of the line-start synchronous reluctance motor. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 1(3), 320—326. Retrieved from <https://doi.org/10.5370/jeeet.2006.1.3.320>

- [10] Rodkin, D. I., & Hladyr, A. I. (2003). Systema formuvannia puskovykh kharakterystyk elektropryvodiv zminnoho strumu z vazhkymy umovamy pusku[System of forming starting characteristics of AC electric drives under heavy starting conditions]. *KDPI, Elektroinform*, (1), 17–19
- [11] Chornyi, O. P., Hladyr, A. I., Osadchuk, Yu. H., Kurbanov, I. R., & Voshun, A. N. (2006). Puskovi systemy nerehulovanykh elektropryvodiv: monohrafiya [Starting systems of unregulated electric drives]. *Kremenchuk, Ukraine: PP A. V. Shcherbatykh*.
- [12] Nizimov, V. B. (2000). Zastosuvannia nakopychuvachiv enerhii dlia asynkhronnoho pusku synkhronnykh dvyhuniv. [Application of energy accumulators for asynchronous starting of synchronous motors]. *Naukovyi visnyk NDA Ukrainy — Scientific Bulletin of NDA Ukraine*, (1), 49–51.
- [13] Pivnyak, H. H., Kyrychenko, V. I., & Borodai, V. A. (2002). Pro novyi napriamok udoskonalennia krupnykh synkhronnykh elektrodvyhuniv [On a new direction of improving large synchronous electric motors]. *NAN Ukrainy — NAS of Ukraine. Technical Electrodynamics. Thematic issue*. Part 2, 62–65.
- [14] Sposib pusku synkhronnoho dvyhuna [Method of starting a synchronous motor], pat. 98412 Ukraine, No. 201103138. (2012).
- [15] Sposib pusku synkhronnoho dvyhuna ta prystrii dlia yoho realizatsii [Method of starting a synchronous motor and device for its implementation], pat. 106667 Ukraine, No. 201300459. (2014).

Надійшла до редколегії 11.03.2024