

DOI: 10.31319/2519-2884.44.2024.14

УДК 621.313.323

Количев С.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-1017-5125, e-mail: kolychev.sergey58@gmail.com

Качура О.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-6338-0974, e-mail: fem@ukr.net

С'янов О.М., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0003-4120-4926, email: alexandr.sianov@gmail.com

Десна Д.О., здобувач третього (доктор філософії) рівня, e-mail: ipmax 99@gmail.com

Лісняк М.М., здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Kolychev Serhii, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Kachura Oleksii, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Syanov Oleksandr, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Desna Dmytro, Postgraduate Student

Lisniak Mykhailo, master's degree student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ДИНАМІКА ПУСКУ БЕЗЩІТКОВОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА З ІНДУКЦІЙНИМИ РЕОСТАТАМИ В КОЛІ РОТОРА

Безконтактні (безщіткові) синхронні двигуни, виготовлені на базі асинхронних машин з фазним ротором, мають низькі показники при прямому пуску від мережі, якщо в їх роторні обмотки по ортогональних осях d, q включені постійні за величиною активні опори, значення яких не залежать від частоти, форми та амплітуди протікаючого струму. Результати проведених експериментальних досліджень показали позитивний ефект від застосування в роторних обмотках цих машин індукційних реостатів дискової конструкції, які дозволили досить просто вирівняти комплексні опори синхронного двигуна по осях d, q і забезпечити розворот ротора з постійним прискоренням.

Ключові слова: синхронний двигун; ортогональні роторні обмотки; індукційний реостат.

Brushless synchronous motors manufactured on the basis of asynchronous machines with a phase rotor have low performance during direct start-up from the mains if their rotor windings along the orthogonal axes d, q include constant active resistances, the values of which do not depend on the frequency, shape and amplitude of the flowing current. The results of the conducted experimental studies have shown a positive effect from the use of induction rheostats of disk design in the rotor windings of these machines, which made it possible to simply align the complex resistances of the synchronous motor along the d, q axes and ensure the rotation of the rotor with constant acceleration.

Keywords: synchronous motor; orthogonal rotor windings; induction rheostat.

Постановка проблеми

Безщіткові (безконтактні) синхронні двигуни (БСД), що випускаються вітчизняною промисловістю, мають низькі пускові показники через сталість активних опорів їх роторних кіл. Тому актуальною технічною проблемою є математичне та експериментальне дослідження динамічних властивостей таких двигунів у режимі прямого асинхронного пуску при включенні в обмотки ротора реостатів зі змінними параметрами.

Високовольтні БСД можуть бути виготовлені на базі асинхронних двигунів із фазним ротором. Причому дві фази ротора двигуна послідовно з'єднуються за схемою неповної "зірки", утворюючи основну обмотку збудження по поздовжній осі " d ". Ця обмотка на час пуску замикається на додатковий опір через тиристорний ключ. Фаза ротора, що залишилася, в безщітковому виконанні машини замикається коротко і утворює пускову обмотку по осі " q ". Таким чи-

ном в режимі прямого асинхронного пуску БСД є неявнополусною машиною з симетричною трифазною обмоткою на статорі і несиметричною двофазною обмоткою на роторі в ортогональних координатах d, q . Пускові властивості такої машини різко обмежені через сталість величин опорів (власних та додаткових). Отже дослідження пускових можливостей БСД з індукційними реостатами (ІР), що обертаються на роторі, мають змінні частотно-залежні параметри, є актуальним науковим завданням.

Аналіз основних досліджень та публікацій

Власне конструювання та проектування ІР у симетричному трифазному виконанні для пуску асинхронних двигунів з фазним ротором досить докладно досліджено у кількох монографіях [1, 2, 3]. Але несиметричні режими асинхронних машин з такими реостатами не стали предметом вивчення через складність і неоднозначності розрахунку їх параметрів. ІР для синхронних явнополусних машин з повною демпферною обмоткою на роторі знайшли застосування поки що тільки для режиму динамічного гальмування, в якому вони мають незаперечні переваги перед релейно-контакторними схемами [4]. Результати розрахунків підтвердили також позитивний технічний ефект від включення ІР в обмотку збудження синхронних двигунів із поєднаними обмотками на статорі [5]. Але досліджене підтвердження доцільності впровадження та експлуатації ІР у колах збудження високовольтних та низьковольтних синхронних машин не приводяться.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження — розробка та випробування в режимі асинхронного пуску дослідного зразка синхронного двигуна з включенням в його поздовжню та поперечну роторні обмотки індукційних реостатів.

Виклад основного матеріалу

Для отримання достовірних відомостей про пускові можливості БСД із включеними в дві ортогональні обмотки на роторі індукційними реостатами було створено лабораторну установку, схема якої показана на рис. 1.

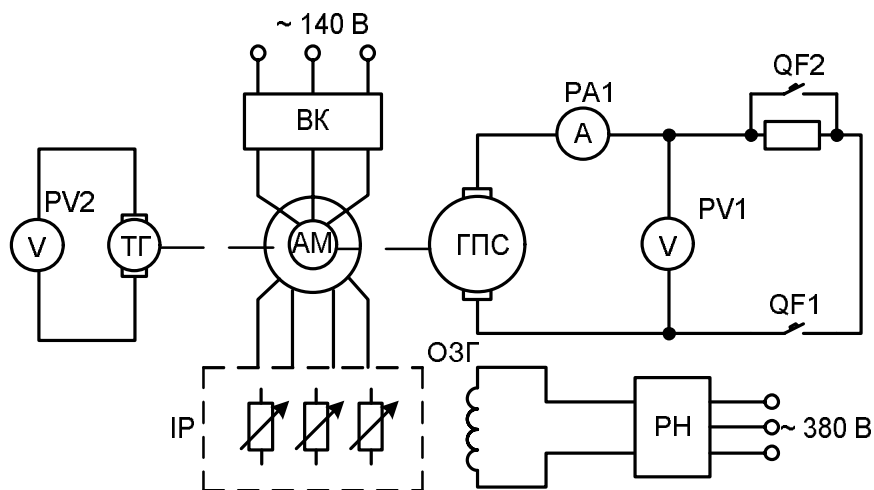


Рис. 1. Схема лабораторної установки

Як досліджуваній двигун використана машина з фазним ротором типу МТВ-412-8 (11 кВт; $U_R = 140$ В; $U_S = 220$ В; 750 об/хв). Обмотки машини в руховому режимі підключені навпаки: до кілець ротора через вимірювальний комплект ВК підводилася трифазна симетрична система напруги з лінійним значенням 140 В. “Зірка” обмотки статора була розімкнена і розділена на дві частини (рис. 2): фази “а” і “с” становили пускову обмотку по осі d (у синхронному режимі вони виконували функцію основної обмотки збудження), а фаза “в”, що залишилася, виконувала роль пускової обмотки по осі q (у синхронному режимі ця додаткова обмотка збудження поперечної осі). Кожна обмотка на час пуску замикалася на власний індукційний реостат Z_d або Z_q .

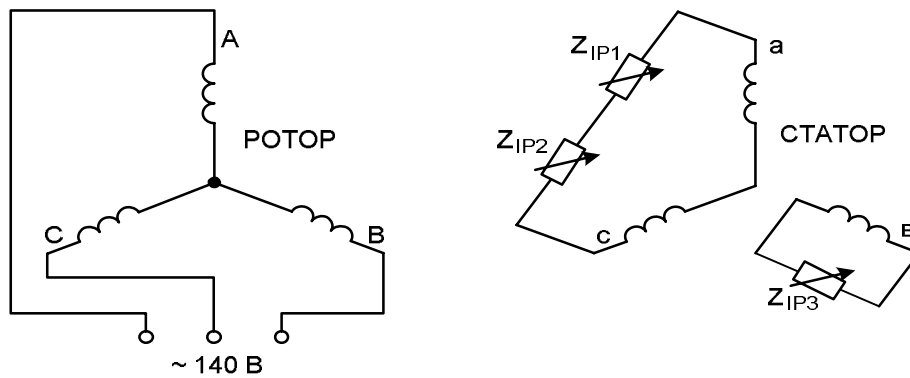


Рис. 2. Схема включення обмоток двигуна

Вал асинхронної машини для створення протидіючого моменту і підвищення інерційності маси, що обертається, був зчленований з генератором постійного струму ГПС (тип GGK, 23 кВт, 230 В, 1460 об/хв, 100 А). Його обмотка збудження живилася через регулятор напруги РН. Швидкість випробуваної машини фіксувалася тахогенератором ТГ з необхідною точністю.

ІР дискової конструкції були виконані у кількості трьох штук, загальний вигляд яких показаний на рис. 3. Причому $Z_d = Z_{IP1} + Z_{IP2}$, $Z_q = Z_{IP3}$ та $Z_{IP1} = Z_{IP2} = Z_{IP3}$. Дві котушки кожного ІР були включені електрично послідовно, а магнітним потоком — назустріч один одному через внутрішню феромагнітну перегородку товщиною ≈ 4 мм. Ширина кожної котушки не перевищувала 30 мм, товщина зовнішніх феромагнітних елементів — 10 мм. У середині кожної котушки містилися масивні феромагнітні кільця тієї ж товщини. Розглянуте виконання та схема включення ІР дозволили вирівняти комплексні параметри машини по осях d та q . Обмотки ІР були забезпечені відпаюваннями для регулювання ступінчастим методом їх комплексного опору. Зближення параметрів машини по осях d і q контролювалося вольтметрами і амперметрами, включеними в пускові обмотки при нерухомому (заклиненому) роторі. У такому режимі здійснювалося тарування записаних кривих перехідних процесів.

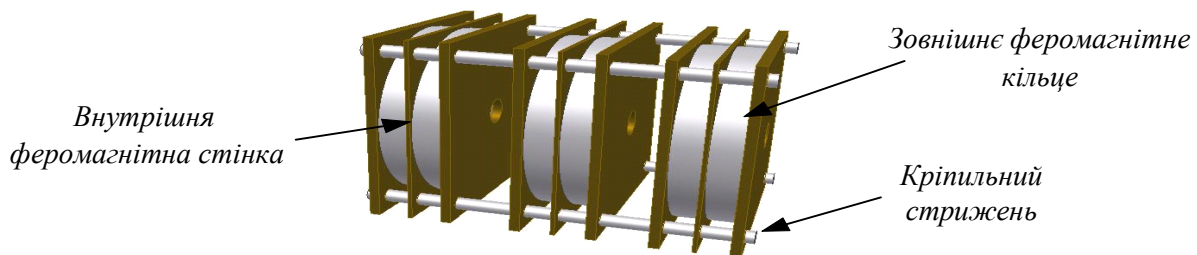


Рис. 3. Конструкція ІР з феромагнітними пластинами та центральною стінкою

Отриманні осцилограми пуску експериментального двигуна приведені на рис. 4.

Крива швидкості (n) демонструє постійний темп розгону машини, що свідчить про незмінність електромагнітного моменту протягом усього пуску (≈ 5 с.). Амплітудні значення струмів i_d , i_q близькі за величиною, а характер їх зменшення в міру розвороту машини підтверджує близькість еквівалентних опорів по осях d , q . Крива струму i_p первинної обмотки (у нашому випадку це роторне коло) максимально близька за кількісними та якісними показниками до кривої струму статора асинхронних двигунів з фазним ротором, що пускаються за допомогою симетричних трифазних індукційних реостатів.

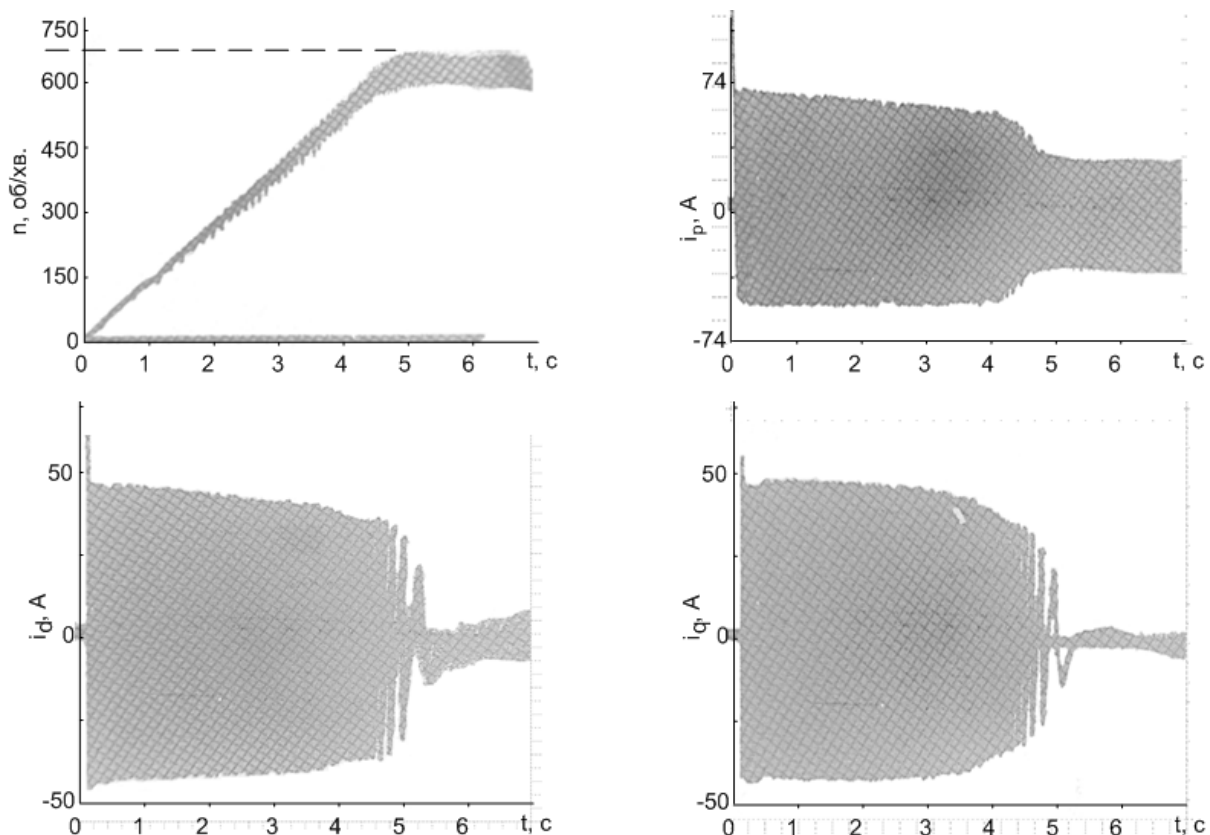


Рис. 4. Осцилограми пуску експериментального двигуна

Висновки

Результати експериментальних досліджень дозволяють зробити такі узагальнення.

1. Використання індукційних реостатів в обмотках ротора синхронних безщіткових двигунів дає можливість оптимізувати перехідні процеси пуску таких машин з точки зору обмеження прискорень і амплітуди струмів.

2. Відомий досвід розрахунків, проектування та експлуатації індукційних реостатів різної конструкції може бути розширений за рахунок їх застосування для синхронізованих асинхронних двигунів з поздовжньо-поперечним збудженням контактного або безщіткового виконання.

Список використаної літератури

1. Качура О.В., Количев С.В., С'янов О.М. Індукційні реостати з покращеними масогабаритними показниками для асинхронних двигунів з фазним ротором: монографія. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2011. 209 с.
2. Вербовой А.П., Вербовой П.Ф., С'янов О.М. Проектування асинхронних двигунів: монографія. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. 528 с.
3. Вербовой А.П. Математична модель для дослідження електромагнітних процесів в трифазних індукційних реостатах. *Збірник наукових праць (Регулюємі асинхронні двигуни)*. Ін-т електродинаміки НАН України. Київ, 1999. С. 21–26.
4. Количев С.В., С'янов О.М. Експериментальне дослідження статичних характеристик синхронної машини в режимі динамічного гальмування з індукційними опорами в обмотці статора. *Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки)*. Кам'янське, 2020. вип. 2 (37). С. 22–27.

5. Количев С.В. Особливості пускових режимів безконтактних поєднаних синхронних двигунів. *Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки)*. Кам'янське, 2015. вип. 2 (27). С. 123–127.

START DYNAMICS OF A BRUSHLESS SYNCHRONOUS MOTOR WITH INDUCTION RHEOSTATS IN THE ROTOR CIRCUIT

Abstract

Brushless synchronous motors with two orthogonal field windings on the rotor have low mechanical characteristics during direct asynchronous start-up. The main reason for this is the constant value of additional resistances included in the longitudinal and transverse field windings for the start-up period. The replacement of standard resistance elements with induction rheostats (IR), the complex resistances of which significantly depend on the frequency and amplitude of the flowing current, allows us to meet the most stringent operational requirements for the starting properties of such motors. The article presents a scheme of an experimental installation, with the help of which the practical expediency of using IR in the mentioned contactless synchronous motors is confirmed. The obtained oscillograms show that the disk design of the IR with the given geometric dimensions makes it possible to equalize the electrical resistances and starting currents in the windings of the motor rotor, as well as limit and stabilize its acceleration.

References

- [1] Kachura O.V., Kolychev S.V., Sianov O.M. (2011) *Induktsiini reostaty z pokrashchenymy maso-habarytnymy pokaznykamy dlia asynkhronnykh dvyhuniv z faznym rotorom [Induction rheostats with improved weight and size indicators for asynchronous motors with a phase rotor] : monohrafiia*. Dniprodzerzhynsk: DDTU, 2011. 209 p. [in Ukrainian].
- [2] Verbovoi A.P., Verbovoi P.F., Sianov O.M. (2013) *Proektuvannia asynkhronnykh dvyhuniv [Design of asynchronous engines] : monohrafiia*. Dniprodzerzhynsk: DDTU, 2013. 528 p. [in Ukrainian].
- [3] Verbovoi A.P. (1999) Matematychna model dlia doslidzhennia elektromahnitnykh protsesiv v try-faznykh induktsiinykh reostatakh [Mathematical model for the study of electromagnetic processes in three-phase induction rheostats]. *Zbirnyk naukovykh prats (Rehuliuiemi asynkhronni dvyhuny)*. In-t elektrodynamiky NAN Ukrainy. Kyiv, 1999. P. 21–26. [in Ukrainian].
- [4] Kolychev S.V., Sianov O.M. (2020) Eksperymentalne doslidzhennia statychnykh kharakterystyk synkhronnoi mashyny v rezhymi dynamichnoho halmuvannia z induktsiinyomy oporamy v obmottsii statora [Experimental study of the static characteristics of the synchronous machine in the mode of dynamic braking with induction resistance in the winding of the stator]. *Zbirnyk naukovykh prats DDTU (tekhnichni nauky)*. Kamianske, 2020. vyp. 2 (37) . P. 22–27. [in Ukrainian].
- [5] Kolychev S.V. (2015) Osoblyvosti puskovykh rezhymiv bezkontaktnykh poiednanykh synkhronnykh dvyhuniv [Features of starting modes of non-contact combined synchronous motors]. *Zbirnyk naukovykh prats DDTU (tekhnichni nauky)*. Kamianske, 2015. vyp. 2 (27). P. 123–127. [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії 18.03.2024