

DOI: 10.31319/2519-2884.38.2021.8

УДК 621.313.323

С.В. Количев, к.т. н., доцент, kolychev.sergey 58 @gmail.com

О.М. С'янов, д.т.н., професор, alexandr.sianov@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОЇ МАШИНИ В РЕЖИМІ ДИНАМІЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ З ІНДУКЦІЙНИМИ ОПОРАМИ В ОБМОТЦІ РОТОРА

У роботі вирішена актуальна наукова задача, що полягає в оптимізації процесу динамічного гальмування асинхронних машин з фазним ротором. Метою дослідження є розробка й експериментальне підтвердження ефективності простих схем керування асинхронної машини в зазначеному режимі з удосконаленими безконтактними індукційними реостатами в роторі. Отримані залежності гальмового моменту на валу від частоти обертання ротора при трьох варіантах живлення обмотки статора. Рекомендується застосовувати поетапне перемикачання фаз статора для стабілізації середнього гальмового моменту.

Ключові слова: асинхронна машина; динамічне гальмування; індукційний опір.

The work has solved an urgent scientific problem, which is to optimize the process of dynamic braking of asynchronous machines with a wound rotor. The aim of the study is to develop and experimentally confirm the effectiveness of simple control circuits of an asynchronous machine in the specified mode with improved contactless induction rheostats in the rotor. The dependences of the braking torque on the shaft on the rotor speed are obtained for three options for supplying the stator winding. It is recommended to use a stator phase changeover to stabilize the average braking torque.

Keywords: asynchronous machine; dynamic braking; induction resistance.

Постановка проблеми

Для плавного гальмування асинхронного електропривода шахтних піднімальних машин, канатних доріг і інших відповідальних механізмів широко використовують переведення приводного двигуна в режим динамічного гальмування (ДГ). При цьому для підтримки сталості гальмового моменту у фазах ротора машини здійснюють східчасте регулювання опорів за допомогою релейно-контакторної апаратури, а постійну складову струму статора змінюють, як правило, у функції положення кліті або піднімальної посудини [1]. Наявність у роторі ящиків опорів і силової контактної апаратури істотно ускладнює класичну схему керування електроприводом і знижує її надійність. Тому актуальною технічною проблемою є заміна східчастої комутації опорів у роторі машини на безконтактні реостати зі змінними параметрами, що автоматично змінюються в заданих межах у функції швидкості руху механізму.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Типові підходи, спрямовані на рішення позначеної проблеми, зводяться в основному до аналізу схем у роторному колі асинхронної машини (АМ) з безконтактними вентильними ключами й імпульсним регулюванням еквівалентної величини постійних опорів [2]. Такі технічні рішення дозволяють усунути силові контактори з кіл ротора АМ, але не дають можливості в принципі відмовитися від комутації роторних опорів. Отже розробка схем і дослідження режиму динамічного гальмування АМ з безконтактними реостатами в колі ротора є актуальною інженерною і науковою задачею.

Індукційні опори (ІО) різної конструкції знайшли досить широке застосування в схемах безступінчастого пуску й гальмування противключенням асинхронних двигунів з фазним ротором (ФР) [3]. У першу чергу це технічне рішення стосується кранових електроприводів циклічної дії. Але з певними особливостями в частині виконання ІО може бути поширене й на АМ із ФР для механізмів безперервного режиму роботи. Представляється доцільним поширити застосування ІО й на високовольтні двигуни з низьковольтними обмотками на роторі. Однак перева-

ги використання ІО при гальмуванні АМ із ФР способом динамічного гальмування залишилися практично не вивченими.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження — розробка й експериментальне підтвердження ефективності практичних і відносно простих схем керування АМ у режимі ДГ із безконтактними реостатами в роторі.

Виклад основного матеріалу

Для одержання об'єктивної інформації про режим ДГ асинхронної машини з ІО в колі фазного ротора була створена лабораторна установка, схема якої показана на рис. 1. Як досліджувана АМ використан двигун МТВ-412-8 (11 кВт; 220 В; 750 об/хв), що працював гальмовим генератором зі змінною швидкістю. Постійний струм подавався в обмотку статора АМ від тиристорного збудника ТЗ, що містить живильний трансформатор і керований випрямляч. Ротор АМ приводився в рух двигуном постійного струму (ДПС) типу GGK (23 кВт; 230 В; 1460 об/хв; 100 А). Обмотка збудження двигуна (ОЗД) одержувала живлення від незалежного джерела постійного струму напругою 220 В. Швидкість пари машин АМ — ДПС контролювалася високоточним тахогенератором ТГ. Для регулювання частоти обертання пари машин АМ — ДПС у широких межах у лабораторній установці передбачена допоміжна електромеханічна система асинхронний короткозамкнений двигун – генератор постійного струму (АД — ГПС) потужністю ≈ 40 кВт, причому обмотка збудження ОЗГ ГПС постачена регулятором напруги (РН). Завдяки такій структурі схеми створений засіб для розгону досліджуваної машини АМ до швидкості, що вдвічі перевищує її синхронну швидкість (до 1500 об/хв проти 750 об/хв). Це, у свою чергу, дозволяє міняти частоту електрорушійної сили (ЕРС) у роторі АМ при динамічному гальмуванні від ≈ 100 Гц до ≈ 1 Гц. Вимірювальний комплект (ВК) розширює можливості установки в частині додаткового вивчення параметрів власне індукційного опору.

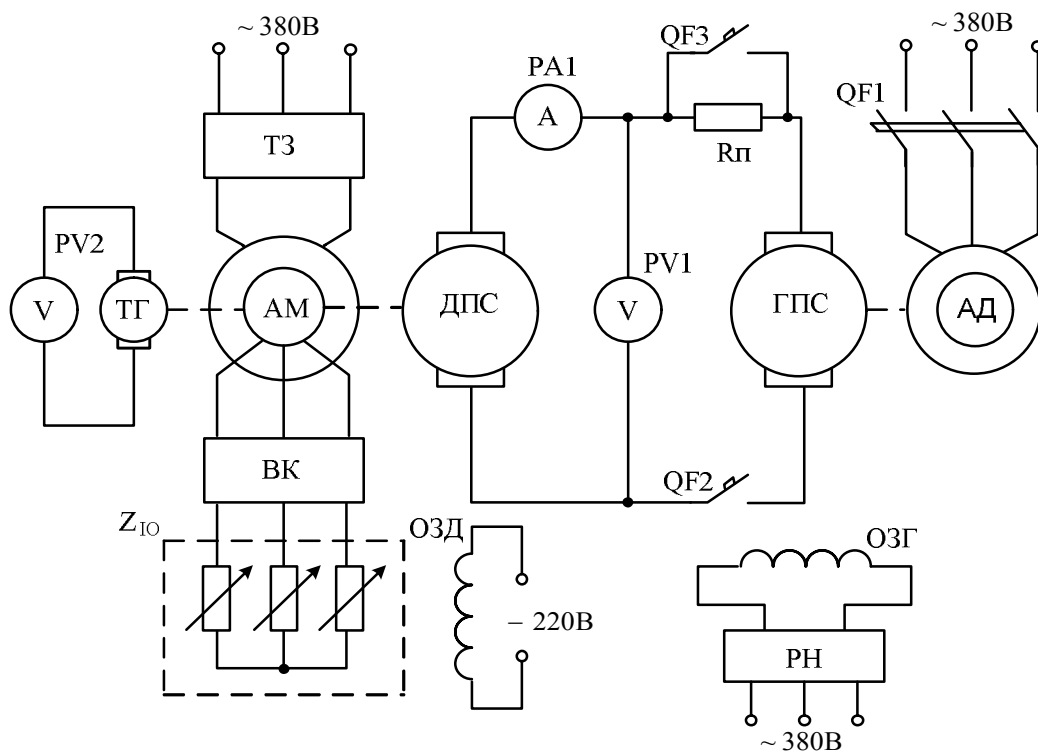


Рис. 1. Схема лабораторної установки для досліджень режиму ДГ АМ

Як реостат зі змінними параметрами в роторі АМ установлений трифазний індукційний опір дискової конструкції. Котушка фази ІО складається із двох рівних половинок, електрично паралельно включених друг стосовно друга, а в магнітному відношенні — зустрічно через фе-

ромагнітну середню стінку товщиною ≈ 6 мм (див. рис. 2). Загальна ширина двох котушок однієї фази дорівнює ≈ 60 мм, товщина зовнішньої стінки й зовнішнього кільця ≈ 10 мм. У середині кожної "напівфази" розміщені масивні феромагнітні диски сумарною товщиною ≈ 30 мм. На низькій частоті обертання ($\leq 200\dots 300$ об/хв), коли електромагнітна хвиля починає виходити зі сталеві середньої стінки, котушки "напівфаз" розмагнічують одна одну, знижуючи тим самим загальний комплексний опір реостата.

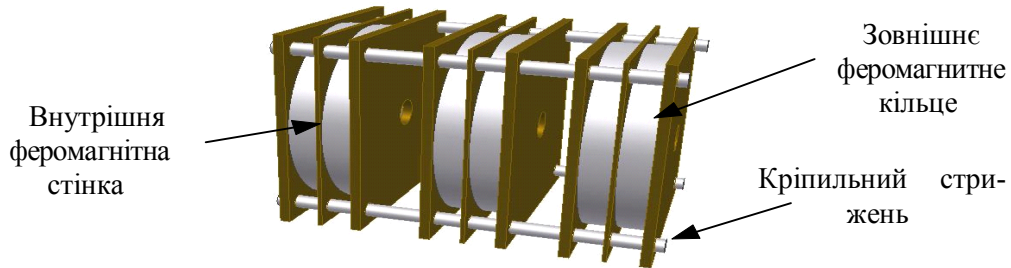


Рис. 2. Конструкція ІО з феромагнітними пластинами та центральною стінкою

Для аналізу режиму ДГ важливе значення має схема підключення фаз обмотки статора до джерела постійного струму. В нашому випадку розглядалися три варіанта.

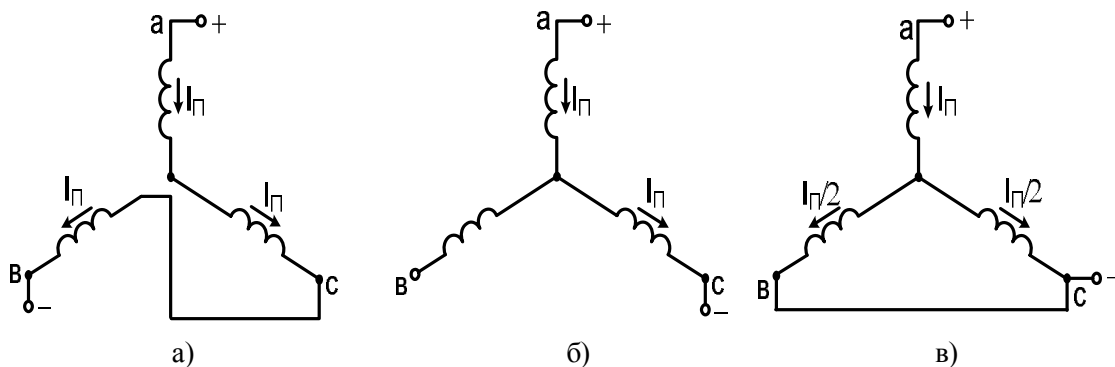


Рис. 3. Електричні схеми вмикання фаз обмотки статора у режимі ДГ: а — послідовно три; б — послідовно дві; в — послідовно-паралельно три

При розрахунку амплітуди намагнічувальної сили (НС) необхідно геометрично підсумувати НС двох або трьох фаз відповідно. У підсумку одержуємо:

$$\text{а) } F_{\Pi} = 2 \cdot I_{\Pi} \cdot W_1; \text{ б) } F_{\Pi} = \sqrt{3} \cdot I_{\Pi} \cdot W_1; \text{ в) } F_{\Pi} = 1,5 \cdot I_{\Pi} \cdot W_1,$$

де I_{Π} — середнє значення постійного струму фази; W_1 — число послідовно з'єднаних витків фази статора.

Почергове перемикання обмотки статора (рис. 3) з варіанта а) до варіанта в) дозволило східчасто регулювати НС із кроком $\approx (0,25\dots 0,27) \cdot I_{\Pi} \cdot W_1$.

Розрахунок моменту на валу асинхронної машини був виконаний після обробки експериментальних даних для трьох вищевказаних схем обмотки статора й двох значень постійного струму: $I_{\Pi 1} = 20$ А; $I_{\Pi 2} = 30$ А. При обчисленнях використаний метод поділу втрат в агрегаті АМ — ДПС, що враховував реальну картину насичення стали статора АМ, механічні й магнітні втрати в агрегаті залежно від сили струму I_{Π} і частоти обертання пари машин, а також електричні й додаткові втрати в якорі ДПС. Для кожного варіанта схеми включення обмотки статора й величини живильного струму виконане тарування втрат пари АМ-ДПС на холостому ході у всім діапазоні частоти обертання ротора АМ (від 1500 об/хв до ≈ 15 об/хв). Для виділення механічних і магнітних втрат використаний графоаналітичний метод розрахунку. Результати розрахунків на валу АМ представлені на рис. 4...6.

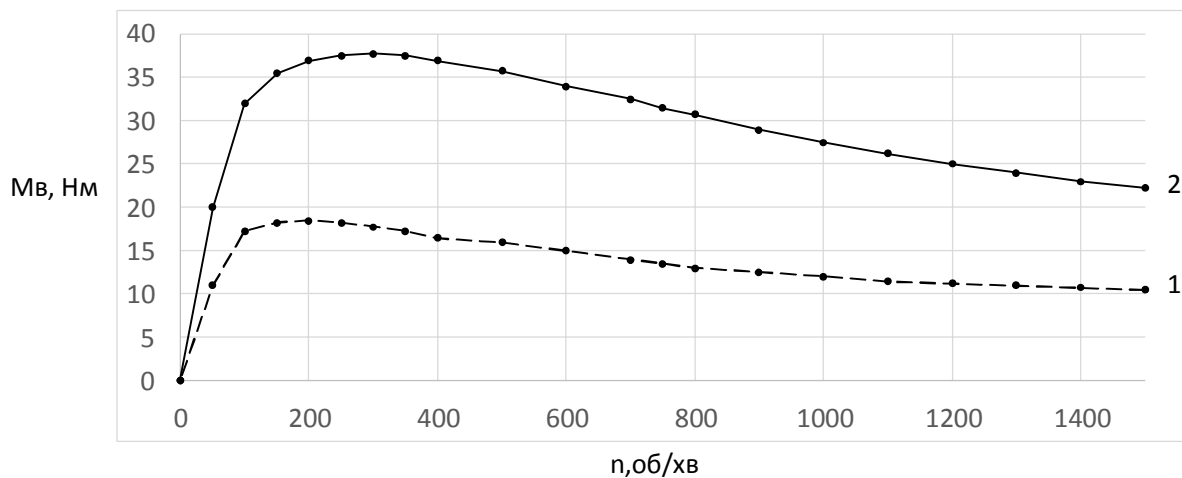


Рис. 4. Механічні характеристики АМ в режимі ДГ з живленням обмотки статора за схемою на рис. 3,а: $I_{П1} = 20$ А; $I_{П2} = 30$ А

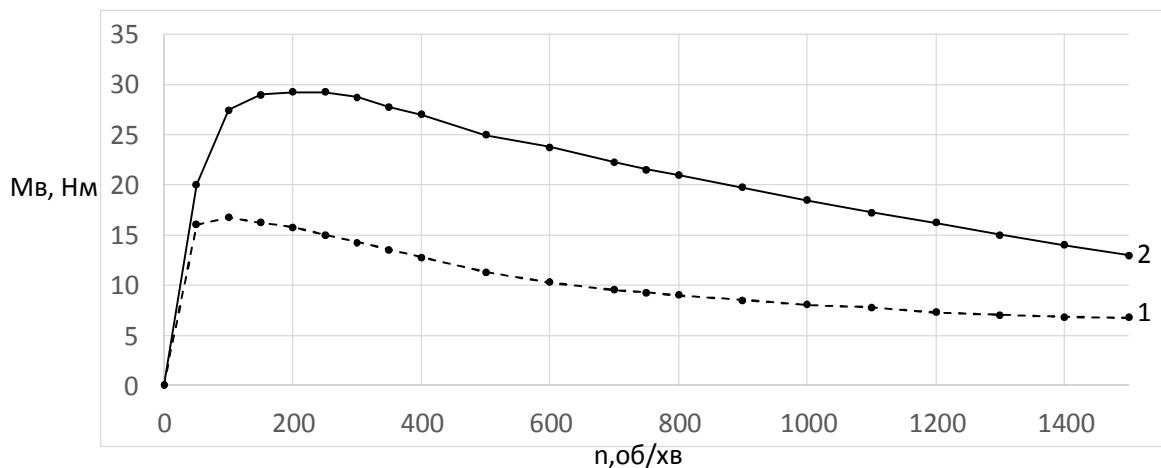


Рис. 5. Механічні характеристики АМ в режимі ДГ з живленням обмотки статора за схемою на рис. 3,б: $I_{П1} = 20$ А; $I_{П2} = 30$ А

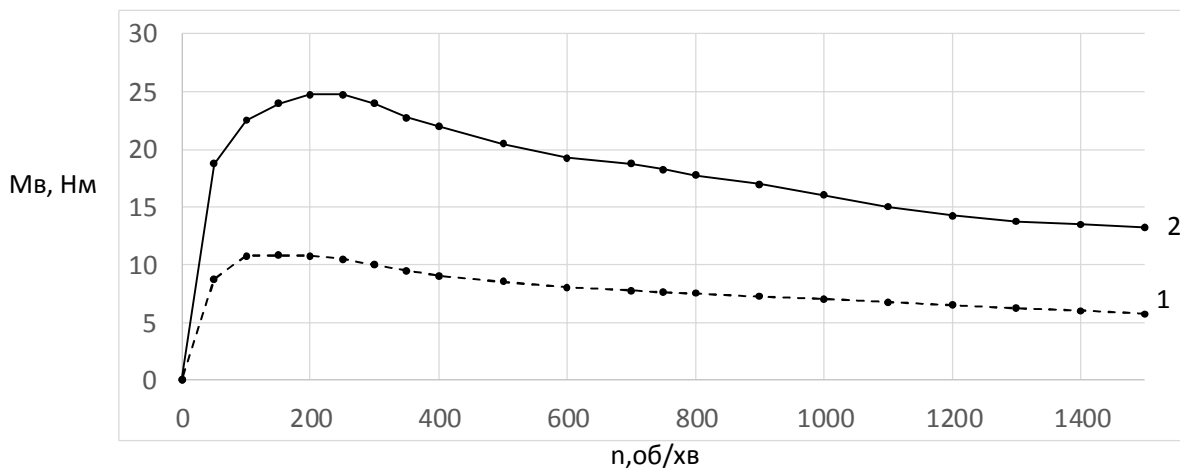


Рис. 6. Механічні характеристики АМ в режимі ДГ з живленням обмотки статора за схемою на рис. 3,в: $I_{П1} = 20$ А; $I_{П2} = 30$ А

Аналіз отриманих кривих дозволяє затверджувати наступне:

- форма й характер зміни моменту на валу не залежать від схеми включення обмоток статора, а визначаються амплітудою живильного струму (див. криві 1 і 2). Ця обставина пояснюється різним ступенем насичення стали при зміні I_{Π} від 20 А до 30 А;
- вплив амплітуди живильного струму I_{Π} на абсолютні значення моменту більшою мірою виявляється в області невеликих швидкостей машини ($n \leq 350$ об/хв по двох причинах: 1) ступінь насичення стали ротора при $n \leq 350$ об/хв досить помітна в порівнянні зі швидкістю $n \approx 1500$ об/хв, удвічі перевищуючої номінальну; 2) розмагнічувальна дія "напівфаз" ІО при частоті струму в роторі від ≈ 100 Гц (1500 об/хв) до ≈ 23 Гц (350 об/хв) порівняно невелика;
- відхилення максимального моменту (при $n = 100 \dots 150$ об/хв) щодо точки $n = n_N = 750$ об/хв досягає у випадку $I_{\Pi} = 20$ А $\Delta_{M_{BMAX}} \approx +55\%$ залежно від схеми включення обмотки статора. Збільшення I_{Π} до 30 А знижує це співвідношення до $\approx +30\%$, але воно залишається досить істотним;
- відхилення мінімального моменту $\Delta_{M_{BMIN}}$ ($n = 1500$ об/хв) щодо тієї ж точки ($n_N = 750$ об/хв) має менший розкид: при $I_{\Pi} = 20$ А $\Delta_{M_{BMIN}} = -23\%$; при $I_{\Pi} = 30$ А $\Delta_{M_{BMIN}} = -33\%$, але залишається неприпустимо великим;
- збереження величини струму I_{Π} незмінним у всім діапазоні швидкостей АМ у режимі ДГ не забезпечує сталості гальмового моменту на валу із прийнятними відхиленнями від середнього значення ($\pm 15\%$).

Точна підтримка постійного значення гальмового моменту на валу АМ з ІО в обмотці фазного ротора можлива тільки при безперервному керуванні величиною постійного струму I_{Π} у колі статора у функції швидкості машини. Практична реалізація цієї умови здійснена за допомогою керованого тиристорного збудника (ТЗ), що, однак, помітно ускладнює всю схему електропривода. Більше раціональним є інший підхід — східчаста зміна схеми живлення обмотки статора залежно від величини швидкості машини й відсутність комутаційних апаратів у колі ротора.

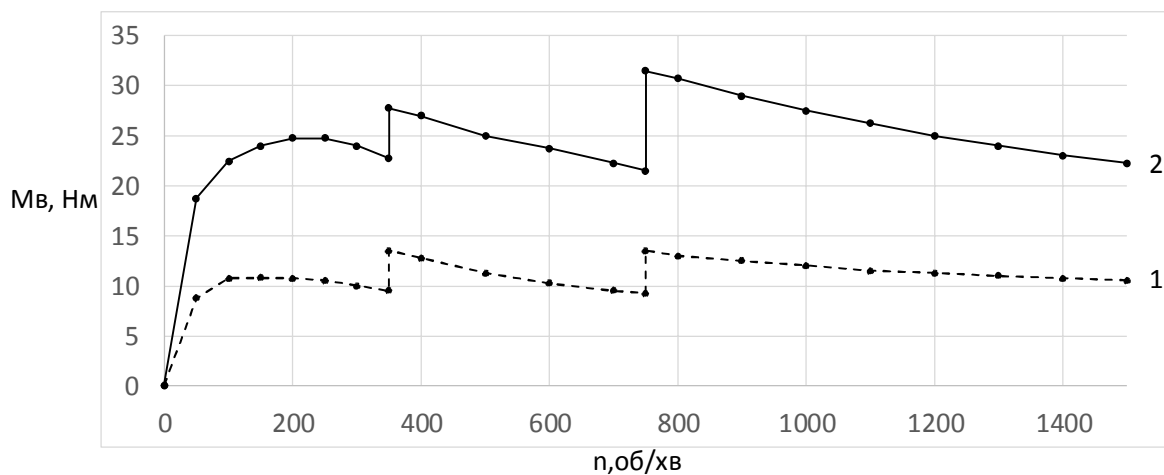


Рис. 7. Механічні характеристики АМ в режимі ДГ зі ступінчастим живленням обмотки статора: $I_{\Pi 1} = 20$ А; $I_{\Pi 2} = 30$ А

На рис. 7 представлені розрахунково-експериментальні залежності $M_B = f(n)$ для триступінчастої схеми перемикачів обмотки статора АМ і двох фіксованих значень I_{Π} ($I_{\Pi 1} = 20$ А, $I_{\Pi 2} = 30$ А. Передбачається, що ТЗ має властивості джерела струму). У діапазоні швидкостей (750...1500) об/хв обмотка статора включена по варіанту а) на рис. 3. На ділянці швидкостей (350...750) об/хв діє варіант схеми рис. 3, б. На заключній ділянці $n < 350$ об/хв вводиться схема живлення обмотки статора рис. 3, в. Таким чином вдається втримувати середнє значення гальмового моменту АМ на заданому рівні з максимальними відхиленнями від нього $\pm(15 \dots 20)\%$ без додаткових технічних витрат.

Механічні характеристики АМ у режимі ДГ можна будувати за типовою методикою з дотриманням ряду умов [4, 5]:

- насичення магнітного кола необхідно враховувати для кожного значення швидкості ротора й постійного струму в колі статора. Із цією метою краще скористатися сімейством кривих ЕРС ротора $e_{2i} = f_i(n)$ при $I_{\Gamma i} = \text{const}$, попередньо знятих експериментально з розімкнутою "зіркою" ІО;
- активна $R_{\Gamma 0}$ й індуктивна $X_{\Gamma 0}$ складові комплексного опору $Z_{\Gamma 0}$ залежать як від частоти f_2 , так і від величини струму ротора I_2 АМ. Необхідні закономірності повинні бути отримані заздалегідь досвідченим або розрахунковим шляхом;
- для досягнення прийнятної точності при розрахунку механічних характеристик АМ з ІО в колі ротора варто використовувати метод послідовних наближень (ітерацій).

Висновки

1. Експериментальними дослідженнями підтверджена ефективність використання індукційних опорів для динамічного гальмування асинхронних машин, оскільки ці опори забезпечують підтримку середнього гальмового моменту в широкому діапазоні зміни частоти обертання вала $n = (2 \dots 0,1) \cdot n_N$.

2. Для істотного обмеження відхилень максимального й мінімального моменту на валу від середнього значення доцільно виконувати поетапне перемикання схеми живлення обмотки статора постійним струмом у функції швидкості машини.

Список використаної літератури

1. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1977. 432 с.
2. Есаков В. П. Электрооборудование и электропривод промышленных установок. Киев: Вища школа, 1981. 248 с.
3. 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.
4. Постников И. М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. М.: Высшая школа, 1975. 319 с.
5. Вербовой А.П., Вербовой П.Ф., С'янов О. М. Проектування асинхронних двигунів: монографія. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. 528 с.

EXPERIMENTAL STUDY OF STATIC CHARACTERISTICS ASYNCHRONOUS MACHINE IN DYNAMIC BRAKING MODE WITH INDUCTION RESISTANCE IN THE ROTOR WINDING

Kolychev S., Sianov A.

Abstract

The article discusses the results of a study of the static electromechanical characteristics of an asynchronous machine (AM) when prototypes of induction resistances (IR) with improved parameters are included in its rotor circuits. The dynamic braking (DB) of asynchronous machines, which is widespread in practice, provides for the dissipation of the kinetic energy of the rotating parts in the resistance boxes included in the rotor winding. In the process of stopping, to maintain a constant average braking torque AM, a bulky relay-contactor circuit for shunting rotor resistances is used. However, it is not possible to eliminate significant fluctuations in the electromagnetic torque in this way. To optimize the DB AM process, it is proposed to include a three-phase IR in the rotor winding instead of resistance boxes, the value of which automatically decreases along with the rotor current frequency. This approach allows you to abandon contact equipment and ensure smooth braking of the machine with fluctuations in the electromagnetic moment in narrower limits. The known IR designs are de-

signed for starting modes of induction motors with a wound rotor, but they cannot ensure the constancy of the torque on the AM shaft in the DB mode. Therefore, the purpose of the study is to develop and experimentally confirm the effectiveness of simple control circuits of an induction machine in the specified mode with improved contactless induction rheostats in the rotor. The paper presents a diagram of a pilot plant and a figure explaining the design features of the IR. The studies were carried out for an asynchronous machine of the MTB-412-8 type, equipped with a thyristor exciter and a tachogenerator. The three phases of the AM rotor included ICs connected by a "star". The experiments were carried out in the direction of obtaining the necessary braking characteristics of the AM by varying the switching circuit of the stator phases and the value of the current supplying them. The figures show the mechanical characteristics of AM, obtained in the process of studying the influence on them of three typical circuits for switching on the phases of the stator winding and two values of the fixed supply current. The research results show that the desired form of the mentioned AM characteristics is achieved only when using the stator phase switching in a function of the rotor speed and a constant supply current value.

References

- [1] Veshenevskiy S. N. (1977) *Harakteristiki dvigateley v elektroprivode*. M.: Energiya, 1977. 432 s. [in Russian].
- [2] Esakov V. P. (1981) *Elektrooborudovanie i elektroprivod promyshlennyh ustanovok*. Kyev: Vyssha shkola, 1981. 248 s. [in Russian].
- [3] Kachura O. V. & Kolychev S. V. & Sianov O. M. (2011) *Indukciyni reostaty z pokraschenymy masogabaritnymy pokaznykamy dlya asynhronnyh dvyguniv z faznym rotorom: monografiya*. Dniprodzergynsk: DDTU, 2011. 209 s. [in Ukraine].
- [4] Postnikov I. M. (1975) *Obobschennaya teoriya i perehodnye prozessy elektricheskikh mashin*. M.: Vysshaya shkola, 1975. 319 c. [in Russian].
- [5] Verbovoy A. P. & Verbovoy P. F. & Sianov O. M. (2013) *Proektuvannya asynhronnyh dvyguniv: monografiya*. Dniprodzergynsk: DDTU, 2013. 528 s. [in Ukraine].