

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621.313.323

DOI 10.31319/2519-2884.37.2020.5

КОЛИЧЕВ С.В., к.т. н., доцент
С'ЯНОВ О.М., д.т.н., професор

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОЇ МАШИНИ В РЕЖИМІ ДИНАМІЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ З ІНДУКЦІЙНИМИ ОПОРАМИ В ОБМОТЦІ СТАТОРА

Вступ. Широко розповсюджений на практиці спосіб зупинки машин змінного струму – динамічне гальмування (ДГ) – відрізняється своєю відносно простою реалізацією й піддається досить точному розрахунку [1]. При цьому в синхронних машинах (СМ) зазначений спосіб гальмування знайшов застосування як для зупинки синхронних двигунів, зчленованих з виробничими механізмами, так і для зупинки електромеханічних агрегатів, що містять СМ як привод або генератор. Кінетичну енергію, запасену в подібних об'єктах, звичайно розсіюють у ящиках опорів, включених за симетричною схемою в обмотку статора. У процесі зупинки для підтримки сталості середнього гальмового моменту СМ використовують громіздку релейно-контакторну схему шунтування статорних опорів. Додатково на низьких частотах обертання для посилення гальмового ефекту застосовується регулювання струму збудження синхронної машини або його форсування. У найпростішому випадку динамічне гальмування здійснюють при короткочасному збільшенні струму збудження й включенні обмотки статора на незмінний активний опір [1]. Однак домогтися таким чином постійного темпу уповільнення не вдається.

Постановка задачі. Для оптимізації процесу динамічного гальмування СМ представляється доцільним замість стандартних ящиків опорів включати в обмотку статора трифазний індукційний опір (ІО), величина якого автоматично знижується разом із частотою струму статора [2]. Перешкодами на шляху реалізації запропонованого технічного рішення виступають два фактори. Перший – відомі конструкції ІО, розроблені для пуску асинхронних двигунів з фазним ротором (АДФР) і мають параметри, які щонайкраще відповідають вимогам високої добротності пускової характеристики при ковзанні $S \approx 1$ і мінімального ІО у зоні критичного ковзання $S_{кр} \approx 0,15 \dots 0,2$. Другий фактор – нелінійна залежність величини ІО тимчасово й від частоти, і від амплітуди протікаючого струму, що викликає неоднозначність при розрахунку геометричних розмірів і числа витків індукційного реостата. Крім того, величина критичного ковзання в СМ у режимі ДГ набагато менше, ніж в АДФР у режимі пуску, і становить $S_{кр} \approx 0,03 \dots 0,07$. У зазначеному діапазоні ковзання частота струму в статорі мінімальна $f_1 \approx 1,5 \dots 3,5$ Гц і точність визначення параметрів ІО невисока. Отже, для підтримки постійної величини моменту на валу СМ у режимі ДГ необхідно мати індукційний реостат такої конструкції, що забезпечить майже лінійне зниження модуля опору при збереженні прийнятної $\cos \varphi_1$ (0,45...0,6).

Результати роботи. Експериментальне підтвердження припущення про ефективність використання ІО для динамічного гальмування СМ проведено на лабораторній установці, схема якої представлена на рис.1. В якості синхронної машини СМ використано синхронний генератор типу МСА-72/4А, постачаний для живлення обмотки збудження тиристорним збудником (ТЗ) і для фіксації частоти обертання – прибудованим

тахогенератором (ТГ). Номінальні дані СМ: $P_N = 12$ кВт; $U_{IN} = 230$ В; $I_{IN} = 37,6$ А; $n_N = 1500$ об/хв; $f_1 = 50$ Гц; $\eta = 87,5$ %; $U_{fN} = 27$ В; $I_{fN} = 23$ А.

Для надання руху досліджуваному генератору використано сполучений з ним механічно двигун постійного струму ДПС типу П-72 (21 кВт; 230 В; 91,3 А; 1450 об/хв.). Живлення й регулювання частоти обертання останнього виконано за системою Г-Д потужністю ≈ 40 кВт (у лабораторній установці на рис.1 застосовані асинхронний короткозамкнений двигун АД й генератор постійного струму ГПС із регулятором напруги збудження РН). У три фази статора СМ включалися індукційні опори, що мають конструкцію, показану на рис.2, і з'єднані "зіркою". Причому "напівфази" кожного індукційного релаксатора включені електрично послідовно, механічно відділені внутрішньою феромагнітною стінкою, а за магнітним потоком діють назустріч одна одній. Розмагнічувальний ефект котушок "напівфаз" проявляється тим сильніше, чим нижче частота струму статора машини. Замість внутрішніх сталевих кілець (ВСК), які звичайно встановлюють в ІО для АДФР, згадана конструкція містить масивні внутрішні феромагнітні диски (ВФД).

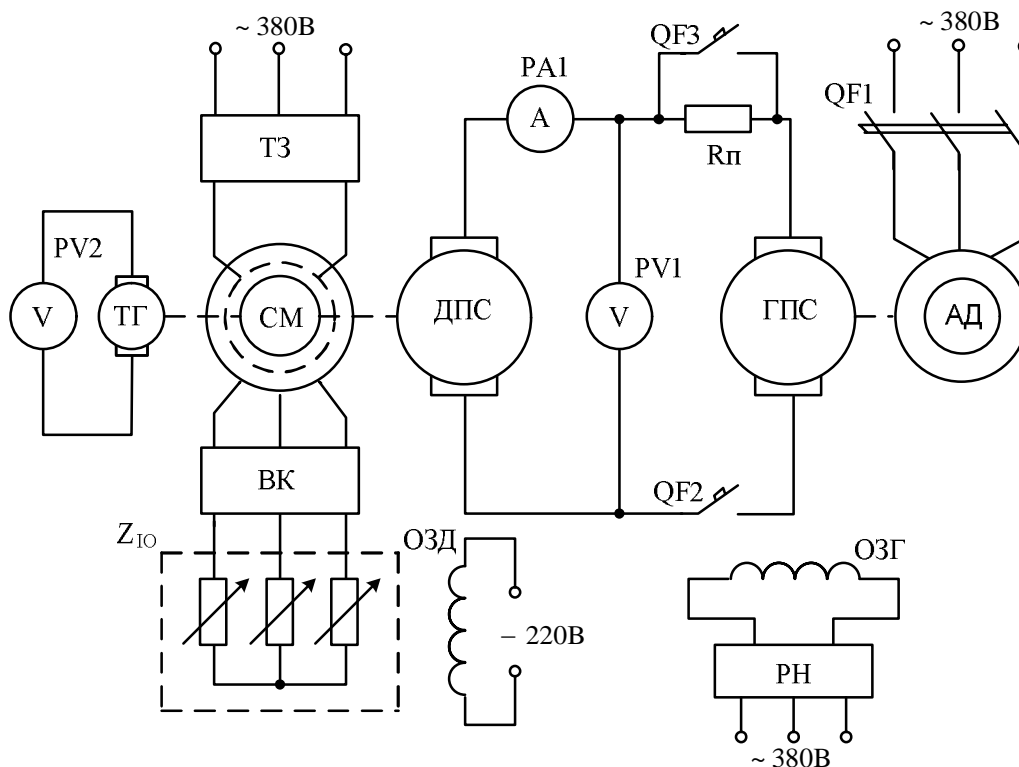


Рисунок 1 – Схема лабораторної установки для досліджень режиму ДГ СМ

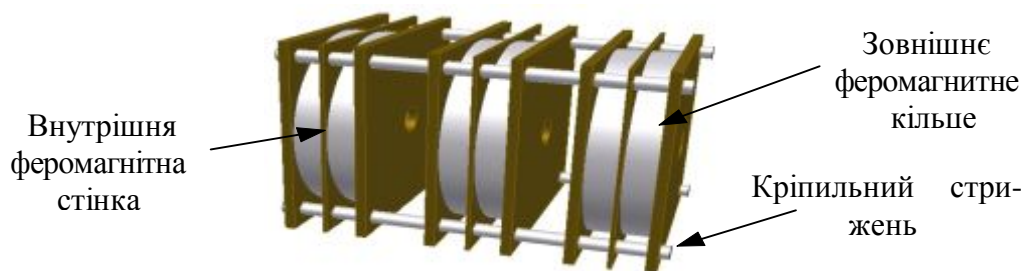


Рисунок 2 – Конструкція ІО з феромагнітними пластинами та центральною стінкою

На рис.3-5 показані експериментальні статичні характеристики синхронного генератора МСА-72/4А з різними варіантами індукційних реостатів у статорній обмотці в режимі ДГ, отримані шляхом тарування й поділу втрат між випробуваною й приводною машинами лабораторної установки.

Представлені залежності виконані для незмінної товщини внутрішньої феромагнітної стінки $\Delta_{ВН СТ} = 6$ мм, через яку "напівфази" ІО розмагнічують одна одну на низькій частоті струму статора, підсилюючи тим самим ефект зниження загального опору. На рис.3, 4 наочно видно, що при досить тонкому внутрішньому кільці ($\Delta_{ВСК} \approx 5$ мм) взаємний вплив котушок "напівфаз" помітно сильніше в порівнянні з варіантом потовщеного внутрішнього кільця ($\Delta_{ВСК} \approx 8$ мм).

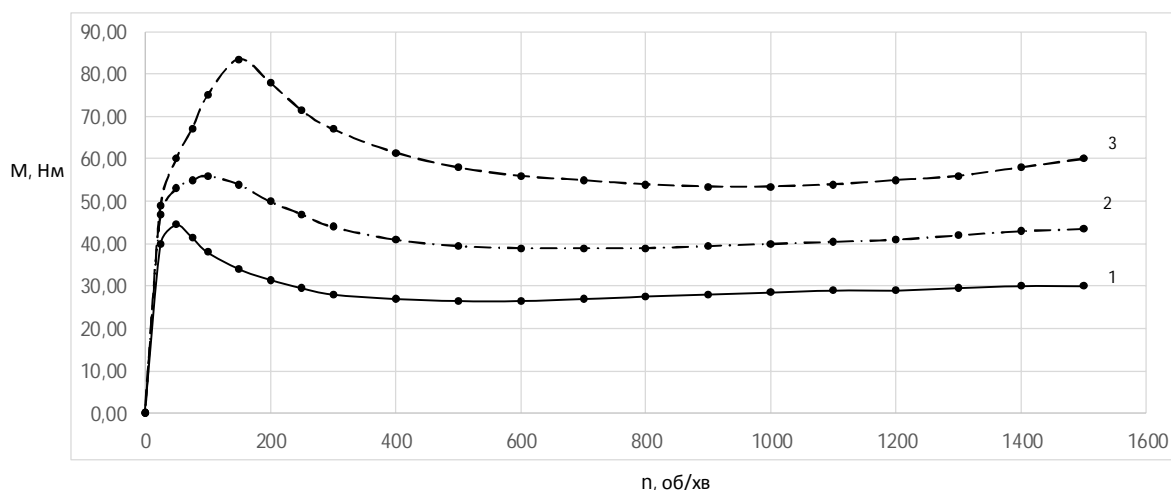


Рисунок 3 – Механічні характеристики СМ у режимі ДГ з тонким ВСК ІО ($\Delta_{ВСК} \approx 5$ мм) і різним струмом збудження: $I_{f1} = 12$ А; $I_{f2} = 16$ А; $I_{f3} = 20$ А

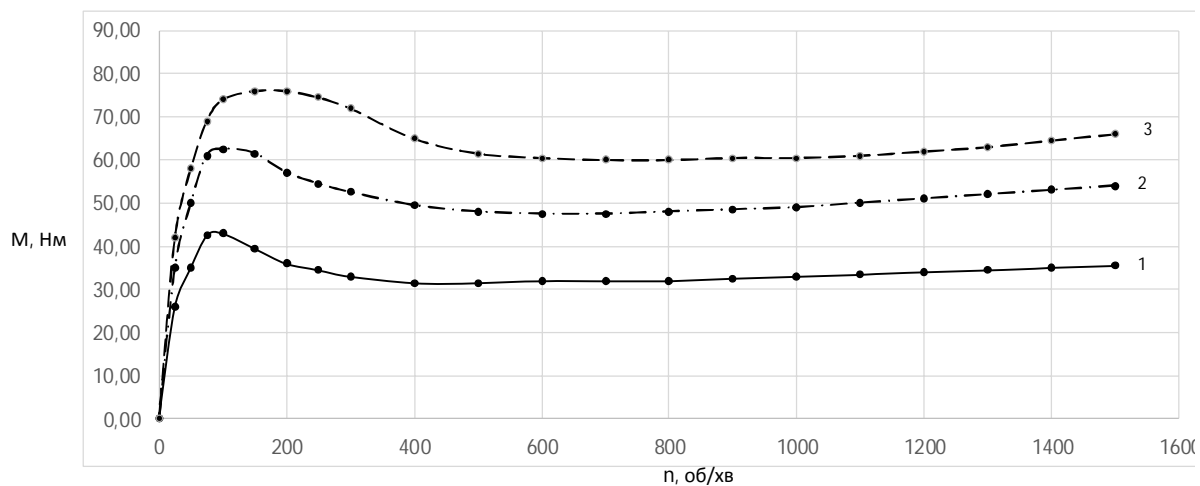


Рисунок 4 – Механічні характеристики СМ у режимі ДГ з потовщеним ВСК ІО ($\Delta_{ВСК} \approx 8$ мм) при різному струмі збудження: $I_{f1} = 12$ А; $I_{f2} = 16$ А; $I_{f3} = 20$ А

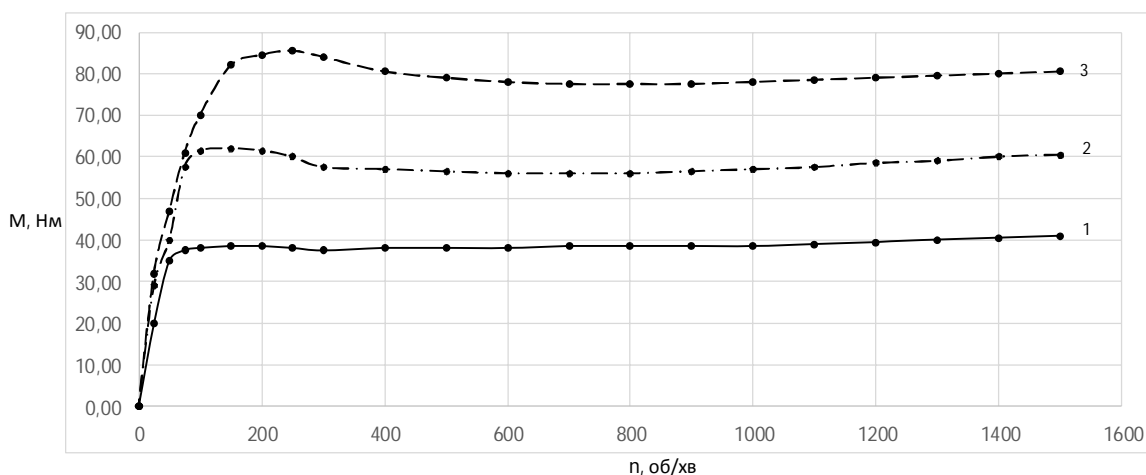


Рисунок 5 – Механічні характеристики СМ у режимі ДГ з масивними ВФД ІО при різному струмі збудження: $I_{f1} = 12 \text{ A}$; $I_{f2} = 16 \text{ A}$; $I_{f3} = 20 \text{ A}$

Уведення до конструкції ІО замість кілець масивних внутрішніх елементів спричиняє появу трьох ефектів:

- різке зниження або повне зникнення явно вираженого екстремуму гальмового моменту в області низької частоти струму ($\approx 2,5 \dots 10 \text{ Гц}$ при швидкості вала машини в діапазоні $75 \dots 300 \text{ об/хв.}$);
- збільшення на $(20 \dots 30)\%$ гальмового моменту в області промислової частоти струму статора, що відповідає швидкості вала ($1400 \dots 1500 \text{ об/хв.}$);
- вирівнювання максимальних і мінімальних значень гальмового моменту СМ у всьому діапазоні зміни частоти обертання вала, що наближає залежність $M = f(n)$ до бажаного виду – в ідеалі до прямої лінії.

Для розрахунку механічних характеристик СМ у режимі ДГ із індукційними реліктами у фазах статора необхідно мати достовірну інформацію про величину й закон зміни параметрів як випробуваної машини, так і включених опорів. Насамперед потрібно знати рівень магнітного насичення сталі з урахуванням частоти обертання ротора й величини струму збудження, реакції статора, втрат і спадання напруги в ньому.

Рівняння рівноваги е.р.с. з урахуванням складових за поздовжньою та поперечною осями [3] можна записати в комплексній формі:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_\delta - \dot{I}_1 (r_1 + jx_{1\sigma}), \quad \dot{E}_\delta = \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_f,$$

де

$$\dot{E}_{ad} = jx_{ad} \dot{I}_d; \quad \dot{E}_{aq} = jx_{aq} \dot{I}_q; \quad \dot{E}_f = jx_{ad} \dot{I}'_f;$$

$\dot{E}_{ad}, \dot{E}_{aq}, \dot{E}_f$ – е.р.с. поздовжньої та поперечної реакції якоря від поля збудження ротора;

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 [r_{10} + r_{10}(I_1, f_1) + jx_{10}(I_1, f_1)];$$

$\dot{I}_d, \dot{I}_q, \dot{I}'_f$ – комплексні значення струму статора за осями d, q і струму збудження при приведенні до статора; x_{ad}, x_{aq} – реактивності якоря за осями d, q ; $r_1, x_{1\sigma}$ – активний та індуктивний опір розсіювання обмотки статора; \dot{I}_1 – комплексне значення повного

струму статора; $r_{\text{Ю}}(I_1, f_1)$, $x_{\text{Ю}}(I_1, f_1)$ – активна та реактивна складові Ю; $r_{\text{ЮЮ}}$ – опір проводу обмотки Ю.

Величина всіх реактивних опорів у рівнянні рівноваги напруг визначається частотою обертання ротора СМ і, отже, частотою струму статора f_1 . На параметри x_{ad} , x_{aq} помітний вплив чинить ступінь насичення магнітопроводу машини, а складові індукційного опору $r_{\text{Ю}}(I_1, f_1)$, $x_{\text{Ю}}(I_1, f_1)$ істотно нелінійно залежать як від частоти, так і від амплітуди протікаючого струму. Виходячи з цього, задачі розрахунку механічної характеристики СМ зводяться до розв'язання нелінійного рівняння з декількома невідомими. Визначення діючих значень струму статора I_1 , напруги на затискачах машини U_1 і фазового зрушення між ними φ_1 можливе за методом ітерацій (послідовних наближень).

Для підвищення вірогідності вихідних даних, необхідних при розрахунках механічних характеристик СМ, на лабораторній установці проведені додаткові дослідження залежності режимних величин генератора (U_1 , I_1 , $\cos \varphi_1$) для трьох фіксованих значень струму збудження (12 А, 16 А, 20 А) і відповідних їм складових Ю ($r_{\text{Ю}}$, $x_{\text{Ю}}$, $z_{\text{Ю}}$) від частоти обертання ротора. Обробка результатів вимірювань, частина яких отримана за допомогою комплексу ВК і показана на рис.6, дозволила виявити наступні особливості й закономірності.

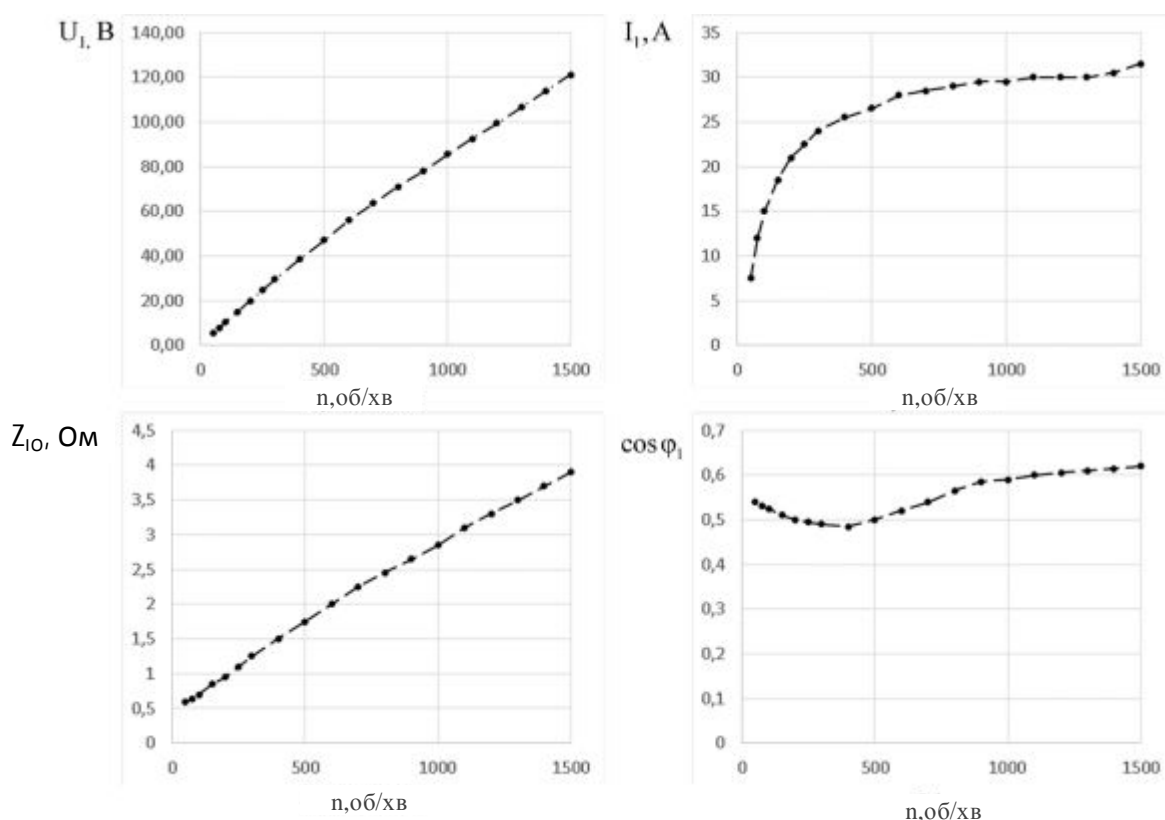


Рисунок 6 – Залежності деяких величин навантаження СМ від частоти обертання валу при $I_2 = 16$ А

1. Вихідна напруга U_1 через реакцію якоря й нелінійності Ю не прямо залежить від швидкості обертання валу (рис.6). Так при зміні n в 30 разів (від 1500 до 50) об/хв., при струмі збудження генератора $I_2 = 16$ А U_1 зменшується тільки в 24 рази, від ≈ 120 В до ≈ 5 В.

2. Модуль ІО знижується разом із частотою струму статора практично в 6,5 разів, у той час як сама частота f_1 змінюється в межах (50...1,5) Гц, що відповідає (1500...45) об/хв., тобто більш ніж у 30 разів.

3. Амплітуда струму статора I_1 зменшується слідом за частотою f_1 , але з темпом удвічі меншим, чим z_{IO} на ділянці $n = (1500...500)$ об/хв., де $f_1 = (50...17)$ Гц. Надалі струм знижується набагато швидше модуля z_{IO} . Пояснюється це тим, що струм статора залежить як від зменшеної е.р.с. E_f , так і від z_{IO} . E_f прямо пропорційна f_1 , а $z_{IO} \approx f_1^{1/2}$.

4. $\cos \varphi_1$ навантаження, як витікає з рис.6, слабо залежить від частоти f_1 і коливається в досить вузьких межах $\cos \varphi_1 \approx (0,62...0,49)$. Мінімальні значення відповідають зоні взаємного розмагнічування котушок "напівфаз" ІО через внутрішню стінку. Зростання $\cos \varphi_1$ на низьких частотах f_1 викликане збільшенням частки активного опору проводу ІО стосовно модуля z_{IO} , у нашому випадку $r_{0IO} \approx 0,63 \cdot r_1$.

Висновки. Експериментальними дослідженнями підтверджено ефективність використання ІО для динамічного гальмування синхронних машин, оскільки ці опори забезпечують досить високу сталість електромагнітного моменту в усьому необхідному діапазоні зміни частоти обертання вала $n = (1...0,1) \cdot n_N$. Отримані за результатами обробки дослідних даних залежності електромагнітних величин U_1 , I_1 , $\cos \varphi_1$, z_{IO} від швидкості машини (а, значить, і від f_1) при фіксованому струмі збудження, є об'єктивною основою для розробки уточненої методики розрахунку механічних характеристик СМ із ІО у режимі ДГ, а також для вдосконалювання конструкції самих опорів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1977. 432 с.
2. Качура О.В., Количев С.В., С'янов О.М. Индукційні реостати з покращеними масогабаритними показниками для асинхронних двигунів з фазним ротором: монографія. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2011. 209 с.
3. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. М.: Высшая школа, 1975. 319 с.

Надійшла до редколегії 10.06.2020.