

## 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  $\approx 40$  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).

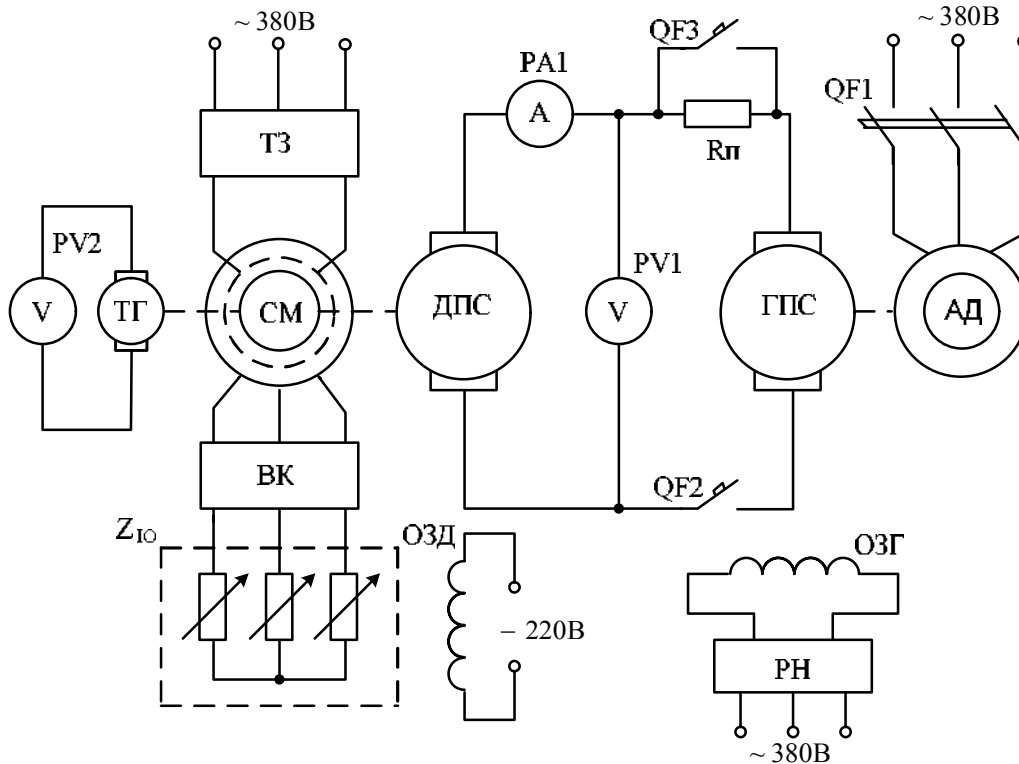


Рисунок 1 – Схема лабораторної установки для досліджень режиму ДГ СМ

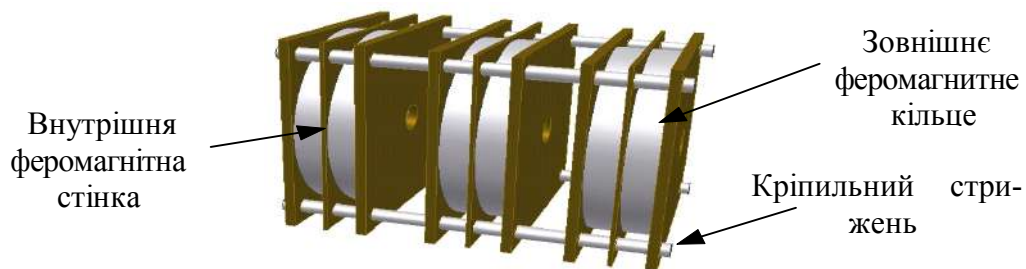


Рисунок 2 – Конструкція ІО з феромагнітними пластинами та центральною стінкою

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).

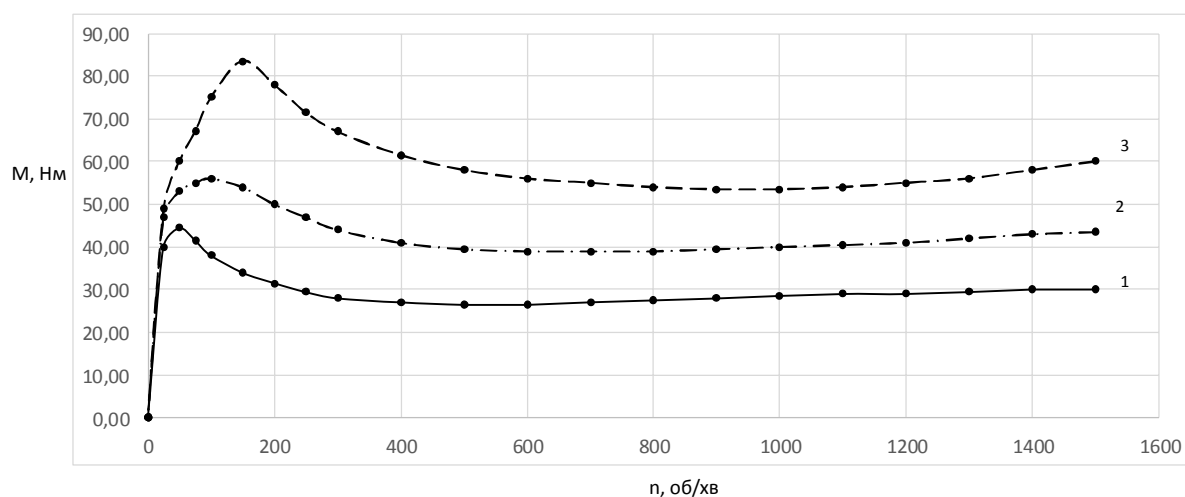


Рисунок 3 – Механічні характеристики СМ у режимі ДГ з тонким ВСК ІО ( $\Delta_{ВСК} \approx 5$  мм) і різним струмом збудження:  $I_1 = 12$  А;  $I_2 = 16$  А;  $I_3 = 20$  А

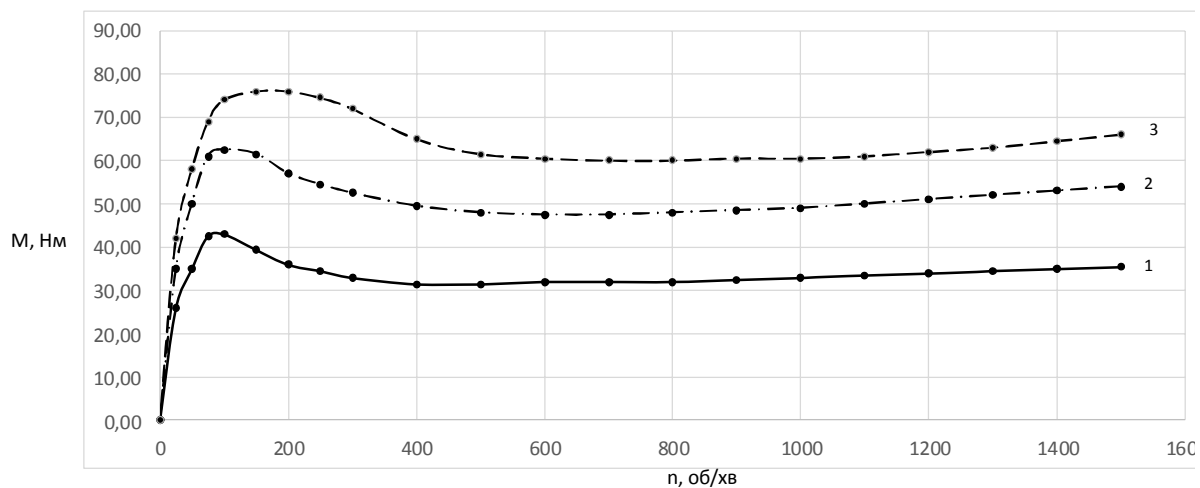


Рисунок 4 – Механічні характеристики СМ у режимі ДГ з потовщеним ВСК ІО ( $\Delta_{ВСК} \approx 8$  мм) при різному струмі збудження:  $I_1 = 12$  А;  $I_2 = 16$  А;  $I_3 = 20$  А

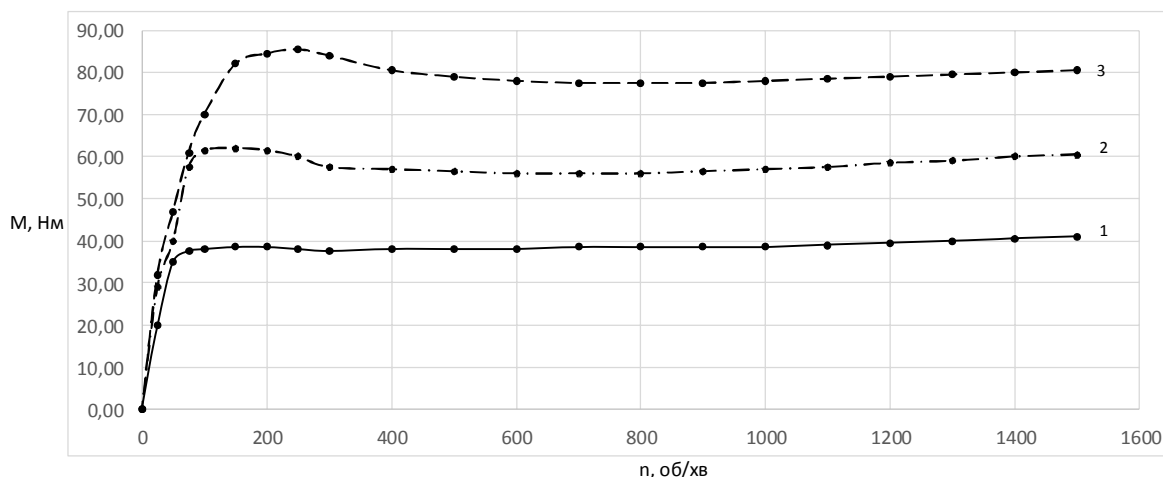


Рисунок 5 – Механічні характеристики СМ у режимі ДГ з масивними ВФД ІО при різному струмі збудження:  $I_1 = 12 \text{ A}$ ;  $I_2 = 16 \text{ A}$ ;  $I_3 = 20 \text{ A}$

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;

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 [r_{010} + r_{10}(I_1, f_1) + jx_{10}(I_1, f_1)];$$

$\dot{I}_d, \dot{I}_q, \dot{I}'_f$  – 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;  $r_{\text{IO}}(I_1, f_1)$ ,  $x_{\text{IO}}(I_1, f_1)$  – активна та реактивна складові ІО;  $r_{\text{0IO}}$  – опір проводу обмотки ІО.

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  $r_{\text{IO}}(I_1, f_1)$ ,  $x_{\text{IO}}(I_1, f_1)$  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  $\varphi_1$  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 ІО ( $r_{\text{IO}}$ ,  $x_{\text{IO}}$ ,  $z_{\text{IO}}$ ) 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.

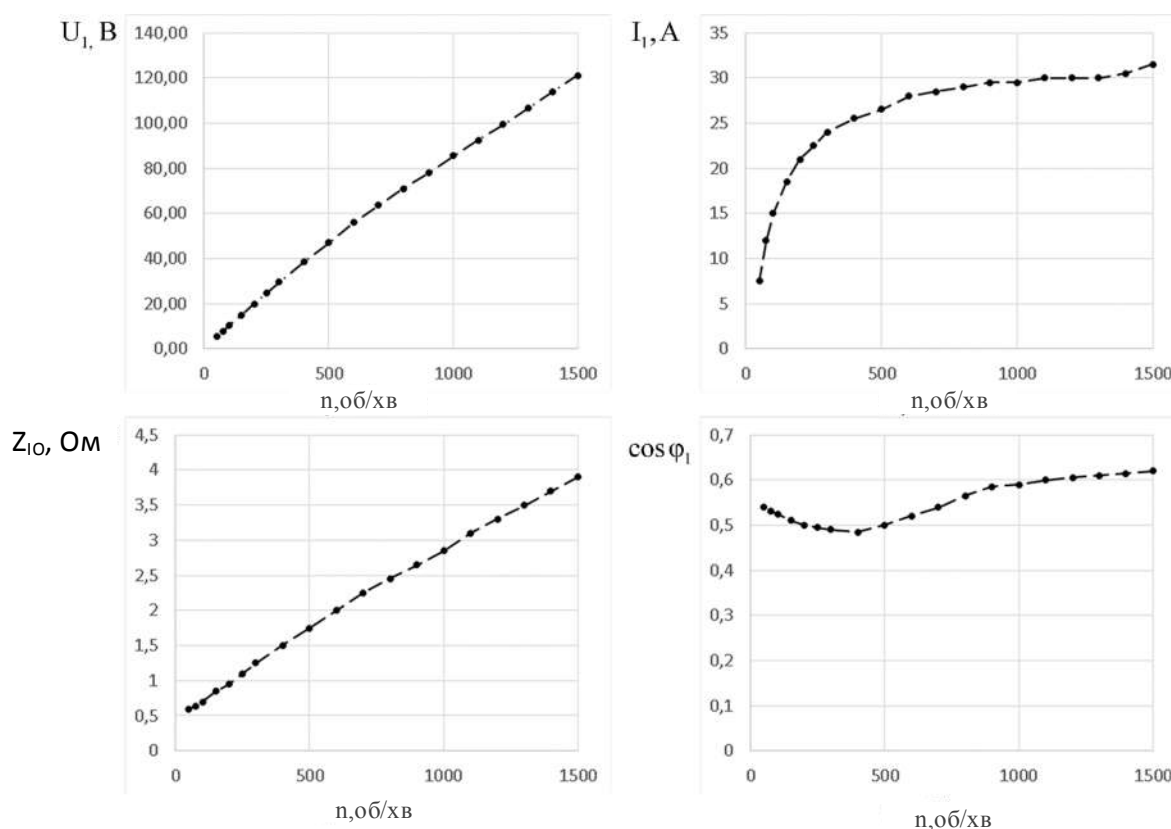


Рисунок 6 – Залежності деяких величин навантаження СМ від частоти обертання валу при  $I_2 = 16$  А

1. Вихідна напруга  $U_1$  через реакцію якоря й нелінійності ІО 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  $\approx 120$  В до  $\approx 5$  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  $r_{IO} \approx 0,63 \cdot R_1$ .

**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.