

Шамардіна Віра Миколаївна. Канд.тех.наук, доцент, Тел. +380506478150, E-mail: vira.shamardina@khpі.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9274-6517

Земцова Катерина Олегівна. PhD-студент, Тел.+380509480216, E-mail: Kateryna.Zemtsova@ieeє.khpі.edu.ua, ORCID: 0009-0000-8969-2290

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, Україна, вулиця Кирпичова, 2, 61000.

ВИЗНАЧЕННЯ ОБЛАСТІ САМОЗБУДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА У БАГАТОДВИГУННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ

Анотація. Сучасні підприємства вимогливі до енергоефективності та експлуатаційних характеристик електроприводів виробничих механізмів. У багатодвигунних електроприводах вантажопідйомних механізмів з асинхронними двигунами з фазним ротором цим вимогам певною мірою задовольняє використання режиму динамічного гальмування із самозбудженням. Правильна експлуатація електроприводів потребує визначення достовірних механічних характеристик двигунів в цьому режимі. Відомі методики їх розрахунку громіздкі і потребують уточнень, детального аналізу із застосуванням сучасних пакетів прикладних комп'ютерних програм. Мета роботи полягає в виявленні впливу параметрів багатодвигунного асинхронного електропривода на область самозбудження двигунів у режимі динамічного гальмування з самозбудженням. Отримано аналітичні залежності механічних характеристик двигунів у режимі ДГС, а також структурні алгоритмічні моделі для визначення області самозбудження АД з використанням *Simulink Matlab*. Результати досліджень мають універсальний характер, дозволяють визначити область надійного самозбудження в режимі ДГС двигунів і виконати обґрунтований вибір параметрів складових багатодвигунного ЕП.

Ключові слова: багатодвигунний асинхронний електропривод, динамічне гальмування з самозбудженням, область самозбудження, вантажопідйомні механізми, параметри багатодвигунного асинхронного електропривода.

Shamardina Vira M., Candidate of Technical Sciences, Docent. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Tel. +380506478150; e-mail: vira.shamardina@khpі.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9274-6517

Zemtsova Kateryna O., PhD-student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Tel. +380509480216, E-mail: Kateryna.Zemtsova@ieeє.khpі.edu.ua, ORCID: 0009-0000-8969-2290

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2 Kyrpychova str., 61002, Kharkiv, Ukraine.

DETERMINATION OF THE SELF-EXCITATION REGION OF AN INDUCTION MOTOR IN A MULTI-MOTOR ELECTRIC DRIVE

Abstract. In the modern operation of enterprises, the requirements for energy efficiency and performance of electric drives are always increasing. In multi-motor electric drives of hoisting mechanisms with asynchronous motors with a phase rotor, the use of dynamic braking with self-excitation is aimed at solving these issues. Proper operation requires knowledge of the mechanical characteristics of motors. However, the known methods for calculating the characteristics require refinement and detailed analysis, which necessitates the use of modern

application software packages in the calculations. The aim of the study is to determine the influence of the parameters of a multi-motor induction electric drive on the self-excitation region of motors in the mode of dynamic braking with self-excitation. As a result of the work, analytical dependencies describing the mechanical characteristics of motors in the DBS mode and structural algorithmic models in the Simulink Matlab package for determining the AD self-excitation region were obtained.

Keywords: *multi-motor asynchronous electric drive, dynamic braking with self-excitation, self-excitation area, lifting mechanisms, parameters of a multi-motor asynchronous electric drive.*

Постановка проблеми. У сучасному світі вантажопідйомні машини є одним з факторів, що визначають продуктивність праці у виробництві. Підвищити якість вантажопідйомних машин можна шляхом розробки нових систем електроприводів, які мають високу надійність, забезпечують плавний розгін і гальмування робочих механізмів кранів, а також дозволяють суттєво економити електроенергію.

Гальмування електродвигунів є необхідним режимом роботи, який дозволяє забезпечити позиціонування механізму. Якщо не використовувати гальмування, перехідні процеси можуть тривати неприпустимо довго та призвести до ненадійної роботи механізму в цілому. У багатодвигунних електроприводах (ЕП) вантажопідйомних машин частіше використовують асинхронні двигуни, зокрема з фазним ротором. З різних причин ЕП можуть бути багатодвигунними. Аналіз сучасних систем асинхронних ЕП показав доцільність використання режиму динамічного гальмування з самозбудженням.

Схеми динамічного гальмування з самозбудженням (ДГС) вигідно відрізняються[2,3,4,5]:

- відсутністю понижуючого трансформатора або інших вузлів підживлення, що обумовлює їх відносну простоту та невелику вартість;
- автоматичною залежністю струму збудження від навантаження електродвигуна, що забезпечує жорсткі характеристики привода і відносно високий діапазон регулювання швидкості;
- високими енергетичними показниками, так як в режимі динамічного гальмування з самозбудженням енергія з мережі практично не споживається.

Дослідження та експлуатація електроприводів не можливі без визначення механічних характеристик (МХ) двигунів. Однак відомі методики їх розрахунку для режиму динамічного гальмування з самозбудженням потребують великих витрат часу на їх отримання, крім того є необхідність врахування додаткових факторів. Це зумовлює застосування для таких розрахунків сучасних пакетів прикладних комп'ютерних програм, завдяки чому прискорюється і спрощується їх виконання, насамперед, характеристик у режимі динамічного гальмування з самозбудженням, для якого є актуальним визначення достовірної області самозбудження асинхронного двигуна і вплив на її межі параметрів електропривода.

Аналіз останніх досліджень. На вантажопідйомних механізмах часто виникає необхідність використовувати багатодвигунні електроприводи на базі асинхронних двигунів з фазним ротором (АДФР). В ЕП великої потужності завдяки цьому можна зменшити його габарити, а в ЕП пересування вантажопідйомних кранів або рейкових транспортних засобів - спростити кінематичну схему механізмів. У таких приводах двигуни повинні мати ідентичні параметри. Досягти цього доволі складно, тому навіть за однакового навантаження часто є неузгодженість частот обертання приводних двигунів, що проявляється в ривках і перекосах конструкції механізмів під час руху, у буксуванні ходових коліс, передчасному виході з ладу одного з двигунів і руйнуванні металоконструкцій транспортних засобів. У багатодвигунних ЕП актуальною є задача синхронізації частот обертання двигунів, у тому числі і у пускогальмівних режимах [1]. Цю задачу можна вирішувати, якщо використовувати в якості базової схему асинхронного багатодвигунного ЕП з електричним зв'язком роторів за колом випрямленого струму, наведену на рис. 1.

Одночасне увімкнення всіх двигунів M_1, M_2, \dots, M_n механізму та рівномірність розподілу навантаження між ними забезпечується тим, що перемикання в колах статорів і роторів здійснюють загальні комутаційні

апарати, а роторні обмотки електрично пов'язані між собою через трифазні випрямляючі мости UZ_1, UZ_2, \dots, UZ_n , увімкнені на загальний пускорегулювальний резистор R_d . Для реалізації режиму динамічного гальмування з самозбудженням використовується випрямлений струм роторів, величина якого визначається значенням опору $R_{dш}$, який шунтує обмотки статорів під час гальмування двигунів. Додатково ЕП може мати вузол підживлення (на схемі рис. 1 не показано). Такі особливості схемного рішення надають можливості для підвищення енергоефективності ЕП, подальші його дослідження доцільно продовжувати, допрацьовувати, щоб забезпечити енергозберігаючі гальмівні режими.

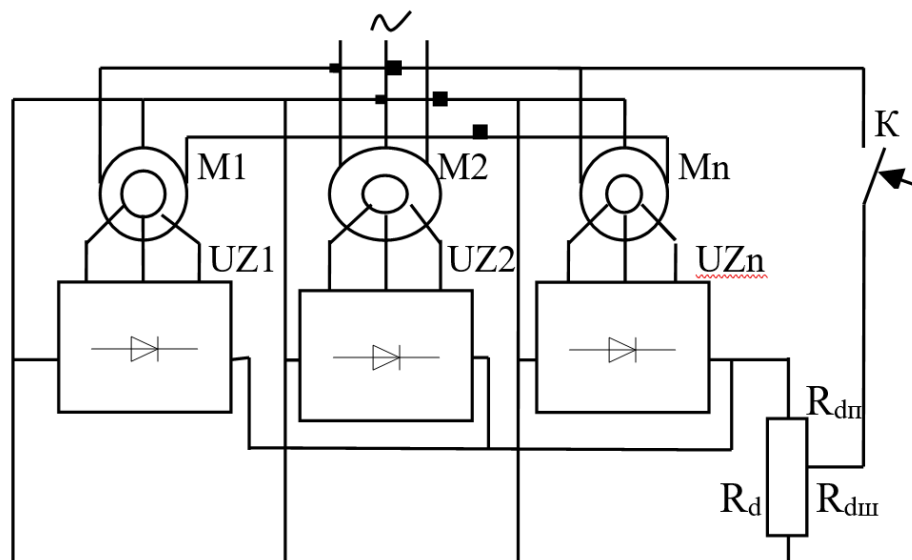


Рис. 1 – Спрощена схема силових кіл базового багатодвигунного електропривода

Мета роботи та постановка завдання. Метою роботи є виявлення впливу параметрів багатодвигунного асинхронного ЕП електропривода на область самозбудження двигунів у режимі ДГС.

З цією метою постає завдання з отримання необхідних аналітичних залежностей, які дозволять спростити дослідження режиму ДГС з урахуванням параметрів багатодвигунного ЕП.

Основний матеріал дослідження і отримання результатів. Динамічне гальмування з самозбудженням (без джерела постійного струму, розрахованого на повну потужність збудження) може використовуватися тільки для машин, які збуджуються, у яких ЕРС ротора менша за ЕРС статора, тобто виконується умова: $\frac{U_1}{U_2} > 1$, (1), де U_1 , U_2 - відповідно номінальна напруга статора та ротора, В. Для машин, що збуджуються, достатньо введення струму підживлення силою 2...3 А, таке джерело постійного струму необхідно тільки для забезпечення надійного початкового збудження.

Якщо рівність (1) не виконується, режим ДГС при збудженні двигуна тільки випрямленим струмом ротора стає неможливим. Тоді крім випрямленого струму ротора для збудження двигуна використовують додаткове джерело постійного струму, при цьому двигун називають двигуном, що не збуджується, а збудження – змішаним. Сила струму підживлення в цьому випадку складає 5...15 % номінальної сили струму статора машини.

Умова самозбудження (1) дає можливість за каталожними даними визначити, чи є асинхронний двигун збудженим або незбудженим. Проте для введення двигуна в режим самозбудження недостатньо виконання даної умови, необхідно враховувати особливості конкретної схеми електропривода.

Вирішення цієї проблеми для однодвигунних асинхронних електроприводів запропоновано в роботах [5,6].

Аналітична умова самозбудження асинхронної машини:

$$K_{CX} \geq \sqrt{1 + \frac{2x'_r}{x_\mu}}, \quad (2)$$

де K_{CX} – коефіцієнт самозбудження машини; x'_r – приведений індуктивний опір ротора; x_μ - реактивний опір намагнічування.

$$K_{CX} = \frac{K_C K_T K_{\text{Ш}}}{K_B}, \quad (3)$$

де K_c – коефіцієнт приведення постійного струму збудження, що підводиться до статора, до еквівалентного по МРС трьохфазного струму; K_B – коефіцієнт схеми випрямлення; K_T – коефіцієнт трансформації двигуна від статора до ротора; $K_{ш}$ – коефіцієнт шунтування випрямляча.

Співвідношення (2) отримано на основі схеми заміщення фази асинхронного двигуна в режимі живлення від джерела струму. Вважають, що постійний струм обмотки статора не залежить від режиму роботи двигуна, а визначається тільки напругою джерела постійного струму і активним опором обмотки статора. Таку ідеалізацію звичайно застосовують при дослідженні режиму динамічного гальмування від незалежного джерела живлення, використання її для ДГС в [5,14] не доводиться, проте, виходячи з прийнятого допущення, не враховують в (2) вплив параметрів обмотки статора.

Вищевикладене дозволяє виділити 2 питання: визначити умови самозбудження двигуна в багатодвигунному асинхронному електроприводі; оцінити вплив параметрів обмотки статора на самозбудження машини.

На підставі Г-образної схеми заміщення та векторної діаграми асинхронної машини отримано у відносних одиницях наступні рівняння:

$$e_{sv}^2 = i_{\mu v}^2 \sigma^2 x_{\mu v}^2 = (i'_{rv})^2 \left[(r_{sv} + \left(r_{sv} + \frac{\sigma(r'_{rv} + R'_{env})}{S_v} \right)^2 + (x_{sv} + \sigma x'_{rv})^2 \right]; \quad (4)$$

$$i_{sv}^2 = \frac{1}{\sigma^2} (i'_{rv})^2 + i_{\mu v}^2 + \frac{2(x_{sv} + \sigma x'_{rv})}{\sigma^2 x_{\mu v}} + (i'_{rv})^2; \quad (5)$$

де e_{sv} – ЕРС фази v - того двигуна.

В якості базових величин прийнято: $I_B = I_{\mu n}$ – струм холостого струму в двигунному режимі при номінальній напрузі; $Z_B = X_{\mu n} = E_{sh} / I_{\mu n}$; $U_B = E_{sh}$ – номінальне значення ЕРС фази статора.

З (4) та (5) знаходимо відповідні вирази для визначення ковзання і струму ротора v - того двигуна:

$$S_v = \frac{\sigma(r'_{rv} + R'_{env})}{\sqrt{\frac{i'_{\mu v} \sigma^2 x'_{\mu v}}{(i'_{rv})^2} - (x_{sv} + \sigma x'_{rv})^2 - r_{sv}}}; \quad (6)$$

$$i'_{rv} = \frac{i_{\mu v}}{\sqrt{K_D^2 K_H^2 - \frac{1}{\sigma^2} - 2(x_{sv} + \sigma x'_{rv}) / (\sigma^2 x_{\mu v})}}. \quad (7)$$

Гальмівний момент двигуна:

$$\mu_v = \frac{(r'_{rv} + R'_{env})(i'_{rv})^2}{S_v}. \quad (8)$$

Наявності потрібного гальмівного моменту, тобто самозбудженню двигуна, відповідають позитивні реальні значення S_v та i'_{rv} , тобто необхідно виконання умов:

$$K_D^2 K_H^2 > \frac{1}{\sigma^2} + \frac{2(x_{sv} + \sigma x'_{rv})}{\sigma^2 x_{\mu v}}; \quad (9)$$

$$\frac{i_{\mu v} \sigma x_{\mu v}}{i'_{rv}} > \sqrt{r_{rv}^2 + (x_{sv} + \sigma x'_{rv})^2}. \quad (10)$$

Умова (10) після підстановки у неї залежності (7) матиме вигляд:

$$K_D K_H > \sqrt{\frac{r_{rv}^2 + (x_{sv} + \sigma x'_{rv})^2}{\sigma^2 x_{\mu v}} + \frac{1}{\sigma^2} + \frac{2(x_{sv} + \sigma x'_{rv})}{\sigma^2 x_{\mu v}}}. \quad (11)$$

Очевидно, що виконання умови (11) є достатнім, щоб були виконані умови (9) та (10). Отже, умовою самозбудження двигуна в багатодвигунному асинхронному електроприводі з електричним зв'язком по колу випрямленого струму ротора є нерівність (11).

Граничне ковзання, при якому відбувається самозбудження двигуна, може бути визначено з (6), якщо прийняти $X_{\mu v} = X_{\mu v \max}$:

$$S_{ГР} = \frac{\sigma(r'_{rv} + R'_{env})}{\sqrt{3.18(\sigma^2 K_D^2 K_H^2 - 1) - 3.567(x_{sv} + \sigma x'_{rv}) - (x_{sv} + \sigma x'_{rv})^2 - r_{sv}}}, \quad (12)$$

де $R'_{env} = K_H K_r \rho_r (R_{dп} + K_{Ш} \Gamma_{сп})$.

В режимі ДГС велика кратність критичного моменту, що значно перевищує допустимі короточасні навантаження двигуна. Механічні характеристики двигуна при цьому відрізняються високою жорсткістю. Ці обставини можуть стати причиною незадовільної роботи електропривода механізму пересування. Для виключення цього недоліку необхідно передбачити додаткові заходи. Вони можуть заключатися в наступному:

- 1) введення додаткового послідовно включеного контуру збудження опору $R_{dп}$;
- 2) включення в схему електропривода вузла підживлення, і правильний вибір величини струму підживлення з точки зору забезпечення необхідної кратності критичного моменту двигуна;
- 3) чергування режимів ДГС та противно включення при гальмуванні механізму пересування крану.

Якщо при $x_{\mu max}$ за виразом (11) $K_d K_H < (K_d K_H)_{min}$, або $K_d K_H < (K_d K_H)_{min}$, але струм намагнічування асинхронної машини більший критичного значення, необхідно забезпечити підживлення двигуна. Величина струму підживлення визначається потрібним моментом гальмування. Для заданого значення S_v необхідний струм ротора:

$$i'_{rvпотр} = \sqrt{\frac{\mu_{vпотр} S_v}{r'_{rv} + R'_{env}}} \quad (13)$$

який забезпечує потрібний струм намагнічування машини:

$$i_{\mu vпотр} = \frac{i'_{rvпотр}}{\sigma x_{\mu v}} \sqrt{\left[r_{sv} + \frac{\sigma(r'_{rv} + R'_{env})}{S_v} \right]^2 + (x_{sv} + \sigma x'_{rv})^2}. \quad (14)$$

Якщо вирішити трансцендентне рівняння (14), можна знайти струм підживлення за наступною формулою:

$$i_n = \frac{1}{K_c} \sqrt{i_{\mu vпотр}^2 + \left[\frac{1}{\sigma^2} + \frac{2(x_{sv} + \sigma x'_{rv})}{\sigma^2 x_{\mu v}} \right] (i'_{rvпотр})^2 - \frac{K_d K_H}{K_c} i'_{rvпотр}}. \quad (15)$$

При наявності незалежного джерела підживлення, або контуру підживлення, трьохфазний струм v -того двигуна, який еквівалентний по МРС постійного струму збудження, визначається за формулою:

$$i_{1v} = i_{еквv} = K_H K_D i'_{rv} + K_C i_{\Pi}. \quad (16)$$

Тоді намагнічувальний струм двигуна:

$$i_{\mu v}^2 = (K_H K_D i'_{rv} + K_C i_{\Pi})^2 - (i'_{rv})^2 \left[\frac{1}{\sigma^2} + \frac{2(x_{sv} + \sigma x'_{rv})}{\sigma^2 x_{\mu v}} \right]. \quad (17)$$

При дослідженнях межі області самозбудження було використано каталожні данні асинхронного двигуна МТФ 312-6. При побудові графіку залежності було прийнято ряд значень намагнічувального струму в можливому діапазоні його зміни: $0,05 \leq i_{\mu v} \leq 5$ та використана умова (11), що дає ряд значень $K_D K_H$. Моделювання для отримання універсальності результатів розрахунків виконано з параметрами двигуна, які переведено у відносні одиниці.

Аналіз виразу (11) показує, що на самозбудження асинхронних машин впливають не тільки параметри обмоток статора і ротора, насичення магнітної системи, конкретна схема електропривода, але і співвідношення навантажень електрично взаємозв'язаних електродвигунів. В багатодвигунному асинхронному електроприводі з електричним зв'язком роторів кращі умови самозбудження має менш завантажений двигун, так як коефіцієнт $K_H=2$ (розглядається електропривод дводвигунний), він для нього буде більше, аніж для інших двигунів.

Умови самозбудження визначаються тільки параметрами обмоток машини, за формулою (11) виконано розрахунки, результати надано на рис. 1 (крива 1). Якщо знехтувати впливом активного та індуктивного опорів r_{sv} і x_{sv} обмотки статора, що прийнято в [1,6], отримаємо криву 2 (рис. 2), яка проходить значно нижче кривої 1 в області насиченого стану асинхронної машини, в якому, як правило, знаходиться двигун механізму пересування при

переході в режим ДГС. Врахування r_{sv} і x_{sv} дає можливість виключити помилку при виборі параметрів схеми електропривода ($K_{ш}K_c$) для забезпечення надійного самозбудження машини.

Залежність (12) показує, що граничне ковзання двигуна ($S_{гр}$) прямо пропорційно значенню опору $R_{дп}$, що включений послідовно контуру збудження. Для отримання менших значень $S_{гр}$ доцільно в режимі ДГС прийняти $R_{дп}=0$. Комп'ютерна модель залежності $S_{гр}=f(K_{д}, K_{н})$ представлена на рис. 4.

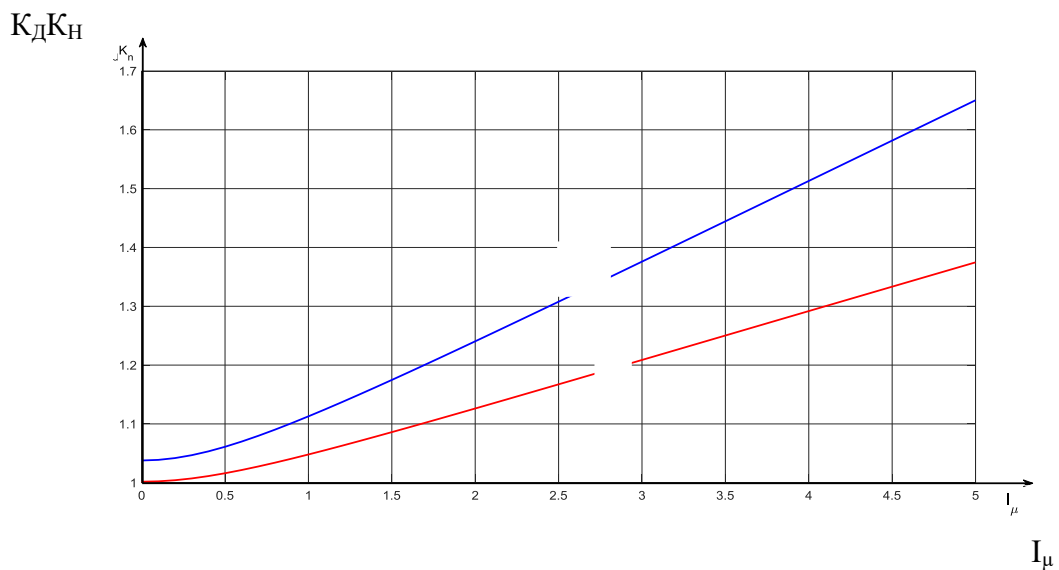


Рис. 2 – Залежність струму намагнічування від схемних коефіцієнтів $K_{д}K_{н}$

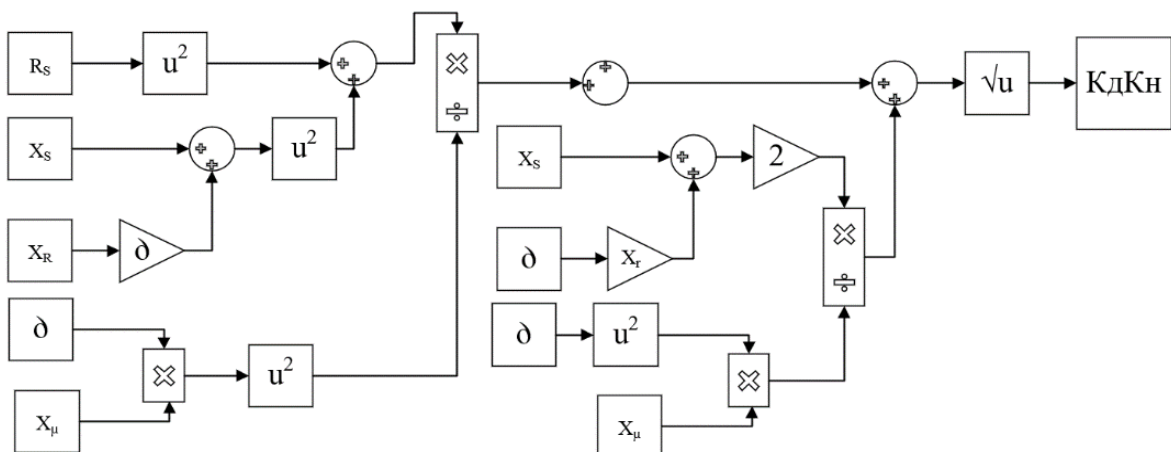


Рис. 3 – Комп'ютерна модель добутку $K_{д}K_{н}$ у пакеті SimulinkMatlab, складена за формулою (11)

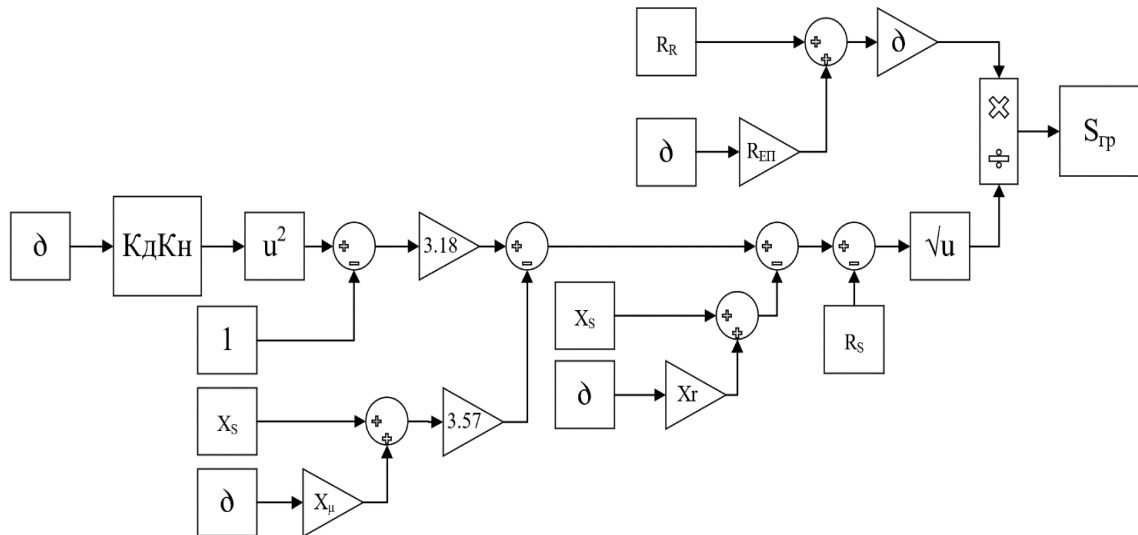


Рис. 4 – Комп’ютерна модель для визначення граничного ковзання $S_{гр}$ у пакеті SimulinkMatlab

При коефіцієнті шунтування $K_{ш} \approx 1$ граничне ковзання залежить тільки від коефіцієнта K_n , це забезпечується включенням паралельно контуру збудження опору $R_{дп} \gg r_{сп}$. Чим більше навантажений двигун, тим більше граничне ковзання він має. При роботі на холостому ходу всіх двигунів, крім якогось одного, збудження його в діапазоні ковзань $0 \leq S \leq 1$ не відбудеться. Таким чином, правильний вибір коефіцієнта шунтування $K_{ш}$ та рівномірний розподіл навантаження між двигунами у схемі багатодвигунного асинхронного електропривода з електричним зв’язком роторів дозволяє розширити область самозбудження машин без струмів підживлення. Графіки залежності $S_{гр} = f(K_d, K_n)$ представлені на рис. 5.

Для того, щоб визначити потрібний струм підживлення, можна скористатися залежністю струму підживлення від необхідного гальмівного моменту двигуна $i_n = f(\mu_{впотр})$. У дослідженні для моделювання було використано 2 двигуни: МТФ 312-6 – двигун, що самозбуджується і АД МТН713-10 – двигун, що не самозбуджується. Комп’ютерні моделі та отримані графіки цієї залежності представлено на рисунках 6, 7, 8 і 9 відповідно.

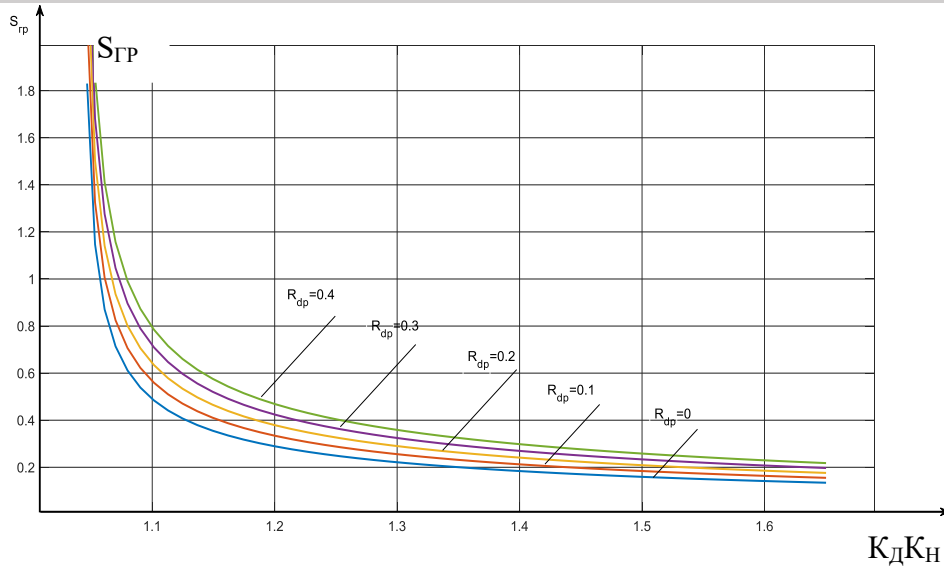


Рис. 5 – Графіки залежності $S_{гр}=f(K_d, K_n)$, отримані у результаті моделювання

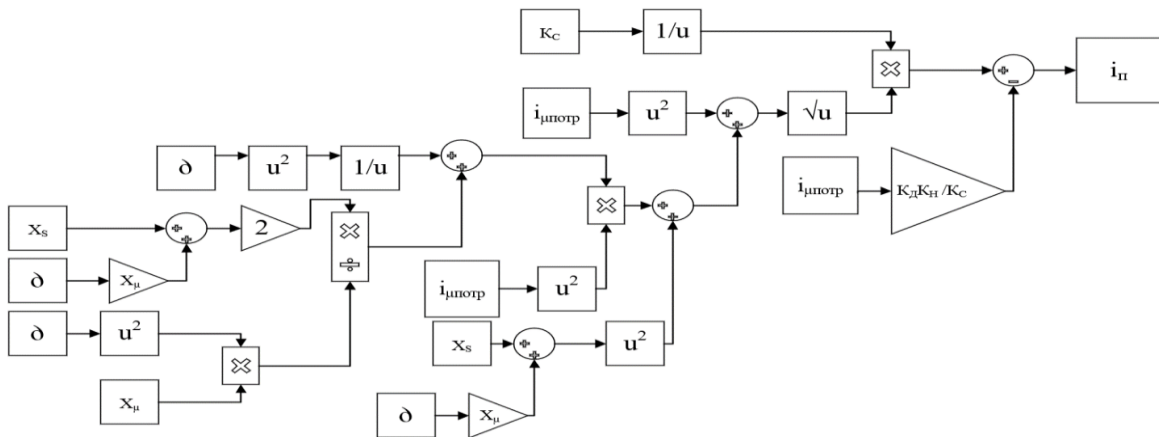


Рис. 6 – Модель для визначення струму підживлення $i_{п}$ пакеті SimulinkMatlab

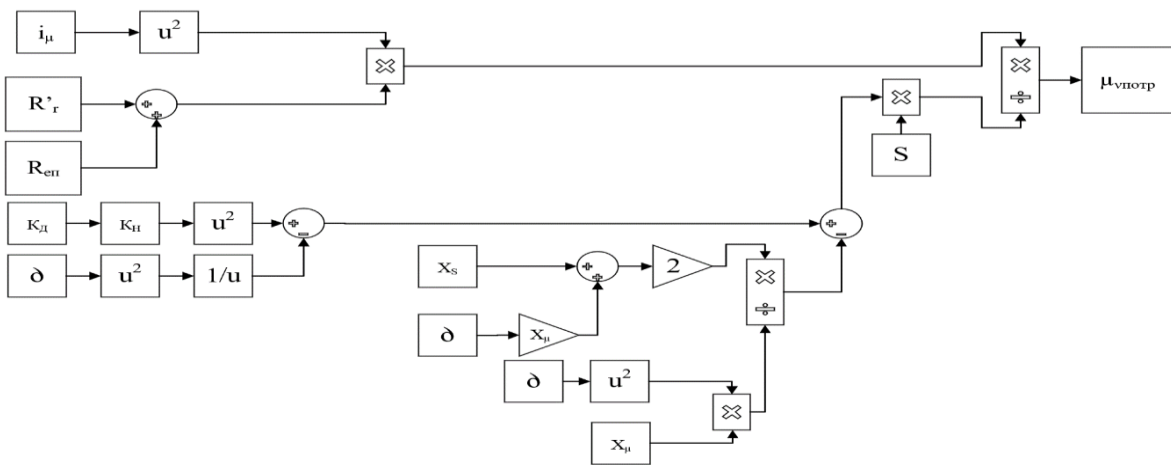


Рис. 7 – Схема моделювання графіку потрібного гальмівного моменту двигуна $\mu_{впогр}$

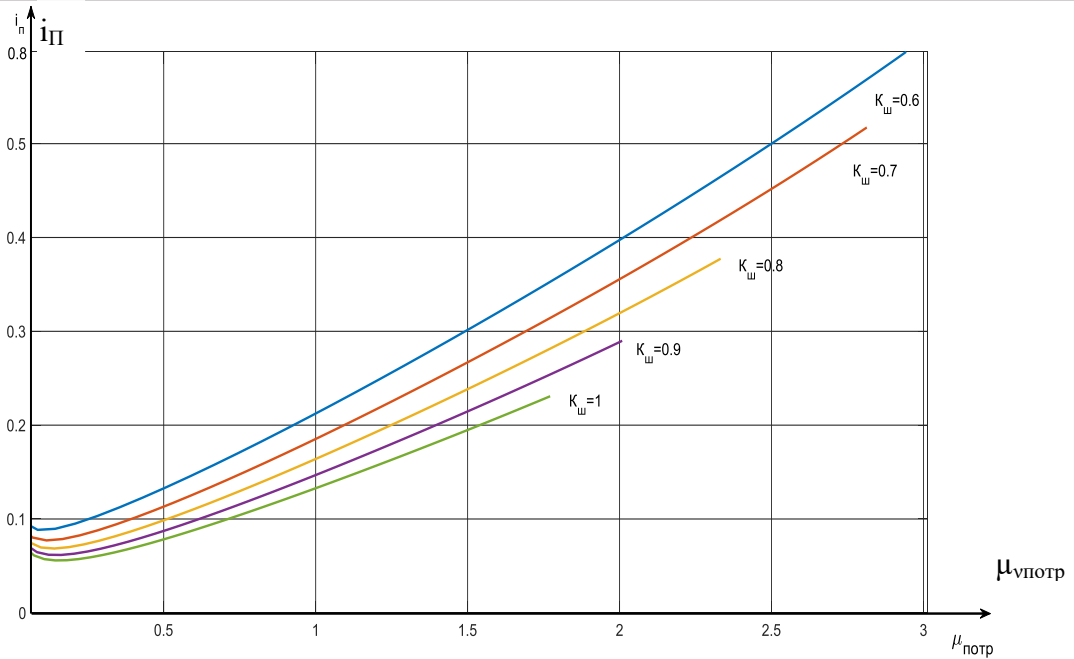


Рис. 8 – Графік залежності $i_{п}=f(\mu_{впотр})$ для АД МТФ 312-6 (двигун, що самозбуджується)

Аналіз графіків на рисунках 8, 9 показує, що при коефіцієнті шунтування $K_{ш}=0,8 \div 0,9$ струм підживлення не потребується, якщо $\mu_{впотр} \leq 1,4M_n$. При $K_{ш} \leq 0,6$ практично у всьому діапазоні зміни навантаження двигуна необхідне підживлення.

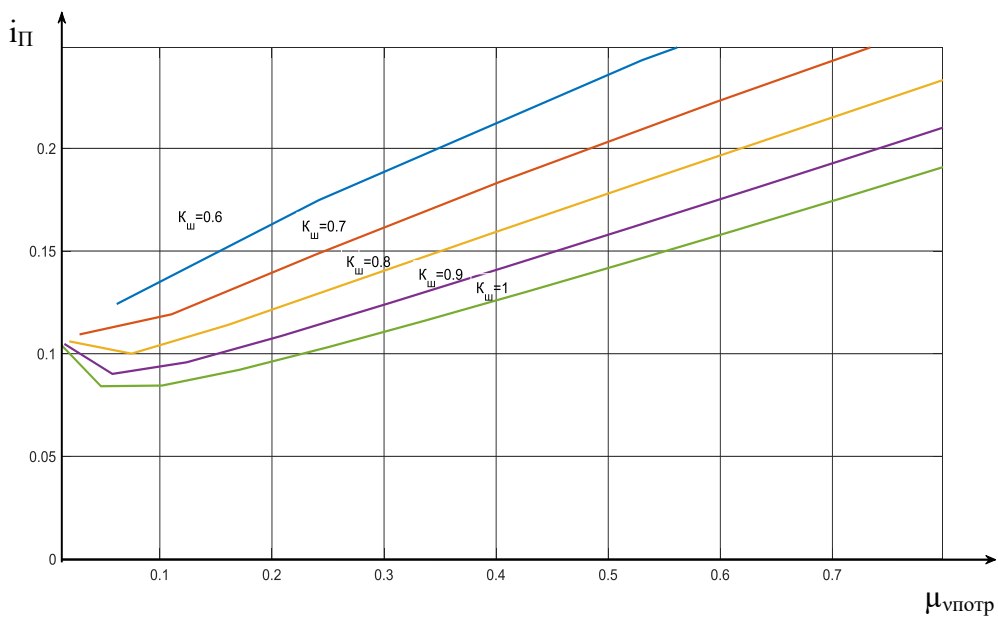


Рис. 9 – Графік залежності $i_{п}=f(\mu_{впотр})$ для АД МТН713-10 (двигун, що не самозбуджується)

Висновки. Отримано аналітичні залежності, які описують МХ двигунів у режимі ДГС. Вони дозволяють визначити область самозбудження та вплив параметрів багатодвигунного ЕП на неї.

Отримано структурні алгоритмічні моделі у пакеті SimulinkMatlab для визначення області самозбудження АД і можливості дослідження впливу параметрів електропривода у режимі ДГС для багатодвигунного асинхронного ЕП з електричним зв'язком у колі випрямленого струму роторів.

Моделі дають змогу враховувати параметри статорних обмоток і вплив навантажень взаємопов'язаних приводних двигунів, що підвищує точність розрахункових МХ у режимі ДГС.

Результати досліджень дозволяють визначити область надійного самозбудження в режимі ДГС двигунів і виконати правильний вибір схемних параметрів багатодвигунного ЕП.

Врахування параметрів статорних обмоток x_{sv} та r_{sv} забезпечує підвищення точності розрахунків МХ двигунів у режимі ДГС; залежність $S_{гр}=f(K_d, K_n)$ дозволяє зробити правильний вибір коефіцієнта шунтування $K_{ш}$ та рівномірно розподілити навантаження між двигунами у схемі багатодвигунного асинхронного електропривода з електричним зв'язком роторів, що дозволяє розширити область самозбудження машин без струмів підживлення; залежність $i_n=f(\mu_{впотр})$ показує, у яких випадках і для яких двигунів необхідний струм підживлення у режимі ДГС.

БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Андрієнко П., Андрієнко Д., Андрієнко А., Немикіна О., Близняков О. Синхронізуючі властивості імпульсно-струмового керованого електроприводу узгодженого обертання в колі електрично зв'язаних випрямлячів ротора. *2020 IEEE Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика (РАЕР)*, Кременчук, Україна, 2020. С. 1-5. doi: 10.1109/РАЕР49887.2020.9240846.

2. Танатар А. І., Дурнев В. И. Системи електродинамічного гальмування підйомних кранів. Київ: Техніка, 1982.
3. Кранове електрообладнання: Посібник / Під ред. А.А. Рабіновича. М. Енергія, 1979.
4. Богословський А. П., Певзнер Є. М., Семерня Н. Ф. і інші. Електрообладнання кранів. М.: Машинобудування, 1983.
5. Дранніков В. Г., Звягін І. Є. Автоматизований електропривод підйомно-транспортних машин. М.: Вища школа, 1973.
6. Іорданов С., Райнов Р. Динамічне гальмування з самозбудженням асинхронних двигунів з фазним ротором. *Електротехніка*. 1982. № 4.
7. Капунцев Ю. Д., Іорданов С. Розрахунок характеристик асинхронного двигуна в режимі динамічного гальмування з самозбудженням. *Тр. Моск. енерг. ін-та*. 1966. вип. 66.

REFERENCES:

1. Andrienko P., Andrienko D., Andrienko A., Nemykina O., Blyzniakov O. Synchronizing Properties of Impulse-Current Controlled Electric Drive of Coordinated Rotation in the Circuit of Electrically Coupled Rectifiers of the Rotor. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240846.
2. Tanatar A. I., Durnev V. I. Systems of electrodynamic braking of cranes. Kyiv. Technika, 1982.
3. Crane electrical equipment: Manual / Edited by A.A. Rabinovich. M. Energia, 1979.
4. Bogoslovsky A. P., Pevzner E. M., Semernya N. F. and others. Electrical equipment of cranes. M. Mashinostroitelstvo, 1983.
5. Drannikov V. G., Zvyagin I. E. Automated electric drive of lifting and transport machines. M. Vyssheskaya shkola, 1973.
6. Iordanov S., Raynov R. Dynamic braking with self-excitation of induction motors with a phase rotor. *Elektrotekhnika*. 1982. № 4.
7. Kapuntsev Y. D., Iordanov S. Calculation of the characteristics of an induction motor in the mode of dynamic braking with self-excitation. *Proc. MPEI*. 1966. Issue 66.

Надійшла до редакції 15.08.2023р.