

ДОСЛІДЖЕННЯ ДІАПАЗОНУ ЗМІНИ ФАЗИ СТРУМУ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Розглядається аналітичний метод визначення діапазону зміни кута фази струму φ асинхронного двигуна в залежності від режимів його роботи. Отримані данні порівнюються з результатами моделювання.

Рассматривается аналитический метод определения диапазона изменения угла фазы тока φ асинхронного двигателя в зависимости от режимов его работы. Полученные данные сравниваются с результатами моделирования.

We consider an analytical method for determining the range of variation in the current phase angle φ asynchronous motor depending on the mode of its operation. The results are compared with simulation results.

При фазовому тиристорному управлінні асинхронними двигунами (АД) мають місце нестійкі режими, особливо при роботі без навантаження при кутах керування 70 – 90 ел. град [1]. Одним із засобів позбавлення цього негативного явища є перехід на безпосереднє керування вихідною напругою перетворювача. Для цього встановлюється наступна функціональна залежність

$$\alpha = f(U_1, \varphi), \quad (1)$$

де U_1 – перша гармоніка напруги розглядається як керуюча дія, а кут φ – збурююча дія.

Таке керування дозволяє створити систему регулювання напруги, незалежної від збурюючої дії, тобто навантаження двигуна, його швидкості та режиму роботи [2]. Така система стає принципово стійкою до коливань. При моделюванні зручно використовувати в цій функціональній залежності еквівалентний кут навантаження φ_e , який обчислюється за параметрами схеми заміщення.

Проводячи ідентифікацію членів виразу (1), важливо визначити діапазон зміни фази струму φ в залежності від навантаження та ковзання. В загальному випадку потрібно враховувати зміну ковзання у межах $-1 < s < 2$ та моментів навантаження у межах $M_{ке} < M < M_{кд}$, де $M_{ке}$ та $M_{кд}$ – критичні моменти на природній механічній характеристиці в режимах генераторному та двигуна відповідно.

Залежність зміни кута фази струму φ можна визначити з кругової діаграми, враховуючи при цьому режими електромеханічного перетворення енергії.

Для спрощення аналізу враховуємо наступні припущення: параметри схеми заміщення двигуна не змінюються, втратами потужності в сталі статора і ротора а також механічними втратами нехтуємо, параметри експериментальної математичної моделі лінійні.

Як відомо, кругова діаграма (діаграма струмів) будується на основі Γ – подібної схеми заміщення АД. У векторній формі рівняння струмів має наступний вигляд

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 - \frac{\bar{I}_2}{c_1}, \quad (2)$$

де I_1 – вектор струму статора; I_0 – вектор струму неробочого ходу; c_1 – коефіцієнт контуру намагнічування для Γ – подібної схеми заміщення:

$$c_1 = 1 + \frac{r_1 + x_1}{x_m}.$$

Для прикладу побудови кругової діаграми, а також для порівняння значень струмів, оберемо двигуни серії 4А: 4А355S2 та 4А132М8. Двигуни обрані за ознакою ефективності перетворення енергії. Перший, двохполюсний двигун потужністю 250 кВт, є представником високоефективної енергетики (високі значення ККД та коефіцієнта потужності). Другий, восьмиполюсний двигун потужністю 5,5 кВт, являє собою двигун з ни-

зькою енергетичною ефективністю. Діаграму будемо у комплексній площині у відносних одиницях, де на вісі ординат відкладені значення реальної складової комплексного числа струмів, а на вісі абсцис – уявної. За базове значення струму приймаємо номінальний струм I_n , а базове значення напруги – U_n . Вектор напруги статора U_1 співпадає за напрямом з віссю ординат, тому кут між цим вектором і вектором струму I_1 є кутом фази струму φ .

Вигляд кругових діаграм для обраних двигунів представлений на рис. 1, де координати кінця вектора струму I_1 в залежності від значення ковзання позначені у вигляді точок. Отримана з кругової діаграми графіч-

на залежність кута фази струму φ приведена на рис. 2. Для врахування режимів електро-механічного перетворення енергії на круговій діаграмі латинськими літерами позначимо відповідні характерні точки (рис. 1), і на їх основі будемо розглядати відповідність кута фази струму φ (рис. 2) з режимами роботи АД.

Діаграми потужностей для п'яти характерних режимів перетворення енергії в АД наведена на рис.3, де: P_1 – потужність, що споживається з мережі, або віддається до неї; $P_{мех}$ – механічна потужність на валу двигуна; $\Sigma \Delta P = \Delta P_{m1} + \Delta P_{m2}$ – сума втрат потужності в обмотках статора та ротора.

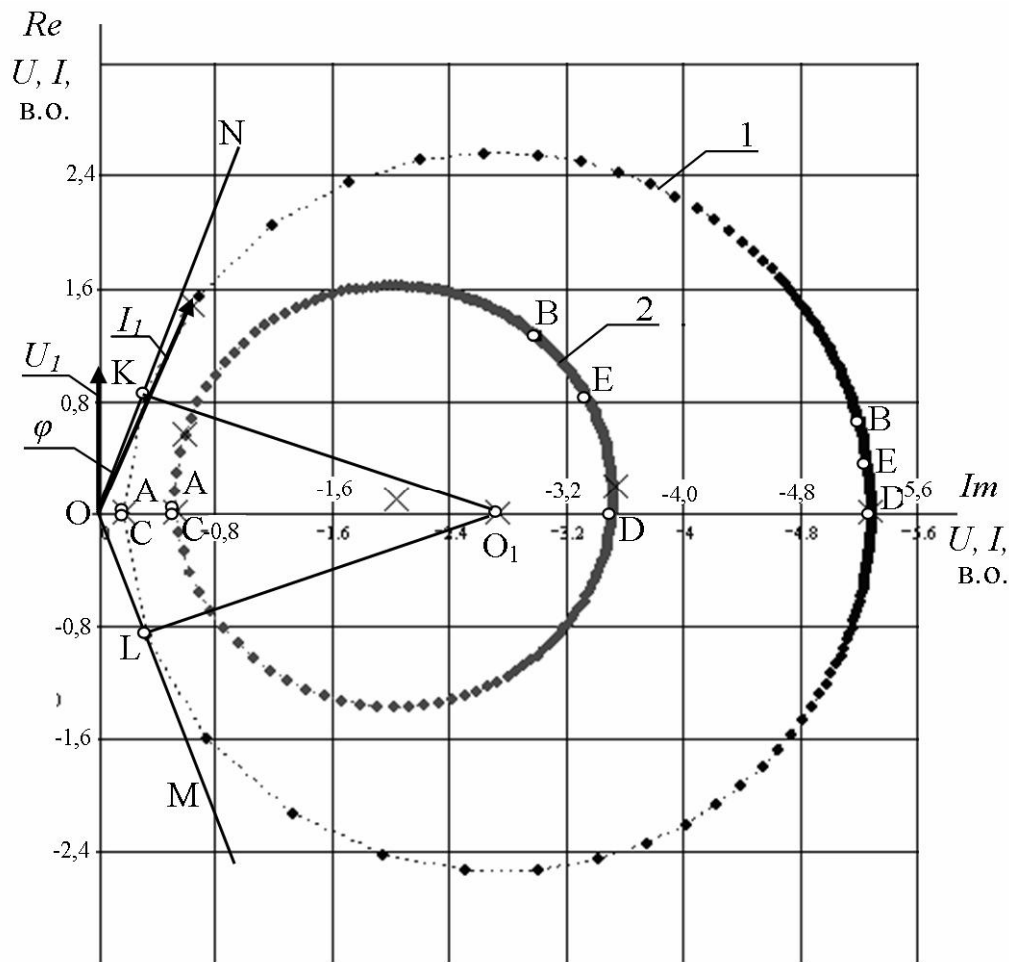


Рис.1. Кругові діаграми АД для двигунів 4A355S2 (1) та 4A132M8 (2)

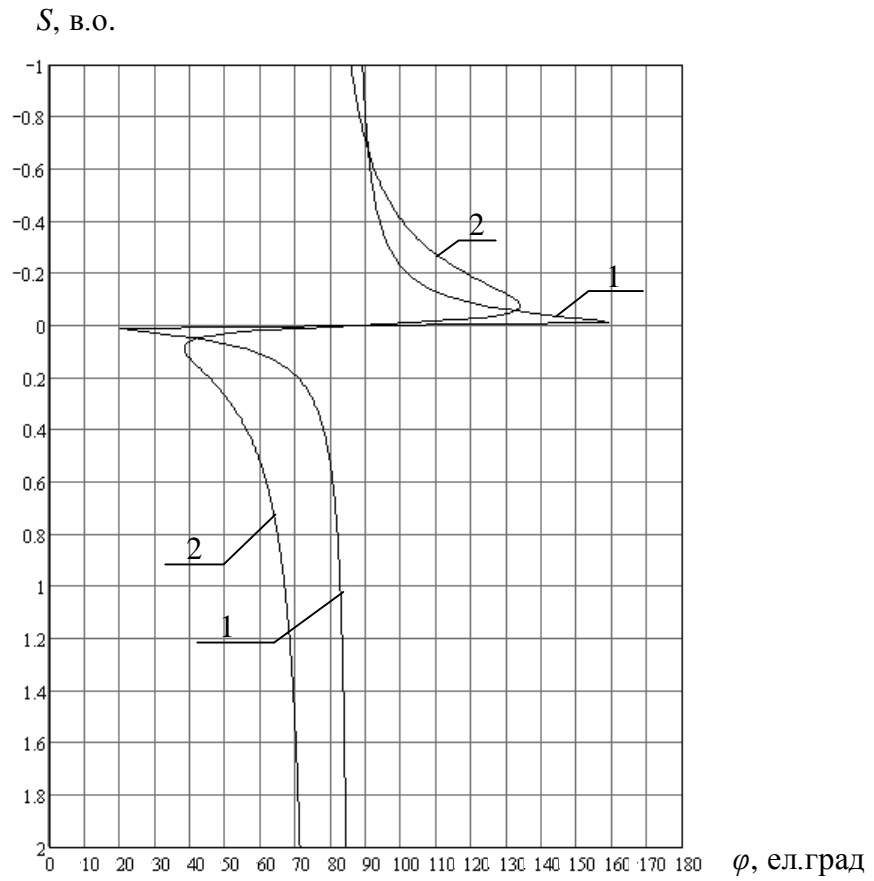


Рис.2. Залежність зміни кута φ для двигунів 4A355S2 (1) та 4A132M8 (2)

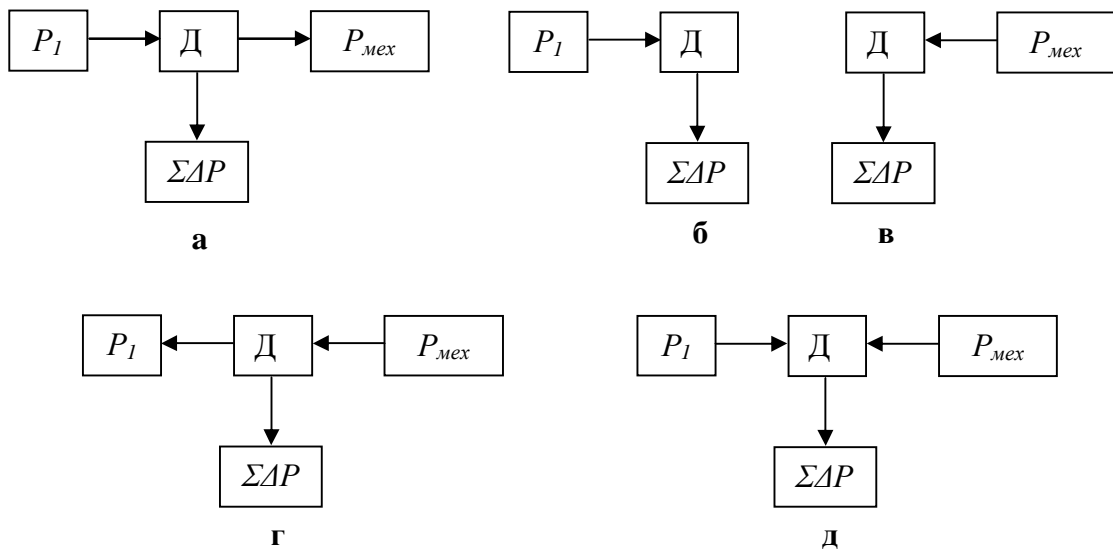


Рис.3. Діаграми потужностей АД

1. Режим двигуна. (дуга АВ на круговій діаграмі (рис. 1), яку описує кінець вектору струму I_1).

При роботі АД в режимі двигуна (рис. 3,а), потужність споживається з мережі і задовольняє умову

$$P_I = P_{\text{мех}} + \Sigma \Delta P > 0. \quad (3)$$

У цьому випадку кут фази струму знаходиться в діапазоні

$$\varphi_{\text{min}} < \varphi < 90 \text{ ел.град.}, \quad (4)$$

де φ_{min} – мінімальне значення кута фази струму.

2. Ідеальний неробочий хід. У цьому режимі кінець вектору струму I_1 має координати у точці А (рис. 1).

В режимі ідеального неробочого ходу (рис. 3,б), енергія, що споживається з мережі компенсує електричні втрати

$$P_1 = \Sigma \Delta P. \quad (5)$$

При цьому кут фази струму залишається незначно меншим за 90 ел.град.

3. Робота двигуна в режимі генератора на межі рекуперації енергії. У цьому режимі координати кінця вектору струму перетинають уявну вісь ординат у точці С. На рис. 1 ці точки відповідають значенню ковзання незначно меншого за ноль.

На межі рекуперації енергії електричні втрати компенсуються за рахунок (рис. 3в), механічної потужності

$$\Sigma \Delta P = P_{\text{мех}}. \quad (6)$$

Двигун у цьому режимі споживає з мережі тільки реактивну енергію. Кут фази струму у цьому випадку $\varphi = 90$ ел.град.

4. Робота двигуна в режимі генератора з рекуперацією енергії (рис. 3г). Кінець вектора струму описує дугу CD (рис. 1).

В цьому випадку потужність рекуперації задовольняє умову

$$P_I = P_{\text{мех}} + \Sigma \Delta P < 0. \quad (7)$$

Кут фази струму перебуває в діапазоні

$$90 \text{ ел.град} < \varphi \leq \varphi_{\text{max}}. \quad (8)$$

5. Робота двигуна в режимі противмикавання (рис. 3,д). На круговій діаграмі (рис. 1) це відповідає дузі BD. Координати точки Е відповідають значенню ковзання, що прямує до нескінченності.

При такому режимі роботи вся енергія, яка потрапляє до двигуна, повністю розсіюється у вигляді тепла на обмотках статора і ротора

$$\Sigma \Delta P = P_{\text{мех}} + P_1. \quad (9)$$

Кут фази струму для цього випадку становить $\varphi < 90$ ел.град., як і для роботи в режимі двигуна.

У АД існує ще одна межа рекуперації енергії, позначена на круговій діаграмі точкою D. Аналогічна за фізичним сенсом режиму, відображеному на рис.3,в. В певному випадку точка С відображає границю початку рекуперації. В другому випадку точка D відображає границю кінця рекуперації, коли зростання ковзання призводить до такого зростання втрат потужності, яке не може бути скомпенсоване за рахунок механічної потужності. Від цієї межі двигун починає споживати енергію з мережі, хоча працює при цьому у другому квадранті і формально повинен би генерувати потужність.

Границю рекуперації можна уточнити за відомим співвідношенням $S_{\text{гр}} = -R_2/R_1$. Для двигунів великої потужності $R_1 \ll R_2$ границя рекуперації має місце при великих значеннях ковзання. Для двигунів малої потужності опори статора і ротора є зіставлені і границя рекуперації може бути в діапазоні ковзання $-1 < s < 0$. Щодо вказаних двигунів потужностями 250 та 5,5 кВт, їх границі рекуперації відповідають ковзанню $-0,84$ та $-0,87$.

Для знаходження мінімального і максимального кутів фази струму (φ_{min} та φ_{max}), зручно скористатися аналітичним виразом, який можна отримати зі складових рівняння кругової діаграми. Для цього побудуємо дотичні ON і OM , які перетинатимуть коло у точках K і L відповідно. При цьому кут між вектором напруги U_1 і відрізком OK відповідатиме значенню φ_{min} , а OL - φ_{max} . З властивостей дотичної відомо, що вона утворює прямиий кут з радіусом кола, тобто з KO_1 та LO_1 . Радіус кола позначимо ρ . Тоді:

$$\rho = \frac{\bar{U}}{2(jx_1 \cdot c_1 + jx_2' \cdot c_1^2)}. \quad (10)$$

Гіпотенуза прямокутного трикутника OO_1 є сумою векторів струму неробочого ходу I_0 та радіуса ρ , тобто:

$$\overline{OO_1} = \overline{I_0} + \rho. \quad (11)$$

Вираз для струму неробочого ходу наступний:

$$\overline{I_0} = \frac{\overline{U}}{(r_1 + jx_1) + (r_m + jx_2)}. \quad (12)$$

З урахуванням цього:

$$\overline{OO_1} = \frac{\overline{U}}{(r_1 + jx_1) + (r_m + jx_2)} + \frac{\overline{U}}{2(x_1 \cdot c_1 + x_2 \cdot c_1^2)}. \quad (13)$$

Знайдемо кут $\angle KO_1O$, як арккосинус відношення ρ до OO_1 :

$$\angle KOO_1 = \arccos\left(\frac{\rho}{OO_1}\right). \quad (14)$$

Враховуючи те, що гіпотенуза OO_1 величина комплексна, тобто має модуль і аргумент, врахуємо це при остаточному запису виразу для отримання φ_{min} :

$$\varphi_{min} = |\angle KOO_1| - 90^\circ - |\arg(OO_1)|. \quad (15)$$

Аналогічно знаходиться і значення кута φ_{max} , а саме:

$$\varphi_{max} = 90^\circ + (90^\circ - |\angle KOO_1|) - (90^\circ - |\arg(OO_1)|). \quad (16)$$

З графіка залежності значення кута фази струму (рис. 2), а також аналітичних виразів (15) та (16) видно, що чим вищі енергетичні показники двигуна (η і $\cos\varphi$), тим менше значення φ_{min} . Так, наприклад для двигуна 4A355S2 потужністю 250 кВт і високими енергетичними показниками кут φ_{min} становить 20,3, а для двигуна 4A132M8 потужністю 5,5 кВт з менш низькими енергетичними показниками 38,9 ел.град.

Від енергетичних показників також залежить і значення φ_{max} . Для приведених вище двигунів φ_{max} дорівнює 159,3 і 134,8 ел.град. відповідно. Зазначені діапазони отримали експериментальне підтвердження на математичній моделі узагальненої електричної машини в осях α , β . Різниця розрахунків в порівнянні з експериментом не перевищує 1,5 ел. град. При врахуванні в моделі нелінійностей АД різниця зростає до 2 ел.град.

Таким чином, отриманий на основі кругової діаграми аналітичний вираз для знаходження φ_{min} і φ_{max} дозволить визначити межу

зміни кута фази струму і збільшити точність визначення коефіцієнтів при ідентифікації параметрів множини

$$\alpha = f(U_1, \varphi).$$

Список використаної літератури

1. Андрущенко О.А. Природа нестійких режимів в розімкнутій системі електроприводу "Тиристорний перетворювач - асинхронний двигун" / О.А. Андрущенко, А.О.Бойко – Львів: Видавнич.дім Екоінформ. – № 2. – 2006. – С.6-7.

2 Андрущенко О.А. Ідентифікація вихідної напруги тиристорного перетворювача за параметрами комутації вентилів / О.А.Андрущенко, А.В.Бібік // Вісник Нац.техніч. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». – Харків: – 2008. – № 30. – С.409-411.

Отримано 01.12.2010



Андрущенко
Олег Андрійович,
д-р. техн. наук, проф. каф.
«Електромеханіч. системи з
комп'ютерн. управлінням»
Одеськ. нац. політехн.
ун-ту
тел. (048) 734-85-81
e-mail: aoattl@mail.ru



Бібік
Артур Віталійович,
аспірант тієї ж кафедри
e-mail: CJ51@rambler.ru