

Акад. наук Чуваш. респ. – 2000. – № 1. – С. 42–48. 3. Ли Дж. Ф. Новое в механизированной добыче нефти: перевод с англ. / Ли Дж. Ф., Амосо Т. // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. – 1992. – № 9. – С. 10–16. 4. Бульбас В.М. Диагностика свердловини з глибинною штанговою помпою / В.М. Бульбас, Б.Д. Денис, Б.С. Калужний // Науково-виробничий збірник “Нафтова і газова промисловість”. – 2001. – № 1. – С. 27–29. 5. Маляр А.В. Використання нейромережі для побудови системи керування електроприводом верстатогойдалки / А.В. Маляр, А.С. Андрейшин // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2011. – № 707: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 77–82. 6. Ф. Уоссермен. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. [Пер. на рус. язык, Ю. А. Зуев, В. А. Точенов]. – М.: Мир, 1992. – 184 с.

УДК 621.32

В.С. Маляр, І.А. Добушовська  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ТЗЕ

## ПУСКОВІ ВЛАСТИВОСТІ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ЄМНІСНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ ІНДУКТИВНОГО ОПОРУ ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ

© Маляр В.С., Добушовська І.А., 2012

Розглядається вплив конденсаторів в обмотці збудження на пускові властивості синхронних двигунів. Виконано дослідження впливу величини ємності конденсаторів на характер перебігу асинхронного пуску. В основу алгоритму покладено математичну модель явнополюсного синхронного двигуна, в якій враховується насичення магнітопроводу як основним магнітним потоком, так і потоками розсіювання стержнів пускової обмотки.

*Ключові слова:* синхронний двигун, пускові характеристики, ємнісна компенсація.

The influence of capacitors in excitation winding on the starting characteristics of synchronous motors is discussed. The investigation of the influence of capacitance value on the character of the course of asynchronous starting is performed. Mathematical model of salient-pole synchronous motor is set as base for the algorithm, and considers saturation of magnet wire as main magnetic flux and scattering fluxes of cores of starting winding.

*Key words:* synchronous motor, starting characteristics, capacitive compensation.

### Вступ

В електроприводах великої потужності використовують явнополюсні синхронні двигуни (ЯСД). Їх динамічні властивості забезпечуються регулюванням струму збудження та наявністю демпферної обмотки, а економічність і доцільність використання доведена на практиці експлуатації впродовж багатьох років. Основним недоліком цих двигунів є порівняно невисокий пусковий електромагнітний момент, який вони розвивають під час асинхронного пуску. Крім того, несиметрія ротора ЯСД зумовлює провал в електромагнітному моментові статичної асинхронної характеристики, тобто погіршує пускові властивості двигуна. Частково проблема підвищення пускового моменту вирішується відповідним конструктивним виконанням розміщеної на роторі пускової обмотки, однак питання покращення пускових властивостей ЯСД не можна вважати вирішеним на належному рівні, що зумовлює неперервний пошук шляхів і засобів забезпечення необхідних пускових характеристик. Проблема дослідження процесів в ЯСД під час пуску має важливе практичне значення, а розроблення ефективних методів їх аналізу як в перехідних, так і в усталених режимах є актуальною задачею.

### Аналіз останніх досліджень та постановка задачі.

Ідея використати обмотку збудження для покращення пускових властивостей ЯСД в літературі відома давно [1], однак вибір раціонального значення величини ємності конденсаторів залишається не

вирішеним до тепер, тому в технічній літературі цій проблемі приділяється значна увага [2–5]. Розроблені в [2] і розвинуті в [4, 5] методи аналізу роботи синхронних двигунів засновані на використанні заступних схем, а тому не завжди забезпечують достовірність отриманих результатів розрахунку, тому потребують експериментальної перевірки. Аналітичні методи розрахунку процесів пуску ЯСД не дають змоги виявити всі явища, які зумовлені, з одного боку, наявністю конденсаторів в обмотці збудження, а з іншого, явнопольосністю конструкції та насиченням магнітопроводу як на шляху основного магнітного потоку, так і потоків розсіювання. Оскільки експерименти над ЯСД великої потужності надто дорогі, а випускаються вони порівняно невеликими партіями, то єдино прийнятним методом дослідження є математичне моделювання. Для цього необхідно мати високого рівня адекватності математичні моделі, які б давали достовірні результати.

### Постановка проблеми

Наявність конденсаторів може зумовлювати появу резонансних явищ як на основній, так і на вищих гармоніках. Це може зумовити не тільки появу перенапруг, але й значного провалу або підвищення електромагнітного моменту  $i$ , як наслідок, незапуску двигуна.

ЯСД мають магнітну та електричну несиметрію, у результаті чого розподіл магнітної індукції у повітряному проміжку значно відрізняється від синусоїдного, а електромагнітний момент в асинхронному режимі має постійну та змінну складові. Крім того, на процеси в ЯСД впливає насичення магнітопроводу, а тому вони належать до найскладніших для математичного моделювання електричних машин, і достовірні результати розрахунку, які дають змогу відмовитись від натурних експериментів, можна отримати лише на підставі використання математичних моделей високого рівня адекватності.

Запропонований в [3] метод дає змогу розраховувати статичні характеристики ЯСД з конденсаторами в обмотці збудження з урахуванням перелічених вище чинників. Однак вибір значення ємності конденсаторів за статичною характеристикою потребує перевірки перебігу перехідного процесу під час пуску, тобто в динамічному режимі. Вирішенню зазначеної проблеми присвячена стаття.

### Виклад основного матеріалу

Розглянемо роботу ЯСД, трифазна обмотка статора якого симетрична і живиться від мережі з симетричною системою напруг, а на роторі розташована обмотка збудження й пускова з  $n$  стержнями на полюсі. У зв'язку з симетрією трифазну обмотку статора без втрати точності замінимо двома ортогональними контурами, розміщеними по відомих осях  $d, q$ . Оскільки пускова обмотка є визначальною під час пуску, то її не перетворюємо і розглядатимемо реальні контури, які утворюють стержні разом із короткозамикаючими кільцями. Надалі відповідні величини, які належать до зазначених контурів, позначатимемо індексами  $d, q, 1, \dots, n, f$ . За таких умов динамічні процеси, які відбуваються в ЯСД, описуються нелінійною системою диференціальних рівнянь (ДР) електричної рівноваги

$$\frac{dy_d}{dt} = wy_q - ri_d + u_d;$$

$$\frac{dy_q}{dt} = -wy_d - ri_q + u_q;$$

$$\frac{dy_1}{dt} = -r_{1,1}i_1 + r_{1,2}i_2 - r_{1,n}i_n;$$

$$\frac{dy_2}{dt} = r_{2,1}i_1 - r_{2,2}i_2 + r_{2,3}i_n;$$

**М**

$$\frac{dy_{n-1}}{dt} = -r_{n-1,n-2}i_{n-2} + r_{n-1,n-1}i_{n-1} - r_{n-1,n}i_n; \quad (1a)$$

$$\frac{dy_n}{dt} = -r_{n,1}i_1 + r_{n,n-1}i_{n-1} - r_{n,n}i_n;$$

$$\frac{dy_f}{dt} = -R_f i_f + u_f$$

та динаміки руху ротора

$$\frac{dq}{dt} = w - w_0; \quad (16)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{p_0}{J} (M_e - M_\epsilon),$$

де  $Y_d, Y_q, Y_1, \mathbf{K}, Y_n, Y_f, i_d, i_q, i_1, \mathbf{K}, i_n, i_f$ , – потокозчеплення та струми відповідних контурів;  $r, r_f, r_{jk}$  – активні опори контурів d та q статора (r), обмотки збудження (r<sub>f</sub>) та демпферних  $r_{jk}$ , власних – при  $j = k$  і взаємних – при  $j \neq k$ ;  $u_d = U_m \sin q$ ,  $u_q = U_m \cos q$  – проекції на осі d, q зображувального вектора напруги статора;  $q$  – кут вибігу ротора;  $u_f$  – прикладена до обмотки збудження напруга;  $\omega$  – миттєве значення кутової швидкості обертання ротора;  $M_\epsilon, M_e$  – момент навантаження на валу двигуна та електромагнітний;  $J$  – момент інерції системи електроприводу.

Напруга замкненої на конденсатори ємністю  $C$  обмотки збудження дорівнює напрузі на конденсаторах, тобто  $u_f = u_C$ , тому повна система ДР електромеханічної рівноваги в асинхронному режимі СД складається з рівнянь (1) та рівняння

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{i_f}{C}. \quad (2)$$

Перейдемо до так званого синхронного часу  $t = w_0 t$ , а також, оскільки розглядається процес пуску, доцільно перейти від кутової швидкості  $w$  до ковзання  $s$ . В результаті отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{d(w_0 Y_d)}{dt} &= (1-s)w_0 Y_q - r_{i_d} + U_m \sin q; \\ \frac{d(w_0 Y_q)}{dt} &= -(1-s)w_0 Y_d - r_{i_q} + U_m \cos q; \\ \frac{d(w_0 Y_1)}{dt} &= -r_{1,1} i_1 + r_{1,2} i_2 - r_{1,n} i_n; \\ \frac{d(w_0 Y_2)}{dt} &= +r_{2,1} i_1 - r_{2,2} i_2 + r_{2,3} i_n; \\ &\quad \mathbf{M} \\ \frac{d(w_0 Y_{n-1})}{dt} &= -r_{n-1,n-2} i_{n-2} + r_{n-1,n-1} i_{n-1} - r_{n-1,n} i_n; \\ \frac{d(w_0 Y_n)}{dt} &= -r_{n,1} i_1 + r_{n,n-1} i_{n-1} - r_{n,n} i_n; \\ \frac{d(w_0 Y_f)}{dt} &= -r_f i_f + u_C; \\ \frac{dq}{dt} &= -s; \\ \frac{ds}{dt} &= \frac{p_0}{w_0^2 J} (M_c - M_e); \\ \frac{du_c}{dt} &= \frac{i_f}{w_0 C}. \end{aligned} \quad (3)$$

Кут вибігу ротора в асинхронному режимі є неперервно змінною величиною і визначається за формулою  $q = g - t$ , де  $\gamma$  – кут повороту ротора, а ковзання коливається відносно деякого середнього значення

$$s_c = \frac{1}{T_a} \int_0^{T_a} s dt,$$

де  $T_a$  – період зміни ковзання.

За умови постійного ковзання  $s$  ротора змінні стану змінюються за періодичним законом з періодом  $T_a = 2p/s$ , а періодичні залежності координат можна отримати як результат розв'язування задачі Коші. Однак здійснювати вибір ємності конденсаторів шляхом розв'язування еволюційної задачі неефективно з багатьох міркувань. Це зумовлює необхідність застосування методів розрахунку, які б давали змогу отримати періодичний розв'язок, не вдаючись до розрахунку перехідного процесу.

Задачу розрахунку стаціонарних періодичних процесів в асинхронному режимі роботи СД при заданому ковзанні найефективніше можна отримати шляхом розв'язування нелінійної двоточкової крайової задачі для системи ДР (3), а дослідити залежність електромагнітного моменту від значення ємності можна здійснити диференціальним сплайн-методом за розробленим в [3] алгоритмом розрахунку статичних характеристик.

Кожному середньому значенню ковзання відповідає періодична залежність координат, зокрема й електромагнітного моменту. Тому, вибравши значення ємності за розробленим алгоритмом розрахунку усталених асинхронних режимів, необхідно дослідити перебіг перехідного процесу в пусковому режимі. У зв'язку з цим задача вибору необхідного для успішного запуску СД значення величини ємності є доволі складною. Її можна розв'язати в два етапи. Спочатку необхідно визначити величину ємності конденсаторів, які забезпечують потрібне для пуску двигуна значення рушійного електромагнітного моменту, тобто при значенні ковзання  $s = 1,0$ , а потім розрахувати перехідний процес за умови замикання обмотки збудження на конденсатори визначеною з першого етапу ємністю  $C$  шляхом чисельного інтегрування системи ДР (3). Це пояснюється тим, що вибране за умови забезпечення необхідного рушійного електромагнітного моменту значення ємності не завжди забезпечує успішний перебіг процесу розгону СД, оскільки при цьому можуть виникати резонансні явища, які зумовлюють провали в кривій моменту.

Система (3) нелінійна внаслідок наявності рівняння руху ротора та нелінійної залежності потокозчеплень від струмів. Тому для розрахунку перехідного процесу, який виникає під час пуску СД, необхідно проінтегрувати систему ДР (3) одним із чисельних методів. Коефіцієнтами матриці Якобі системи є диференціальні індуктивності контурів СД. Вони визначаються шляхом розрахунку магнітного поля в повітряному проміжку на основі представлення магнітопроводу розгалуженою заступною схемою відповідно до викладеного в [6]. Крім того, оскільки під час пуску в стержнях

виникають значні струми, то необхідно враховувати явище насичення магнітопроводу, зумовленого потоками розсіювання. Для цього використовується окрема крива намагнічування заліза ротора потоками розсіювання кожного стержня.

Нижче наведені результати математичного моделювання пускових режимів синхронного двигуна СДС3-17-41-16 ( $P = 1600$  кВт,  $U = 6$  кВ,  $I = 181$  А,  $I_f = 290$  А,  $2p = 16$ ,  $n = 8$ ).

На рис. 1 зображена залежність середнього значення електромагнітного моменту від величини ємності конденсаторів в обмотці збудження при значенні ковзання  $s = 1,0$ , отримана викладеним в [3] методом. Як видно з кривої, за деяких значень ємності конденсаторів рушійний електромагнітний момент має від'ємне значення. Користуючись даними розрахунку, можна вибрати ті значення ємності, які має сенс досліджувати на перебіг перехідного процесу під час пуску.

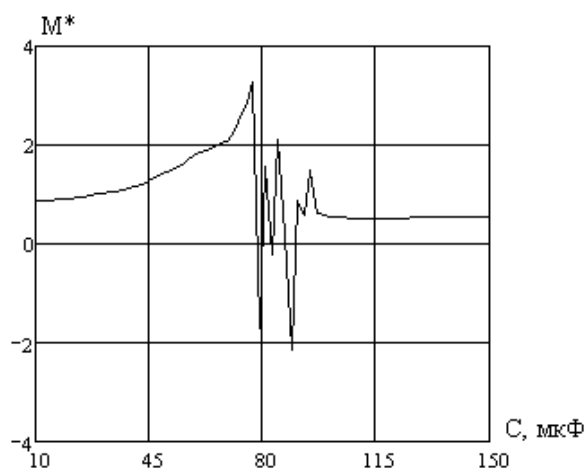


Рис. 1. Залежність середнього значення електромагнітного моменту від величини ємності конденсаторів в обмотці збудження при значенні ковзання  $s = 1,0$

Вибір необхідного значення ємності конденсаторів за статичною характеристикою потребує перевірки поведінки двигуна в динамічному режимі процесу пуску, оскільки при цьому може за деяких значень швидкості обертання ротора виникати резонансний режим і, крім того, існує відомий провал в механічній характеристиці електромагнітного моменту на швидкості, яка дорівнює половині від номінальної, що може призвести до незапуску двигуна. Крім того, від величини ємності конденсаторів залежить тривалість процесу пуску при заданому значенні моменту на валу.

Розраховані відповідно до викладеного алгоритму залежності від ковзання електромагнітного моменту та струму якоря під час пуску синхронного двигуна СДС3-17-41-16 з конденсатором в обмотці збудження ємністю  $C=75$  мкФ і номінальному навантаженні наведені на рис. 2, а з конденсатором ємністю  $C = 15$  мкФ і навантаженні  $M_c = 0,5M_n$  – на рис. 3. Як показали дослідження, за значення ємності 15 мкФ пуск двигуна з номінальним моментом на валу неможливий, оскільки не забезпечується необхідне середнє значення електромагнітного моменту.

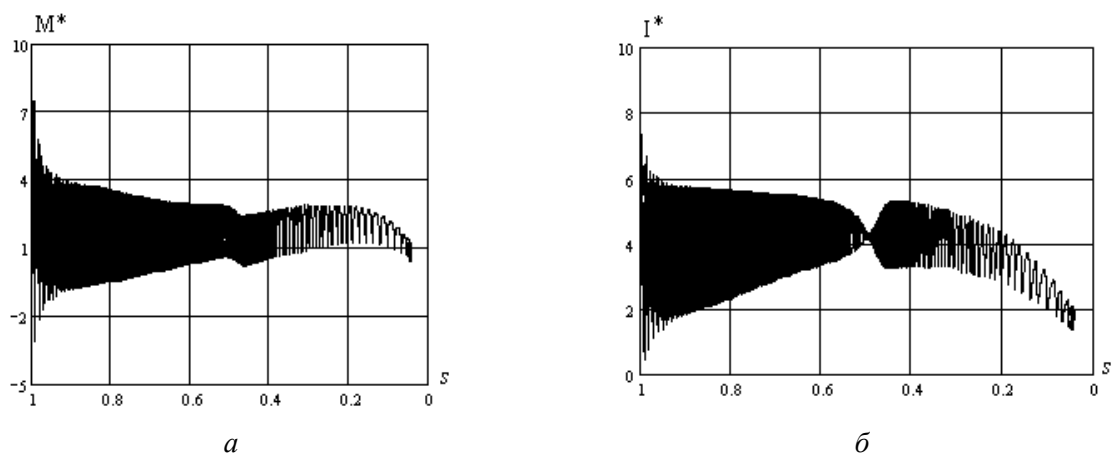


Рис. 2. Залежності від ковзання електромагнітного моменту (а) та струму якоря (б) під час пуску СД з конденсатором в обмотці збудження ємністю 75 мкФ і номінального навантаження

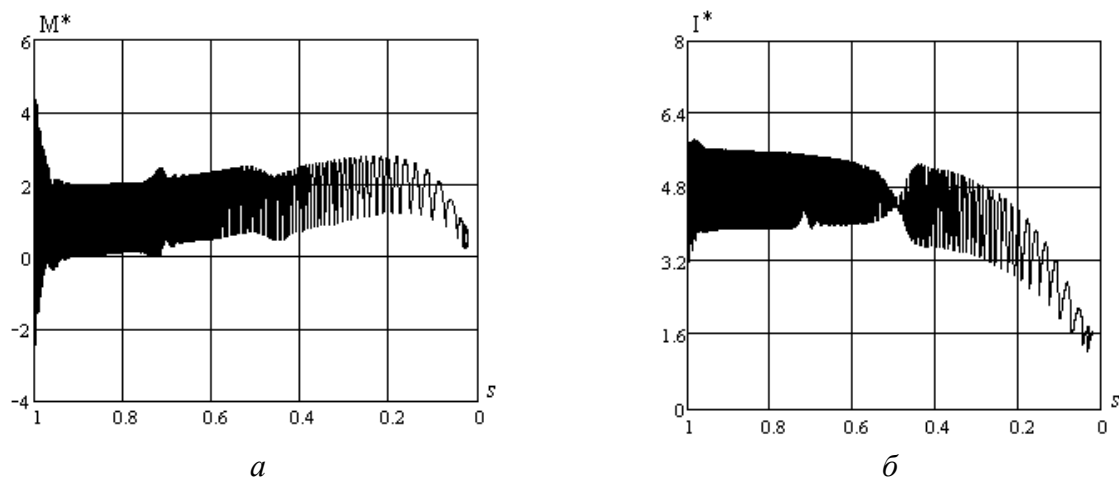


Рис. 3. Залежності від ковзання електромагнітного моменту (а) та струму якоря (б) під час пуску СД з конденсатором в обмотці збудження ємністю 15 мкФ і моментові навантаження  $M_c = 0,5M_n$

### Висновки

Запропонований алгоритм та розроблені на його основі програми розрахунку дають можливість здійснювати вибір конденсаторів для вмикання в обмотку збудження з метою компенсації індуктивного реактивного опору та досліджувати вплив величини ємності на пускові

властивості. Задача розв'язується в два етапи: на першому розраховується проекційним методом розв'язування крайової задачі статична характеристика як залежність пускового моменту від величини ємності конденсаторів, а на другому для вибраного значення ємності здійснюється розрахунок перехідного процесу з метою дослідження перебігу перехідного процесу.

1. Велин Н.В. Статический возбудитель синхронного двигателя с глухо подключенным конденсатором // *Электротехника*. – 1973. – № 12. – С. 35–36. 2. Кириченко В.І., Бородай В.А., Яланський А.А. Улучшение пусковых свойств крупных синхронных машин // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля*. – 2003. – № 6[64] – С. 38–40. 3. Маляр В.С. Статичні характеристики синхронного двигуна з конденсаторами в колі збудження / В.С. Маляр, А.В. Маляр, І.А. Добушовська // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 1. – С. 57–62. 4. Пивняк Г.Г., Кириченко В.І., Бородай В.А. О новом направлении усовершенствования крупных синхронных электродвигателей // *Технічна електродинаміка. Темат. вип. “Проблеми сучасної електротехніки”*. – 2002, ч. 2. – С. 62–65. 5. Пивняк Г.Г. Повышение надежности и экономичности мощных синхронных приводов с тяжелым пуском / Г.Г. Пивняк, В.В. Кириченко, В.А. Бородай // *Проблеми автоматизированного электропривода. Теория и практика*. – 2007. – С. 553–555. 6. Фильц Р.В., Лябук Н.Н. Математическое моделирование явнопольных синхронных машин. – Львов: *Світ*, 1991. – 176 с.

УДК 519.711.3 : 621.311.243

В.І. Мороз, О.В. Турич

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ЕАП

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

© Мороз В.І., Турич О.В., 2012

**Проаналізовано відомі моделі елементів сонячних батарей. Визначено основні математичні рівняння, що описують фотоелектричні модулі. Також наведено основні переваги використання однодіодної схеми заміщення.**

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, сонячні батареї, напівпровідникові фотоелектричні системи.

**The analysis of the existing models of solar cells is presented. The basic mathematical equations that describe the photovoltaic modules are given. The major advantages of the single diode equivalent circuit are shown.**

**Key words:** Computer simulation, Photovoltaic cells, Solar power generation.

**Постановка проблеми.** У зв'язку з дефіцитом викопного палива, підвищенням цін на нафту, глобальним потеплінням і значним погіршенням стану навколишнього середовища та екосистем мають велике значення перспективні стимули для розвитку альтернативних джерел енергії з високим ККД і низьким рівнем викидів. Серед відновлюваних джерел енергії фотоелектричні пристрої (*photovoltaic* – PV) можна вважати найважливішими, тому що сонячна енергія повсюдно поширена, широко доступна і абсолютно безкоштовна. Останнім часом фотоелектричні системи виходять на передній план і в електричній промисловості, бо можуть генерувати постійний струм без негативного впливу на навколишнє середовище. Оскільки така система є напівпровідниковим приладом, фотоелектрична система є статичною, суцільною, і такою, що не містить рухомих частин, що робить її експлуатацію та технічне обслуговування низьковитратними. Хоча фотоелектрична система потребує для виготовлення значного капіталу і має не надто високу