

DOI: 10.31319/2519-2884.44.2024.15

УДК 621.313.323

**Чугунов Д.В.**, здобувач третього (доктор філософії) рівня, e-mail: davidchugunov00@gmail.com

**Нізімов В.Б.**, д.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-4580-5262, email: vikbor36@gmail.com

**Кирпа М.Е.**, здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

**Chugunov David**, Postgraduate Student

**Nizimov Victor**, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

**Курпа Maksym**, master's degree student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

### ПУСКОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ ТРН–СД З НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ В КОНТУРІ ЗБУДЖЕННЯ

*У статті розв'язана актуальна наукова задача, яка полягає в підвищенні пускового моменту двигуна при обмеженні струмів статора при живленні від тиристорного перетворювача напруги. Наведена принципова схема системи тиристорного перетворювача напруги — синхронний двигун та виконаний математичний опис. Визначені статичні та динамічні характеристики асинхронного пуску синхронного двигуна.*

**Ключові слова:** синхронний двигун; регулятор напруги; статичні та динамічні характеристики.

*The article solves an actual scientific problem, which consists in increasing the starting motor when the stator currents are limited when powered by a thyristor voltage converter. The schematic diagram of the thyristor voltage converter system — synchronous motor is given and a mathematical description is made. Static and dynamic characteristics of asynchronous start-up of a synchronous motor are determined*

**Keywords:** synchronous motor; voltage regulator; static and dynamic characteristics.

#### Постановка проблеми

Пускові системи для синхронних двигунів (СД) можуть бути реалізовані за схемами: тиристорний перетворювач напруги — синхронний двигун (ТПН–СД); тиристорний перетворювач частоти — синхронний двигун (ТПЧ–СД) та ін. [1, 2].

Квадратична залежність моменту від напруги не дозволяє створити моменти, які обертаються, що перевищують момент природної характеристики СД при одночасному обмеженні пускового струму на заданому рівні.

Таким чином, істотним недоліком цього способу пуску є обмеження моментних характеристик СД.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Підвищення пускового моменту можливе як зі сторони статора, наприклад, підвищенням напруги живлення за рахунок перемикання анцапф трансформатора на час пуску, так і зі сторони обмотки збудження за рахунок введення додаткового елемента (пусковий резистор, ємнісний накопичувач енергії (ЄНЕ)). Мінімальний зсув між ЕРС і струмом повинен складати  $\pi/4$ . При такому куті зрушення між ЕРС і струмом досягається оптимальна величина пускового резистора, при якому струм в обмотці збудження (ОЗ) зменшується у  $\pi/8$  разів.

Існуючі системи параметричного пуску (ТРН–СД, ТПЧ–СД) забезпечують зниження напруги живлення СД, а також пускового моменту та струму статора.

Введення в обмотку збудження пускового резистора забезпечує зменшення фазового зсуву між ЕРС і струмом статора.

Істотне підвищення обертового моменту СД під час пуску може бути досягнуто за рахунок збільшення моменту, обумовленого обмоткою збудження при включенні ємнісних нако-

пичувачів енергії (ЄНЕ) до контуру збудження або ускладненням конструкції обмотки збудження (ОЗ) за рахунок включення ємнісних елементів [3, 6].

Обмеження струмових навантажень двигуна забезпечується вмиканням регулятора напруги.

### Формулювання мети дослідження

Метою роботи є дослідження статичних та динамічних характеристик при керуванні напругою ТРН в статорі СД та впливу ЄНЕ на пускові режими при різних моментах статичного опору виробничих механізмів.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Принципова схема пуску СД наведена на рис.1.

Оскільки розгін СД відбувається під дією середнього значення електромагнітного моменту, що створюється пусковою обмоткою і обмоткою збудження, то доцільно визначити пускові характеристики двигуна в системі ТРН-СД з ЄНЕ.

Вказані розрахунки виконані за еквівалентними схемами заміщення СД для подовжньої і поперечної осей для першої гармоніки напруги тиристорного регулятора.

Середнє значення електромагнітного моменту [4, 5]:

$$M_a = U \cdot I_{np.в.} - I_{np}^2 r_1 - I_{об}^2 \frac{r_1}{1-s}.$$

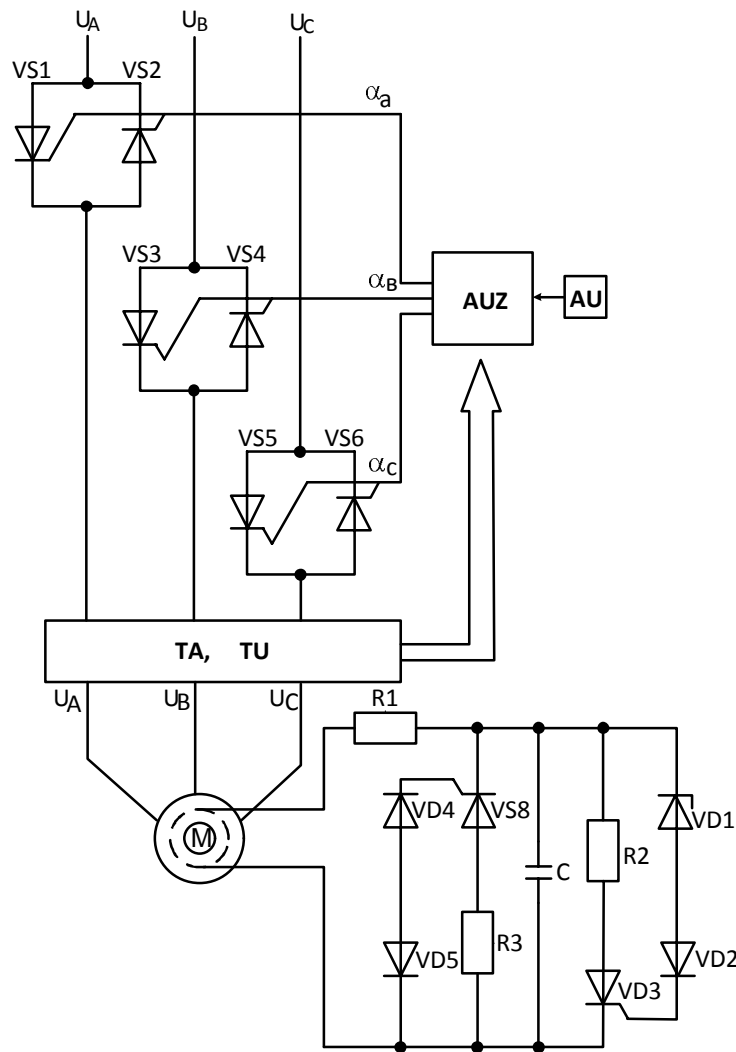


Рис. 1. Принципова схема пуску СД

Струми і їх відповідні складові за поздовжньою та поперечною осями:

$$\dot{I}_{np} = 0,5(\dot{I}_d + \dot{I}_q); \quad I_{np} = \sqrt{I_{np.в.}^2 + I_{np.мн.}^2};$$

$$\dot{I}_d = \frac{\dot{U}}{Z_{ds}}; \quad (1)$$

$$\dot{I}_{o\delta} = 0,5(\dot{I}_d - \dot{I}_q); \quad I_{o\delta} = \sqrt{I_{o\delta.в.}^2 + I_{o\delta.мн.}^2};$$

$$\dot{I}_q = \frac{\dot{U}}{Z_{qs}}. \quad (2)$$

де  $Z_{ds}$  — опір поздовжньої схеми заміщення,

$$Z_{ds} = jx_{\sigma} + \left[ \frac{1}{jx_{ad}} + \frac{1}{j \cdot \left( x_{\sigma f} - \frac{x_c}{s^2} \right) + \frac{R_f(K_{II} + 1)}{s}} + \frac{1}{j \cdot x_{kd} + \frac{r_{kd}}{s}} \right]^{-1};$$

$Z_{qs}$  — опір поперечної схеми заміщення,

$$Z_{qs} = jx_{\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{jx_{aq}} + \frac{1}{\frac{r_{kq}}{s}} + jx_{kq}};$$

$I_{np}$  — струм статора основної кутової частоти,

$$I_{np} = \frac{U \left( Z_d + Z_q + \frac{2r_1}{2s-1} \right)}{(Z_d + r_1) \left( Z_q + \frac{r_1}{2s-1} \right) + (Z_q + r_1) \left( Z_d + \frac{r_1}{2s-1} \right)};$$

$I_{o\delta}$  — струм статора, кутової частоти  $(2s-1)$

$$I_{o\delta} = \frac{U(Z_q - Z_d)}{(Z_d + r_1) \left( Z_q + \frac{r_1}{2s-1} \right) + (Z_q + r_1) \left( Z_d + \frac{r_1}{2s-1} \right)}.$$

Пусковий струм статора СД

$$I_1 = \sqrt{I_{np}^2 + I_{o\delta}^2}.$$

Розрахунок статичних пускових характеристик, виконаний для синхронного двигуна типу СДС3–2000–100 з номінальною потужністю 2000 кВт, номінальною напругою статора  $U_{1н} = 6000$  В і номінальним струмом  $I_{1н} = 229$  А, 100 об/хв. Параметри ОЗ: номінальна напруга  $U_{fn} = 51$  В і номінальний струм ОЗ  $I_{fn} = 276$  А.

Режим асинхронного пуску СД з чотирикратним пусковим резистором був прийнятий як базовий варіант. На рис. 2 представлені пускові характеристики СД при послідовному включенні пускового резистора  $R1 = 4rf$  і ЄНЕ з ємністю 75 мкФ для різних значень напруги перетворювача  $U = 1; 0,9; 0,8; 0,7 U_H$  (криві 1–4). Залежності  $M = f(s)$  і  $I_s = j(s)$  природної характеристики при номінальній напрузі статора позначені цифрою 5. На рисунках прийнято позначення: АМ — середнє значення асинхронного моменту, в.о.; ТІРУС — модуль струму статора, в.о.

Аналіз розрахункових залежностей показує, що включення ЄНЕ дозволяє істотно збільшувати пускові моменти СД при обмеженні струму статора. При ковзаннях  $s = 0,1 \dots 0,15$  доцільно шунтувати ЄНЕ тиристорними ключами для підтримки вхідного моменту на рівні природної характеристики двигуна.

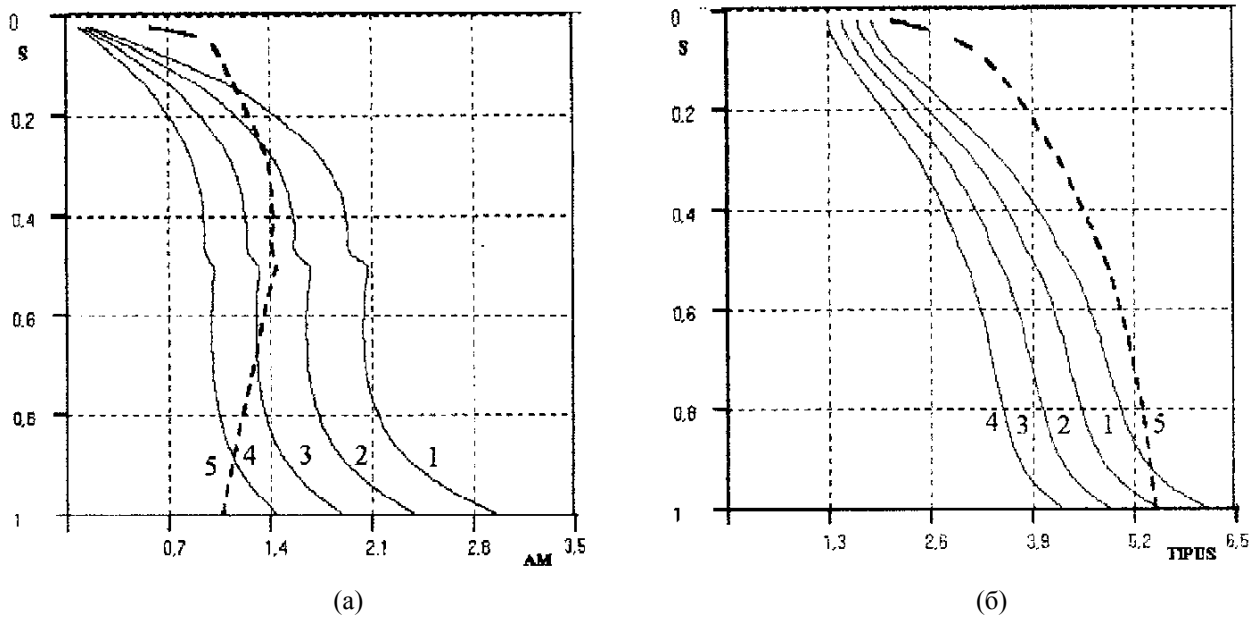


Рис. 2. Пускові статичні характеристики системи ТРН–СД з ЄНЕ

Для порівняльної оцінки вплив системи ТРН–СД з ЄНЕ на динаміку пускових режимів використовується повна система диференціальних рівнянь СД в осях  $d, q$  в системі відносних одиниць (в.о.):

$$\left. \begin{aligned} p\Psi_d &= -U \sin \theta - r_1 i_d - \Psi_q (1-s) \omega_0; \\ p\Psi_q &= -U \cos \theta - r_1 i_q + \Psi_d (1-s) \omega_0; \\ p\Psi_f &= U_f - U_c - i_f R_f; \\ p\Psi_{kd} &= -r_{kd} i_{kd}; \\ p\Psi_{kq} &= -r_{kq} i_{kq}; \\ p\theta &= S; \\ pS &= (M_c + \Psi_d i_q - \Psi_q i_d) / H_J; \\ pU_c &= x_c \cdot i_f. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де  $H_J$  — інерційна стала агрегату;  $x_c$  — відносне значення реактивного опору електричної ємності НЕ;  $x_c = \frac{K_{np}}{C}$ ;  $K_{np} = \frac{K_i K_u 10^6 I_n}{314 U_n}$  — коефіцієнт приведення для ємнісного опору НЕ;  $K_i$  та  $K_u$  — відповідно коефіцієнти приведення струму і напруги контуру збудження СД.

Для різних моментів статичного опору отримані розрахункові залежності режиму асинхронного пуску синхронного двигуна СДС3–2000–100.

Розрахункові залежності режиму керованого пуску СД при холостому ході представлені на рис. 3, на якому прийняті наступні позначення:  $M$  — асинхронний момент СД;  $i_s$  — модуль струму статора.

Аналіз розрахункових залежностей показує, що пусковий момент перевищує чотирикратне значення, а середнє значення обертового моменту знаходиться на двократному рівні. Пусковий струм не перевищує 6,5–кратного значення.

Розрахункові залежності пускових характеристик системи ТРН–СД з ЄНЕ при постійному статичному моменті  $M_c = 0,8 M_n$  представлені на рис. 4. Аналіз розрахункових залежностей показує, що пусковий момент СД досягає шестикратного значення при струмі статора 7,8 в.о.

При вентиляторному моменті статичного опору (рис. 5) пусковий момент складає 4,5-кратного значення при зниженні струму статора до 6,5 в.о.

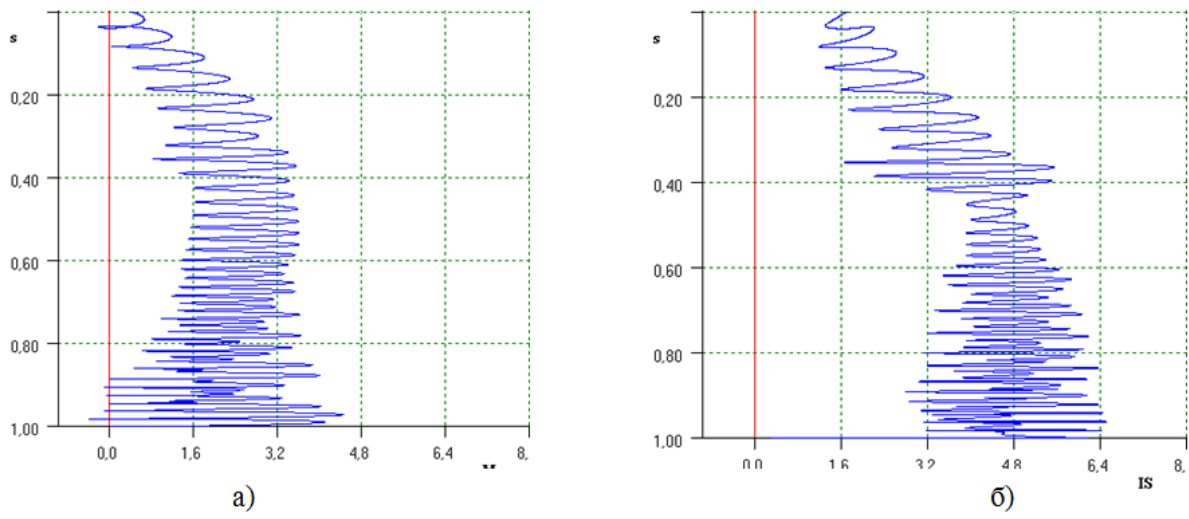


Рис. 3. Пуск СД в холосту: а)  $M=f(s)$ ; б)  $i_s=f(s)$

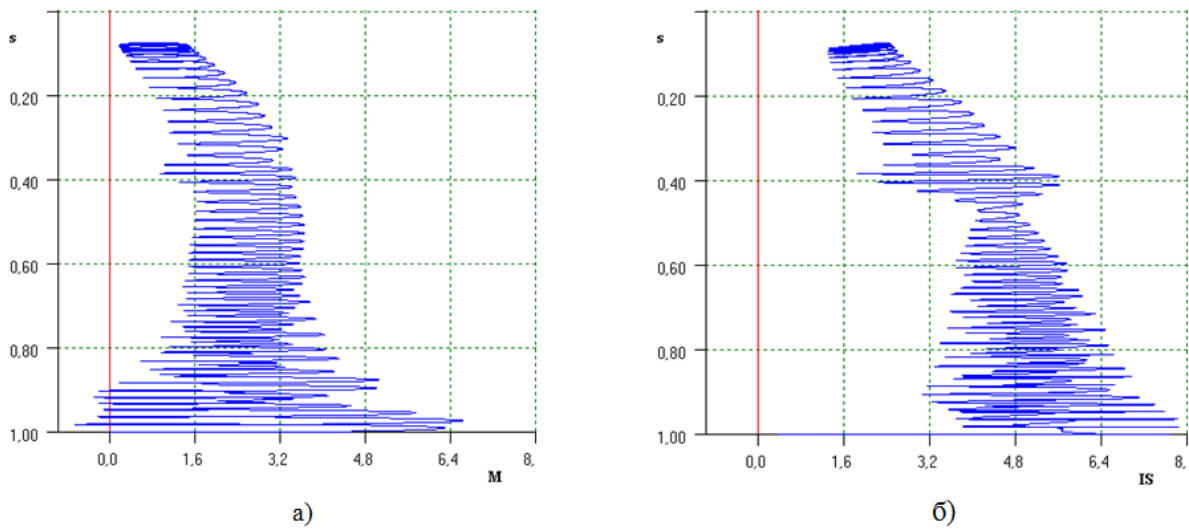


Рис. 4. Пуск СД при постійному моменті опору  $M_c = 0,8M_n$ : а)  $M = f(s)$ ; б)  $i_s = f(s)$

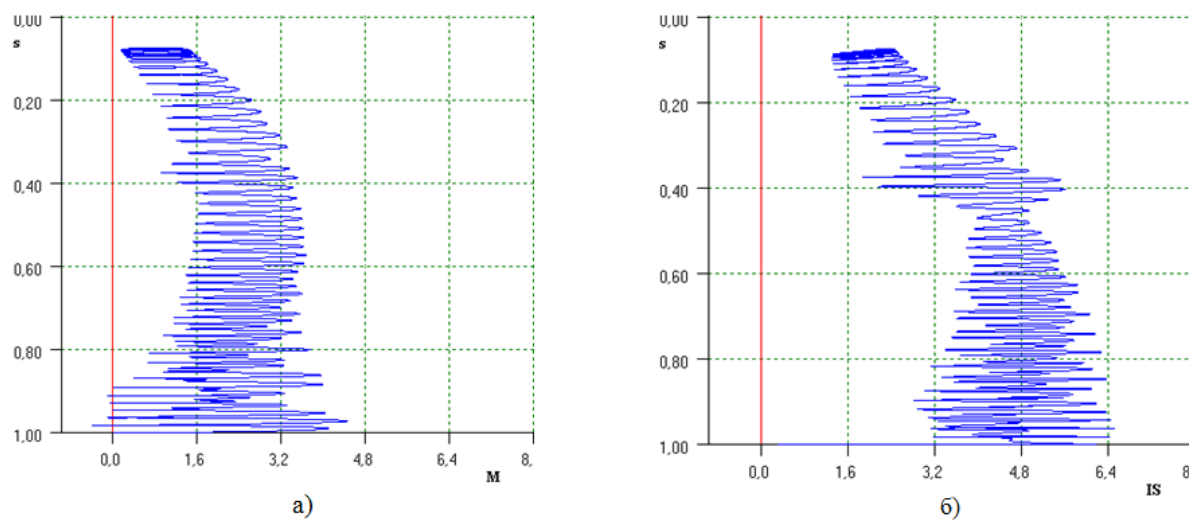


Рис. 5. Пуск СД при вентиляторному моменті опору: а)  $M=f(s)$ ; б)  $i_s=f(s)$

Для порівняльної оцінки впливу ЄНЕ на режими асинхронного пуску СД наведені залежності напруги фаз статора та електромагнітного моменту (рис. 6, а, б — з ЄНЕ; в, г — без ЄНЕ). При вмиканні ЄНЕ в контур збудження момент збільшився на 15 %, а час зменшився на 20 %.

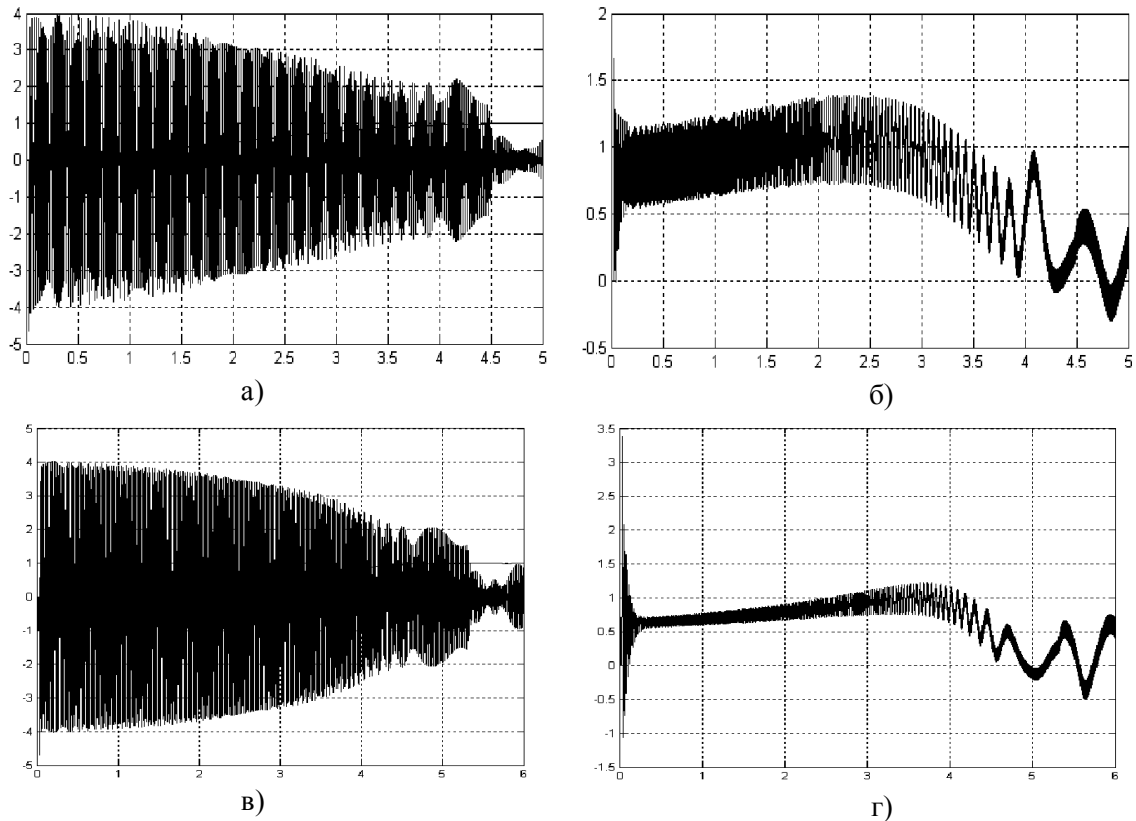


Рис. 6. Часові характеристики двигуна в системі ТРН-СД

### Висновки

Вмикання ємнісних накопичувачів енергії в обмотці збудження у поєднанні з тиристорним регулятором напруги в колі статора забезпечує необхідний асинхронний момент синхронного двигуна залежно від моменту статичного опору при зниженні струмового навантаження обмоток статора.

### Список використаної літератури

1. Півняк Г. Г., Кириченко В. І., Бородай В. А. Про новий напрямок удосконалення крупних синхронних електродвигунів// НАН України. Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Київ, 2002. Частина 2. С.62–65.
2. Мілих В. І. та ін. Дослідження синхронних машин [Текст]: лаб. практикум / В. І. Мілих, Б. О. Єгоров, Г. Г. Єгорова, А. Г. Мірошніченко, В. Д. Юхимчук; за ред. В. І. Мілих. Харків : НТУ «ХП», 2010. 117 с.
3. Родькін Д. І., Гладирь А. І. Система формування пускових характеристик електроприводів змінного струму з важкими умовами пуску. Кременчук : КДП, 2003. 10 с.
4. Квітка С. О. Електричні машини: асинхронні і синхронні машини. Лабораторний практикум / С.О. Квітка, О. В. Ковальов. Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2020. 189 с.

5. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посіб. / М. Г. Попович та ін. ; за заг. ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. Київ : Либідь, 2005. 680 с.
6. Спосіб пуску синхронного двигуна: пат. 98412 Україна. № 201103138; заявл. 17.03.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. 8 с.

## STARTING CHARACTERISTICS OF THE TRN-SD SYSTEM WITH ENERGY STORAGE IN THE EXCITATION CIRCUIT

### Abstract

With the simultaneous limitation of the starting current at a given level, the quadratic dependence of the moment on the voltage does not allow creating moments that rotate that exceed the moment of the natural characteristic of the synchronous motor, which is a significant disadvantage of this starting method. Therefore, the purpose of the work is to study the static and dynamic characteristics when controlling the voltage of the thyristor voltage regulator in the stator of a synchronous motor and the influence of the capacitive energy storage on the starting modes at different moments of static resistance of production mechanisms with using calculation dependencies.

For different moments of static resistance, calculated dependences of the asynchronous start mode of the synchronous motor were obtained. Analysis of calculated dependencies shows that the starting torque exceeds a fourfold value, and the average value of the torque is at a two-fold level. When the capacitive energy storage device was turned on in the excitation circuit, the moment increased by 15%, and the time decreased by 20%.

Turning on capacitive energy storage devices in the excitation winding in combination with a thyristor voltage regulator in the stator circuit provides the necessary asynchronous moment of the synchronous motor depending on the moment of static resistance when the current load of the stator windings is reduced.

### References

- [1] Pivniak H. H., Kyrychenko V. I., Borodai V. A. (2002) *Pro novyi napriamok udoskonalennia krupnykh synkhronnykh elektrodvuhuniv [About a new direction of improvement of large synchronous electric motors]* // NAN Ukrainy. Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vy-pusk : K. Chastyna 2, P.62–65. [in Ukraine].
- [2] Milykh V. I. ta in. (2010) *Doslidzhennia synkhronnykh mashyn [Research of synchronous machines]* [Tekst]: lab. praktykum / V. I. Milykh, B. O. Yehorov, H. H. Yehorova, A. H. Miroshnychenko, V. D. Yukhymchuk; za red. V. I. Milykh. Kharkiv : NTU «KhPI», 117 p. [in Ukraine].
- [3] Rodkin D. I., Hladyr A. I. (2003) *Systema formuvannia puskovykh kharakterystyk elektropryvodiv zminnoho strumu z vazhkymy umovamy pusku [The system for forming the starting characteristics of alternating current electric drives with difficult start-up conditions]*. Kremenchuk, KDPI, 10 p. [in Ukraine].
- [4] Kvitka S. O. (2020) *Elektrychni mashyny: asynkhronni i synkhronni mashyny [Electric machines: asynchronous and synchronous machines]*. Laboratornyi praktykum / S.O. Kvitka, O. V. Kovalov. Melitopol : Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr «Liuks», 189 p. [in Ukraine].
- [5] Popovych M. H. (2005) *Elektromekhanichni systemy avtomatychnoho keruvannia ta elektropryvody [Electromechanical systems of automatic control and electric drives]* : navch. Posibnyk / M. H. Popovych ta in. ; za zah. red. M. H. Popovycha, O. Yu. Lozynskoho. Kyiv : Lybid, 680 p. [in Ukraine].
- [6] *Sposib pusku synkhronnoho dvyhuna [Method of starting a synchronous motor]* : pat. 98412 Ukraina. № 201103138; zaiavl. 17.03.2011; opubl. 10.05.2012, Biul. № 9. 8 p. [in Ukraine].