

DOI: 10.31319/2519-2884.44.2024.16

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

**Ковтун Р.О.**, 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

**Kovtun Rostyslav**, master's degree student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

### СТАТИЧНІ МОМЕНТИ І СТРУМИ КОНТУРІВ СИНХРОННОГО ДВИГУНА З ЄМНІСНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ В РЕЖИМІ АСИНХРОННОГО ПУСКУ

*У статті розв'язана актуальна наукова задача, яка полягає у визначенні складових моментів та струмів контурів синхронного двигуна в режимі асинхронного пуску. Наведені вирази складових моментів та струмів схеми заміщення та алгоритм розрахунку. Визначені статичні характеристики асинхронного пуску синхронного двигуна з ємнісними накопичувачами енергії.*

**Ключові слова:** синхронний двигун; асинхронний пуск; статичні характеристики; ємнісний накопичувач енергії.

*The article solves an actual scientific problem, which consists in determining the component moments and currents of the circuits of a synchronous motor in the asynchronous start mode. Expressions of the component moments and currents of the substitution scheme and the calculation algorithm are given. The static characteristics of the asynchronous start-up of a synchronous motor with capacitive energy storage devices are determined.*

**Keywords:** synchronous motor; asynchronous start; static characteristics; capacitive energy storage.

#### Постановка проблеми

Для зрушення механізмів із значним моментом статичного опору необхідний відповідний пусковий момент. Найпростішим способом збільшення моменту являється вмикання в обмотку збудження (ОЗ) пускового резистора або ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ). У залежності від величини пускового резистора або ємності відбувається перерозподіл моментів і струмів між контурами двигуна. Визначення складових моментів і струмів є актуальною задачею.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Існуючі способи і пристрої для асинхронного пуску синхронного двигуна (СД) ґрунтуються на компенсації електромагнітної інерційності контурів збудження шляхом вмикання резисторів, накопичувальних акумуляторів енергії, а також компенсуючої електрорушійної сили [1—3].

У наведених роботах ніде не визначено вплив ЄНЕ на складові моментів і струмів контурів СД.

#### Формулювання мети дослідження

Метою роботи є дослідження впливу ємнісного накопичувача енергії в обмотці збудження на складові моментів і струмів у режимі асинхронного пуску.

#### Виклад основного матеріалу

Оскільки розгін СД відбувається під дією середнього значення електромагнітного моменту, що створюється пусковою обмоткою і обмоткою збудження, то доцільно визначити складові моментів і струмів контурів двигуна в режимі асинхронного пуску.

Вказані розрахунки виконані за еквівалентними схемами заміщення СД для подовжньої і поперечної осей.

Середнє значення електромагнітного моменту:

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

Струми та їх відповідні складові за поздовжньою та поперечною осями:

$$\dot{I}_{np} = 0,5(\dot{I}_d + \dot{I}_q); \quad I_{np} = \sqrt{I_{np.в.}^2 + I_{np.мн.}^2}; \quad (1)$$

$$\dot{I}_d = \frac{\dot{U}}{Z_{ds}}; \quad (2)$$

$$\dot{I}_{об} = 0,5(\dot{I}_d - \dot{I}_q); \quad I_{об} = \sqrt{I_{об.в.}^2 + I_{об.мн.}^2}; \quad (3)$$

$$\dot{I}_q = \frac{\dot{U}}{Z_{qs}}. \quad (4)$$

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,

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

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

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

Пусковий струм статора СД

$$I_1 = \sqrt{I_{np}^2 + I_{об}^2}.$$

Рівняння для визначення складових моментів та струмів кожного із роторних контурів:

$$M_f = 0,5 \dot{U}_{rd} \cdot \operatorname{Re}[\dot{I}_f] - R_{fd} (0,5|\dot{I}_f|)^2 + \frac{R_{fd}}{2s-1} (0,5|\dot{I}_f|)^2; \quad (5)$$

$$M_{kd} = 0,5 \dot{U}_{rd} \cdot \operatorname{Re}[\dot{I}_{kd}] - R_{kd} (0,5|\dot{I}_{kd}|)^2 + \frac{R_{kd}}{2s-1} (0,5|\dot{I}_{kd}|)^2; \quad (6)$$

$$M_{kq} = 0,5 \dot{U}_{rq} \cdot \operatorname{Re}[\dot{I}_{kq}] - R_{kq} (0,5|\dot{I}_{kq}|)^2 + \frac{R_{kq}}{2s-1} (0,5|\dot{I}_{kq}|)^2, \quad (7)$$

де  $R_{fd}$  — сумарний опір ОЗ і пускового резистора;  $U_{rd}$ ,  $U_{rq}$  — напруги на поздовжній і поперечній осях схеми заміщення.

Алгоритм розрахунку статичних характеристик наведений на рис. 1.

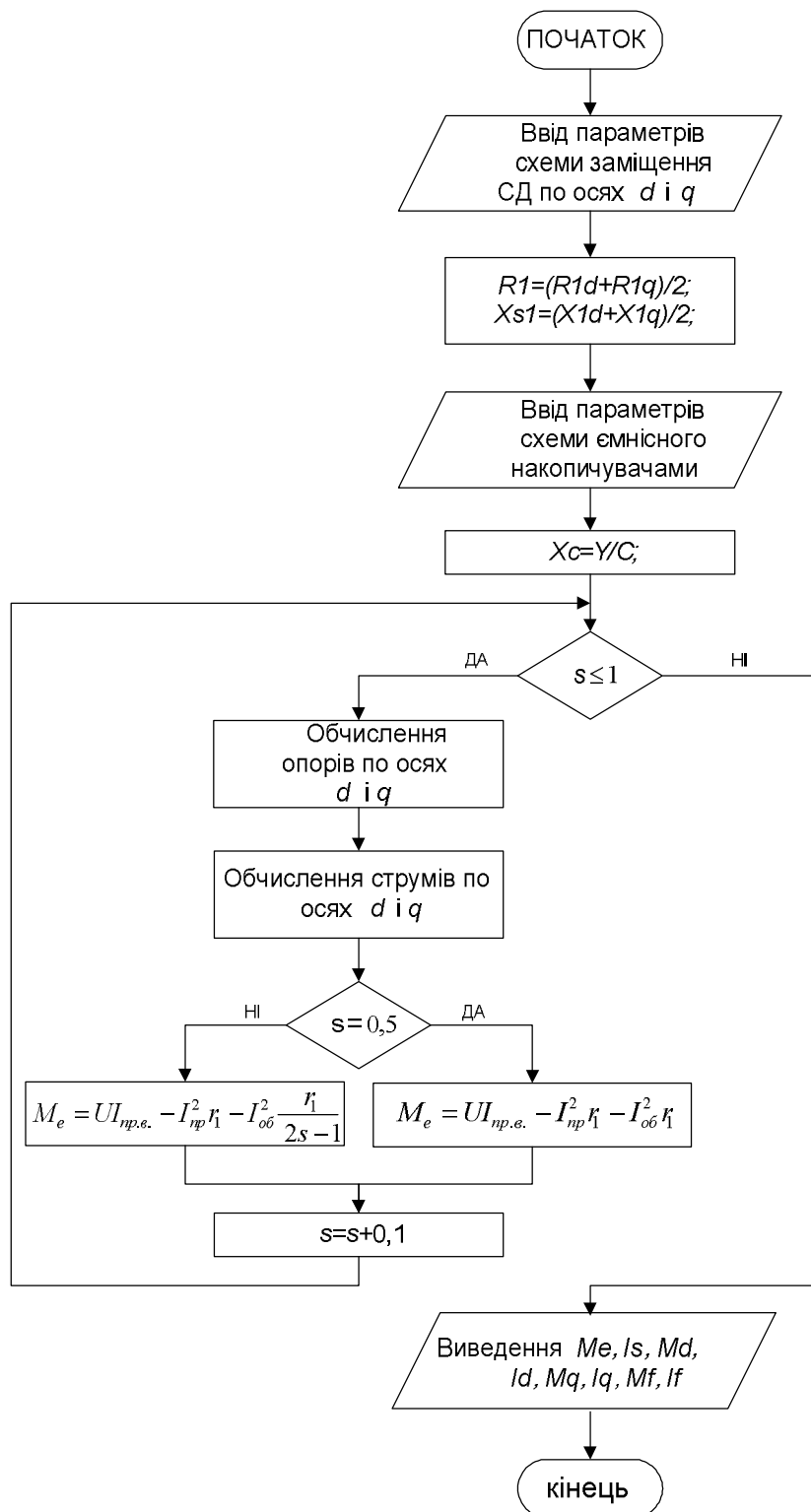


Рис. 1. Загальний алгоритм розрахунку статичних характеристик СД

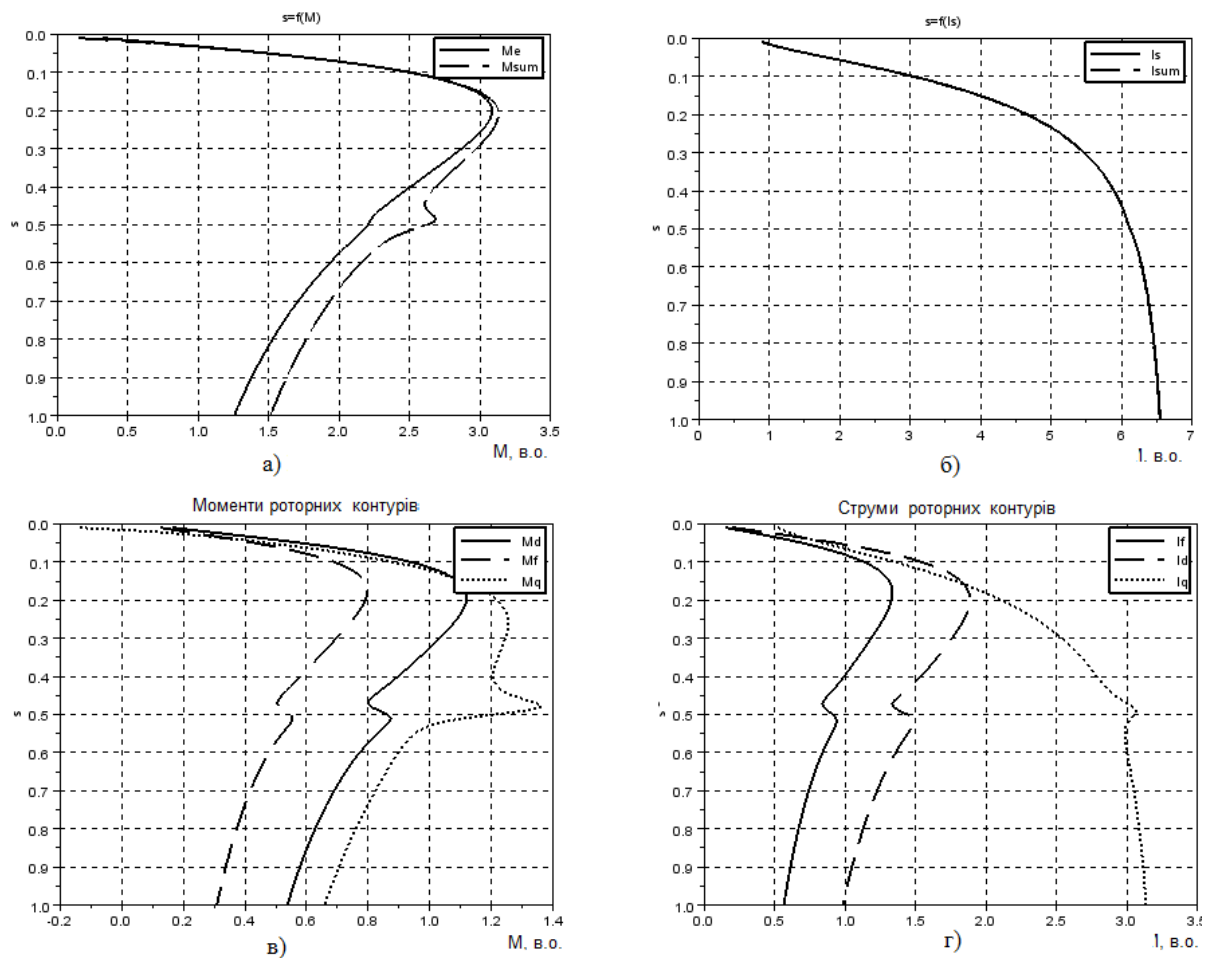


Рис. 2. Статичні характеристики СД при пуску з чотирикратним добавочним резистором: а — електромагнітний момент двигуна і сумарний момент роторних контурів; б — струм двигуна і сумарний струм контурів ротора; в — моменти роторних контурів; г — струми роторних контурів

У результаті обчислення були отриманні розрахункові залежності складових статичних характеристик пуску СД з ємнісним накопичувачем у контурі збудження (рис. 2).

Аналіз отриманих розрахункових залежностей, при послідовному вмиканні ємнісного накопичувача в ОЗ, свідчить про те, що початковий пуск струму і момент перевищують номінальні значення у 3,5 рази (рис. 3). З підвищенням швидкості двигуна ці значення спадають за рахунок збільшення ємнісного опору накопичувача через зворотню квадратичну залежність від ковзання. Струм демпферної обмотки в повздовжньому контурі заміщення також збільшується, але момент при цьому незначний. Струми поперечного контуру схеми заміщення дещо перевищують трикратне значення, а момент знаходиться в межах номінального значення.

При паралельному підключенні ємнісного накопичувача до ОЗ початковий струм досягає шестикратного значення від номінального, а момент становить 3,5 номінальних значень (рис. 4).

У процесі розгону двигуна, струм і момент цієї обмотки також зменшуються, але більш інтенсивно, чим у попередньому випадку. Струм у повздовжній демпферній обмотці обмежується на рівні двократного, а момент дещо перевищує номінальний. Поперечний демпферний контур розвиває момент на рівні номінального, а струм, що протікає в ньому, не перевищує трикратного значення.

Розрахунки статичних складових моментів і струмів контурів асинхронного пуску СД представлені у табл. 1.

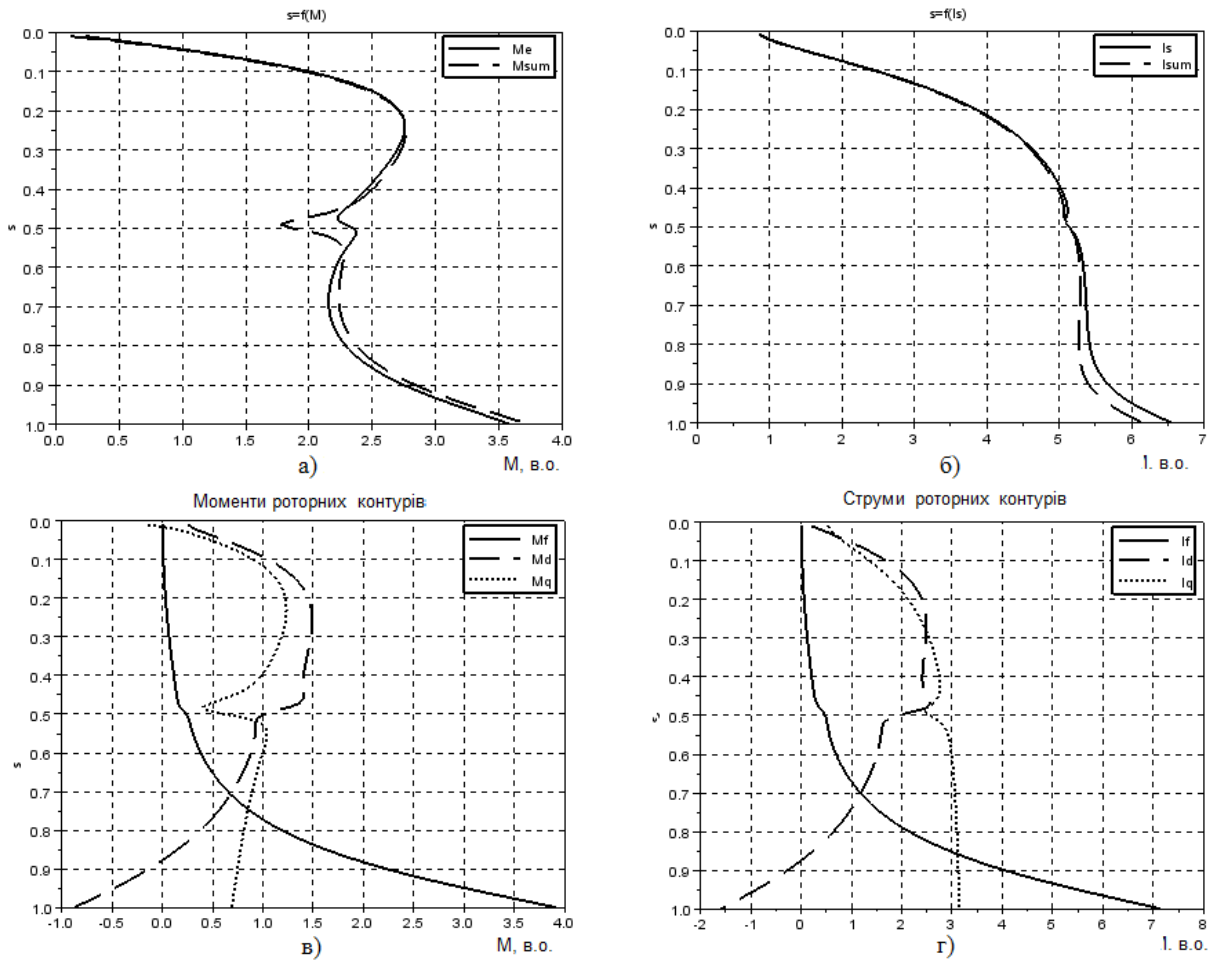


Рис. 3. Пускові характеристики СД при пуску з ЄНЕ ємністю 75 мкФ, послідовно підключеному до ОЗ: а — електромагнітний момент двигуна і сумарний момент роторних контурів; б — струм двигуна і сумарний струм контурів ротора; в — моменти роторних контурів; г — струми роторних контурів

Таблиця 1. Результати розрахунків статичних складових моментів і струмів контурів асинхронного пуску СД

Складові моментів і струмів	$R_d = 4R_f$	$R_d = 4R_f$ і послідовно підключений в ОЗ $C_H = 75\text{мкФ}$	$R_d = 4R_f$ і паралельно підключений до ОЗ $C_H = 300\text{мкФ}$
$M_{fn}$ , в.о.	0,3	4,0	3,3
$M_f \text{ max}$ , в.о.	0,8	4,0	3,3
$M_{dn}$ , в.о.	0,55	-0,8	-0,65
$M_d \text{ max}$ , в.о.	1,15	1,5	1,15
$M_{qn}$ , в.о.	0,66	0,65	0,65
$M_q \text{ max}$ , в.о.	1,38	1,25	1,25
$I_f \text{ max}$ , в.о.	1,3	7	6
$I_d \text{ max}$ , в.о.	1,75	2,5	2,1
$I_q \text{ max}$ , в.о.	3,1	3,1	3,1

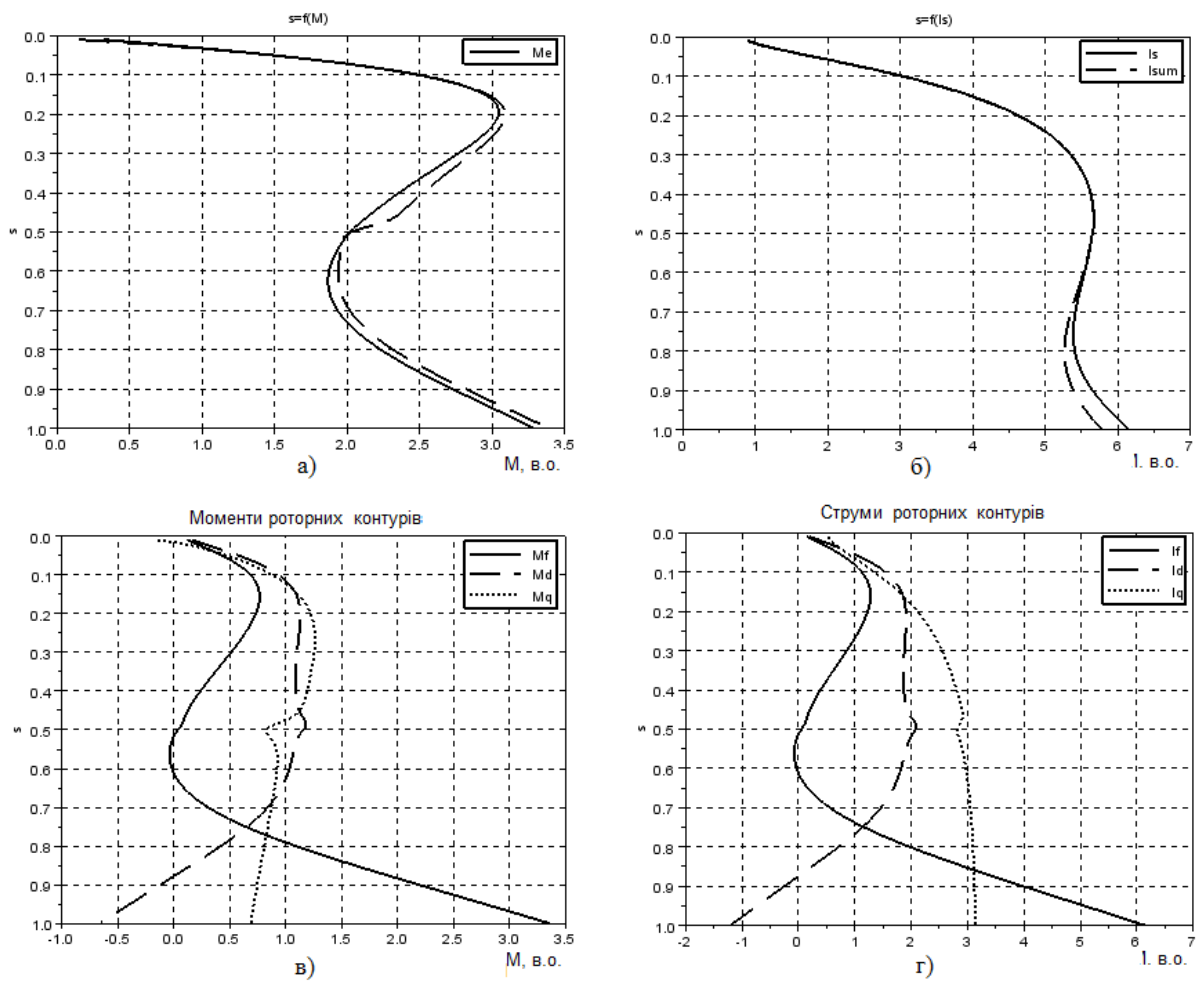


Рис. 4. Пускові характеристики СД з паралельно підключеним ЄНЕ номіналом в 300 мкФ: а — електромагнітний момент двигуна і сумарний момент роторних контурів; б — струм двигуна і сумарний струм контурів ротора; в — моменти роторних контурів; г — струми роторних контурів

### Висновки

1. Пускові моменти синхронного двигуна при послідовному вмиканні ЄНЕ зростають у 4 рази, а при паралельному — в 3,3 рази.
2. Максимальний струм статора синхронного двигуна при послідовному вмиканні ЄНЕ у 7 ... 7,6 разів перевищує номінальне значення струму.

### Список використаної літератури

1. Чорний О. П., Гладирь А. І., Осадчук Ю. Г., Курбанов І. Р., Вошун А. Н. Пускові системи нерегульованих електроприводів : монографія. Кременчук : ПП А. В. Щербатих, 2006. 280 с.
2. Родькін Д. І., Гладирь А. І. Система формування пускових характеристик електроприводів змінного струму з важкими умовами пуску : Кременчук, КДПІ, 2003. 10 с.
3. 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.

## STATIC MOMENTS AND CURRENTS OF THE CONTOURS OF A SYNCHRONOUS MOTOR WITH A CAPACITIVE ENERGY STORAGE IN THE ASYNCHRONOUS START MODE

### Abstract

To increase the starting torque of the synchronous motor, either a starting resistor or a capacitive energy storage device is turned on in the excitation winding. This will lead to a redistribution of moments and currents along the circuits of the synchronous motor. Therefore, the task of the work is to determine the component moments and currents along the engine circuits. The calculation of moments and currents is performed according to the substitution scheme according to the developed algorithm.

Calculated static components of moments and currents of circuits of asynchronous start-up of SD. A summary table of extreme moments and contour currents for various schemes for turning the ENE into the excitation winding is given.

### References

- [1] Chorny O. P., Hladyr A. I., Osadchuk Yu. H., Kurbanov I. R., Voshun A. N. (2006) *Puskovi systemy nerehulovanykh elektropryvodiv [Starting systems of unregulated electric drives] : monohrafiya*. Kremenchuk : PP A. V. Shcherbatykh, 2006. 280 p. [in Ukrainian].
- [2] 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, 2003. 10 p. [in Ukrainian].
- [3] Pivniak H. H., Kyrychenko V. I., Borodai V. A. (2002) *Pro novyi napriamok udoskonalennia krupnykh synkhronnykh elektrodyvuniv [About a new direction of improvement of large synchronous electric motors]* NAN Ukrainy. Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk.– K. 2002. Chastyna 2. P. 62–65. [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії 05.02.2024