

DOI: 10.31319/2519-2884.45.2024.12

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

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

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

### ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ РОБОТИ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ ПОСАДЦІ НАПРУГИ В МЕРЕЖІ АБО ПРИКЛАДАННІ ЗНАЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

*У статті розглянуті режими сталої роботи синхронних двигунів при короткочасних пониженнях напруги в мережі. Отримані рівняння електричної рівноваги напруги для контурів СД з ємністю в контурі збудження. Наведені розрахункові залежності режиму форсування збудження з електричною ємністю, увімкненої в контур збудження.*

**Ключові слова:** синхронний двигун; форсування; збудження; ємність; інерційність.

*The work examines modes of stable operation of synchronous motors with short-term voltage drops in the network. Obtained equations of electrical voltage balance for LED circuits with capacitance in the excitation circuit. Calculated dependences of the excitation forcing mode with the electric capacity included in the excitation circuit are given.*

**Keywords:** synchronous motor; forcing; excitation; capacity; inertia.

#### Постановка проблеми

Звичайно синхронні двигуни (СД) працюють в номінальному режимі або близькому до нього при синхронній швидкості обертання ротора. При порушеннях електроживлення вони втрачають стійкість та випадають із синхронізму. При цьому синхронні двигуни переходять в асинхронний режим, що спричиняє перегрівання пускової обмотки та призводить до виходу їх із ладу. Найбільш ефективним методом збереження стійкості роботи є застосування режиму форсування напруги збудження від тиристорного перетворювача (ТП).

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Для збереження сталої роботи синхронних двигунів при короткочасних пониженнях напруги в мережі або при прикладанні значного навантаження до валу двигуна у всіх випадках повинен використовуватися збільшений рівень напруги збудження [1, 2, 3]. Найбільш дієвий спосіб виконання зазначеного завдання полягає в форсуванні збудження із застосуванням ємнісної компенсації інерційності контуру, що досягається шляхом розряду попередньо зарядженого конденсатора в цей контур [5, 6, 4].

#### Формулювання мети дослідження

Метою роботи є підвищення швидкодії режимів форсування напруги збудження СД шляхом компенсації інерційності обмотки збудження (ОЗ).

#### Виклад основного матеріалу

Отримані рівняння при загальноприйнятих припущеннях і позначеннях [2, 4] електричної рівноваги напруги для контурів СД при вмиканні електричної ємності в контур збудження мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 U_d &= r_d i_d + p\Psi_d - \Psi_q \omega, \\
 U_q &= r_q i_q + p\Psi_q + \Psi_d \omega, \\
 U_f &= r_f i_f + p\Psi_r + U_c, \\
 pU_c &= X_c i_r, \\
 0 &= r_{ed} i_{ed} + p\Psi_{ed}, \\
 0 &= r_{eq} i_{eq} + p\Psi_{eq},
 \end{aligned} \tag{1}$$

де  $P = \frac{d}{dt}$  — оператор диференціювання.

Рух ротора визначається рівнянням:

$$\Psi_d i_q - \Psi_q i_d - M_c = j p \omega. \quad (2)$$

Складові потокозчеплення для відповідних контурів:

$$\begin{aligned} \Psi_{\delta d} &= \frac{1}{p} = \left[ U_d - r_1 i_d \left( 1 + \frac{X_{\sigma}}{r_1} p \right) + \Psi_q \omega \right], \\ \Psi_{\delta q} &= \frac{1}{p} = \left[ U_q - r_1 i_q \left( 1 + \frac{X_{\sigma}}{r_1} p \right) + \Psi_d \omega \right], \\ \Psi_{\delta r} &= \frac{1}{p} = \left[ U_r - r_f i_f \left( 1 + \frac{X_{\sigma f}}{r_f} p + \frac{1}{p} \frac{X_c}{r_f} \right) \right], \\ \Psi_{\delta d} &= \frac{1}{p} \left( 1 + \frac{X_{\sigma ed}}{r_{ed}} \right) r_{ed} i_{ed}, \\ \Psi_{\delta q} &= \frac{1}{p} \left( 1 + \frac{X_{\sigma eq}}{r_{eq}} \right) r_{eq} i_{eq}. \end{aligned} \quad (3)$$

Електрична ємність (конденсатор) увімкнена в роторне коло, то струму збудження буде мати вигляд:

$$i_f = \frac{1}{r_f \left( T_{\sigma f} p + 1 + \frac{1}{T_c p} \right)} (U_f - p \Psi_{\delta d}), \quad (4)$$

де  $T_{\sigma f} = \frac{X_{\sigma f}}{r_f}$ ;  $T_c = \frac{X_c}{r_f}$  — відповідні сталі часу ОЗ.

Тоді:

$$i_f = \frac{p T_c}{r_f (T_{\sigma f} T_c p^2 + T_c p + 1)} (U_f - p \Psi_{\delta d}) \quad (5)$$

або

$$i_f = \frac{T_c p}{r_f (T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1)} (U_f - p \Psi_{\delta d}), \quad (6)$$

де  $T_0 = \sqrt{T_{\sigma f} T_c}$ ;  $\xi = \frac{T_c}{2T_0}$ .

Напряга збудження приймає вигляд:

$$U_f = U_{f\phi} + U_c \quad (7)$$

Тоді вираз (6) набуде вигляду:

$$i_f = \frac{T_c p}{r_f (T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1)} (U_{f\phi} + U_c - p \Psi_{\delta d}). \quad (8)$$

Вираз струму ОЗ при некомпенсованому контурі у режимі форсування:

$$i_f = \frac{1}{r_f (T_{\sigma f} p + 1)} (U_{rf} - p \Psi_{\delta d}). \quad (9)$$

У чисельнику формули (9) міститься форсуючий член, а знаменник представлений коліальною ланкою при відповідному виборі значення ємності. При наявності електричної ємності в ОЗ можна більш інтенсивно змінювати струм. Напряга зарядженої ємності може в 5–10 разів перевищувати форсуючу напругу серійних тиристорних збуджувачів.

Для порівняльної оцінки впливу електричної ємності на режими форсування збудження отримані розрахункові залежності з ємнісною компенсацією інерційності ОЗ та її відсутності. Результати чисельного дослідження представлені на рис. 1, 2.

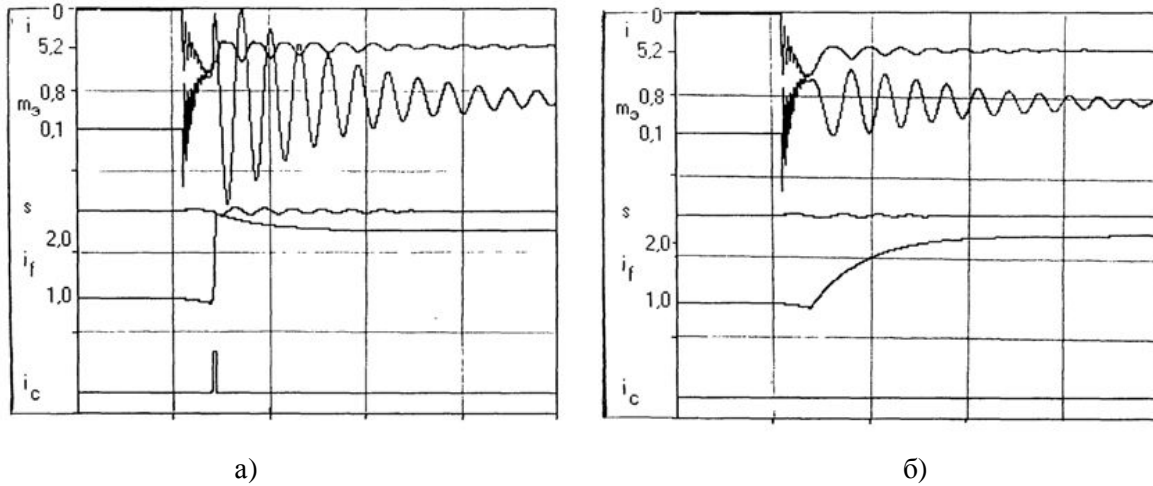


Рис.1. Перехідні процеси режимів форсування напруги збудження: компенсований контур (а); існуючий контур (б)

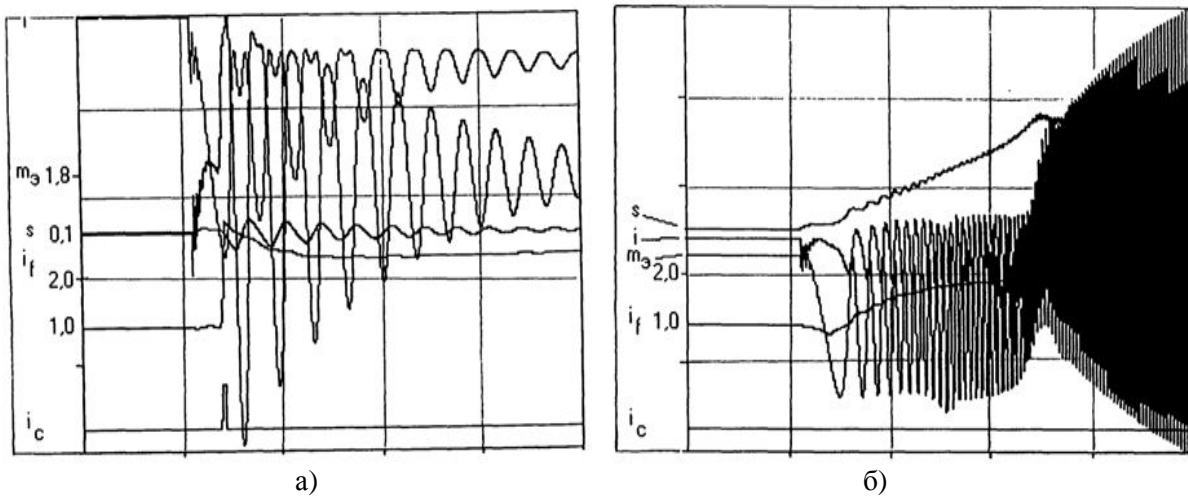


Рис. 2. Перехідні процеси форсування збудження СД при накиді навантаження  $M = 1,8$  в. о. і посадці напруги в електромережі до  $0,8 U_n$ : а) з ЄНЕ в ОЗ; б) без ЄНЕ в ОЗ

Наведені результати показують, що струм збудження  $21,1$  А у першому випадку досягається за час  $0,091$  с, а у другому — становить  $19,16$  А за час  $0,45$  с.

На рис. 2, а, б приведені перехідні процеси режиму форсування напруги збудження СД при прикладанні значного ударного навантаження на вал двигуна, що дорівнює  $M_c = 1,8$  в.о. при одночасній посадці напруги в живильній електромережі до  $0,8 U_n$  відповідно.

Форсування напруги збудження показує, що застосування ЄНЕ в контурі збудження забезпечує утримувати в синхронізмі СД до навантажень рівних  $M_c = 2$  в.о. при значенні напруги в мережі  $0,8 U_n$ . При відключеному ЄНЕ двигун випадає з синхронізму при  $M_c = 1,5$  в. о. та  $U = 0,8 U_n$ .

Таким чином, аналіз розрахункових залежностей показує, що в області значних навантажень ( $M_c > 1$ ) необхідно застосовувати керування з ЄНЕ шляхом зміни структури силового

перетворювача. В області малих навантажень ( $M_c < 1$ ) необхідно застосовувати керування з пристроями автоматичного регулювання збудження (АРЗ).

Результати впровадженнь модельного двигуна з ємнісною компенсацією інерційності контуру збудження та з її відсутністю наведено на рис. 3, а, б.

Аналіз експериментальних досліджень показує, що в запропонованому пристрої швидкодія режимів форсування приблизно в 10 разів перевищує швидкодію традиційних систем збудження.

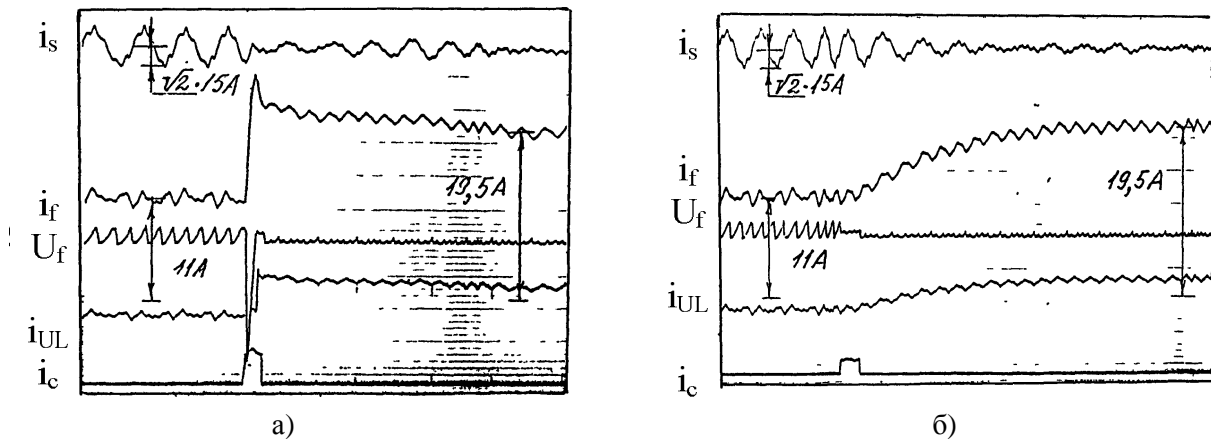


Рис. 3. Результати експериментальних досліджень: при ємнісній компенсації індуктивності контуру збудження (а); для серійних збуджувачів (б)

### Висновки

Аналіз розрахункових залежностей показує, що в існуючих збуджувачах максимальне значення струму збудження 21,1 А досягається за час 0,091 с, а при компенсації — значення струму становить 19,16 А за час 0,45 с.

Встановлено, що при ємнісній компенсації інерційності контуру збудження СД швидкодія розглянутих режимів у 8 – 10 разів вища, чим у серійних тиристорних збуджувачів.

### 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. Міліх В.І. та ін. Дослідження синхронних машин [Текст]: лаб. практикум / В.І. Міліх, Б.О. Єгоров, Г.Г. Єгорова, А.Г. Мірошниченко, В.Д. Юхимчук; за ред. В.І. Міліх. 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 : КДПІ, 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. 41735 Україна. № u 2001031428; заявл. 01.03.2001; опубл. 17.09.2001, Бюл. № 8, 8 с.

## ENSURING STABILITY OF SYNCHRONOUS MOTORS WHEN THE VOLTAGE IN THE NETWORK DROPS OR A SIGNIFICANT LOAD IS APPLIED

### Abstract

To increase the stable operation of the LED and increase the reactive power supplied to the network, during short-term voltage drops, in all cases, the network should use either parametric and relay excitation forcing or applying a significant load to the motor shaft. The limitations of the existing thyristor exciters and excitation forcing devices can be significantly expanded. The most effective way to implement the specified task is forcing the excitation with capacitive compensation of the inertia of the excitation circuit by discharging a pre-charged capacitor in this circuit with the simultaneous supply of a forcing voltage from a thyristor converter.

Since the electric capacity (capacitor) is included in the excitation circuit, it is therefore appropriate to determine its effect on the transient processes in the rotor circuit, partly on the nature of the current change in the OZ in the excitation forcing mode. For this purpose, the expression of the excitation current is found from the third equation of the system. A comparative analysis of the obtained expressions shows that the presence of electrical capacitance in the excitation circuit allows for a more intensive change in the current in this circuit, since there is a forcing term in the numerator, and the denominator is represented by an oscillating link with an appropriate selection of the capacitance value. In addition, the total voltage in the excitation circuit due to the charged capacity can be 5 to 10 times higher than the forcing voltage of series thyristor exciters.

Analysis of calculated dependencies shows that in the first case, the maximum excitation current value of 21.1 A is reached in 0.0091 s, and in the second case, the current value is 19.16 A in 0.45 s. To confirm the theoretical propositions, experimental studies of the model engine were carried out in the forced excitation mode with capacitive compensation of the inertia of the excitation circuit and with serial thyristor exciters.

### References

- [1] Pivniak H.H., Kyrychenko V.I., Borodai V.A. (2002) *Pro novyi napriamok udoskonalennia krupnykh synkhronnykh elektrodyhunyv [About a new direction of improvement of large synchronous electric motors]* NAN Ukrainy. Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk : K. Chastyna 2, 2002. 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. Mirosnychenko, V.D. Yukhymchuk; za red. V.I. Milykh. Kharkiv : NTU «KhPI», 2010. 117 p. [in Ukraine].
- [3] Rodkin D.I., Hladyr A.I. (2003) *Systema formuvannia puskovykh kharakterystyk elektropyvodiv 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 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», 2020. 189 p. [in Ukraine].
- [5] Popovych M.H. (2005) *Elektromekhanichni systemy avtomatychnoho keruvannia ta elektropyvody [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, 2005. 680 p. [in Ukraine].
- [6] *Sposib pusku synkhronnoho dyyhuna [The method of starting a synchronous motor]* : pat. 98412 Ukraina. № a 201103138; zaiavl. 17.03.2011; opubl. 10.05.2012, Biul. № 9, 6 p. [in Ukraine].

Надійшла до редколегії 09.10.2024