

DOI: 10.31319/2519-2884.45.2024.13

УДК 621.313.323

Чугунов Д.В., здобувач третього (доктор філософії) рівня, e-mail: davidchugunov00@gmail.com
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Chugunov David, Postgraduate Student
Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ВИПРОБОВУВАННЯ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ СИНХРОННОГО ДВИГУНА З ДОДАТКОВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ В КОЛІ ЗБУДЖЕННЯ

Наводяться результати стендових випробувань синхронного двигуна при живленні від повної та пониженої напруг у мережі. Отримані осцилограми режимів пуску синхронного двигуна при вмиканні резисторів та електричної ємності в контур збудження.

Ключові слова: синхронний двигун; контур збудження; пускові режими; осцилограма.

The article presents the results of bench tests of a synchronous motor when powered from full and reduced voltage in the network. Obtained oscillograms of starting modes for a synchronous motor when resistors and electrical capacity are turned on in the excitation circuit.

Keywords: synchronous motor; excitation circuit; starting modes; oscillogram.

Постановка проблеми

Підвищення ефективності керування режимами асинхронного пуску завантажених синхронних електроприводів (СЕП) в умовах пониженої напруги живильної електромережі для збереження складних та безперервних технологічних процесів може бути досягнуто вмиканням ємнісних накопичувачів енергії в обмотку збудження. Для підтвердження ефективності вмикання ємнісним накопичувачем енергії в обмотку збудження необхідно провести стендове випробування пускових режимів синхронного двигуна при живленні статора з різноманітною напругою, що є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Технічна реалізація одноразової зміни величини пускового резистора розглянута в [1]. При такому керуванні забезпечується асинхронний режим з максимально можливими пусковим і вхідним моментами. Наявність додаткового тиристорного ключа, який шунтує частину пускового резистора, ускладнює пристрій та знижує надійність синхронного електропривода.

Для забезпечення режиму пуску та самозапуску синхронного двигуна (СД) під навантаженням запропоновано замість звичайної короткозамкненої пускової клітки в полюсні наконечники закладати з'єднану в "зірку" трифазну обмотку, до якої підключаються розташовані на спицях ротора пусковий індукційний пристрій, або регульований через контактні кільця активний опір [2, 3]. Подібні пристрої ускладнюють конструкцію двигуна, знижують його надійність і можуть бути реалізовані тільки в період капітальних ремонтів.

Відомі способи підвищення електромагнітного моменту СД шляхом компенсації опору контуру збудження ротора. У роботі [4] запропонований спосіб збільшення електромагнітного моменту, створюваного обмоткою збудження СД, в області підсинхронної швидкості при зменшенні індуктивності обмотки збудження (ОЗ) за допомогою динамічної ємності, налаштованої на бажану частоту.

Для збільшення електромагнітного моменту СД при малих значеннях ковзання, запропонований пусковий пристрій, який містить у контурі збудження резистори, один із яких підключають паралельно конденсатору, а іншої — послідовно [5].

Існуючі способи і пристрої для асинхронного збільшення моменту СД ґрунтуються на компенсації електромагнітної інерційності контурів збудження шляхом вмикання резисторів, накопичувальних акумуляторів енергії, розчепленні обмотки збудження з ємностями, а також компенсувальної електрорушійної сили [6—8].

У наведених роботах не достатньо визначено вплив ємнісного накопичувача енергії на моменти та струми контурів СД.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є експериментальне дослідження пускових режимів синхронного двигуна з різними параметрами контуру збудження під час живлення від повної і зниженої напруг мережі із застосуванням ємнісного та багатоступінчастого накопичувачів енергії.

Виклад основного матеріалу

На рис. 1 наведено розроблений випробувальний стенд, до складу якого входить синхронний двигун типу МСА 72/4А з номінальними даними : $P_n = 12$ кВт; $U_c = 230$ В; $i_{ln} = 37,6$ А; $U_{fn} = 27$ В; $i_{fn} = 23$ А; $n_n = 1500$ об/хв і тиристорний збуджувач (UZ) типу ET3-121-43/1500.

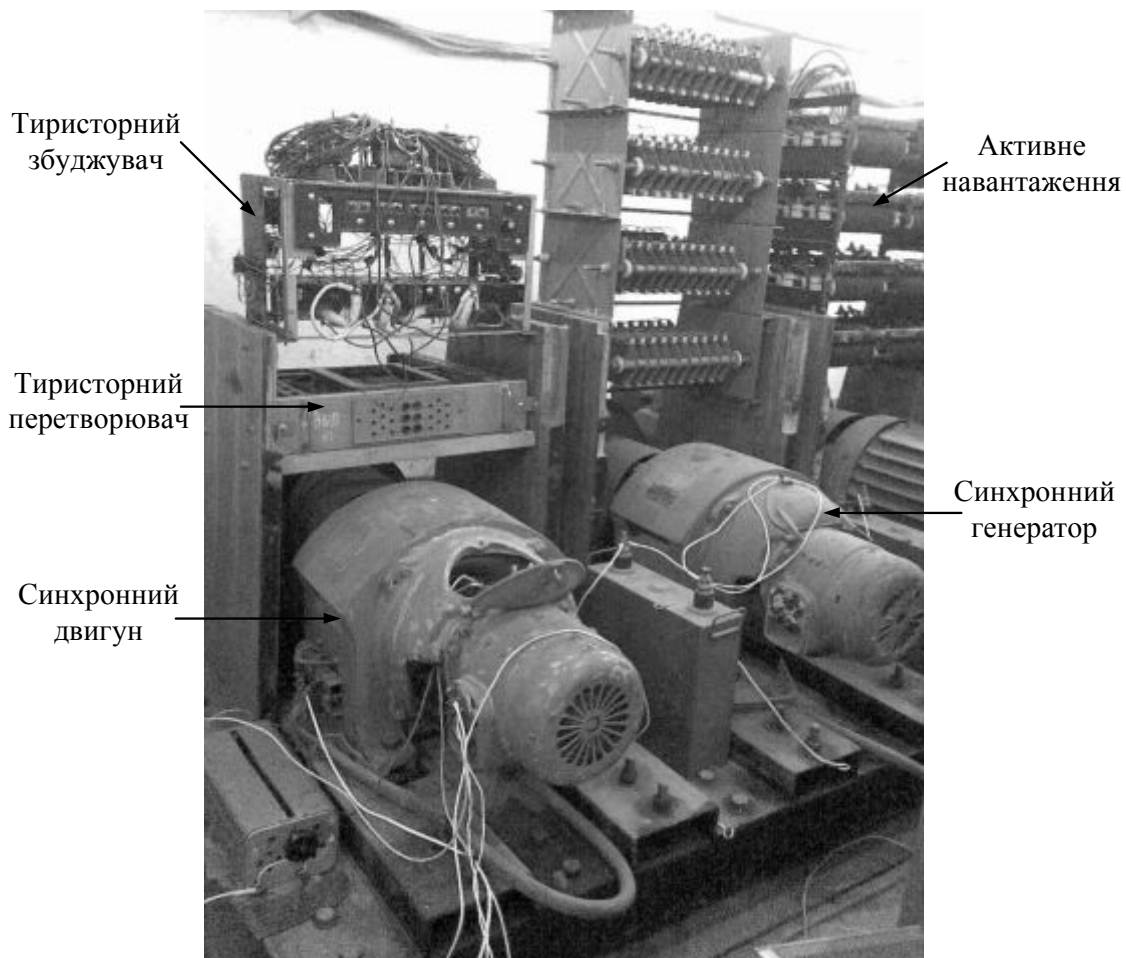


Рис. 1. Зовнішній вигляд випробувального стенда

Принципова схема випробувального стенда з тиристорним регулятором напруги та багатоступінчастим накопичувачем енергії приведена на рис. 2.

Програмою експериментальних досліджень передбачені наступні режими:

а) експериментальний пуск синхронного двигуна від номінальної напруги мережі при вмиканні в обмотку збудження пускового резистора послідовно з обмоткою збудження. Для цього прийнято $R_1 = 4R_f$ або $8R_f$ (рис. 2, а);

б) експериментальний пуск синхронного двигуна при зниженій напрузі мережі;

в) експериментальний пуск синхронного двигуна при живленні від тиристорного регулятора напруги з багатоступеневим накопичувачем енергії (рис. 2, б).

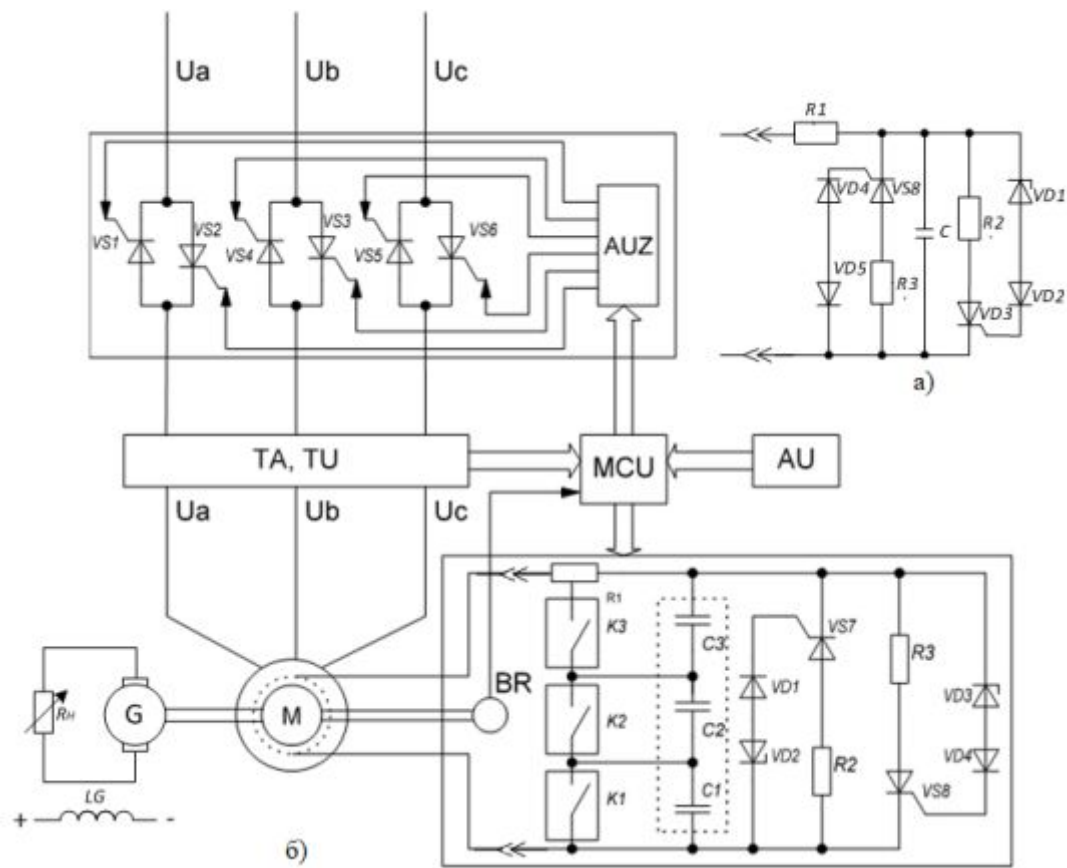


Рис. 2. Принципова схема випробувального стенда з тиристорним регулятором напруги і багатоступінчастим накопичувачем енергії

На рис. 3—8 приведені осцилограми асинхронного пуску синхронного двигуна при вмиканні в ротор додаткових елементів при різних значеннях напруги. В тому числі осцилограми пускових режимів синхронного двигуна при номінальній напрузі (рис. 3, рис. 4, табл. 1); з ємнісним накопичувачем енергії в обмотці збудження при пониженій напрузі живлення (рис. 5, 6, табл. 2); з ємнісним накопичувачем енергії в обмотці збудження при пониженій напрузі живлення від тиристорного регулятора напруги (рис. 7, рис. 8, табл. 3).

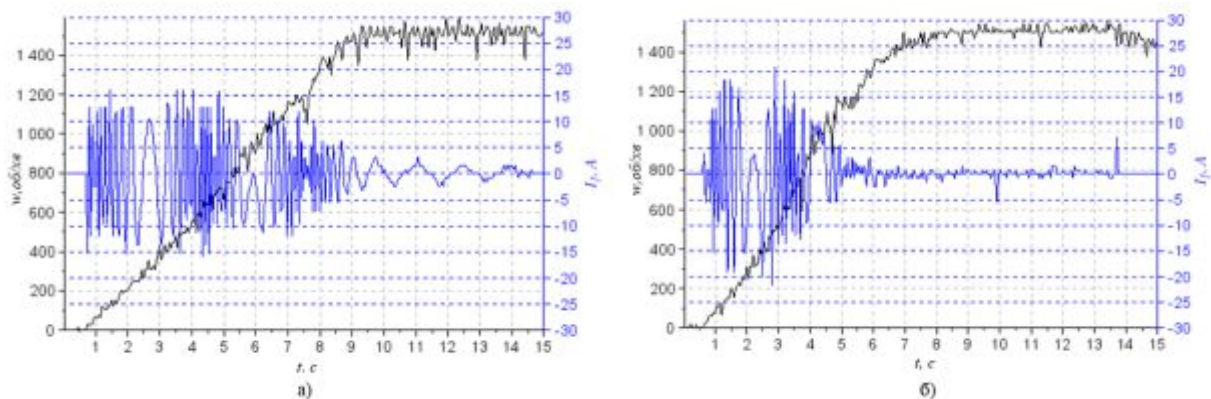


Рис. 3. Осцилограми струму ОЗ і частоти обертання ротора СД при пуску: а) $R_d = 4R_f$; б) $R_d = 8R_f$

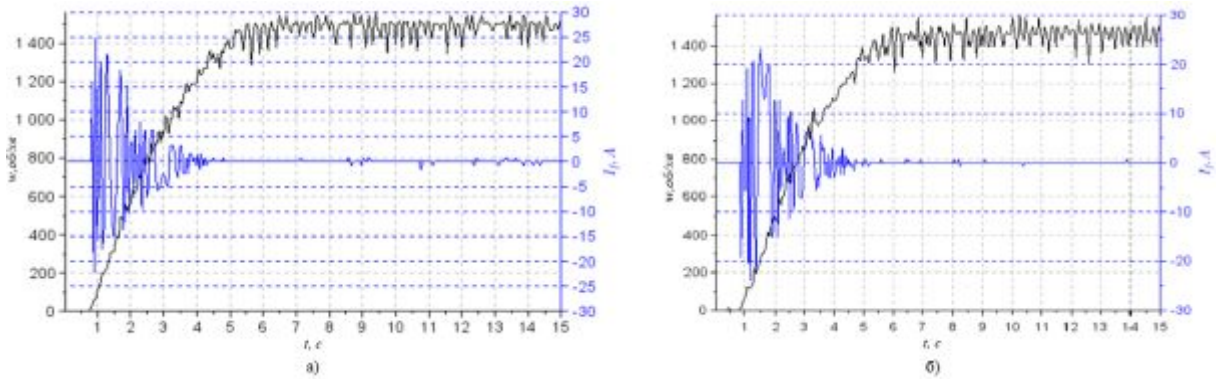


Рис. 4. Осцилограми струму ОЗ при пуску СД: а) $R_0 = 4R_f$; і послідовно увімкненим ЄНЕ $C = 100 \text{ мкФ}$; б) $R_0 = 8R_f$ і паралельно увімкненим ЄНЕ $C = 100 \text{ мкФ}$

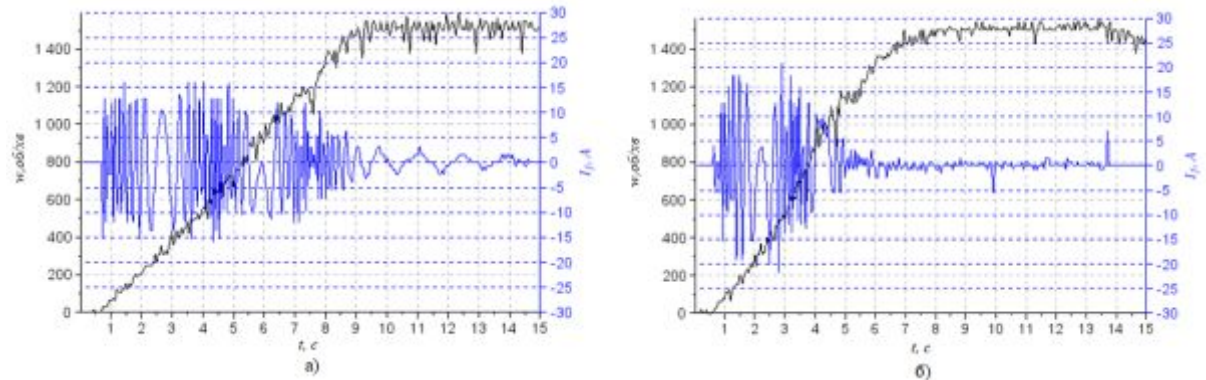


Рис. 5. Осцилограми струму ОЗ і частоти обертання ротора СД при пуску: а) з $R_0 = 4R_f$ і послідовно увімкненого БЄНЕ із живленням від ТРН $U = 0.9U_H$; б) з $R_0 = 8R_f$, живлення від ТРН $U = 0.9U_H$

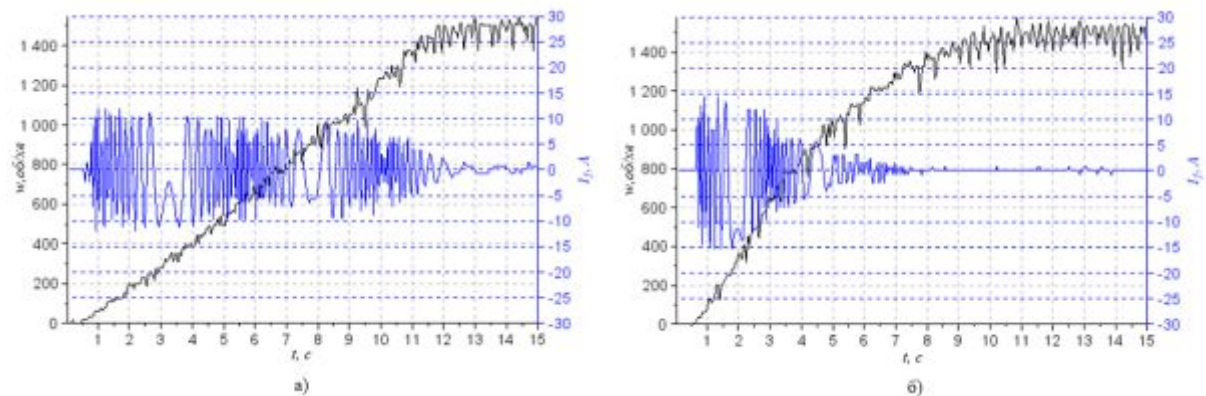


Рис. 6. Осцилограми струму і частоти обертання ротора СД при пуску: а) $R_0 = 4R_f$; і паралельно увімкненим ЄНЕ $C = 150 \text{ мкФ}$ при $U = 0.8U_H$; б) з $R_0 = 8R_f$ і послідовно увімкненим ЄНЕ $C = 100 \text{ мкФ}$ при $U = 0.8U_H$

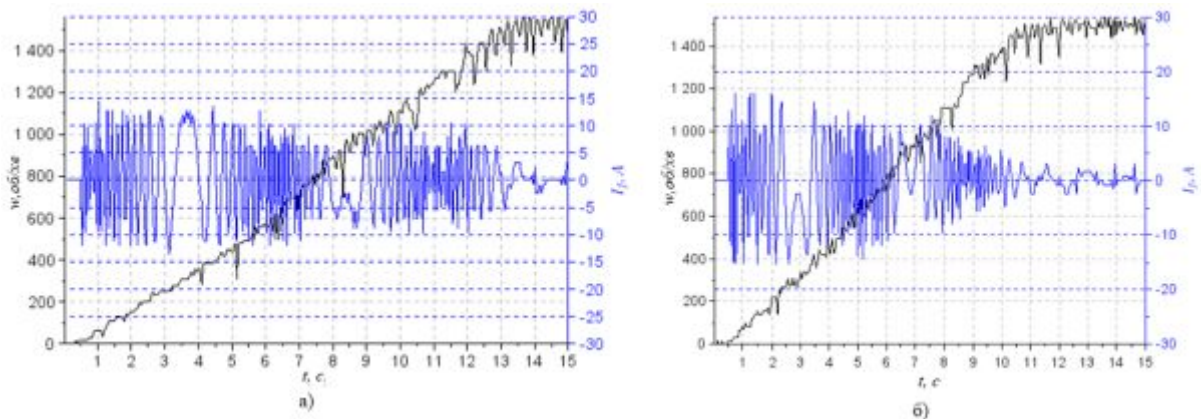


Рис. 7. Осцилограми струму і частоти обертання ротора СД при пуску: а) $R_d = 4R_f$; живленням від ТРН $U = 0.9U_H$; б) з $R_d = 8R_f$, живлення від ТРН $U = 0.9U_H$

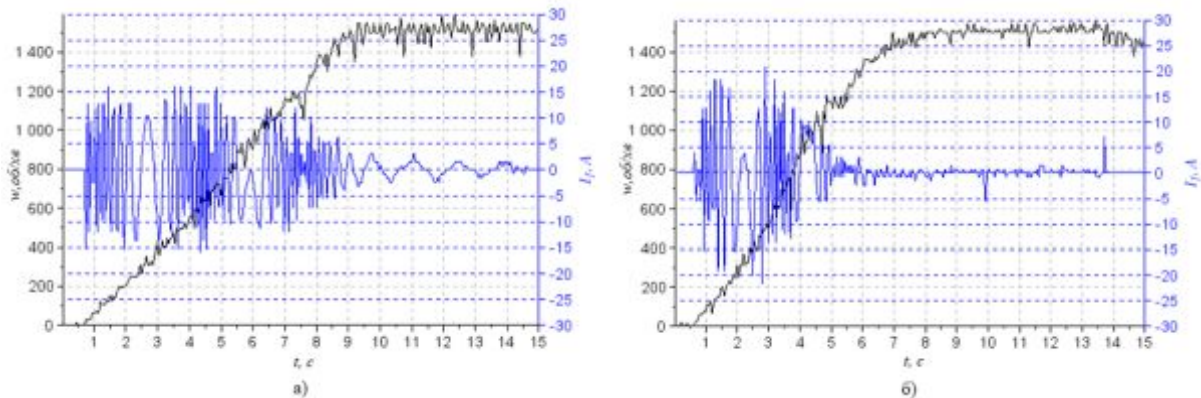


Рис. 8. Осцилограми струму і частоти обертання ротора СД при пуску: а) $R_d = 4R_f$; і послідовно увімкненого ЄНЕ із живленням від ТРН $U = 0.9U_H$; б) з $R_d = 8R_f$, і паралельно увімкненого від ТРН $U = 0.9U_H$

Таблиця 1. Зведені результати досліджень пускових режимів СД при номінальній напрузі

U_H	$R_d = 4R_f$	$R_d = 8R_f$	$R_d = 4R_f$ і послідовно увімкненим ЄНЕ $C = 100 \text{ мкФ}$	$R_d = 8R_f$ і послідовно увімкненим ЄНЕ $C = 100 \text{ мкФ}$	$R_d = 4R_f$ і паралельно увімкненим ЄНЕ $C = 100 \text{ мкФ}$	$R_d = 8R_f$ і паралельно увімкненим ЄНЕ $C = 100 \text{ мкФ}$
$t_n, \text{ с}$	9,3	8,4	5,3	5,2	4,6	4,7
$I_{f_{\max}}, \text{ А}$	14,3	14,5	28	23	25	20
$I_{s_{\max}}, \text{ А}$	63,3	66,6	50	66	63	66

Таблиця 2. Зведені результати досліджень пускових режимів СД з ЄНЕ в контурі збудження при пониженій напрузі живлення

$U=0,8U_n$	$R_o=4R_f$	$R_o=8R_f$	$R_o=4R_f$ і послідовно увімкненим ЄНЕ $C=150\text{мкФ}$	$R_o=8R_f$ і послідовно увімкненим ЄНЕ $C=100\text{мкФ}$	$R_o=4R_f$ і паралельно увімкненим ЄНЕ $C=100\text{мкФ}$	$R_o=8R_f$ і паралельно увімкненим ЄНЕ $C=150\text{мкФ}$
$t_n, \text{с}$	14,5	12	9,4	9,5	14	11,3
$I_{f_{\max}}, \text{А}$	14	13,3	18	15	12	12,5
$I_{s_{\max}}, \text{А}$	66	67	115	66	68	50

Таблиця 3. Зведені результати досліджень пускових режимів СД з ЄНЕ в контурі збудження при пониженій напрузі живлення від ТРН

$U=0,9U_n$, ТРН	$R_o=4R_f$	$R_o=8R_f$	$R_o=4R_f$ і послідовно увімкненим ЄНЕ $C=100\text{мкФ}$	$R_o=8R_f$ і послідовно увімкненим ЄНЕ $C=100\text{мкФ}$	$R_o=4R_f$ і паралельно увімкненим ЄНЕ $C=100\text{мкФ}$	$R_o=8R_f$ і паралельно увімкненим ЄНЕ $C=100\text{мкФ}$
$t_n, \text{с}$	12,2	10,3	6,5	6,3	9,8	8
$I_{f_{\max}}, \text{А}$	14	16	15	21	16,5	15,1
$I_{s_{\max}}, \text{А}$	62	55	70	71	63	63

Висновки

1. Ємнісний спосіб пуску СД переважає над резистивним за рахунок підвищення струмового навантаження ОЗ.

2. Пуск при зниженій напрузі, до $0,8U_n$, з ємнісним накопичувачем, включеним послідовно з додатковим опором, відбувається за час, який можна порівняти з часом резистивного пуску при номінальній напрузі.

3. Порівняно з резистивним пуском застосування ЄНЕ дозволяє знизити час на 41,4 %, проте струм в ОЗ при цьому зростає на 28,6 %, а струм статорної обмотки на 64,3 %.

4. Паралельне підключення ЄНЕ до пускового резистора є найменш ефективним, через повну відсутність впливу ємності накопичувача на характер пускових процесів. Однак навіть таке включення є ефективнішим за звичайний резистивний пуск.

5. Зміна напруги живлення СД за допомогою ТРН нижче 85 % від номінального призводить до надмірного зниження електромагнітного моменту двигуна та неможливості його розвороту. Зниження амплітуди напруги живлення навіть на 20 % від номінального зі збереженням його форми дозволяє здійснити надійний пуск СД за наявності ЄНЕ в контурі збудження.

Список використаної літератури

1. Родькін Д.І., Гладирь А.І. Система формування пускових характеристик електроприводів змінного струму з важкими умовами пуску. Кременчук : КДПІ, 2003. 10 с.
2. E. Davison, R. Narayan. "The Optimal Output Feedback Control of a Synchronous Machine", Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on. PAS-90. 2123–2134. 10.1109/TPAS.1971.293030, 1971.

3. Спосіб пуску синхронного двигуна: пат. 98412 Україна. № 201103138; заявл. 17.03.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. 8 с.
4. 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.
5. M. Šundrica, M. Petrinić. “Observer-based Linear Control of Synchronous Machine with Damper and Excitation Winding”, *Acta Polytechnica Hungarica* Vol. 17, No. 6, pp. 95–114, 2020.
6. M. Šundrica, “Synchronous Machine Nonlinear Control System Based on Feedback Linearization and Deterministic Observers”, In *Control Theory in Engineering*, p. 145, <https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.89420>, 2019.
7. Півняк Г.Г., Кириченко В.І., Бородай В.А. Про новий напрямок удосконалення крупних синхронних електродвигунів. *НАН України. Технічна електродинаміка. Темат. випуск*. Київ, 2002. Частина 2. С. 62–65.
8. Спосіб пуску синхронного двигуна та пристрій для його реалізації : пат. 106667 Україна. № 201300459; заявл. 14.01.2013; опубл. 29.09.2014, Бюл. № 18.

TESTING OF START-UP MODES SYNCHRONOUS MOTOR WITH ADDITIONAL ELEMENTS IN THE CIRCLE OF AROUSAL

Abstract

In the work, experimental studies of starting modes of a synchronous motor with different parameters of the excitation circuit during powering from full and reduced network voltages, for starting a synchronous motor based on capacitive and multi-stage energy storage devices, were performed.

A schematic diagram of a test bench with a thyristor voltage regulator and a multi-stage energy storage device is given. The program of experimental studies of different modes of starting a synchronous motor is presented.

Oscillograms of asynchronous start of a synchronous motor when additional elements are included in the rotor at different voltage values are given, including oscillograms of starting modes of a synchronous motor at nominal voltage, with a capacitive energy storage in the excitation winding at a reduced supply voltage and of a synchronous motor in the excitation winding at a reduced supply voltage from the thyristor voltage regulator.

The parallel connection of the capacitive energy storage to the starting resistor is the least effective, due to the complete lack of influence of the storage capacity on the nature of the starting processes. However, even this inclusion is more effective than the usual resistive start.

Compared to resistive starting, the use of a capacitive energy storage will reduce the starting time by 41.4 %, but the current in the excitation winding will increase by 28.6 %, and the current in the stator winding by 64.3 %.

It was determined that the change in the supply voltage of the synchronous motor using a thyristor voltage regulator is below 85 % from the nominal value will lead to an excessive reduction of the electromagnetic torque of the motor and make it impossible to reverse. Reducing the amplitude of the supply voltage even by 20 % from the nominal value while preserving its shape will allow a reliable start of the synchronous motor in the presence of a capacitive energy storage in the excitation circuit.

References

- [1] 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].
- [2] E. Davison, R. Narayan. (1971) “The Optimal Output Feedback Control of a Synchronous Machine”, *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on. PAS-90*. 2123 – 2134. 10.1109/TPAS. 293030.
- [3] *Sposib pusku synkhronnoho dyvuhuna [The method of starting a synchronous motor]* : пат. 98412 Україна. № 201103138; zaiavl. 17.03.2011; opubl. 10.05.2012, Biul. № 9. 8 p. [in Ukraine].

- [4] Chornyi O.P., Hladyr A.I., Osadchuk Yu.H., Kurbanov I.R., Voshun A.N. (2006) Puskovi systemy neregulovanykh elektropryvodiv [*Starting systems of unregulated electric drives*] : monohrafiia. Kremenchuk : PP A.V. Shcherbatykh, 280. [in Ukraine].
- [5] M. Šundrica, M. Petrinić. (2020) “Observer-based Linear Control of Synchronous Machine with Damper and Excitation Winding”, *Acta Polytechnica Hungarica* Vol. 17, No. 6, pp. 95–114.
- [6] M. Šundrica, (2019) “Synchronous Machine Nonlinear Control System Based on Feedback Linearization and Deterministic Observers”, In *Control Theory in Engineering*, p. 145, <https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.89420>.
- [7] Pivniak H.H., Kyrychenko V.I., Borodai V.A. (2002). Pro novyi napriamok udoskonalennia krupnykh synkhronnykh elektrodvyhuniv [*About the new direction of improvement of large synchronous electric motors*]. NAN Ukrainy. Tekhnichna elektrodynamika. Temat. vypusk. Kyiv., Chastyna 2. P. 62–65. [in Ukraine].
- [8] *Sposib pusku synkhronnoho dvyhuna ta prystrii dlia yoho realizatsii* [*A method of starting a synchronous motor and a device for its implementation*] : pat. 106667 Ukraina. № 201300459; zaiavl. 14.01.2013; opubl. 29.09.2014, Biul. № 18. [in Ukraine].

Надійшла до редакції 25.10.2024