

DOI: 10.31319/2519-2884.46.2025.13

УДК 621.313.323

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

Гуліша О.М., к.м.н., доцент, ORCID: 0000-0002-7512-5671, e-mail: e.gulesha@gmail.com

Донченко А.П., завідувач лабораторіями кафедри електротехніки та електромеханіки,
e-mail: donchencko45@gmail.com

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

Сухоруков Я.В., здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Chugunov David, Postgraduate Student

Guliesha Olena, Candidate of mathematical sciences, Associate professor of the Department of Electronics and Electronic Communications

Donchenko Andrii, head of laboratories of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

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

Sukhorukov Yaroslav, master's degree student
Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ДИНАМІКА АСИНХРОННОГО ПУСКУ СИНХРОННОГО ДВИГУНА З ОБМЕЖЕННЯМ СТРУМІВ СТАТОРА ТА ПЕРЕНАПРУГ НА ОБМОТЦІ ЗБУДЖЕННЯ

У роботі розглянуті режими асинхронного пуску синхронних двигунів в існуючих пристроях. Для підвищення асинхронного моменту двигуна застосовані ємнісні накопичувачі енергії в колі збудження. Для обмеження струмів статора застосовується тиристорний регулятор напруги. Обмеження перенапруг на обмотці збудження забезпечено тиристорними ключами за рівнем допустимої напруги. Виконані перехідні процеси запропонованого пристрою.

Ключові слова: асинхронний пуск; синхронний двигун; обмеження струмів; статор; перенапруга; ємнісний накопичувач енергії.

The work considers modes of asynchronous start of synchronous motors in existing devices. To increase the asynchronous torque of the motor, capacitive energy storage devices are used in the excitation circuit. A thyristor voltage regulator is used to limit stator currents. Limitation of overvoltages on the excitation winding is provided by thyristor switches according to the level of permissible voltage. Transient processes of the proposed device have been completed.

Keywords: asynchronous start; synchronous motor; limitation of currents; stator; overstrain; capacitive energy storage.

Постановка проблеми

Пуск синхронного двигуна (СД) є невід'ємною частиною всіх виробничих процесів, зумовлюючи керованість промислового виробництва загалом. Водночас, пускові процеси призводять до особливих наслідків, обумовлюють підвищення аварійності електромеханічного обладнання та збільшення різноманітних видів ресурсних витрат, які суттєво впливають на техніко-економічні показники роботи підприємства.

Прямий пуск потужних електроприводів пов'язаний із значними ресурсними витратами. Енергоспоживання СД в режимі пуску перевищує цей показник для номінального режиму роботи в 15—25 разів, процес пуску суттєво зменшує залишковий технічний ресурс як електро-механічного, так і технологічного обладнання. Так, вартість одного пуску для СД потужністю 3,5 МВт, з огляду на початкову вартість, може сягати 50000—60000 грн. Також процеси пуску створюють додаткові економічні ризики підприємства, пов'язані з порушенням роботи через локальне зниження якості напруги живлення.

Оскільки у режимі асинхронного пуску обмотка збудження (ОЗ) є джерелом струму, то

збільшення величини пускового резистора або ємнісного опору накопичувача енергії (НЕ) призводить до значної перенапруги на контурі збудження. Виходячи з викладеного, обмеження перенапруг на цьому контурі є важливою науково-практичною задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Для зрушення механізмів із значним моментом статичного опору необхідний відповідний пусковий момент. Найпростішим способом збільшення моменту являється вмикання в 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 моментів і струмів є актуальною задачею.

Існуючі способи та пристрої для асинхронного пуску синхронного двигуна ґрунтуються на компенсації електромагнітної інерційності контурів збудження шляхом вмикання резисторів, накопичувальних акумуляторів енергії, розчепленні обмотки збудження з ємностями, а також компенсуючої електрорушійної сили [1—4], що ускладнює пристрої і знижує їх надійність.

Підвищення середнього значення моменту в режимі асинхронного пуску, може бути досягнуто збільшенням активного опору в контурі збудження. Проте зі збільшенням кратності пускового резистора фаза струму наближається до оптимальної, а її амплітуда зменшується. Тому найбільше значення середнього моменту при фіксованому ковзанні забезпечується при пусковому опорі, коли фаза струму ОЗ складає $\pi/4$. Однак при цьому амплітуда струму зменшується в $\pi/8$ разів у порівнянні з її значенням при короткозамкненій ОЗ, що обмежує подальше підвищення середнього моменту цієї обмотки [5].

Вмикання в контур збудження НЕ з незмінною ємністю дозволяє покращувати асинхронну характеристику СД в деякому обмеженому діапазоні ковзання, а в інших зонах ковзання може статися значне погіршення пускових властивостей двигуна, аж до появи гальмівних моментів в області напівсинхронної швидкості. Для покращення характеристик застосовується багатоступеневий накопичувач енергії, що ускладнює конструкцію [6].

У наведених роботах недостатньо визначено вплив ємнісного накопичувача енергії на струми статора та рівень перенапруги на ЄНЕ.

Формулювання мети дослідження

Дослідження динаміки пускових режимів СД з обмеженням струмів статора та перенапруг ОЗ.

Виклад основного матеріалу

Принципову схему одного із можливих варіантів системи полегшеного пуску СД наведено на рис. 1.

У залежності від напруги пробією стабілітронів і величини резисторів можливі наступні схеми пускових пристроїв в обмотці збудження:

1. Послідовне вмикання R_1 і ЄНЕ при $R_2 = R_3 = 0$.
2. Паралельне вмикання ЄНЕ і резисторів R_2 і R_3 при $R_1 = 0$.
3. Послідовно-паралельне вмикання резисторів і ЄНЕ.

У статорні кола СД увімкнені датчики струму ТА і напруги ТУ, сигнали яких подаються на один із входів системи керування АУЗ, а на другий вхід — сигнал заданої величини струму або моменту від АУ.

Оскільки розгін СД здійснюється під дією середнього значення електромагнітного моменту, що створюється пусковою обмоткою й обмоткою збудження, то доцільно визначити пускові характеристики двигуна в системі керування ТРН з ЄНЕ у колі збудження.

Стосовно високовольтних СД значної потужності вмикання в ОЗ ЄНЕ в залежності від схеми вмикання останніх і параметрів двигуна слід мати на увазі, що можуть викликати небезпечні перенапруги, які перевищують у декілька разів максимальне значення трансформаторної е.р.с., наведеної в ОЗ.

Для обмеження перенапруг на ОЗ у процесі асинхронного пуску СД необхідно вимикати ЄНЕ за рівнем допустимої напруги. Допустимий рівень перенапруг на ОЗ досягається застосуванням тиристорних ключів при відповідному виборі напруги пробією стабілітронів, увімкнених у керувальні кола тиристорних ключів. При досягненні небезпечного рівня напруги на ОЗ пробиваються стабілітрони та тиристорні ключі шунтують ЄНЕ або останній шунтується резистором.

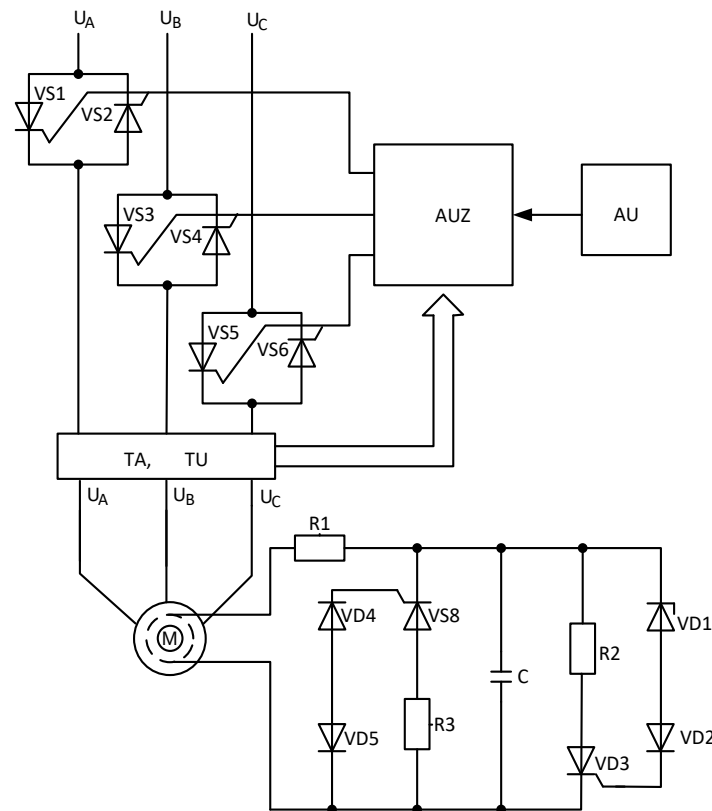


Рис. 1. Принципова схема асинхронного пуску СД за схемою ТРН–СД

Для порівняльної оцінки різних типів пускозахисних кіл отримані розрахункові залежності режиму асинхронного пуску потужного СД типу СДС3-2000-100 з номінальним збудженням 186 В. З цією метою було використано математичну модель, яка представлена повними рівняннями Парку-Горьова в осях d , q і системі відносних одиниць з урахуванням включення в ОЗ ЄНЕ, пускового та шунтуючого резисторів. Як базовий варіант за рівнем перенапруг на ОЗ прийнятий резисторний пуск СД з $R_n = 10R_f$ (рис. 2). У табл. 1 наведено розрахункові залежності режиму асинхронного пуску без обмеження рівня перенапруги на ОЗ. Аналіз наведених залежностей показує, що максимальні та входні моменти значно вищі, ніж при резисторному пуску (варіант 1), проте рівень перенапруг на ОЗ досить великий, що може викликати пробій ізоляції ротора СД. Прийнятні результати за рівнем перенапруг на ОЗ можуть бути отримані при паралельному або послідовно-паралельному вмиканні резисторів та значній за величиною НЕ.

Таблиця 1. Результати розрахунків пуску СД типу СДС3-2000-100

№ варіанту	Параметри ПЗК	$m_{\max}$, В.О.	$m_{\text{вх}}$, В.О.	$i_{1\max}$, В.О.	$i_{f\max}$, В.О.	$e_{f\max}$, В.О.	$u_{f\max}$, В.О.	$u_{\text{смах}}$, В.О.
С обмеженням рівня перенапруг на ОЗ								
1	$R_n = 10R_f$	4,67	2,17	8,93	3,9	0,339	0,105	—
2	$R_n = 10R_f$, $C_{\text{посл}} = 2000$ мкФ	4,93	2,58	8,85	3,74	0,330	0,121	0,0298
3	$R_{\text{СН}} = 10R_f$, $C_{\text{пар}} = 2000$ мкФ	4,78	2,39	9,08	4,22	0,343	0,137	0,0297
4	$R_n = 6R_f$, $R_{\text{СН}} = 4R_f$, $C_{\text{пар}} = 2000$ мкФ	4,74	2,71	8,96	3,98	0,353	0,101	0,0299

Результати розрахунків при обмеженні рівня перенапруги на ОЗ тиристорними ключами представлені в табл. 1 (варіанти 2—4). Шунтування ЄНЕ тиристорними ключами, обмежуючи рівень перенапруг, дещо знижує ефективність розглянутих пускозахисних кіл, проте максимальні та входні моменти вищі, ніж у базовому варіанті резисторного пуску СД. На рис. 2, 3, 4 показані розрахункові залежності режиму асинхронного пуску СД при обмеженні рівня перенапруги на ОЗ.

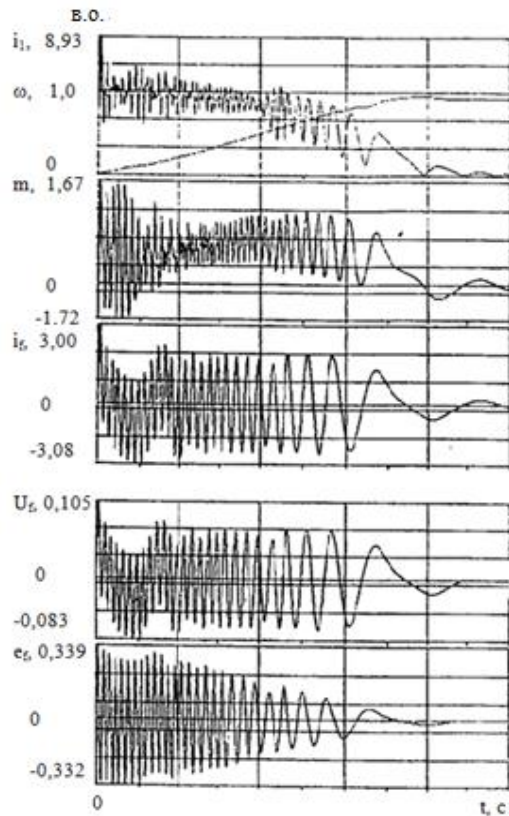


Рис. 2. Розрахункові залежності асинхронного пуску СД при $R_d = 10R_f$

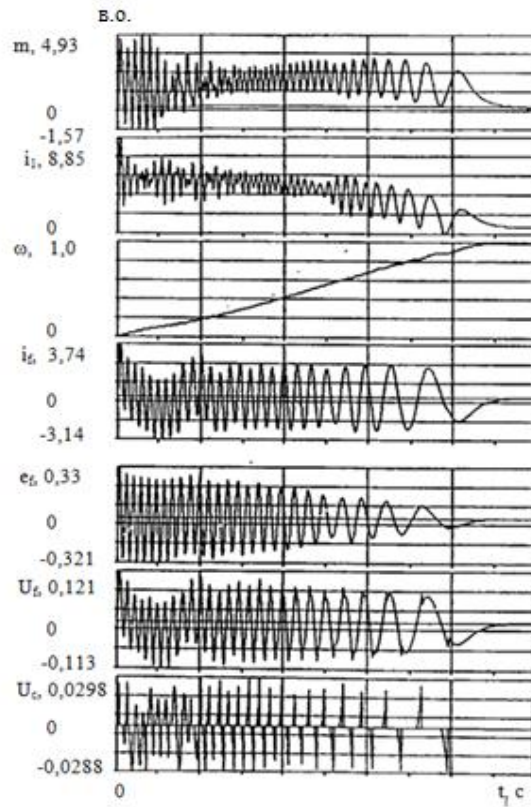


Рис. 3. Розрахункові залежності асинхронного пуску СД при $C = 2000$ мкФ, $R_d = 10R_f$

Для розрахунку динаміки пускових режимів використовується повна система диференціальних рівнянь СД в осях d, q і системі відносних одиниць (в.о.):

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

де H_J — стала агрегату.

Розрахунок струмів за поздовжньою та поперечною осями, струму контуру збудження, струмів подовжнього і поперечного демпферних контурів здійснюється за виразами:

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \Delta_{ID} / \Delta_{AD}; \\ i_q &= \Delta_{IQ} / \Delta_{AQ}; \\ i_f &= \Delta_{IF} / \Delta_{AF}; \\ i_{kd} &= \Delta_{IKD} / \Delta_{AD}; \\ i_{kq} &= \Delta_{IKQ} / \Delta_{AQ}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Визначення Δ_{ID} , Δ_{IQ} , Δ_{IF} , Δ_{IKD} , Δ_{IKQ} , Δ_{AD} , Δ_{AQ} здійснюється за співвідношеннями:

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta_{AD} &= x_{\sigma} (x_{\sigma f} \cdot x_{\sigma kd}) + x_{ad} (x_{\sigma f} \cdot x_{\sigma kd} + \\
 &\quad + x_{\sigma} \cdot x_{\sigma kd} + x_{\sigma} \cdot x_{\sigma f}); \\
 \Delta_{AQ} &= x_{\sigma} \cdot x_{\sigma kq} + x_{aq} \cdot x_{\sigma kq} + x_{aq} \cdot x_{\sigma}; \\
 \Delta_{ID} &= (x_{\sigma f} \cdot x_{\sigma kd} + x_{ad} \cdot x_{\sigma kd} + x_{\sigma f} \cdot x_{ad}) \psi_d - \\
 &\quad - x_{ad} \cdot x_{\sigma kd} \cdot \psi_f - x_{ad} \cdot x_{\sigma f} \cdot \psi_{kd}; \\
 \Delta_{IQ} &= (x_{\sigma kq} + x_{aq}) \cdot \psi_q - x_{aq} \cdot \psi_q; \\
 \Delta_{IF} &= -x_{ad} \cdot x_{\sigma kd} \cdot \psi_d + (x_{\sigma} \cdot x_{\sigma kd} + x_{ad} \cdot x_{\sigma kd} + \\
 &\quad + x_{\sigma} \cdot x_{ad}) \psi_f - x_{ad} \cdot x_{\sigma} \cdot \psi_{kd}; \\
 \Delta_{IKD} &= -x_{ad} \cdot x_{\sigma f} \cdot \psi_d - x_{\sigma} \cdot x_{ad} \cdot \psi_f + (x_{\sigma} \cdot x_{\sigma f} + \\
 &\quad + x_{ad} \cdot x_{\sigma f} + x_{\sigma} \cdot x_{ad}) \psi_{kd}; \\
 \Delta_{IKQ} &= -x_{aq} \cdot \psi_q + (x_{\sigma} \cdot x_{aq}) \psi_{kq}.
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

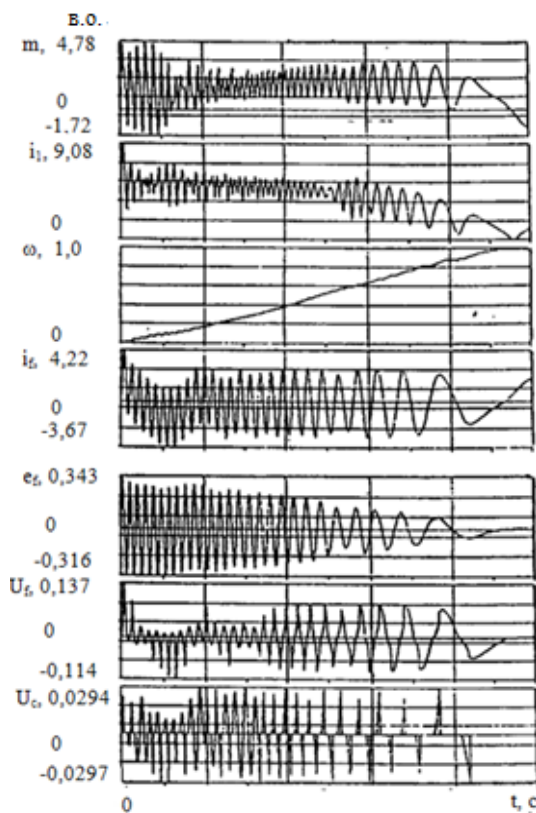


Рис. 4. Розрахункові залежності асинхронного пуску СД при паралельному вмиканні $C = 2000$ мкФ, $R_d = 10R_f$

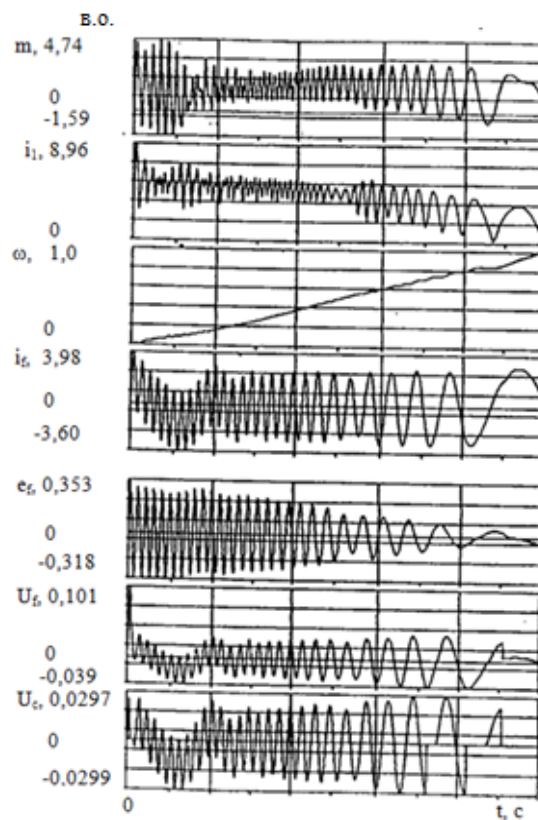


Рис. 5. Розрахункові залежності асинхронного пуску СД при послідовно-паралельному вмиканні $R_d = 6R_f$, $R_d = 4R_f$, $C = 2000$ мкФ

Розрахункові залежності пускових характеристик ЄНЕ наведені на рис. 2—5. Значення моментів, струмів у в.о. зведені в табл. 1.

Випробування виконанні на модельному двигуні.

В якості модельного двигуна використовувався СД типу МСА-72/4А з наступними параметрами: $P_H = 12$ кВт, $U_{1H} = 380$ В, $i_{1H} = 21,6$ А, $U_{fH} = 22$ В, $i_{fH} = 21$ А, $n_H = 1500$ об/хв.

Режим асинхронного пуску СД з десятиразовим пусковим резистором був прийнятий в якості базового варіанту. Аналіз осцилограми цього режиму показав, що амплітудні значення струмів статора і ротора відповідно дорівнюють 320 А і 46 А, а максимальна перехідна напруга на ОЗ складає 505 В (рис. 6).

При вмиканні з'єднаних п'ятиразових пускового і шунтуючого резисторів і НЕ ємністю 300 мкФ виникає зниження струму статора до величини 280 А при зростанні струму обмотки збудження до величини 58 А (рис. 7), що відповідає зниженню струму статора на 12,5 % і зростанню струму обмотки збудження на 26 %.

Для обмеження рівня перенапруг на ЄНЕ шунтується тиристорними ключами, керованими за рівнем напруги за рахунок вмикання в керувальні кола стабілітронів з напругою пробою 162 В. Із осцилограми цього режиму випливає, що рівень перехідної напруги знизився на 31 % у порівнянні з резисторним пуском і складає 347 В.

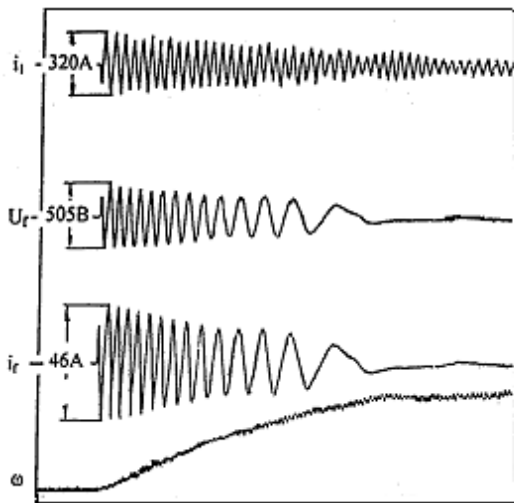


Рис. 6. Осцилограма асинхронного пуску СД з десятиразовим резистором

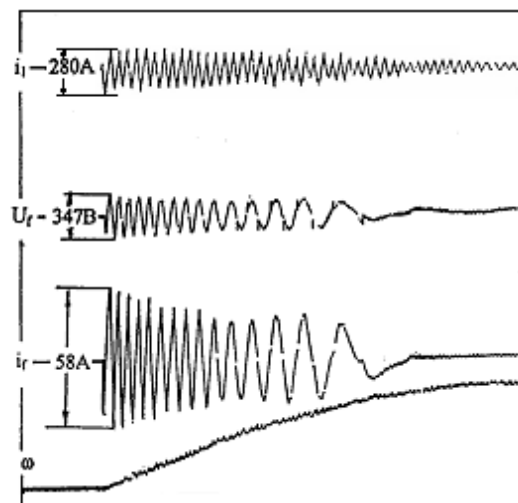


Рис. 7. Осцилограма асинхронного пуску СД з НЕ і ТРН в колі статора

Висновки

1. За розробленою універсальною програмою з врахуванням структури контуру збудження виконано розрахунок перехідних процесів асинхронного пуску синхронного електропривода (СЕП) з ЄНЕ. Встановлено, що вмикання ємнісного НЕ в контур ОЗ спричиняє суттєву зміну характеру перехідних процесів, що необхідно враховувати при розробці пускових пристроїв для асинхронного пуску СД.

2. Можливості формування електромагнітного моменту в схемах збудження з ЄНЕ суттєво ширші за ті, що є у традиційних системах з пусковим резистором. Пристрої з ЄНЕ дозволяють підвищити струм ОЗ у період пуску без небезпеки перенапруг на елементах контуру збудження СД.

3. Достовірність пускових режимів СД з розробленими схемотехнічними рішеннями підтверджено осцилограмами, отриманими на фізичних моделях.

4. На основі експериментальних досліджень режимів асинхронного пуску СД доведено, що вмикання електричної ємності НЕ в контур збудження з різними даними пускових та шунтуючих резисторів дозволяє суттєво збільшити електромагнітний момент СД. Встановлено, що при послідовному вмиканні електричної ємності НЕ і пускового резистора значно зростає пусковий і максимальний моменти СД, а при паралельному вмиканні електричної ємності НЕ та резистора зростають входні моменти. Ці особливості дозволяють створити високоефективні системи керування контуром збудження для СЕП технологічних механізмів із значним моментом статичного опору на підсинхронній швидкості.

5. Для обмеження перенапруг на ОЗ у процесі асинхронного пуску СД необхідно вимикати СНЕ при досягненні допустимого рівня напруги, наприклад, шляхом вмикання стабілітрів у керувальні кола тиристорних ключів, які шунтують накопичувачі енергії.

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. 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.
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.
4. Нізімов В.Б. Застосування накопичувачів енергії для асинхронного пуску синхронних двигунів. *НДА України*. 2000. № 1. С. 49–51.
5. Спосіб пуску синхронного двигуна: пат. 98412 Україна. № 201103138; заявл. 17.03.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. 8 с.
6. Спосіб пуску синхронного двигуна та пристрій для його реалізації : пат. 106667 Україна. № 201300459; заявл. 14.01.2013; опубл. 29.09.2014 Бюл. № 18.

DYNAMICS OF ASYNCHRONOUS START OF A SYNCHRONOUS MOTOR WITH STATOR CURRENT LIMITATION AND OVERVOLTAGE ON THE EXCITATION WINDING

Abstract

Starting mode of a synchronous motor is an integral part of all production processes, determining the controllability of industrial production in general. At the same time, starting processes lead to special consequences, cause an increase in the accident rate of electromechanical equipment and an increase in various types of resource costs, which significantly affect the technical and economic performance of the enterprise.

Since in the asynchronous starting mode the excitation winding is a current source, an increase in the value of the starting resistor or the capacitive resistance of the energy storage device leads to a significant overvoltage on the excitation circuit, so limiting overvoltages on this circuit is an important scientific and practical task.

Existing methods and devices for asynchronous starting of a synchronous motor are based on compensation of electromagnetic inertia of the excitation circuit by including resistors, energy storage devices, decoupling the excitation winding from capacitors, and compensating electromotive force, which complicates the devices and reduces the reliability of the device.

The inclusion of an energy storage device with a constant capacity in the excitation circuit improves the asynchronous characteristics of a synchronous motor in some limited slip range, while in other slip zones, a significant deterioration in the motor's starting properties can occur, up to the appearance of braking torques in the semi-synchronous speed region. To improve the characteristics, a multi-stage energy storage device is used, which somewhat complicates the design.

Based on experimental studies of the asynchronous starting modes of a synchronous motor, it is proved that the inclusion of the electric capacity of the energy storage device in the excitation circuit with different data of starting and shunt resistors can significantly increase the electromagnetic torque of a synchronous motor, and when the electric capacity of the energy storage device and the starting resistor are connected in series, the starting and maximum torques of the synchronous motor increase significantly: when the electric capacity of the energy storage device and the resistor are connected in parallel, the starting and maximum torques of the synchronous motor increase. These features make it possible to create highly efficient excitation circuit control systems for synchronous electric drives of technological mechanisms with a significant static resistance torque at sub-synchronous speed.

References

- [1] Rodkin D.I., Hladyr A.I. (2003). Systema formuvannia puskovykh kharakterystyk elektropryvodiv zminnoho strumu z vazhkymy umovamy pusku [*The system of formation of starting characteristics of alternating current electric drives with difficult starting conditions*]. Kremenchuk, KDPI. 10 p. [in Ukraine].
- [2] Chornyi O.P., Hladyr A.I., Osadchuk Yu.H., Kurbanov I.R., Voshun A.N. (2006). Puskovi systemy nerehulovanykh elektro-pryvodiv [*Starting systems of unregulated electric drives*]: monohrafiia. Kremenchuk : PP A.V. Shcherbatykh, 280 p. [in Ukraine].
- [3] 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. Tematychnyi vypusk. Kyiv. Chastyna 2. P. 62–65. [in Ukraine].
- [4] Nizimov V.B. (2000). Zastosuvannia nakopychuvachiv enerhii dlia asynkhronnoho pusku synkhronnykh dvyhuniv [*Application of energy storage for asynchronous start of synchronous motors*]. NDA Ukrainy, №1. P. 49–51. [in Ukraine].
- [5] Sposib pusku synkhronnoho dvyhuna [*The method of starting a synchronous motor*] : pat. 98412 Ukraina. № 201103138; zaiavl. 17.03.2011; opubl. 10.05.2012, Biul. № 9. 8 p. [in Ukraine].
- [6] 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 редколегії 19.11.2024