

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА. ЕЛЕКТРОНІКА

DOI: 10.31319/2519-2884.47.2025.7

УДК 621.313.323

Чугунов Д.В., асистент, ORCID: 0009-0001-9227-8717, 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

Chuhunov David, Assistant of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

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

Dniprovsky State Technical University, Kamyanske

ВПЛИВ КОМПЕНСОВАНОЇ ДЕМПФЕРНОЇ ОБМОТКИ НА ПУСКОВІ РЕЖИМИ СИНХРОННОГО ДВИГУНА

Наведено результати дослідження впливу компенсованої демпферної обмотки на пускові режими синхронного двигуна. Проведено аналіз сучасних наукових досліджень та публікацій з цієї тематики. Представлено систему диференціальних рівнянь електричної та механічної рівноваги, яка використовується для моделювання пускових режимів синхронних двигунів (СД) із компенсованою демпферною обмоткою. Побудовано структурну схему такого двигуна та наведено розрахункові залежності процесу його пуску за умови застосування стандартної та компенсованої демпферних обмоток. У зв'язку з цим дослідження впливу компенсованої демпферної обмотки на пускові режими синхронного двигуна є актуальним та доцільним.

Ключові слова: синхронний двигун; компенсована демпферна обмотка; пусковий режим.

The article presents the results of a study of the influence of a compensated damper winding on the starting modes of a synchronous motor. An analysis of modern scientific research and publications on this topic is carried out. A system of differential equations of electrical and mechanical equilibrium is presented, which is used to model the starting modes of a synchronous motor with a compensated damper winding. A structural diagram of such a motor is constructed and the calculated dependences of its starting process are given under the condition of using standard and compensated damper windings. In this regard, the study of the influence of a compensated damper winding on the starting modes of a synchronous motor is relevant and appropriate.

Keywords: synchronous motor; compensated damping winding; starting mode.

Постановка проблеми

Забезпечення асинхронного пуску потужних високовольтних синхронних двигунів (СД) з безпосереднім живленням від електромережі залишається актуальним завданням, передусім для електроприводів механізмів з великими моментами інерції та значним статичним опором. До таких механізмів належать кульові й стрижневі млини, барабанні окомковувачі, дробарки, скребкові конвеєри тощо. Актуальність цього питання також зростає в умовах живлення двигунів від довгих електричних мереж, що є характерним для приводів механізмів бурових установок нафто- та газовидобувної промисловості, а також турбокомпресорів газоперекачувальних станцій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз відомих способів і технічних засобів підвищення крутного моменту синхронних двигунів (СД) у режимі асинхронного пуску [1, 2] свідчить, що найпоширенішими серед них є:

застосування спеціальних законів керування контуром збудження, його ускладнення шляхом введення додаткових активних або пасивних елементів, модифікація конструкції СД, а також використання розщеплених або додаткових обмоток [3, 4].

Серед наведених методів найбільш ефективним є включення ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) у контур збудження СД. Такий підхід дозволяє суттєво підвищити пусковий момент без необхідності істотних змін у конструкції самого двигуна, що робить його технічно й економічно привабливим.

Разом із тим, основним недоліком зазначеного способу є залежність електромагнітного моменту, що розвивається двигуном під час пуску, від ступеня ємнісної компенсації індуктивного опору обмотки збудження (ОЗ). Оскільки ємність ЄНЕ обернено пропорційна квадрату ковзання, то зі зменшенням останнього відбувається зростання ємнісного опору, що може призводити до фактичного розриву контуру збудження. З цієї причини у практичних реалізаціях ЄНЕ зазвичай виконують багатоступінчастими, із забезпеченням шунтування на певних етапах пуску. В ідеальному випадку ємність накопичувача має змінюватися залежно від ковзання, що можливо реалізувати шляхом застосування ємнісних стрижнів у структурі демпферної обмотки [5, 6].

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є дослідження впливу компенсованої демпферної обмотки на пускові характеристики синхронного двигуна. Зокрема, досліджується, яким чином застосування компенсованої демпферної обмотки впливає на величину та стабільність пускового електромагнітного моменту, динаміку розгону ротора, рівень пускових струмів, а також загальну ефективність процесу асинхронного пуску. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкції та режимів роботи синхронних електроприводів, що працюють в умовах значних механічних навантажень і жорстких вимог до надійності та енергоефективності пускових процесів.

Виклад основного матеріалу

У режимі асинхронного пуску синхронного двигуна (СД) електромагнітний момент, що створюється контурами ротора, є пропорційним добутку електрорушійної сили (ЕРС) та струму ротора. При цьому між ЕРС, яка наводиться в осерді збудження (ОЗ), і струмом, що протікає в ньому, спостерігається фазовий зсув, який наближається до 90 електричних градусів. Аналогічно, у демпферній обмотці ротора також виникає фазовий зсув між ЕРС і струмом, проте цей зсув менший, ніж в ОЗ, через вищий активний опір демпферної обмотки. Характер моменту, що створюється, залежить від співвідношення фаз ЕРС і струму: при однакових знаках ЕРС і струму виникає руховий момент, а при протилежних — гальмівний момент.

Для підвищення рухового моменту від ОЗ необхідно зменшити фазовий зсув між ЕРС і струмом. Це досягається шляхом увімкнення пускових резисторів або ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) через контактні кільця ротора.

З метою компенсації індуктивного опору демпферної обмотки, останню можна виконати у вигляді ємнісних стрижнів, з'єднаних між собою та укладених у пази полюсів ротора СД. Кожен ємнісний стрижень складається з: плоских шин, розділених шаром композитного діелектрика змінної товщини та ізольованих за допомогою пазової ізоляції. Таке конструктивне рішення дозволяє покращити пускові характеристики СД, зменшити фазовий зсув та підвищити ефективність створення електромагнітного моменту в перехідному режимі.

У початковий момент пуску через явище витіснення струму в шинах ємнісних стрижнів їхня ефективна площа мінімальна, що і визначає початкове значення ємності накопичувача енергії. У міру розгону СД падає частота струму в шинах ємнісних стрижнів, що призводить до збільшення ефективної площі та величини ємності накопичувача енергії.

Наведена система диференціальних рівнянь електричних та механічних рівноваг використовується для дослідження впливу компенсованої демпферної обмотки на пускові режими СД. З урахуванням загальноприйнятих припущень, рівняння складових напруги електричних контурів СД за поздовжньою та поперечною осями у системі відносних одиниць мають такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} U_d &= r_1 i_d + p \Psi_d - \Psi_q \omega; \\ U_q &= r_1 i_q + p \Psi_q + \Psi_d \omega; \\ U_f &= r_f (K+1) i_f + p \Psi_f; \\ 0 &= r_{kd} i_{kd} + \frac{1}{p} x_{cd} i_{kd} + p \Psi_{kd}; \\ 0 &= r_{kq} i_{kq} + \frac{1}{p} x_{cq} i_{kq} + p \Psi_{kq}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де U_d і U_q — напруги поздовжнього та поперечного контурів статора відповідно; U_f — напруга контуру збудження; x_{cd} і x_{cq} — реактивні опори ЄНЕ у поздовжньому та поперечному контурах пускової обмотки відповідно; K — кратність пускового резистора.

Запишемо вирази для потокозчеплень контурів СД:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_d &= x_{\sigma} i_d + x_{ad} (i_d + i_f + i_{kd}) = x_{\sigma} i_d + \Psi_{\delta d}; \\ \Psi_q &= x_{\sigma} i_q + x_{aq} (i_q + i_{kq}) = x_{\sigma} i_q + \Psi_{\delta q}; \\ \Psi_f &= x_{\sigma f} i_f + x_{ad} (i_d + i_f + i_{kd}) = x_{\sigma f} i_f + \Psi_{\delta d}; \\ \Psi_{kd} &= x_{\sigma kd} i_{kd} + x_{ad} (i_d + i_f + i_{kd}) = x_{\sigma kd} i_{kd} + \Psi_{\delta d}; \\ \Psi_{kq} &= x_{\sigma kq} i_{kq} + x_{aq} (i_q + i_{kq}) = x_{\sigma kq} i_{kq} + \Psi_{\delta q}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Рівняння руху ротора:

$$\Psi_d i_q - \Psi_q i_d - M_c = J p \omega. \quad (3)$$

З врахуванням рівнянь (1) перепишемо вираз для потокозчеплень контурів (2) у формі, більш зручній для моделювання:

$$\begin{aligned} \Psi_d &= (x_{\sigma} i_d + \Psi_{\delta d}) = \frac{1}{p} (U_d + \Psi_q \omega - r_1 i_d); \\ \Psi_q &= (x_{\sigma} i_q + \Psi_{\delta q}) = \frac{1}{p} (U_q - \Psi_d \omega - r_1 i_q); \\ \Psi_f &= (x_{\sigma f} i_f + \Psi_{\delta d}) = \frac{1}{p} (U_f + r_f [K+1] i_f); \\ \Psi_{kd} &= (x_{\sigma kd} i_{kd} + \Psi_{\delta d}) = -\frac{1}{p} \left(r_{kd} i_{kd} + \frac{1}{p} x_{cd} i_{kd} \right); \\ \Psi_{kq} &= (x_{\sigma kq} i_{kq} + \Psi_{\delta q}) = -\frac{1}{p} \left(r_{kq} i_{kq} + \frac{1}{p} x_{cq} i_{kq} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

На основі рівнянь (4) отримуємо структурну схему СД з компенсованою демпферною обмоткою (рис. 1).

Розрахункові характеристики асинхронного пуску синхронного двигуна виконані для двигуна СДСЗ-2000-100 зі стандартною демпферною обмоткою та для цього двигуна з компенсованою демпферною обмоткою. Параметри запропонованої демпферної обмотки, як і стандартної, поздовжньої і поперечної осі, різні через явнополюсність ротора СД.

На рис. 2 наведені розрахункові залежності процесу пуску СД зі стандартною компенсованою демпферною обмоткою.

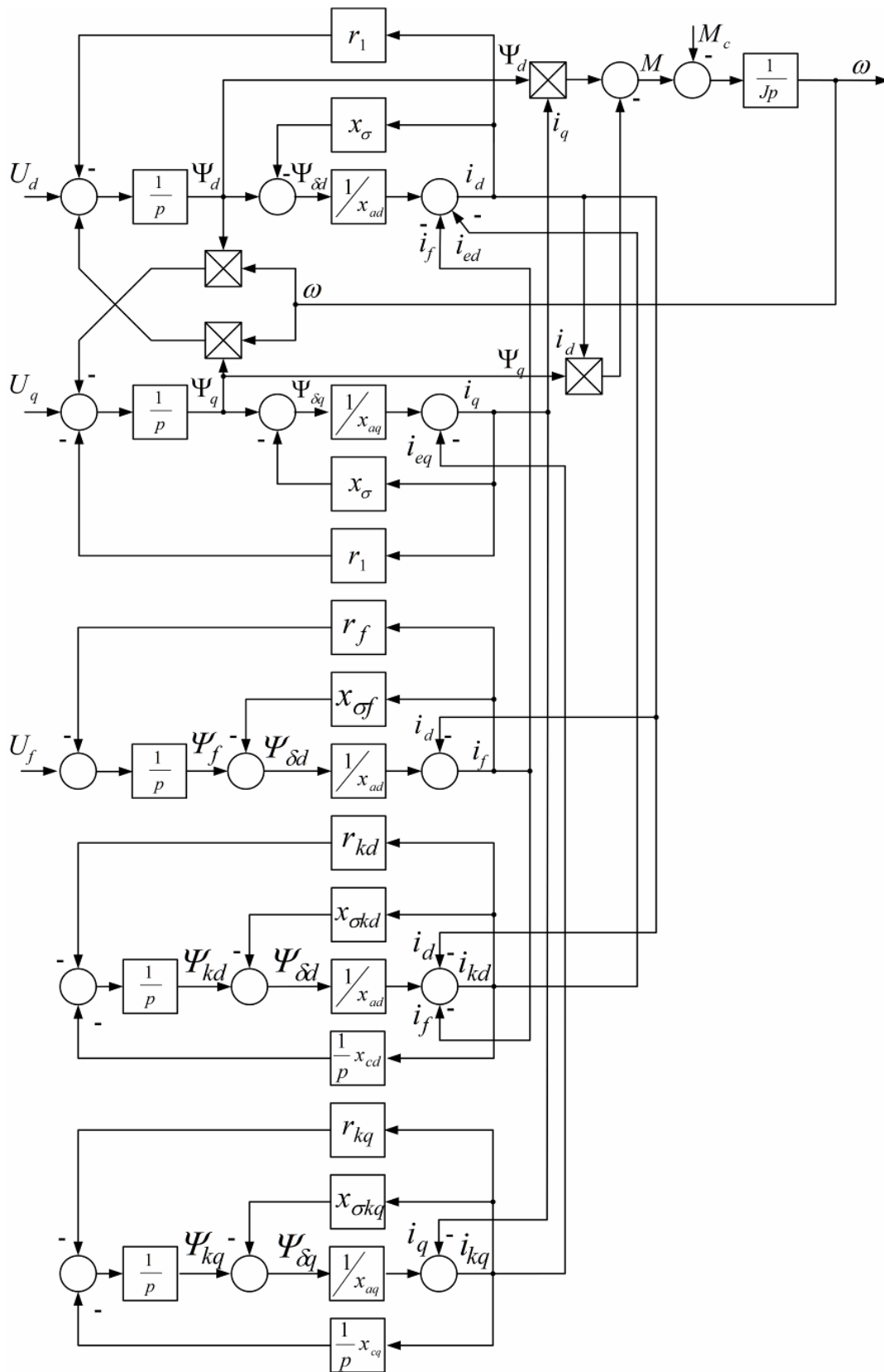


Рис. 1. Структурна схема СД із компенсованою демпферною обмоткою

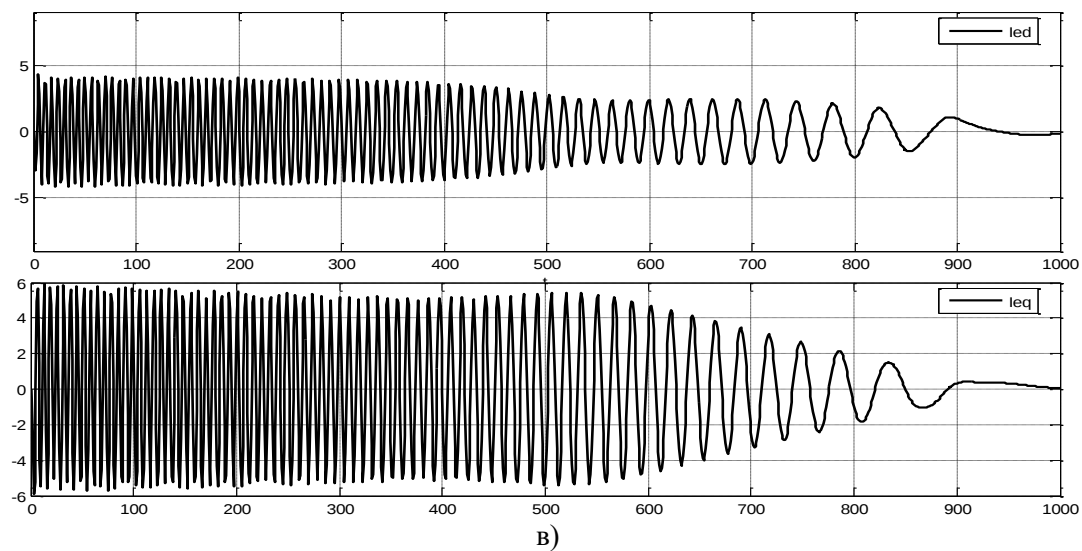
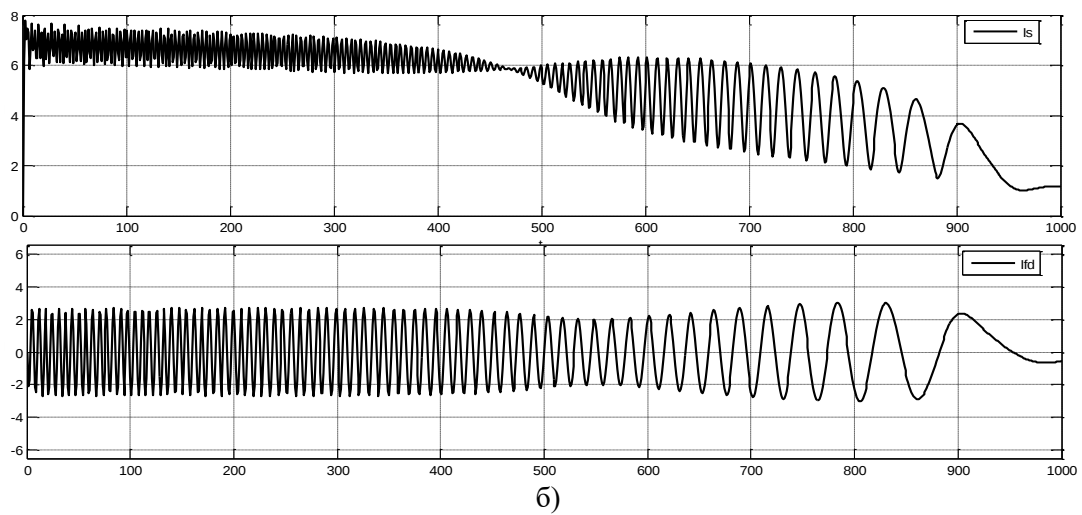
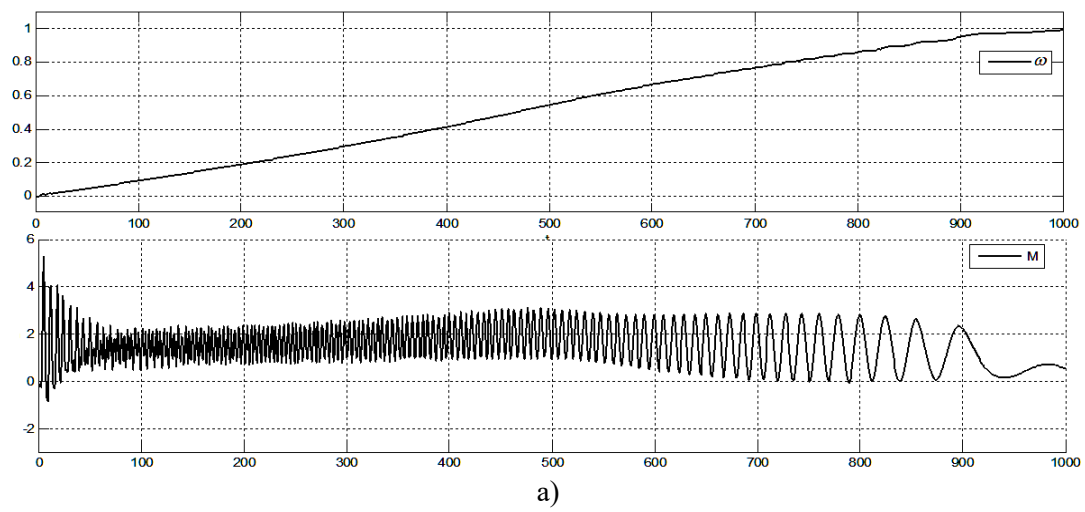
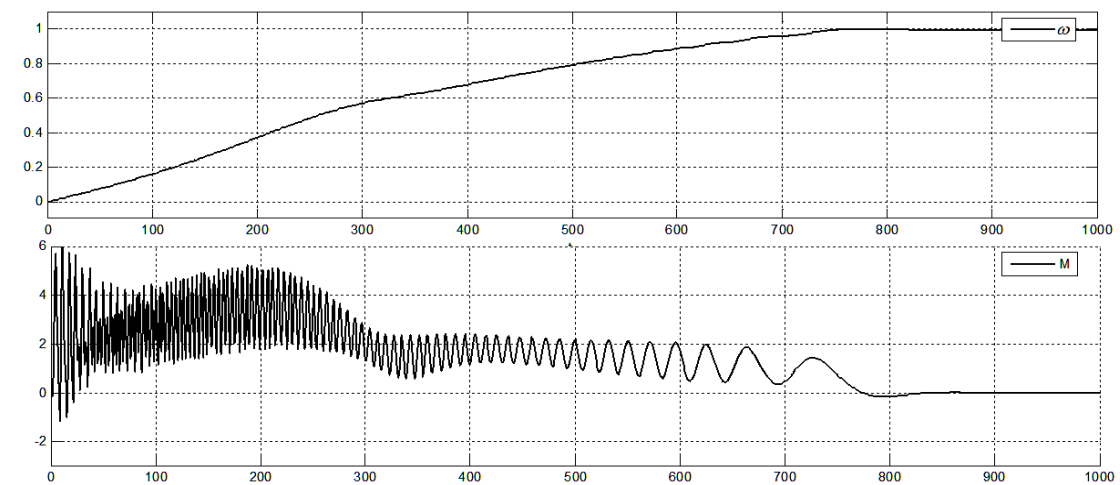
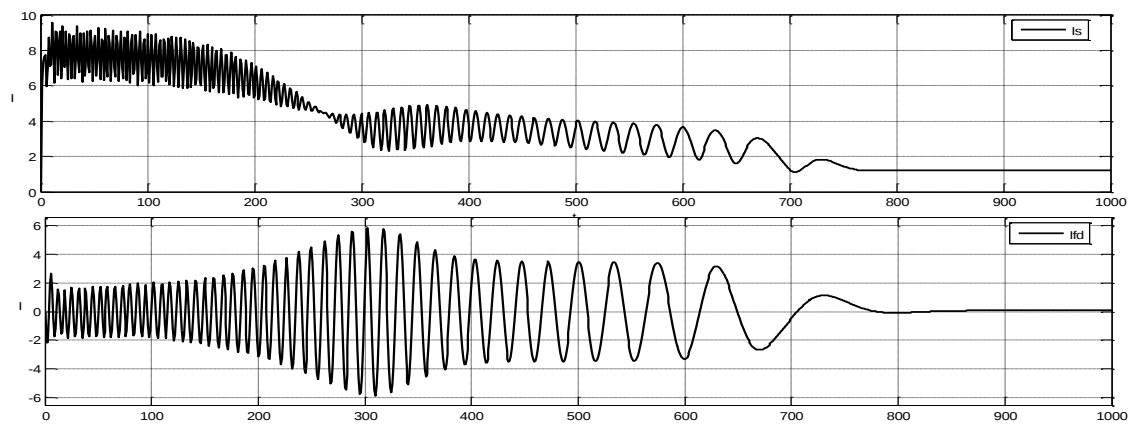


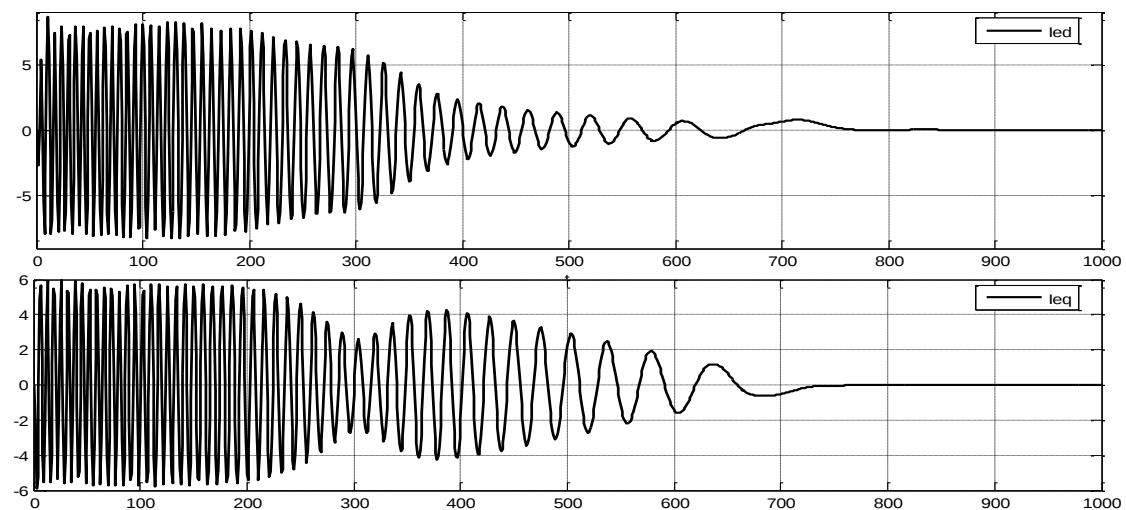
Рис. 2. Резисторний пуск СД з чотирикратним додатковим опором: а) частота обертання ротора та моменту СД; б) струм статора та обмотки збудження; в) струми демпферних контурів



а)



б)



в)

Рис. 3. Ємнісна компенсація повздовжнього і поперечного демпферних контурів $R = 4R_f$, X_{kcd} падає від X_{ad} до 0 за 700 с, X_{kcsq} падає від X_{aq} до 0 за 400 с: а) частота обертання ротора та моменту СД; б) струм статора та обмотки збудження; в) струми демпферних контурів

З аналізу розрахункових залежностей випливає, що середнє значення електромагнітного моменту змінюється від 1,2 в. о. до 2 в. о. при семиразовій величині обгинальних амплітуд струму статора. Час пуску СД становив 1000 ел. с. Струм в ОЗ становить 2 в. о., струм у поздовжньому демпферному контурі не перевищує значення 5 в. о., у поперечному — не більше 6 в. о.

Розрахункові залежності прямого асинхронного пуску СД із компенсованою демпферною обмоткою наведено на рис. 3.

З їхнього аналізу випливає, що середнє значення електромагнітного моменту лежить у межах від 2 в. о. з локальним максимумом до 5 в. о. в області близької до напівсинхронної швидкості обертання ротора. Обгинальна амплітуд струму статора є близькою до 8 в. о. Відбувається також суттєвий перерозподіл струмів у контурах ротора зі зростанням струму ОЗ від 2 в. о. до 6 в. о. Струми в демпферних контурах є близькими до 6 в. о. з різним часом згасання. Час пуску СД із компенсованими демпферними контурами становив 750 ел. с., що на 25 % менше у порівнянні з пуском СД зі стандартною обмоткою.

Висновки

Ємнісна компенсація індуктивності демпферної обмотки дозволяє підвищити середнє значення електромагнітного моменту СД та скоротити тривалість його пуску при незначному збільшенні струмів у відповідних контурах.

Список використаної літератури

1. Гладирь А.І., Гомілко В.І. Система формування пускових характеристик електроприводів змінного струму з важкими умовами пуску. *Електроінформ.* 2003. № 1. С. 17–19.
2. Чорний О.П. Пускові системи нерегульованих електроприводів: монографія. / О.П. Чорний та ін. Кременчук : ПП А.В. Щербатих, 2006. 280 с.
3. Нізімов В.Б. Застосування накопичувачів енергії для асинхронного пуску синхронних двигунів. *Науковий вісник НДА України.* 2000. № 1. С. 49–51.
4. Півняк Г.Г., Кириченко В.І., Бородай В.А. Про новий напрямок удосконалення крупних синхронних електродвигунів. *НАН України. Технічна електродинаміка. Тематичний випуск.* 2002. Ч. 2. С. 62–55.
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: H02P 1/50, H02P 1/46. №201300459; заявл. 14.01.2013; опубл. 29.09.2014, Бюл. № 18. 9 с.

INFLUENCE OF COMPENSATED DAMPER WINDING ON STARTING MODES OF A SYNCHRONOUS MOTOR

Abstract

Asynchronous starting of powerful high-voltage synchronous motors (SMs) powered directly from the mains is an urgent task, especially for electric drives with a large moment of inertia and static resistance - mills, crushers, conveyors, as well as mechanisms of drilling rigs and turbocompressors operating from extended mains. To increase the efficiency of asynchronous starting of SMs, several methods and technical solutions have been analyzed. Among them: the use of special laws of excitation circuit control; complicating the excitation circuit by introducing new elements; structural changes to the SM; the use of split or additional windings. The most effective of them is the inclusion of capacitive energy storage devices in the excitation circuit. This approach does not require significant structural changes in the motor, but significantly increases the starting torque. The main disadvantage of the method is the dependence of the starting torque on the degree of compensation of the inductive resistance of the excitation winding.

Given the change in capacitive resistance with a decrease in slip, the result may be an actual violation of the closedness of the excitation circuit. To eliminate this effect, multi-stage compensation

with shunting at certain stages of start-up is used. Ideally, the storage capacity should change depending on the slip, which can be achieved using capacitive rods in the damper winding.

The system of differential equations of electrical and mechanical equilibrium is used to model the influence of the compensated damper winding on the starting process. The structural diagram of the engine with such a winding is constructed and the calculated dependencies are given.

Capacitive compensation of the inductance of the damper winding allows to significantly increase the average value of the electromagnetic torque of the DC and reduce the start-up time. At the same time, the increase in currents in the circuits remains insignificant, which indicates the effectiveness and feasibility of using this method in industrial conditions.

References:

- [1] Chornyi, O.P., Hladyr, A.I., Osadchuk, Yu.H., Kurbanov, I.R., & Voshun, A.N. (2006). *Puskovi systemy nerehulovanykh elektropryvodiv: monohrafiia* [Starting systems of unregulated electric drives: monograph]. Kremenchuk: PP A.V. Shcherbatykh [in Ukrainian].
- [2] Hladyr, A.I., & Homilko, V.I. (2003). *Systema formuvannia puskovykh kharakterystyk elektropryvodiv zminnoho strumu z vazhkymy umovamy pusu* [System of forming starting characteristics of AC electric drives with heavy starting conditions]. *Elektroinform*, (1), 17–19 [in Ukrainian].
- [3] Nizimov, V.B. (2000). *Zastosuvannia nakopychuvachiv enerhii dlia asynkhronnoho pusu synkhronnykh dvyhuniv* [Application of energy accumulators for asynchronous starting of synchronous motors]. *Naukovyi visnyk NDA Ukrainy* [Scientific Bulletin of NDA Ukraine], (1), 49–51 [in Ukrainian].
- [4] Pivniak, H.H., Kyrychenko, V.I., & Borodai, V.A. (2002). *Pro novyi napriamok udoskonalennia krupnykh synkhronnykh elektrodvyhuniv* [On a new direction of improving large synchronous electric motors]. *NAN Ukrainy. Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk* [NAS of Ukraine. Technical Electrodynamics. Thematic issue], 2, 62–65 [in Ukrainian].
- [5] *Sposib pusu synkhronnoho dvyhuna* [Method of starting a synchronous motor]. (2012). Patent Ukrainy 98412, appl. 17.03.2011; publ. 10.05.2012, Bull. No. 9. 8 p. [in Ukrainian].
- [6] *Sposib pusu synkhronnoho dvyhuna ta prystrii dlia yoho realizatsii* [Method of starting a synchronous motor and device for its implementation]. (2014). Patent Ukrainy 106667, appl. 14.01.2013; publ. 29.09.2014 Bull. No. 18. 9 c. [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії 02.06.2025

Прийнята після рецензування 08.10.25

Опублікована 23.10.2025