

DOI: 10.31319/2519-2884.42.2023.11

УДК 621.313.323

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

**Шрамко Ю.Ю.**, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-8141-260X, e-mail: tehndir@gmail.com

**Бухінник Є.О.**, здобувач третього (доктор філософії) рівня, e-mail: egor.buhinnik@gmail.com

**Чугунов Д.В.**, здобувач другого (магістерського) рівня, e-mail: davidchugunov00@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

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

**Shramko Yury**, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

**Buhinnik Yehor**, postgraduate student

**Chugunov David**, master's degree student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

### ОПТИМІЗАЦІЯ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ СИНХРОННОГО ДВИГУНА З БАГАТОСТУПЕНЕВОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ ІНЕРЦІЙНОСТІ КОНТУРУ ЗБУДЖЕННЯ

*У роботі розглядається наукова задача, яка полягає в підвищенні пускового моменту СД для розвороту механізмів із значним моментом статичного опору згідно одночасного обмеження струмів статора та пускової обмотки за рахунок застосування тиристорного регулятора напруги з використанням багатоступеневої компенсації інерційності контуру збудження. Проблема пуску потужних СД з струмообмеженням не втрачає своєї актуальності, насамперед для розвороту механізмів зі значним моментом статичного опору, а також в умовах живлення двигунів від протяжних електричних мереж, що характерно для приводів механізмів бурових установок нафто- та газодобувної промисловості, турбокомпресорів газоперекручувальних станцій та кар'єрних екскаваторів.*

**Ключові слова:** багатоступенева компенсація інерційності; пусковий режим; синхронний двигун; контур збудження; тиристорний регулятор напруги.

*The paper solves an actual scientific problem, which consists in increasing the starting moment of the synchronous motor for reversing mechanisms with a significant moment of static resistance according to the simultaneous limitation of the currents of the stator and the starting winding due to the use of a thyristor voltage regulator with the use of multi-stage compensation of the inertia of the excitation circuit. The problem of starting powerful synchronous motors with current limitation does not lose its relevance, primarily for reversing mechanisms with a significant moment of static resistance, as well as in the conditions of powering engines from extended electrical networks, which is typical for drives of mechanisms of drilling rigs in the oil and gas industry, turbocompressors of gas pumping of stations and quarry excavators.*

**Keywords:** multi-stage inertia compensation; starting mode; synchronous motor; excitation circuit; thyristor voltage regulator.

#### Постановка проблеми

У сучасній промисловості помітна тенденція до розширення сфери застосування синхронних двигунів (СД) середніх і великих потужностей. Застосування таких двигунів з одного боку забезпечує досить високі техніко-економічні показники, а з іншого — вимагає застосування нових технічних рішень струмообмеження для їх пуску, особливо для приводу механізмів зі значним моментом статичного опору (кульові та стрижневі млини, дробарки, скребкові конвеєри), а також в умовах живлення двигунів від протяжних електричних мереж, що характерно для приводів механізмів бурових установок нафто- та газодобувної промисловості, турбокомп-

ресорів газоперекачувальних станцій та кар'єрних екскаваторів. Значні електродинамічні та струмові навантаження статорних та пускових обмоток роблять застосування асинхронного способу пуску потужних СД проблематичним, а в деяких випадках і неможливим.

#### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Параметричні способи пуску з використанням реакторів, автотрансформаторів та напівпровідникових регуляторів напруги (ТРН) забезпечують обмеження пускових струмів, проте не дозволяють створити необхідних пускових моментів для розвороту СД вище перерахованих механізмів.

Підвищення пускового моменту СД може бути досягнуто:

– застосуванням спеціальних законів керування контуром збудження (дискретне керування напругою збудження, безперервне чи ступінчасте зміна величини опору пускового резистора, і навіть їх спільне керування) [1, 2, 3];

– ускладненням системи збудження СД (пускові індукційні опори в роторі, системи збудження з перетворювачами двосторонньої провідності, ємнісні накопичувачі енергії в контурі збудження) [4, 5];

– зміною конструкції власне СД (застосування розщеплених обмоток збудження з послідовними конденсаторами, розміщення поперечної обмотки збудження) [6].

Існуючі способи і пристрої не дозволяють створити необхідних пускових моментів при обмеженні статорів струму на заданому рівні.

#### **Формулювання мети дослідження**

Мета дослідження — підвищення пускового моменту СД для розвороту механізмів із значним моментом статичного опору при обмеженні струмів статора за рахунок застосування тиристорного регулятора напруги з використанням багатоступеневої компенсації інерційності (БСКІ) контуру збудження.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження**

У режимі асинхронного пуску СД електромагнітний момент створюється переважно пусковий (короткозамкненою) обмоткою, а обмотка збудження (ОЗ) виявляється недовантаженою з таких причин. По-перше, маса міді ОЗ для великих СД перевищує масу міді статора обмотки. Тому, як показано в [1] для великого СД потужністю 3150 кВт, 500 об/хв, за час асинхронного пуску перевищення температури статора обмоток склало 10,4°C, а обмотки збудження — всього лише 0,087°C. По-друге, під час пуску, амплітуда струму частоти ковзання ОЗ лежить у межах (0,8...1,6) від номінального струму збудження.

Величина електромагнітного моменту ОЗ незначна через фазовий зсув між її ЕРС і струмом, близьким до 90 ел. градусів. При однойменній полярності цих величин створюється руховий момент, а за різнойменної — гальмівний. Внаслідок одновісного ефекту ОЗ, момент, що створюється нею, підсумовується з моментом пускової обмотки до півсинхронної швидкості, а після — віднімається. Тому для збільшення електромагнітного моменту СД за рахунок складової від обмотки збудження необхідно зменшити фазовий зсув між ЕРС і струмом ОЗ, збільшуючи амплітуду цього струму, що веде до перерозподілу навантаження між ОЗ і пусковою обмоткою. Такий ефект досягається включенням багатоступеневої компенсації інерційності (БСКІ) в ОЗ. Оскільки його реактивний опір обернено пропорційний ковзанню ротора СД, то при цьому також частково компенсується електромагнітна інерційність контуру збудження.

Відносний нелінійний ємнісний опір, який забезпечує максимум електромагнітного моменту СД протягом усього асинхронного пуску, визначається залежністю [2]:

$$x_c = \frac{ab + cs^d}{b + s^d}, \quad (1)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  — коефіцієнти апроксимації.

Оскільки реалізація безперервної зміни ємності поки що є складним технічним завданням, то ступінчаста зміна величини ємності накопичувача є більш доцільною.

Вмикання регулятора напруги дозволяє обмежити струмові та електродинамічні навантаження на обмотки статора зміною напруги.

Для оцінки впливу БСКІ на пуск СД в умовах обмеження напруги мережі живлення за допомогою регулятора, наведені розрахункові залежності пуску СД при ступінчастій зміні ємності накопичувача в залежності від ковзання.

Принципова схема пускового пристрою [6], що містить ТРН та багатоступеневий компенсатор інерційності, представлена на рис. 1.

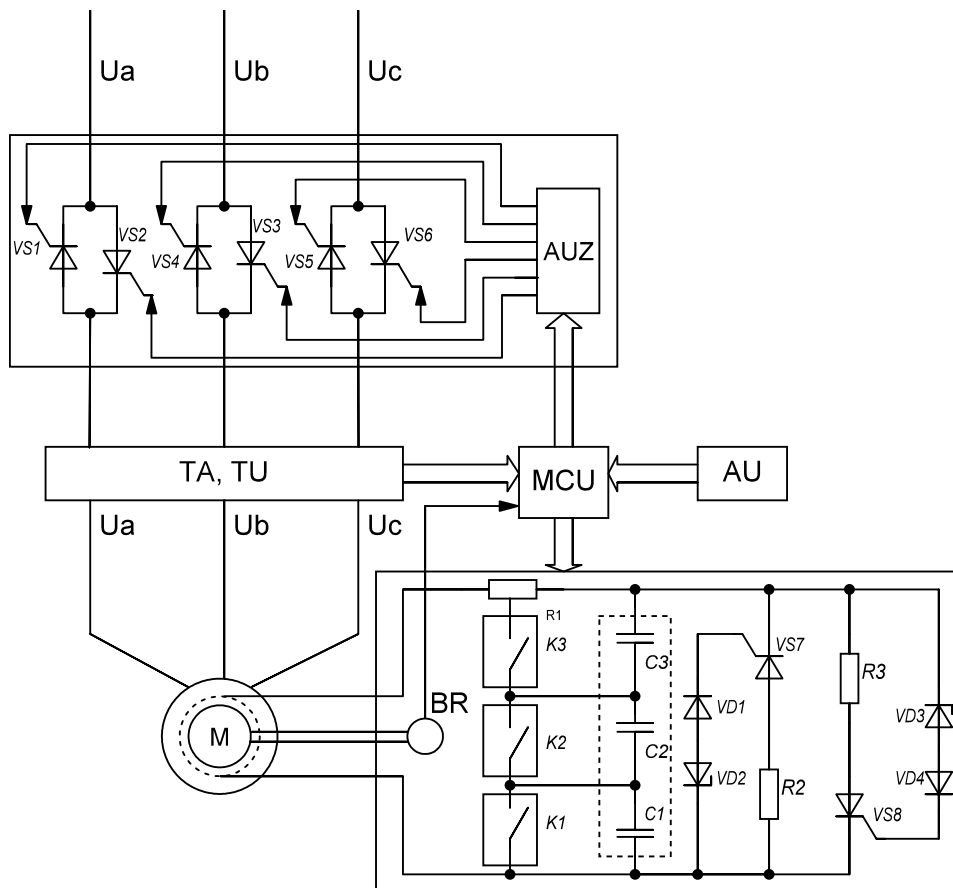


Рис. 1. Принципова схема пускового пристрою з БСКІ в контурі збудження і ТРН у статорі СД

Керування вихідною напругою ТРН здійснюється в залежності від величини струму статора, яка за допомогою датчиків ТА, ТУ, надходить на мікропроцесорний модуль (MCU), що формує керуючі сигнали для блоку керування тиристорами (AUZ) і здійснює контроль вихідної напруги ТРН. Комутація ключів БСКІ і, відповідно, зміна його ємності, проводиться у функції ковзання, що обчислюється шляхом вимірювання частоти обертання ротора двигуна.

При подачі напруги від ТРН на статор СД струм в ОЗ замикається через резистор  $R1$  і послідовно з'єднаний з ним БСКІ ( $C1$ ,  $C2$  і  $C3$ ). При збільшенні швидкості обертання ротора сумарна ємність БСКІ повинна збільшуватися відповідно (1), що досягається послідовним включенням ключів  $K1$ ,  $K2$  і  $K3$ .

На рис. 2 представлена залежність ковзання  $s$  моменту  $M$ , на рис. 3 — від струму статора  $I$ . Розрахунки виконані для двигуна типу СДСЗ–2000–100 для різних значень напруги перетворювача ( $U_1/U_{1н} = 1; 0,9; 0,8$ ) та при ступінчастій зміні ємності ( $C = 75; 100; 150$  мкФ) із послідовно включеним пусковим резистором  $R_n = 4R_f$ . Пунктирними лініями на рисунках зображені пускові характеристики СД при включенні в ОЗ лише чотирикратного пускового резистора.

Аналіз розрахункових залежностей показує, що застосування БСКІ дозволяє істотно збільшити електромагнітний момент СД при обмеженні струмів статора за рахунок величини напруги тиристорного регулятора.

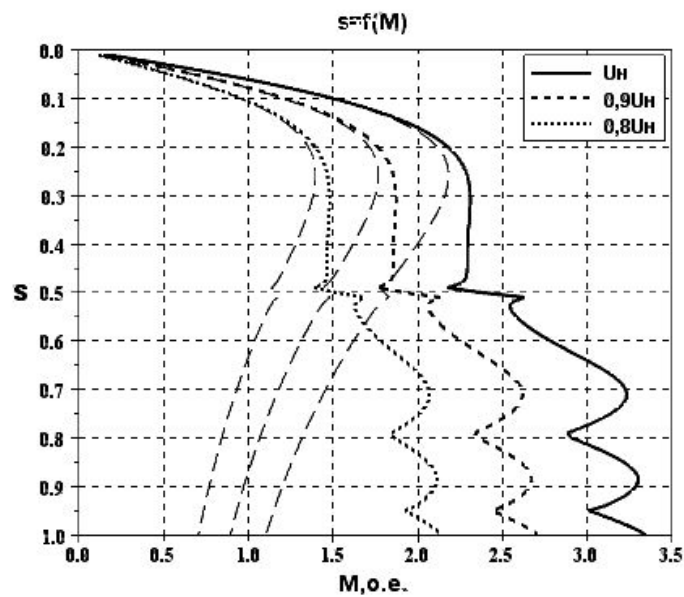


Рис. 2. Залежності моменту СД при БСКІ  $C = 75; 100; 150$

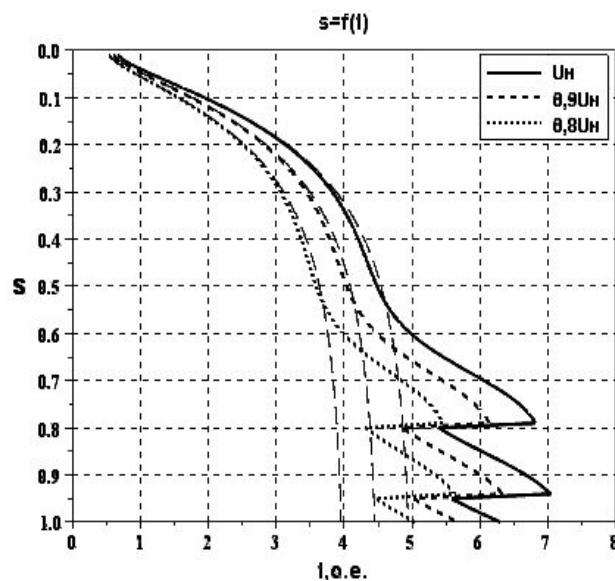


Рис. 3. Залежності струму СД при БСКІ  $C = 75; 100; 150$  мкФ

Таким чином, можна отримати бажану інтегральну характеристику СД для розвороту механізмів із значним моментом статичного опору.

В результаті моделювання пуску СД типу СДСЗ–2000–100 приводу кульового барабанного млина з розглянутим пристроєм, виконаного в ортогональній системі координат  $d-q$ , були отримані розрахункові залежності перехідних процесів. Номінальні параметри двигуна:  $P_H = 2000$  кВт,  $U_{1H} = 6000$ ,  $I_H = 229$  А,  $n_H = 100$  об/хв. Параметри ОЗ:  $U_{fH} = 51$ ,  $I_{fH} = 276$  А.

На рис. 4 представлені характеристики пуску двигуна із застосуванням запропонованої системи, а на рис. 5 — прямий асинхронний пуск із десятикратним додатковим резистором.

Застосування БСКІ дозволило підвищити електромагнітний момент, що розвивається двигуном, з дворазового до 2,5 від номінального. Внаслідок перерозподілу струмового навантаження між роторними контурами, струм у демпферній обмотці при пуску знизився в середньому на один номінал у поздовжній та поперечній обмотках.

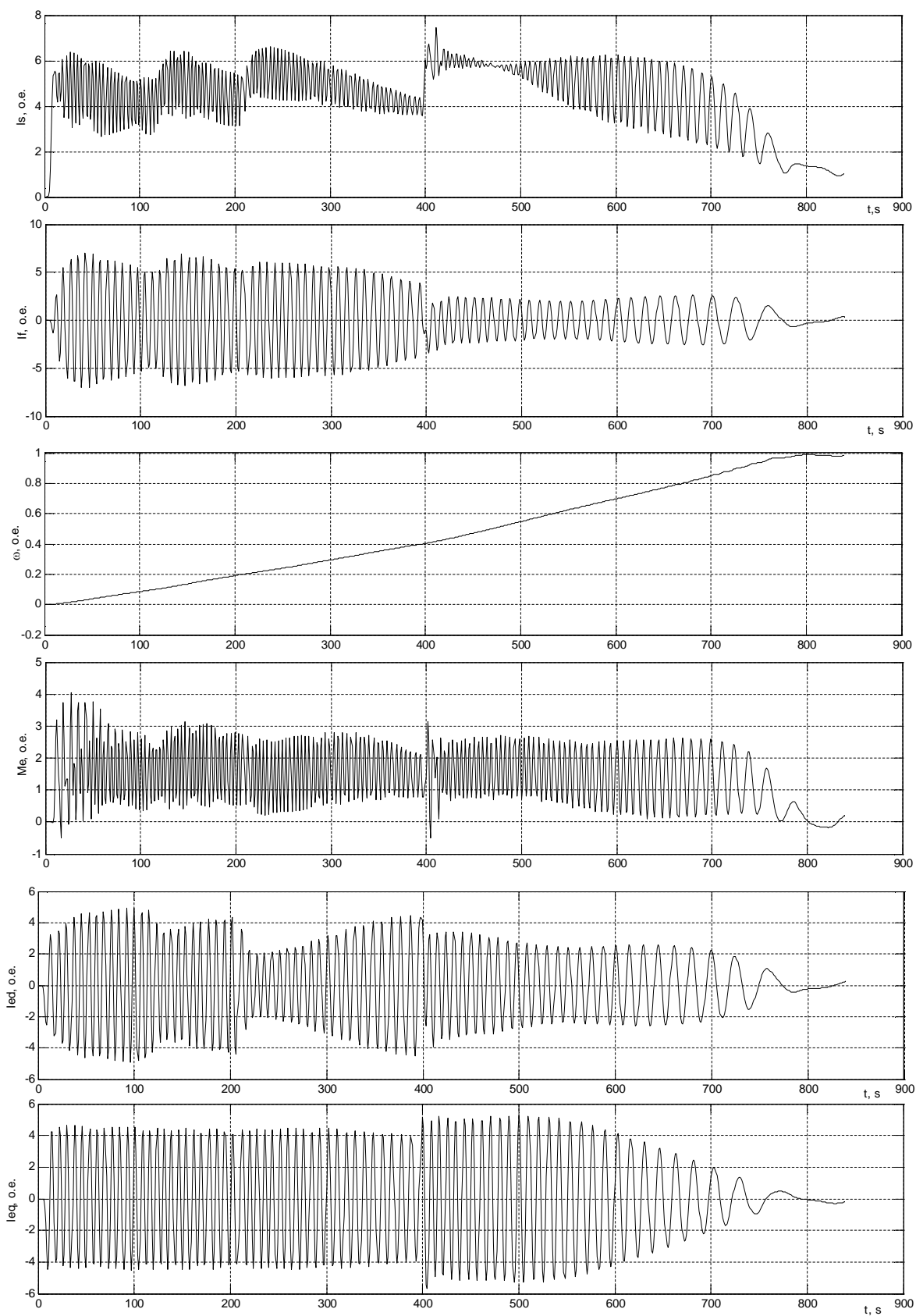


Рис. 4. Динамічні пускові характеристики СД з БСКІ

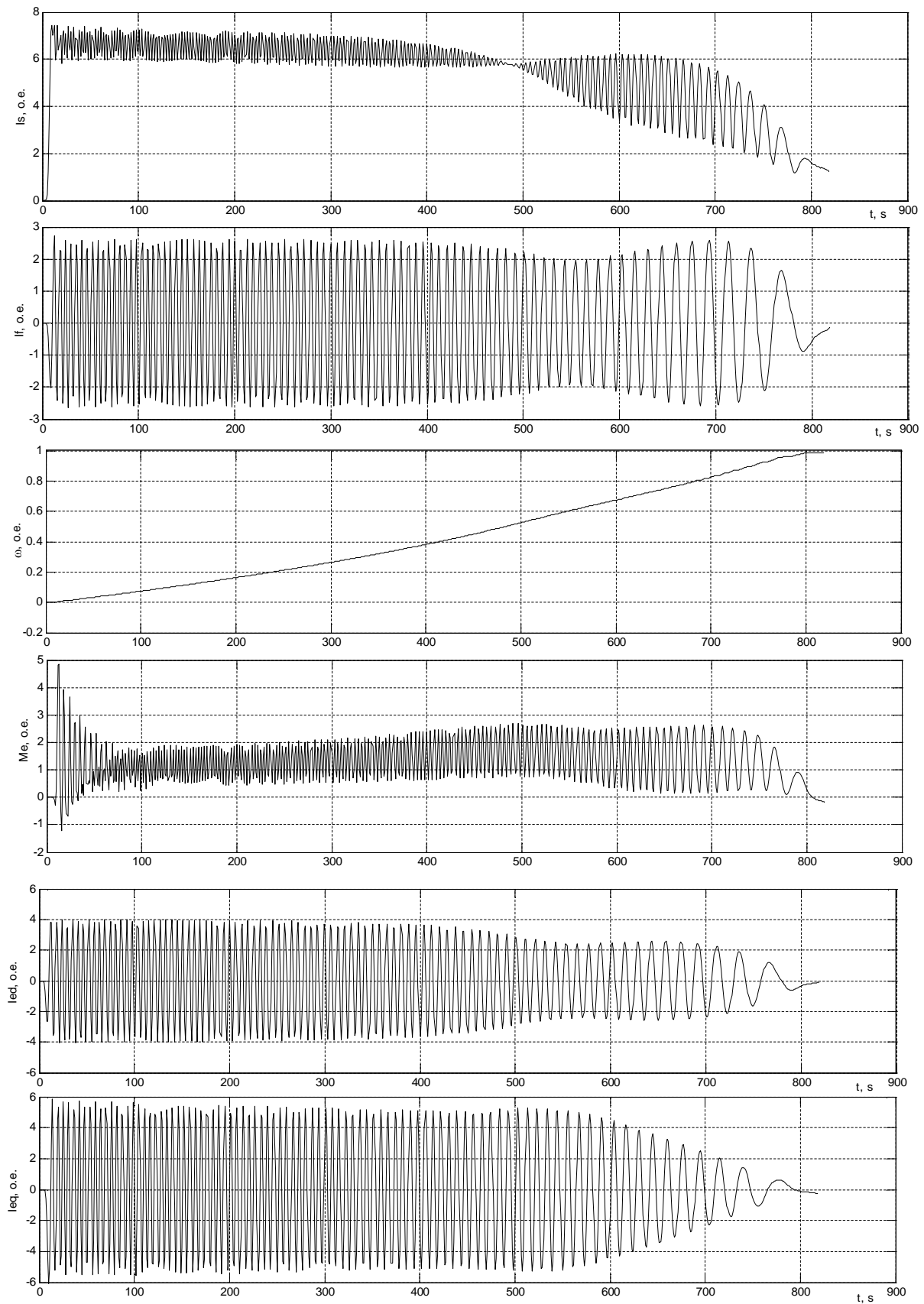


Рис. 5. Динамічні характеристики прямого асинхронного пуску СД

### Висновки

Застосування багатоступеневої компенсації інерційності в контурі збудження у поєднанні з регулятором напруги в колі статора забезпечить необхідний пусковий момент СД при зниженні струмового навантаження на обмотки статора.

### Список використаної літератури

1. Черный А.П., Гладырь А.И., Осадчук Ю.Г., Курбанов И.Р., Вошун А.Н. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: монография. Кременчуг : ЧП Щербатых А. В., 2006. 280 с.
2. Низимов В. Б. Применение накопителей энергии для асинхронного пуска синхронных двигателей. *Науковий вісник НГА України*. 2000. № 1. С. 49–51.
3. Пивняк Г.Г., Кириченко В.И., Бородай В.А. О новом направлении усовершенствования крупных синхронных двигателей. *Національна академія наук України. Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки»*. Київ , 2002. Ч. 2. С. 62–65.
4. Пирматов Н.Б., Ахматов М.Г., Камалов И.К. Исследование работы синхронного двигателя с возбуждением по продольной и поперечной осям при ударной нагрузке. *Електричество*. 2003. № 2. С. 64–65.
5. Низимов В.Б., Сьянов А.М., Качура А.В. Оптимизация пусковых режимов синхронных электроприводов с емкостными накопителями энергии. *Проблеми создания новых машин и технологий. Научные труды КГПУ*. Кременчуг, 2002. Вып. 1. С. 145–150.
6. Спосіб пуску синхронного двигуна та пристрій для його реалізації : пат. 106667 Україна. № 201300459; заявл. 14.01.3013; опубл. 29.09.2014. Бюл. № 18.

## OPTIMIZATION OF STARTING MODES OF A SYNCHRONOUS MOTOR WITH MULTISTAGE COMPENSATION OF THE INERTIA EXCITATION CIRCUIT

### Abstract

The work solves an actual scientific problem, which consists in increasing the starting moment of a synchronous motor for reversing mechanisms with a significant moment of static resistance according to the simultaneous limitation of stator currents due to the use of a thyristor voltage regulator with the use of multi-stage compensation of the inertia excitation circuit. The problem of starting a powerful synchronous motor with current limitation does not lose its relevance, primarily for reversing mechanisms with a significant moment of static resistance, as well as in the conditions of powering the motors from long electrical networks, which is typical for drives of mechanisms of drilling rigs in the oil and gas industry, turbocompressors of gas pumping stations and quarry excavators.

To evaluate the effect of the developed device on the start of a synchronous motor in the conditions of limiting the voltage of the power supply network with the help of a regulator, the calculated dependences of the motor start-up with a step change in the storage capacity depending on the slip are given.

The static dependence of sliding on the moment  $M$  is presented, and the stator current is presented. The dynamic characteristics of the engine start using the proposed system and the direct asynchronous start with a tenfold additional resistor are presented.

The use of the developed device made it possible to increase the electromagnetic moment developed by the engine from twice to 2.5 times the nominal one. As a result of the redistribution current load between the rotor circuits, the current in the damper winding at start-up decreased by an average of one rating in the longitudinal and transverse windings.

### References

- [1] Chernii A.P., Gladir A.I., Osadchuk Yu.G., Kurbanov I.R., Voshun A.N. (2006) *Puskovye sistemi nereguliruemikh elektroprivodov [Start-up systems unregulated electric drives]*. (Monografiya). Kremenchug : ChP Shcherbatikh A. V. [in Ukraine].
- [2] Nizimov V.B. (2000) *Primenenie nakopitelei energii dlya asinkhronnogo puska sinkhronnikh dvigatelei [The use of energy storage devices to asynchronously start synchronous motors]*. *Naukovii visnik NGA Ukraïni*, no. 3. P. 49–51 [in Ukraine].
- [3] Pivnyak G.G., Kirichenko V.I., Borodai V.A. (2002) *O novom napravlenii usovershenstvovaniya krupnikh sinkhronnikh dvigatelei [A new direction to improve large synchronous motors]*. Kïiv : *Tekhnichna yelektrodinamika. Tematichnii vipusk «Problemi suchasnoï yelektrotekhniki»*. vol.2. Natsionalna akademiya nauk Ukraïni. P. 62–65 [in Ukraine].
- [4] Pirmatov N.B., Akhmatov M.G., Kamalov I.K. (2003) *Issledovanie raboti sinkhronnogo dvigatelya s vzbuzhdeniem po prodolnoi i poperechnoi osyam pri udarnoi nagruzke [The research of the synchronous motor with excitation in the longitudinal and transverse axes under shock loadings]*. *Elektrichestvo*. no. 2. P. 64–65 [in Russian].
- [5] Nizimov V. B., Syanov J. M., Kachura A. V. (2002) *Optimizatsiya puskovikh rezhimov sinkhronnikh elektroprivodov s yemkostnimi nakopitelyami energii [Optimization of the starting mode of synchronous motors with capacitive energy storage]*. Kremenchug. *Problemi sozdaniya novikh mashin i tekhnologii. Nauchnie trudi KGPU*. vol. 1. P. 145–150 [in Ukraine].
- [6] Nizimov V.B., Kolichev S.V., Snizhko A.A. (2014) *Sposib pusku sinkhronnogo dviguna ta pristrïi dlya yogo realizatsïi [A method of starting a synchronous motor and a device for its implementation]* pat. 106667 in Ukraine. № 201300459; zaiav. 14.01.3013; opubl. 29.09.2014. *Biul. № 18* [in Ukraine].

Надійшла до редколегії 27.03.2023