

Технічні науки

УДК 621.313.323

Чугунов Давид В'ячеславович

*здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти
Дніпровського державного технічного університету*

Chugunov Davyd

*Postgraduate Student of the
Dniprovsky State Technical University*

ORCID: 0009-0001-9227-8717

Десна Дмитро Олексійович

*здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти
Дніпровського державного технічного університету*

Desna Dmytro

*Postgraduate Student of the
Dniprovsky State Technical University*

Нізімов Віктор Борисович

*доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри електротехніки та електромеханіки
Дніпровський державний технічний університет*

Nizimov Viktor

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Electrotechnics and Electromechanics Department*

Dniprovsk State Technical University

ORCID: 0000-0002-4580-5262

**КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ КОНТУРА ЗБУДЖЕННЯ
СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ ПУСКУ І САМОЗАПУСКУ**

CONTROL OF EXCITATION CIRCUIT PARAMETERS OF SYNCHRONOUS MOTORS AT START-UP AND SELF-START

Анотація. Значну питому вагу в забезпеченні безперервних і складних технологічних процесів на підприємствах металургійної, хімічної, нафтопереробної галузей промисловості мають синхронні двигуни (СД) з системами збудження (СЗ). Існуючі типи промислових механізмів і машин потребують різних пускових та вхідних моментів у роботі СД.

У залежності від вимог технологічних процесів для вирішення проблеми пуску потужних синхронних високовольтних двигунів запропоновані наступні схемні рішення: прямий асинхронний пуск із керуванням параметрами контуру збудження; пуск із керуванням по колу статора СД із використанням пристроїв, що змінюють параметри енергії джерела живлення; пуск із використанням допоміжних електричних машин і механізмів.

Під час прямого асинхронного пуску СД підвищення електромагнітного моменту можна досягти через застосування спеціальних методів керування контуром збудження. Це може включати циклічне регулювання напруги збудження, поступове або крокове зниження опору пускового резистора, а також їх комбіноване використання. Також можливе складніше керування системою збудження, використання пускових індуктивних опорів, систем збудження з перетворювачами двобічної провідності та використання ємнісних накопичувачів енергії у контурі збудження. Додатково, можливе впровадження змін у конструкції самого стаціонарного двигуна, таких як використання розщеплених обмоток збудження з послідовними конденсаторами або розташування ємнісних стрижнів збудження.

Істотне підвищення асинхронного моменту СД при зниженій напрузі може бути отримане при циклічному введенні ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) в контур збудження. Застосування ЄНЕ дозволяє зменшити фазовий зсув між е.р.с. і струмом ОЗ з одночасним ростом струму i_f і його активної складової, а також використовувати запасену накопичувачем енергію ковзання, що призводить до зростання асинхронного моменту. Подача форсувальної напруги в ОЗ з одночасним включенням ЄНЕ забезпечує подальше збільшення моменту.

В статті розглянуто схему пристрою при циклічному керуванні параметрів контуру збудження СД. Для оцінки ефективності циклічного керування параметрами контуру ОЗ розраховані перехідні процеси асинхронного ходу СД типу СДСЗ 2000-100 потужністю 2000 кВт, 100 об/хв. Наведені розрахункові залежності прямого асинхронного пуску СД, а також з циклічною зміною параметрів контуру збудження. Для порівняльної оцінки виконані розрахункові залежності з ЄНЕ при циклічній зміні параметрів контуру збудження.

Аналіз розрахункових залежностей показує, що з включенням ЄНЕ в ОЗ вхідний момент зростає на 22 % проти резисторного пуску за відповідного зростання амплітуди струму ОЗ на 39 %. Максимальне значення перехідної напруги $U_{f\text{макс}}$ при включенні ЄНЕ перевищує лише на 7% перехідну напругу на ОЗ при пуску СД з семиразовим пусковим резистором.

Ключові слова: циклічні керування, ємнісний накопичувач енергії, синхронний двигун, контур збудження.

Summary. Synchronous motors (SD) with excitation systems (SZ) have a significant specific weight in ensuring continuous and complex technological processes at enterprises of the metallurgical, chemical, and petroleum

processing industries. Existing types of industrial mechanisms and machines require different starting and input moments in the operation of the SD.

Depending on the requirements of technological processes, the following circuit solutions are proposed to solve the problem of starting powerful synchronous high-voltage motors: direct asynchronous start with control of the excitation circuit parameters; start-up with control around the stator of the LED using devices that change the energy parameters of the power source; starting with the use of auxiliary electric machines and mechanisms.

During a direct asynchronous start of a synchronous motor, an increase in electromagnetic torque can be achieved through the use of special methods of controlling the excitation circuit. This may include cyclic regulation of the excitation voltage, gradual or stepwise reduction of the resistance of the starting resistor, as well as their combined use. More complex control of the excitation system, the use of starting inductive resistances, excitation systems with two-way conductivity converters, and the use of capacitive energy storage in the excitation circuit are also possible. Additionally, it is possible to introduce changes in the design of the stationary motor itself, such as the use of split excitation windings with series capacitors or the arrangement of capacitive excitation rods.

A significant increase in the asynchronous moment of the LED at a reduced voltage can be obtained by cyclically introducing capacitive energy storage devices (EEE) into the excitation circuit. The use of ENE allows to reduce the phase shift between the E.R.S. and OZ current with a simultaneous increase in the if current and its active component, as well as use the stored slip energy, which leads to an increase in the asynchronous torque. The supply of forcing voltage to the OT with the simultaneous inclusion of the ENE ensures a further increase in torque.

The article discusses the scheme of the device during cyclic control of the LED excitation circuit parameters. To evaluate the effectiveness of the cyclic

control of the parameters of the circuit, the transient processes of the asynchronous operation of the SDS3 2000-100 type with a power of 2000 kW, 100 rpm were calculated. Calculated dependences of direct asynchronous start of the LED, as well as with cyclical changes in the parameters of the excitation circuit, are given. For a comparative assessment, calculated dependences on the ENE with cyclic changes in the parameters of the excitation circuit were performed.

The analysis of calculated dependencies shows that with the inclusion of ENE in the OZ, the input torque increases by 22% compared to the resistor start with a corresponding increase in the OZ current amplitude by 39%. The maximum value of the transient voltage U_{fmax} when the ENE is turned on exceeds the transient voltage on the OZ by only 7% when starting the LED with a seven-fold starting resistor.

***Key words:** cyclic controls, capacitive energy storage, synchronous motor, excitation circuit.*

Постановка проблеми. Підвищення ефективності керування режимами асинхронного пуску завантажених синхронних електроприводів (СЕР) в умовах пониженої напруги живильної електромережі для збереження складних та безперервних технологічних процесів може бути досягнуто вмиканням ємнісних накопичувачів енергії в обмотку збудження є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і 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 пристрої і знижує надійність синхронного електропривода.

Для забезпечення режиму пуску і самозапуску 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; 7]. 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 [3].

У роботі [4] запропонований спосіб збільшення електромагнітного моменту, створюваного обмоткою збудження СД, в області підсинхронної швидкості при зменшенні індуктивності 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 компенсуючої електрорушійної сили [6; 8].

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

Мета статті. Підвищення пускового та вхідного моментів СД при циклічному керуванні параметрами контуру збудження для збереження складних та безперервних технологічних процесів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Принципова схема

пристрою (рис.1) при циклічній зміні параметрів контуру збудження СД. При досягненні заданого ковзання пусковий струм замикається через резистор R1 та конденсатор С накопичувача енергії при однойменній полярності е.р.с. і струму ротора, що призводить до ємнісної компенсації індуктивності поздовжньої осі еквівалентної схеми заміщення двигуна, зростання струму і зменшення його фазового зсуву i , в результаті, до зростання прискорюючого моменту, створюваного ОЗ.

При цьому реле K2 обтікається струмом і замикає свій контакт кола керування тиристором VS2. За зміни полярності е.р.с. ротора (тобто при її переході через нуль) включається реле K1 і відключається реле K2, що призводить до включення тиристора VS1 та відключення тиристора VS2. При цьому ЄНЕ виводиться з контуру збудження (при різнойменній полярності е.р.с. та струму ротора), вводиться додатковий резистор R3, зменшується амплітуда струму та змінюється його фаза, що призводить до зменшення гальмівного моменту, створюваного ОЗ. При зміні полярності струму ротора останній замикається через ЄНЕ і резистор R1, що призводить до зростання струму, зменшення фазового зсуву та збільшення прискорюючого моменту, що створюється обмоткою збудження. Надалі режим роботи тиристорів повторюється.

При перевищенні напруги на ОЗ допустимого рівня пробиваються стабілітрони VD5 або VD6, що призводить до шунтування ЄНЕ резисторами R2 або R3.

Для оцінки ефективності застосування ЄНЕ в ОЗ спільно з форсувальною напругою розраховані перехідні процеси асинхронного пуску СД типу СДС3 2000-100 за рівняннями Парку - Горьова відповідно до алгоритму керування:

при одночасних
знаках e_f і i_f

$$x_c = x_c(s)$$

$$U_{f\phi} = k_\phi U_{fном}$$

$$R_n = R_f (k_{пмин} + 1)$$

$$x_c = 0 \quad \text{при} \quad U_f > U_{доп}$$

при різнойменних
знаках e_f і i_f

$$x_c = 0$$

$$U_{f\phi} = 0$$

$$R_n = R_f (k_{пмин} + 1)$$

(1)

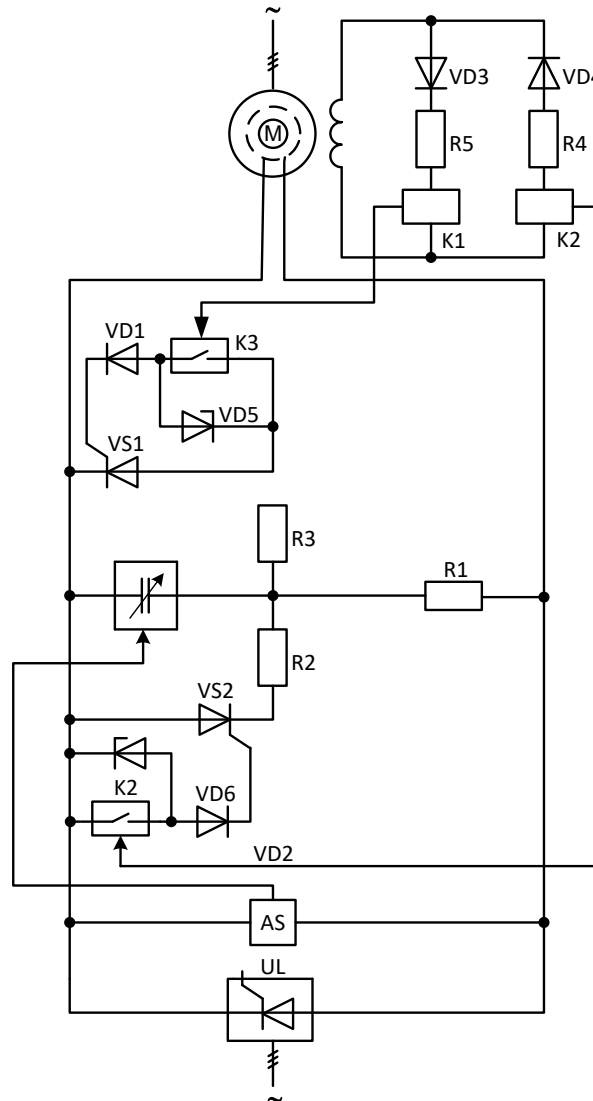


Рис.1. Принципова схема керування при циклічному керування параметрами контуру збудження СД з СНЕ

Процес циклічного керування параметрами починається при ковзанні $s = 0,2$.

При збігу знаків е.р.с. та струму ОЗ параметри контуру збудження

прийнятті $C = 2000$ мкФ, $R_1 = 4 R_f$, а при різнойменних знаках е.р.с. та струму ОЗ замикається на десятикратний пусковий резистор.

На рис. 2, 3 наведені фрагменти резисторного пуску СД з десятикратним пусковим резистором, при циклічному керуванні параметрами контуру збудження без обмеження рівня перехідної напруги на ОЗ, а також з обмеженням перенапруг на ОЗ, а на рис.4, 5 – розрахунок залежності асинхронного пуску СД та ЄНЕ.

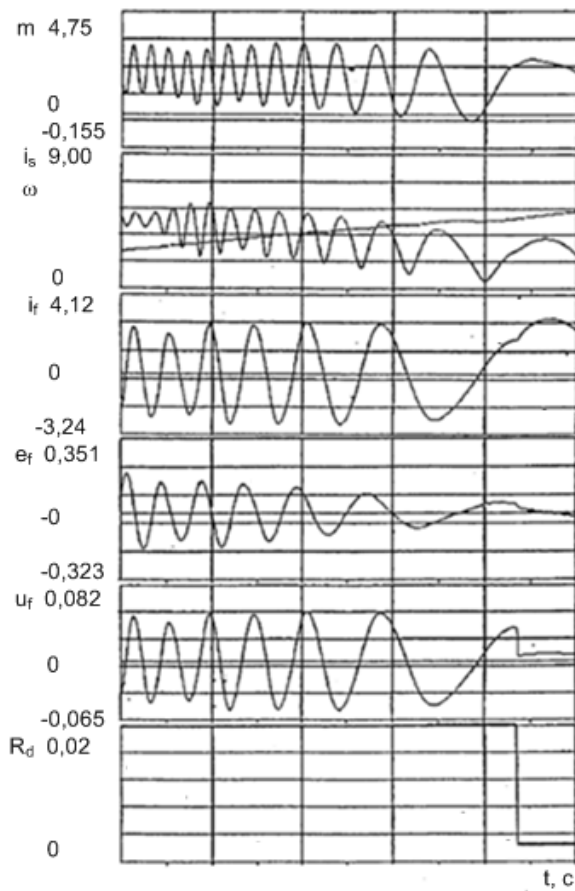


Рис. 2. Розрахункові залежності асинхронного пуску СД із семикратним пусковим резистором

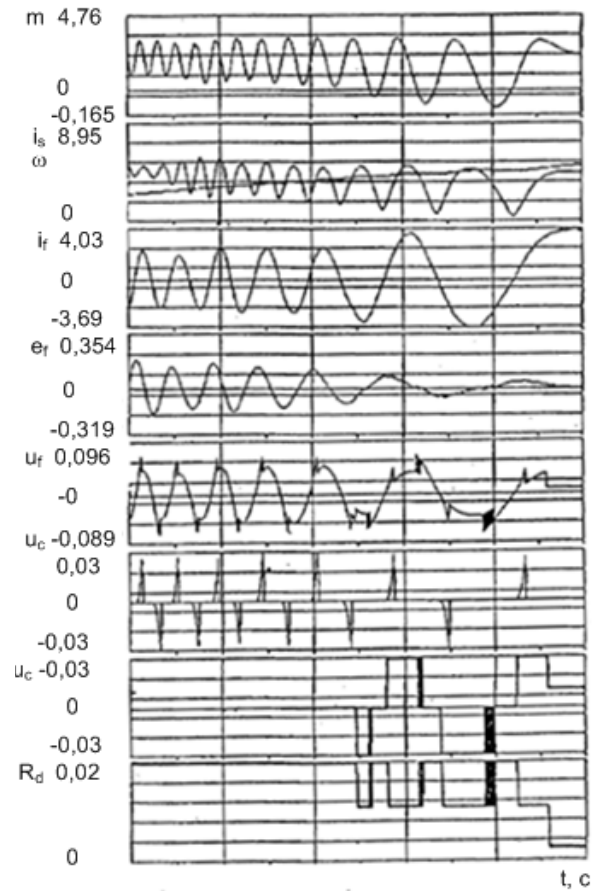


Рис. 3. Розрахункові залежності асинхронного пуску СД з ЄНЕ із форсованою напругою збудження

Зазначене керування здійснюється при кожному провертанні ротора СД, що веде до збільшення електромагнітного моменту, створюваного ОЗ, при збігу знаків e_f і i_f . При різнойменних знаках e_f та i_f знижується величина гальмівного моменту, що створюється ОЗ.

Процес керування параметрами контуру збудження за допомогою

ЄНЕ починається при ковзанні $s=0,2$. При співпадінні знаків e_f і i_f параметри ЄНЕ прийняті $C=2000$ мкФ, $R_n' = 4R_f$, $U_{f\phi} = 0,03$ о.е., а при $U_f > U_{доп} = 0,03$ в.о., ємність виводиться з контуру збудження. При різноіменних знаках e_f і $i_f - x_c = 0$, $U_{f\phi} = 0$, $R_n'' = 7R_f$.

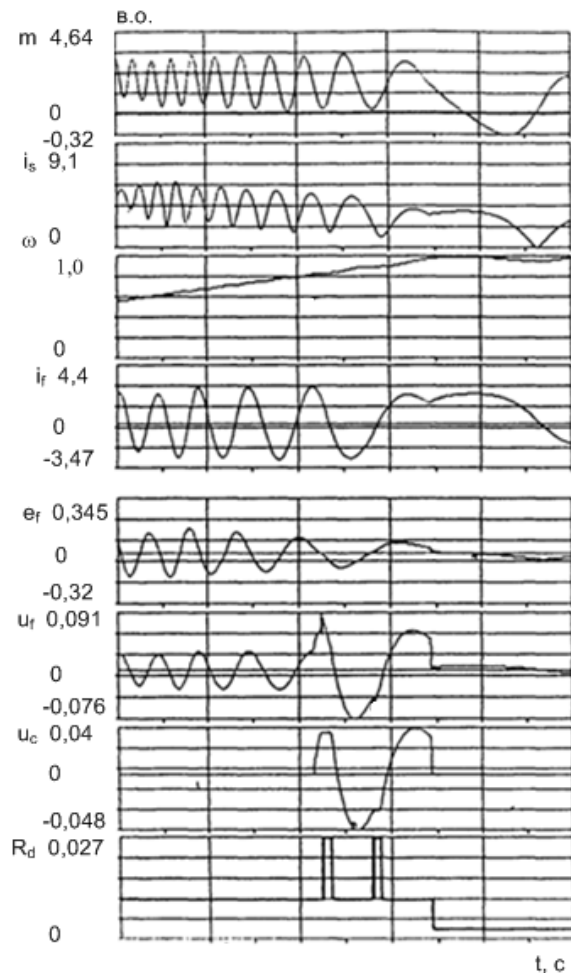


Рис. 4. Розрахункові залежності асинхронного пуску СД при циклічній зміні параметрів контуру збудження з НЕ при $C=2000$ мкФ, $4R_f$

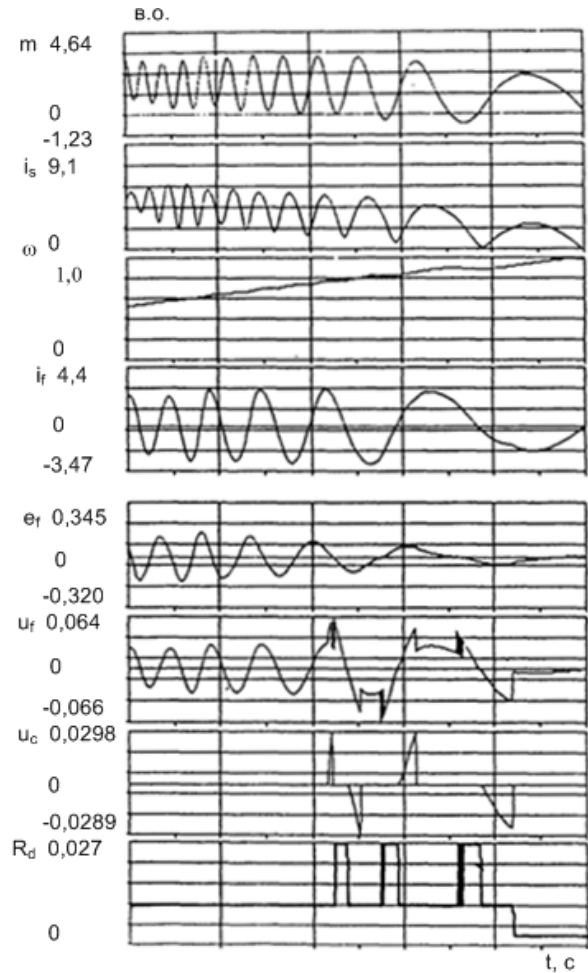


Рис. 5. Розрахункові залежності асинхронного пуску СД при циклічній зміні параметрів контуру збудження з обмеженням перенапруг на ОЗ

Аналіз розрахункових залежностей показує, що з включенні ЄНЕ в ОЗ вхідний момент зростає на 22 % проти резисторного пуску за відповідного зростання амплітуди струму ОЗ на 39 %. Максимальне значення перехідної напруги $U_{fмакс}$ при включенні ЄНЕ перевищує лише на 7% перехідну напругу на ОЗ при пуску СД з семиразовим пусковим резистором.

Висновки та перспективи подальших досліджень.

Запропоновано пристрій для асинхронного пуску СД з циклічним керуванням параметрами контуру збудження.

Аналіз розрахункових залежностей показує, що з включенні ЄНЕ в ОЗ вхідний момент зростає на 22 % проти резисторного пуску за рахунок відповідного зростання амплітуди струму ОЗ на 39 %. Максимальне значення перехідної напруги $U_{\text{фмакс}}$ при включенні ЄНЕ перевищує лише на 7% перехідну напругу на ОЗ при пуску СД з семиразовим пусковим резистором.

Доцільно провести експериментальні дослідження для підтвердження працездатності пристрою та визначення оптимальних паралельних параметрів контуру збудження.

Література

1. Родькін Д. І., Гладирь А. І. Система формування пускових характеристик електроприводів змінного струму з важкими умовами пуску. Кременчук : КДПІ, 2003. 10 с.

2. Davison E., Narayan R. The Optimal Output Feedback Control of a Synchronous Machine. Power Apparatus and Systems. *IEEE Transactions on PAS-90*. 1971. 2123-2134. doi: 10.1109/TPAS.1971.293030.

3. 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.

4. Kar N. C., El-Serafi A. M. A new model for the saturated synchronous machines using the intermediate-axis saturation characteristics. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. 2002. Vol. 1. P. 172-177. doi: 10.1109/CCECE.2002.1015194.

5. Banshchikov N., Toporkov D., Bakiev R. Investigation of transients during start-up of hybrid synchronous electric motor of submersible oil pump

with permanent magnets. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. 194. 052003. doi: 10.1088/1755-1315/194/5/052003.

6. Šundrica M., Petrić M. Observer-based Linear Control of Synchronous Machine with Damper and Excitation Winding. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2020. Vol. 17, No. 6. P. 95-114.

7. Kaukonen J. Salient pole synchronous machine modelling in a industrial direct torque controlled drive application. *PhD Thesis*. Lappeenranta University of Technology, Finland. 1999.

8. Šundrica M. Synchronous Machine Nonlinear Control System Based on Feedback Linearization and Deterministic Observers. *Control Theory in Engineering*. 2019. p. 145. <https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.89420>.

9. Півняк Г. Г., Кириченко В. І., Бородай В. А. Про новий напрямок удосконалення крупних синхронних електродвигунів. *НАН України. Технічна електродинаміка. Темат. випуск*. Київ, 2002. Ч. 2. С. 62–65.

10. Спосіб пуску синхронного двигуна: пат. 98412 Україна. № 201103138; заявл. 17.03.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. 8с.

11. Спосіб пуску синхронного двигуна та пристрій для його реалізації : пат. 106667 Україна. № 201300459; заявл. 14.01.2013; опубл. 29.09.2014, Бюл. № 18.

12. Спосіб пуску синхронного двигуна з блоком пуску : пат. 9850 Україна: № 94311448; заявл. 03.08.1993; опубл. 30.09.1996, Бюл. № 3.