

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 621.314

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Кандидати техн. наук О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький,
аспіранти Д. А. Гордієнко, Д. А. Шелест, А. В. Синявський

RESEARCH OF THE CONTROL SYSTEM OF THE SOFT START DEVICE OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR

PhD (Tech.) O. A. Plakhtii, PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, postgraduate D. A. Hordiienko,
postgraduate D. A. Shelest, postgraduate A. V. Syniavskyi

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273622>



Анотація. Розглянуто систему керування симісторного пристрою плавного пуску асинхронного двигуна з постійним моментом навантаження. Розглянуте керування забезпечує зниження величини пускового струму та пускового моменту асинхронного двигуна. Описано принцип дії та основні технічні параметри пристрою плавного пуску. Розглянуто метод зниження втрат потужності в силових напівпровідникових елементах пристрою плавного пуску. Проведено дослідження електромеханічних процесів пристрою плавного пуску при роботі з асинхронним двигуном за рахунок імітаційного комп'ютерного моделювання в програмному середовищі Matlab/Simulink. Наведено результати імітаційного моделювання: осцилограми вхідних струмів пристрою плавного пуску, динаміку зміни швидкості та пускового моменту асинхронного двигуна. При імітаційному моделюванні встановлено, що робота пристрою плавного пуску дає змогу знизити величину пускового струму та пускового моменту практично вдвічі. Показано, що регулювання часу виходу на повний кут відкриття силових ключів пристрою плавного пуску і стартовий кут відкриття силових ключів, що визначає динаміку розгону асинхронного двигуна, значною мірою впливає на величину максимального амплітудного значення струму та моменту. Результати теоретичних досліджень реалізовано в реальному фізичному прототипі пристрою плавного пуску. Наведено зображення плат розробленого пристрою плавного пуску і вказано його технічні характеристики.

Ключові слова: пристрій плавного пуску, асинхронний двигун, симістор, система керування, пусковий момент.

Abstract. The soft start device is designed to control the process of starting, operation and stopping of electric motors and enables smooth acceleration, smooth stopping, reduction of the starting current of the motor and coordination of the motor torque with the load moment. The article the control system of the triac device of the smooth start of an asynchronous motor with a constant load moment is considered. The control provides a reduction in the starting current and starting torque of the asynchronous motor. The principle of operation and the main technical parameters of the soft start device are described. The method of reducing power losses in power semiconductor elements of the soft start device is considered. The study of electromechanical processes in the soft start device when working with an asynchronous motor was carried out due to

simulated computer modeling in the Matlab / Simulink software environment. The results of simulation modeling are given: oscillograms of input currents of the soft start device, dynamics of speed change and starting torque of an asynchronous motor. In the course of the simulation, it was established that the operation of the soft start device allows to reduce the starting current and starting torque by almost half. It is shown that the adjustment of the time to reach the full opening angle of the power switches of the soft start device and the starting angle of the opening of the power switches, which determines the acceleration dynamics of the asynchronous motor, significantly affects the value of the maximum amplitude value of the current and torque. The results of theoretical studies were implemented in a real physical prototype of the soft start device. The image of the boards of the developed soft start device is shown and its technical characteristics are indicated.

Keywords: *soft start device, asynchronous motor, triac, control system, starting torque.*

Вступ. Асинхронний електропривід є одним із найбільш розповсюджених, що зумовлено його перевагами: підвищене значення ККД, простота і низька собівартість конструкції асинхронного двигуна, його низькі масогабаритні показники (порівняно з двигуном постійного струму), відсутність колекторно-щіткового механізму, що спрощує його обслуговування [1, 2].

Проте асинхронний електропривід має свої недоліки. Так, у режимі прямого пуску асинхронний двигун має досить великі показники пускового струму та пускового моменту, що негативно впливає на мережу живлення і надійність механічної частини навантаження асинхронного двигуна. Падіння напруги може створювати проблеми для інших навантажень мережі, а якщо падіння напруги занадто велике, то може не запуститися і сам двигун [3, 4].

Для зниження величини пускового моменту і пускового струму застосовують додаткові напівпровідникові перетворювачі, такі як перетворювачі частоти або пристрої плавного пуску [5, 6].

Перетворювачі частоти дають змогу забезпечити зниження величини пускового струму та реалізувати частотно-векторне керування швидкістю і моментом двигуна [7, 8]. Проте мають досить високу собівартість.

У випадках, коли в асинхронному електроприводі нема необхідності

частотного регулювання швидкості, наприклад електропривід систем вентиляції, насосів, то застосування перетворювачів частоти економічно не виправдано, і доцільніше використовувати тиристорні регулятори змінної напруги, що в промисловості називаються пристроями плавного пуску [9, 10].

Пристрої плавного пуску порівняно з перетворювачами частоти мають гірші показники регулювання швидкості та моменту асинхронного двигуна, проте характеризуються значно меншою вартістю, простішою системою керування та є оптимальним рішенням для керування асинхронних двигунів мотор-компресорів, мотор-вентиляторів та інших приводів, що не потребують глибокого регулювання швидкості та моменту [11, 12].

Пристрій плавного пуску призначено для керування процесом запуску, роботи і зупинки електродвигунів та дає змогу виконати плавний розгін, плавну зупинку, зменшення пускового струму двигуна та узгодження обертального моменту двигуна з моментом навантаження. Застосування пристроїв плавного пуску забезпечує обмеження швидкості наростання і максимального значення пускового струму протягом заданого часу (після застосування пристроєм плавного пуску значення пускового струму суттєво зменшується) [13, 14].

В електронних пристроях плавного пуску обмеження струму досягається за рахунок плавного наростання напруги на

обмотках електродвигуна. Це дає змогу під час пуску утримувати параметри електродвигуна (струм, напругу і т. п.) у безпечних межах, що знижує ймовірність перегріву обмоток і усуває ривки в механічній частині привода, а також ймовірність виникнення гідравлічних ударів у трубах і засувках у момент пуску і зупинки. У кінцевому підсумку правильно вибраний і налаштований пристрій плавного пуску підвищує показники довговічності і безвідмовності електродвигуна і його привода [15, 16].

Пристрої плавного пуску складаються з силової частини (напівпровідникові ключі – зазвичай тиристори або симістори), виміральної частини (датчики струмів і напруг мережі живлення) і системи керування (мікропроцесорної частини), що реалізує керування силовими ключами.

Робота продовжує раніше проведені дослідження і базується на науковому доробку та результатах, частково опублікованих у роботах [17, 18].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [19, 20] наведено дослідження режимів роботи асинхронного двигуна з пристроєм плавного пуску, у роботах [21, 22] – дослідження пристрою плавного пуску з системою керування, побудованою за принципом нейронної мережі.

З аналізу про застосування пристроїв плавного пуску визначено такі недоліки:

- виникнення при пусках великих гармонічних спотворень напруг у мережі живлення і особливо на клеммах двигуна, що пускається. Ймовірність появи резонансних посилень гармонік до неприйнятних рівнів за наявності мережі ємнісних елементів, наприклад конденсаторних батарей;

- поява при запусках значних за величиною коливань електромагнітних моментів на валу двигуна на частоті 300 Гц;

- поява в мережі змінного струму постійних складових струмів при реально можливих несиметриях у кутах регулювання тиристорів пристрою плавного пуску.

Також недоліком наведених робіт є відсутність оптимізації роботи тиристорного пускача за параметрами втрат потужності, відсутність оптимізації роботи за критерієм виходу пристрою плавного пуску в режим повного відкриття.

Отже, питання подальшого покращення енергоефективності пристроїв плавного пуску за критеріями зниження пускового моменту є актуальним невирішеним завданням.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження системи керування пристрою плавного пуску асинхронного двигуна, що дасть можливість знизити втрати потужності в силових напівпровідникових елементах пристрою плавного пуску. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- розглянути запропоновану топологію пристрою плавного пуску та принцип його роботи;

- дослідити електромеханічні процеси, що протікають у пристрої плавного пуску при його роботі з асинхронним двигуном, за рахунок імітаційного комп'ютерного моделювання;

- проаналізувати розроблений фізичний прототип пристрою плавного пуску.

Основна частина дослідження.

Топологія пристрою плавного пуску.

Запропоновану топологію пристрою плавного пуску, відомого ще як тиристорний регулятор, реалізовано на силових симісторах і шунтуючих контакторах із застосуванням мікропроцесорної системи керування [23, 24]. Структурну схему пристрою плавного пуску наведено на рис. 1.

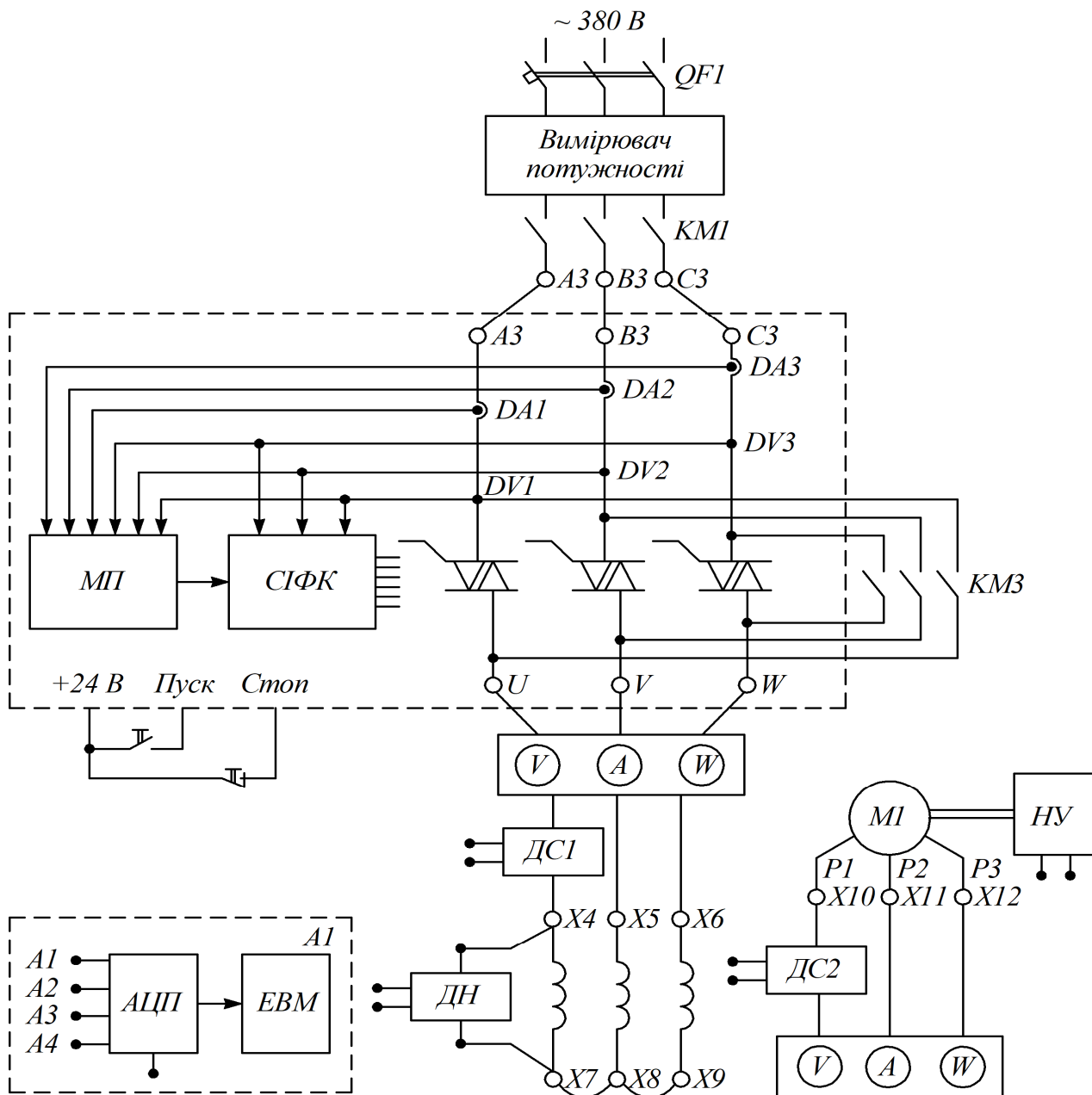


Рис. 1. Структурна схема пристрою плавного пуску

Керування пристроєм плавного пуску реалізовано за допомогою системи імпульсно-фазового керування (СІФК), що засновано на пофазовому детектуванні переходу через нуль фазних напруг і фазовому автоналаштуванні частот опорних пилкоподібних сигналів, що керують силовими симісторами [25, 26]. Принцип роботи системи керування пристроєм плавного пуску наведено на рис. 2.

Під час запуску асинхронного двигуна кут відкриття симісторів змінюється від 150° до 0° , після чого симістори шунтуються контакторами.

Час виходу на режим повного відкриття симісторів задається системою керування та суттєво впливає на величину пускового струму і пускового моменту двигуна.

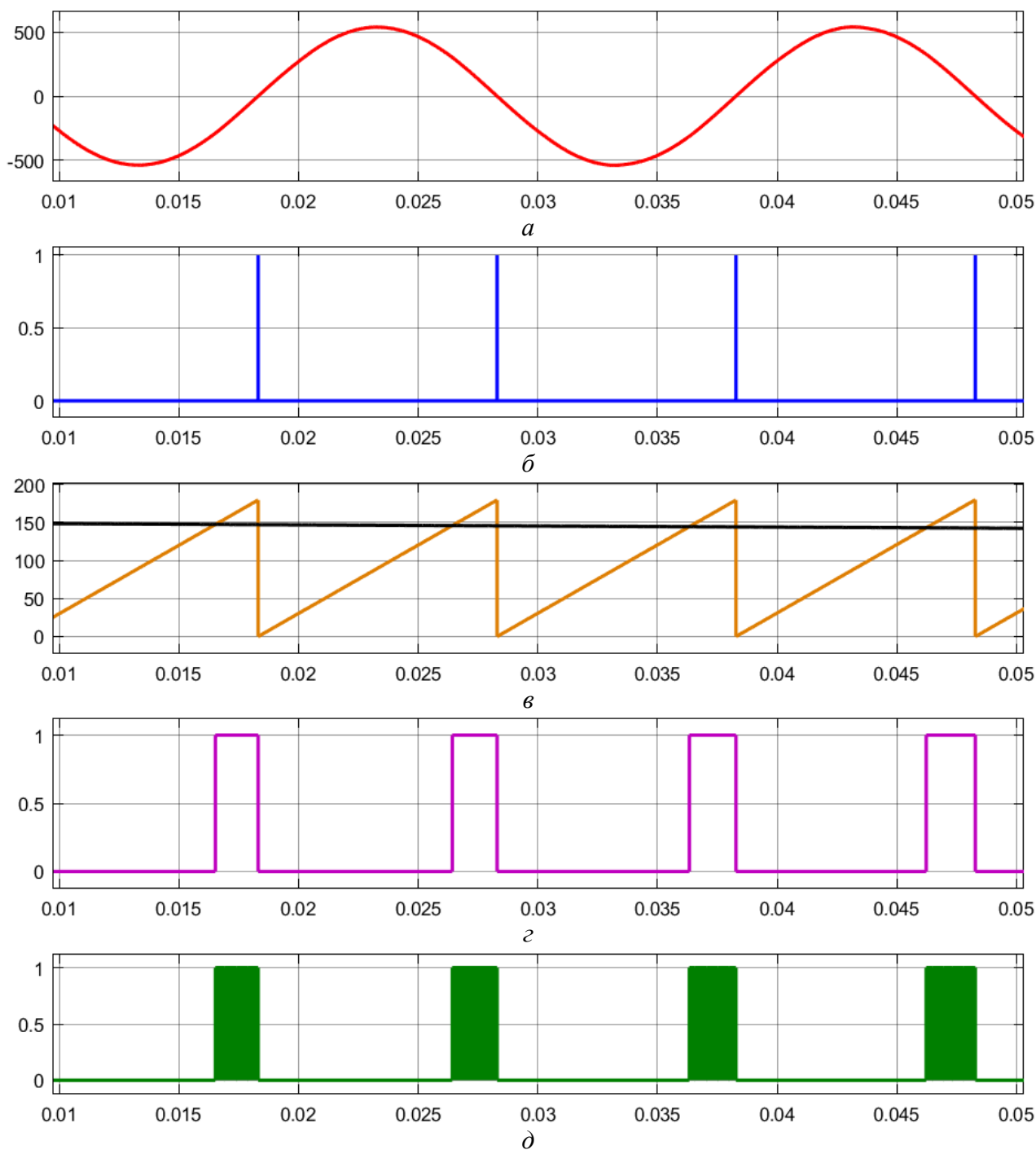


Рис. 2. Осцилограмми керування пристроєм плавного пуску фази А:
 a – фазна напруга; $б$ – детектор переходу через нуль фазної напруги;
 $в$ – опорний пілкоподібний сигнал, синхронізований з фазовою напругою, і сигнал керування кутом відкриття силових ключів пристрою плавного пуску; $г$ – сигнал керування симістора; $д$ – дублювання імпульсів керування ключем для гарантованого вмикання

Моделювання системи плавного пуску асинхронного двигуна. У програмному середовищі Matlab/Simulink

було розроблено імітаційну модель симісторного пристрою плавного пуску з асинхронним двигуном (рис. 3).

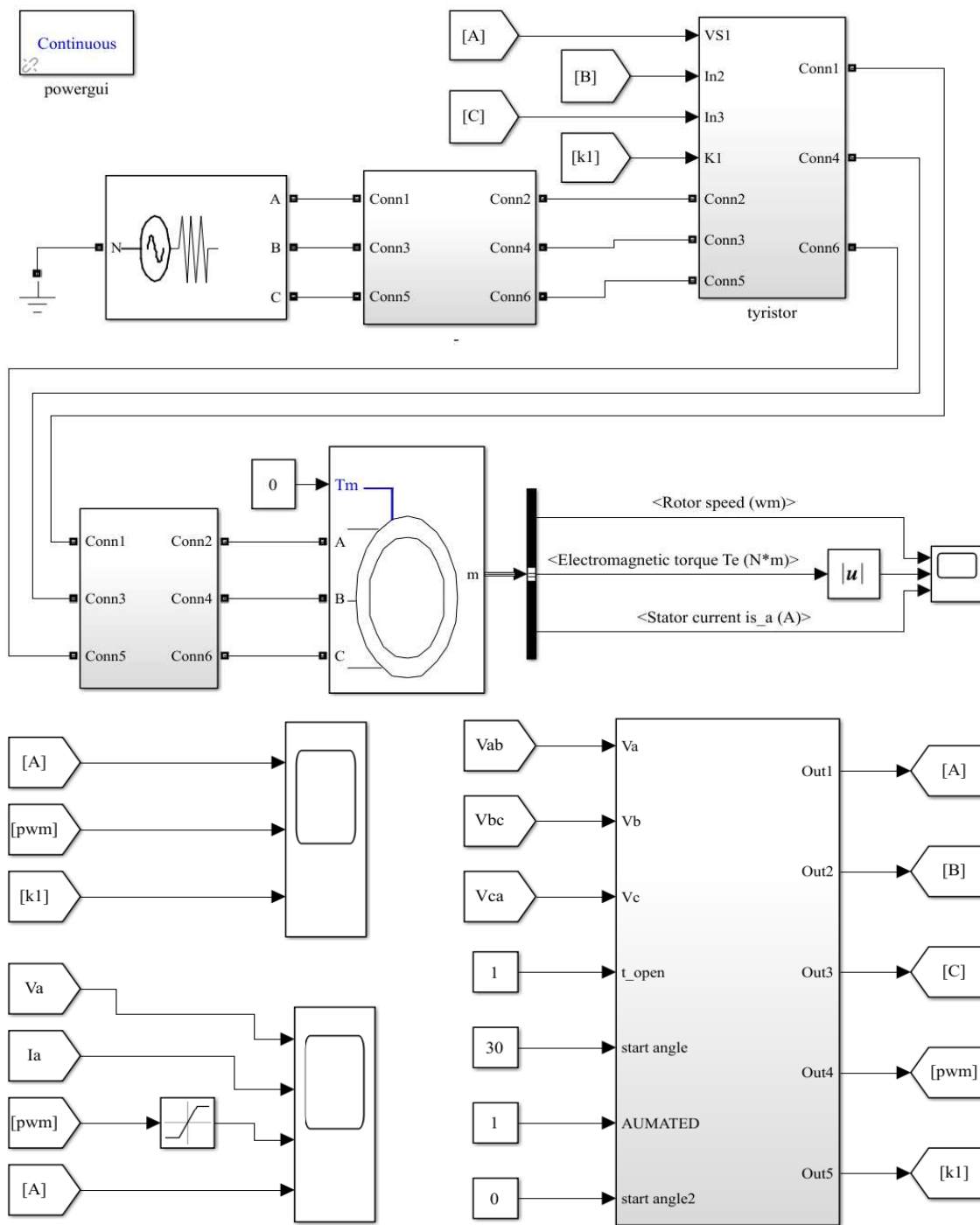


Рис. 3. Зовнішній вигляд імітаційної моделі пристрою плавного пуску з асинхронним двигуном

Розроблена модель дає змогу визначати стартовий кут відкриття силових ключів і час виходу на повністю відкритий режим.

Як навантаження пристрою плавного пуску було обрано типовий асинхронний

двигун потужністю 3 кВт з номінальною частотою обертання 1750 об/хв. Характеристики асинхронного двигуна наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики асинхронного двигуна

| Параметр | Значення |
|---|----------|
| Потужність, кВт | 3 |
| Частота обертання, об/хв | 1750 |
| Номінальна повна потужність, ВА | 3,7 |
| Номінальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ | 0,85 |
| Номінальна лінійна напруга живлення V_{rms} , В | 460 |
| Опір обмотки статора R_s , Ом | 1,11 |
| Опір обмотки ротора R_r' , Ом | 1,083 |
| Індуктивність обмотки статора L_s , мГн | 5,97 |
| Індуктивність обмотки ротора L_r' , мГн | 5,97 |
| Взаємна індуктивність обмоток L_m , Гн | 0,2037 |

Асинхронний двигун моделюється у вигляді схеми заміщення, що наведено на рис. 4 [27, 28]. На рисунку подано кутову

швидкість системи відліку ω та електричну кутову швидкість ω_r .

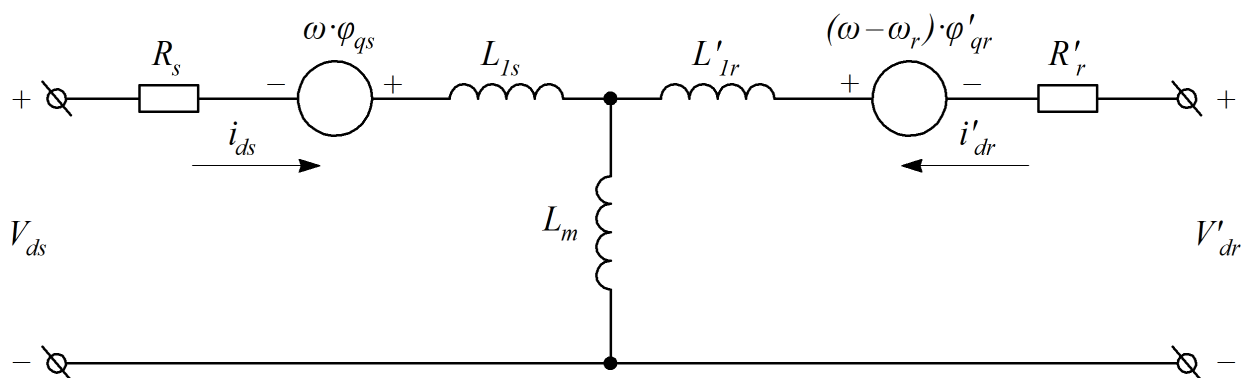


Рис. 4. Схема заміщення асинхронного двигуна

Моделювання роботи асинхронного двигуна засновано на чисельному розв'язанні системи диференціальних рівнянь [29, 30]

$$\begin{cases} \varphi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{qr}; \\ \varphi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i'_{dr}; \\ \varphi'_{qr} = L'_r \cdot i'_{qr} + L_m \cdot i_{qs}; \\ \varphi'_{dr} = L'_r \cdot i'_{dr} + L_m \cdot i_{ds}; \\ L_s = L_{ls} + L_m; \\ L'_r = L'_{lr} + L_m. \end{cases} \quad (1)$$

Крім того, у моделі враховується ефект намагнічування і насичення асинхронного двигуна. Характеристику насичення асинхронного двигуна в імітаційній моделі наведено на рис. 5.

Субмодель системи керування силових ключів пристрою плавного пуску трьох фаз, що реалізує фазове автоналаштування частоти з формуванням опорних сигналів керування, наведено на рис. 6.

Перехідні процеси при прямому пуску асинхронного двигуна з моментом навантаження 20 Н·м наведено на рис. 7.

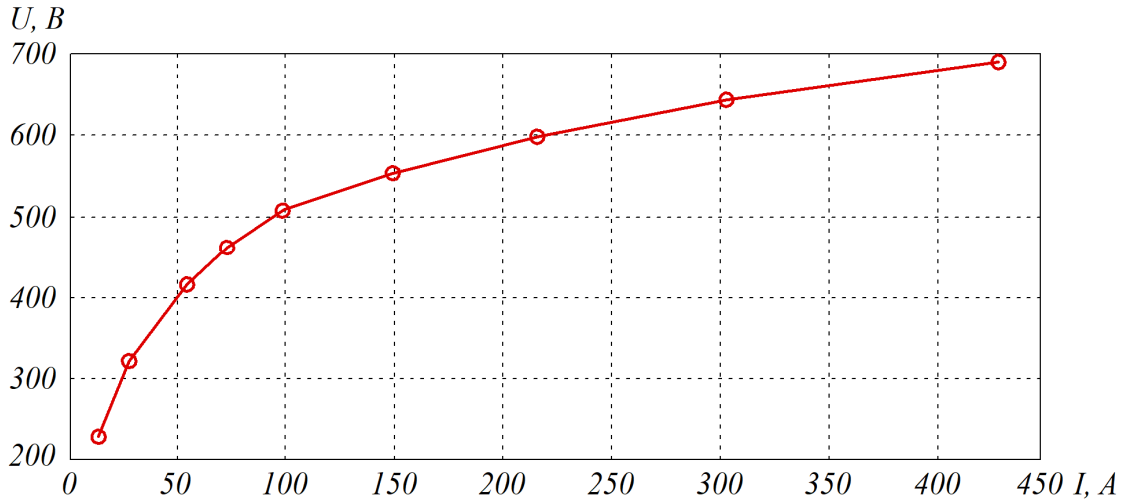


Рис. 5. Характеристика насичення асинхронного двигуна

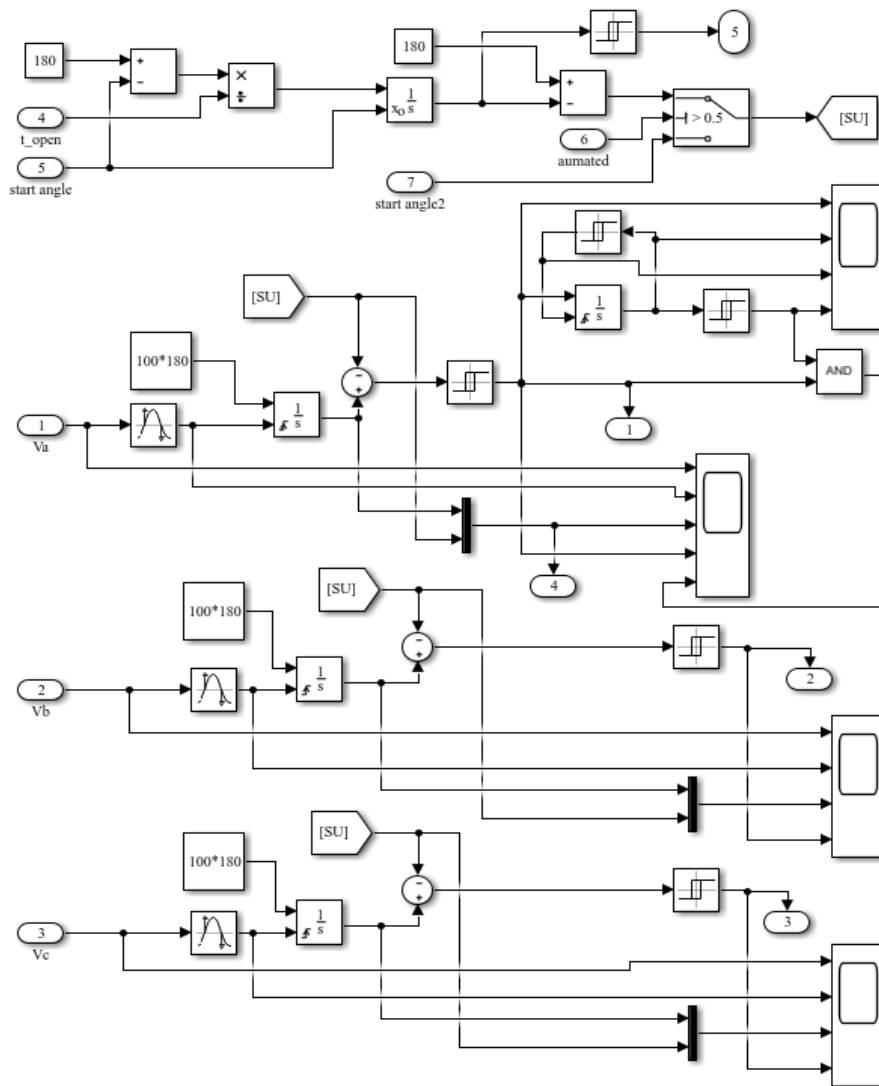


Рис. 6. Субмодель системи керування силових ключів пристрою плавного пуску

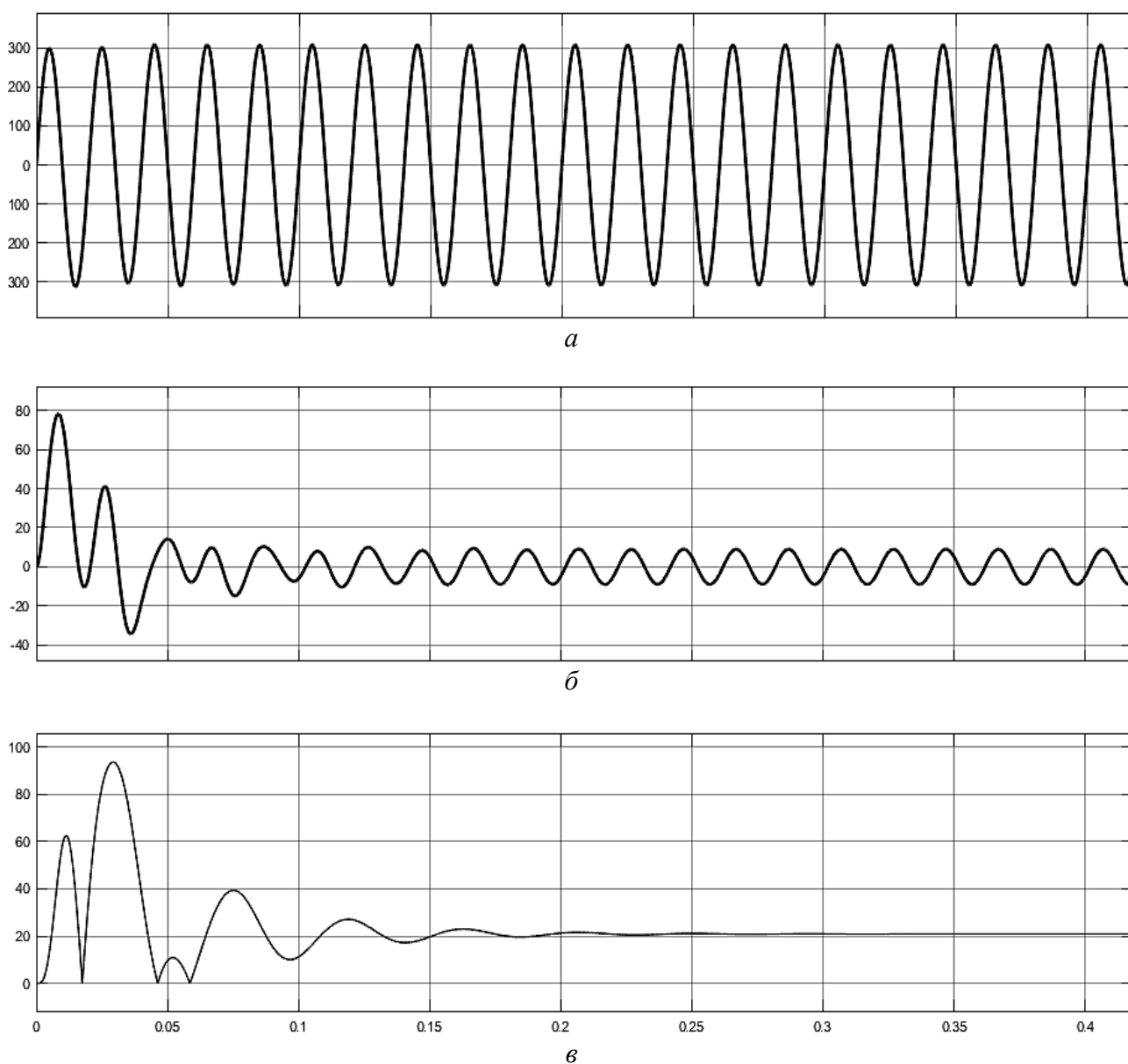


Рис. 7. Перехідні процеси при прямому пуску асинхронного двигуна:
 а – фазна напруга мережі; б – пусковий струм фази А; в – пусковий момент двигуна

У режимі прямого пуску двигуна від трифазної мережі змінного струму максимальна амплітудна величина пускового струму становить 80 А, а пусковий момент у режимі прямого пуску становить 85 Н·м. Подальшим завданням

роботи пристрою плавного пуску є зниження цих величин.

Осцилограми роботи пристрою плавного пуску при заданому часі розгону 0,7 с з моментом навантаження 20 Н·м наведено на рис. 8.

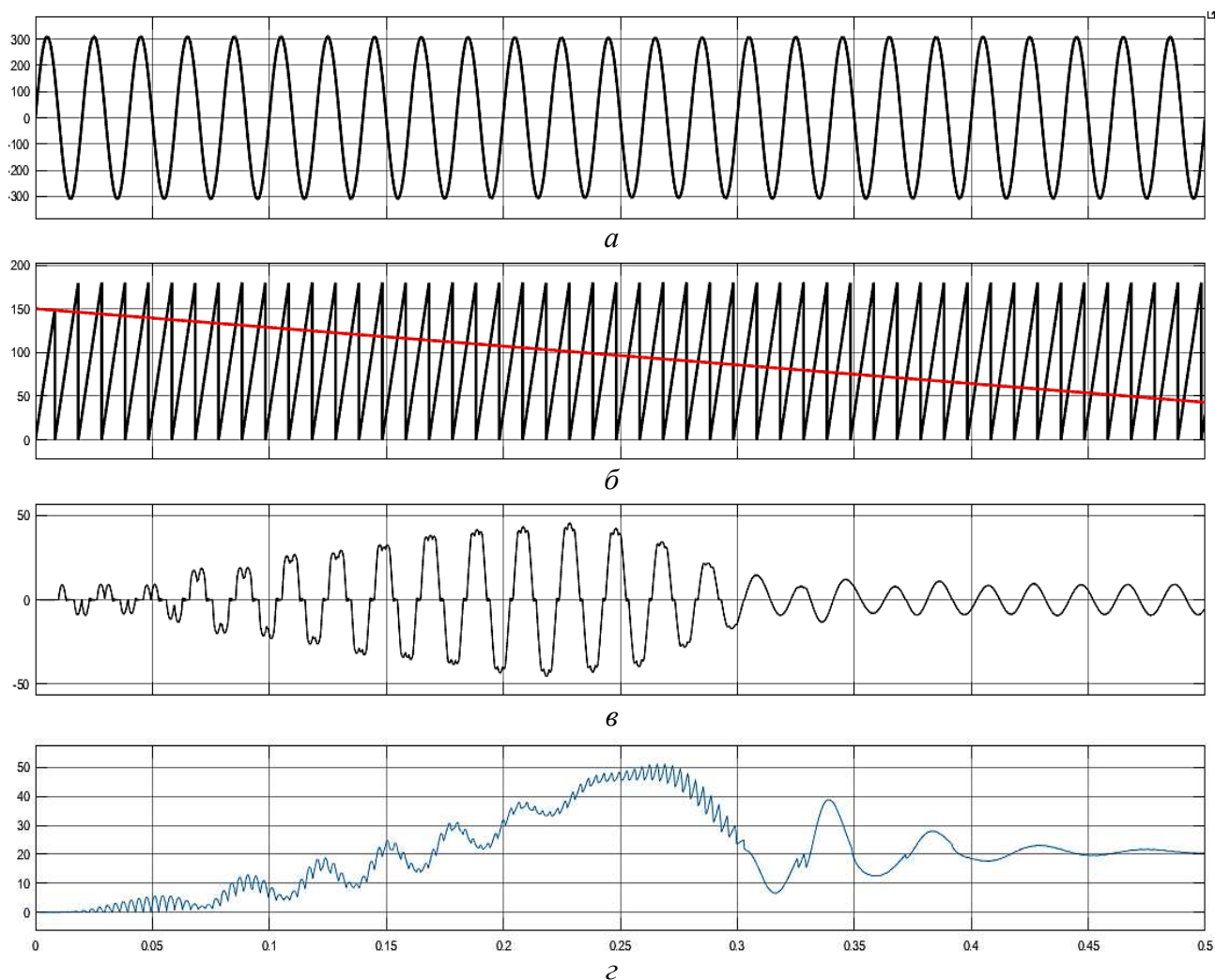


Рис. 8. Осцилограми роботи пристрою плавного пуску:
a – фазна напруга мережі; *б* – опорний сигнал керування, синхронізований з напругою мережі; *в* – пусковий струм фази А; *г* – пусковий момент

З рис. 8 видно, що пристрій плавного пуску реалізує суттєве зниження величини пускового струму та пускового моменту асинхронного двигуна, саме зниження величини пускового струму з 80 до 44 А, а пускового моменту з 93 до 45 Н·м, що підвищує ресурс механічної частини двигуна та знижує рівень електромагнітної завади, що впливає на електричну мережу.

Дослідження коефіцієнта гармонічних спотворень фазного струму в процесі пуску наведено на рис. 9.

З рис. 9 видно, що під час роботи пристрою плавного пуску середньоквадратичне значення струму

двигуна зростає, а значення коефіцієнта гармонічних спотворень струму в початковий момент часу буде найгіршим і складатиме 53,25 % і в процесі пуску буде зменшуватись до нуля, поки форма струму не стане практично синусоїдальною.

Фізичний прототип пристрою плавного пуску. Проведені дослідження стали основою для створення фізичного прототипу пристрою плавного пуску на базі виробничих потужностей компанії ТОВ «ВО ОБЕН» (Харків, Україна). Мікропроцесорну та силову плати пристрою плавного пуску наведено на рис. 10.

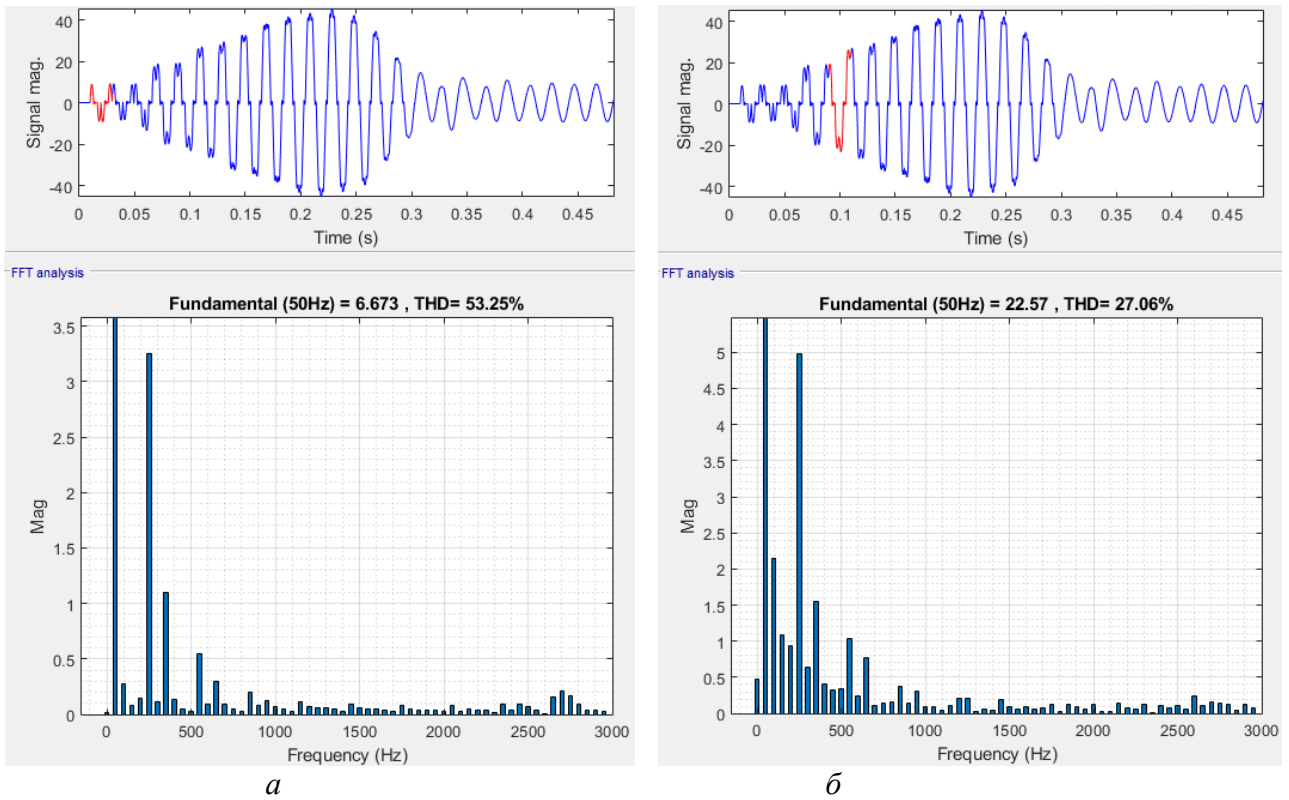


Рис. 9. Величини коефіцієнта гармонічних спотворень фазного струму:
a – початковий момент часу; *б* – процес пуску

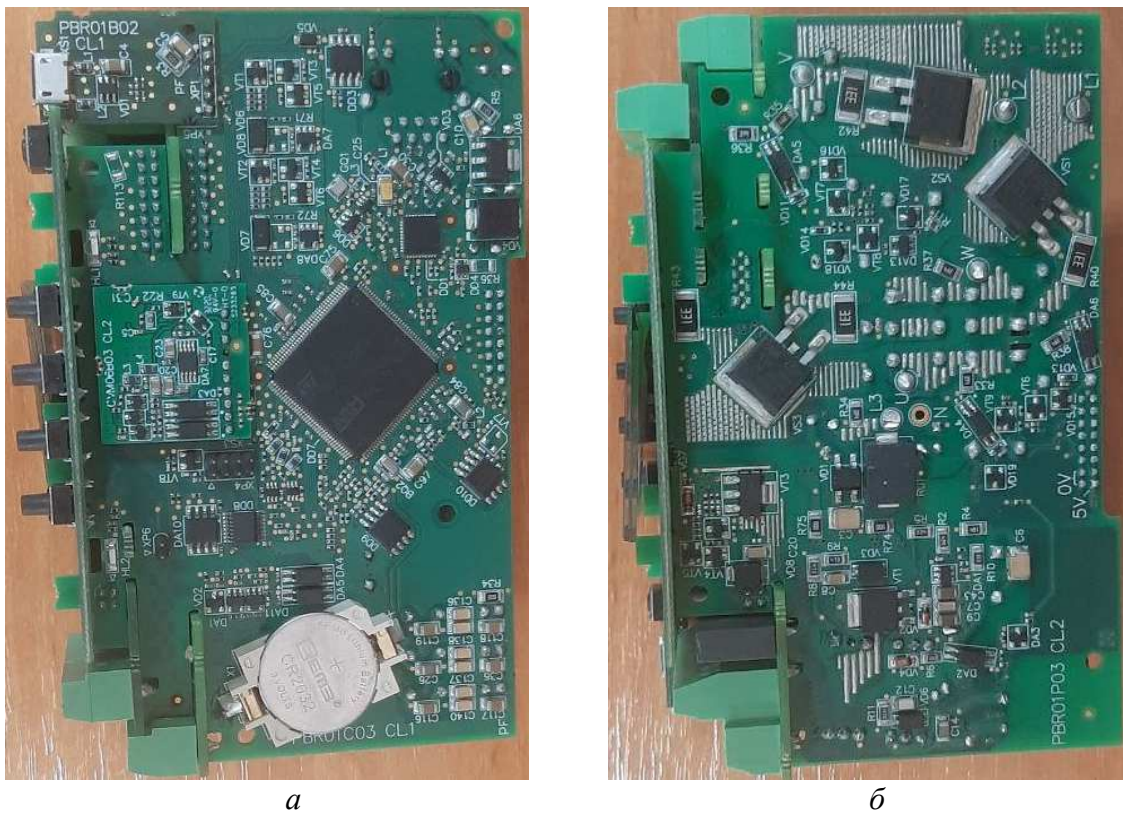


Рис. 10. Плати пристрою плавного пуску: *a* – мікропроцесорна плата; *б* – силова плата

Технічні характеристики виготовленого пристрою плавного пуску наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики пристрою плавного пуску

| Параметр | Значення |
|--|------------------------------------|
| 1 | 2 |
| Робочий діапазон напруги мережі, В | 3×170...480 |
| Номінальна напруга мережі $U_{ном}$, В | 3×380 |
| Частота мережі, Гц | 47...63 |
| Час розгону/гальмування, с | 2...20 |
| Початкова напруга пуску, В | 8 |
| Час роботи тиристорів двох фаз без байпаса під час розгону та гальмування, с | 2...20 |
| Кількість пусків за годину | 8 |
| Напруга живлення змінного струму, В: – клеми А1 і А2 – клеми А2 і А3 | 94...264 330...480 |
| Потужність споживання, Вт, не більше: – під час руху – гальмування | 3 4 |
| Напруга логічних входів (змінний струм), В | 94...300 |
| Комутуюча здатність реле, А: – при 30 В постійного струму – 400 В змінного струму категорії АС-11 | 6 2 |
| Опір ізоляції, МОм, не менше | 20 |
| Електрична міцність ізоляції, В | 3000 |
| Режим роботи з байпасом, за ДСТУ EN 60947-4-2: – УПП2-75К-В, УПП2-90К-В, УПП2-110К-В – інші моделі | АС-53b:3-20:940 АС-53b:3-20:660 |
| Ступінь захисту корпусу, за ДСТУ EN 60529: – УПП2-75К-В, УПП2-90К-В, УПП2-110К-В – інші моделі | IP00 IP20 |
| Вібростійкість при впливі синусоїдальної вібрації частотою 13,2...100 Гц | 0,7 g |

Пристрій плавного пуску реалізовано з застосуванням силових симісторів і мікропроцесорної системи керування. Для роботи пристрою в режимі відсутності мережі живлення передбачено батарею типу CR2032.

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– запропоновано систему керування пристрою плавного пуску, що дає змогу реалізовувати керування виходу кута керування на повністю відкритий режим за заданий оператором час;

– розроблено імітаційну модель пристрою плавного пуску з поданою системою керування. Проведено дослідження енергетичних показників пристрою плавного пуску, а саме величини

пускового моменту, пускового струму та коефіцієнта гармонічних спотворень форми фазного струму під час виходу на режим. Показано, що під час плавного пуску струм двигуна має лінійно зростаюче значення, а значення коефіцієнта гармонічних спотворень струму в початковий момент часу буде найгіршим, складатиме 53,25 % і в процесі пуску буде зменшуватись до нуля. Отже, якщо стоїть питання забезпечення вимог електромагнітної сумісності пристрою плавного пуску з мережею живлення, необхідним є застосування додаткових пасивних чи активних фільтрокомпенсуючих пристроїв;

– наведено результати розроблення фізичного прототипу пристрою плавного

пуску з застосуванням запропонованої системи керування силових симісторів. Пристрій може бути використано для плавного пуску та зупинки асинхронних двигунів або регулювання потужності трифазного резистивного навантаження.

Статтю підготовлено в рамках проведення дослідження за держбюджетною темою «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах» (державний реєстраційний номер 0121U109440).

Список використаних джерел

1. Shokarov D., Zachepa I., Zachepa N., Chorna V., Susyk D. The control of the traction asynchronous electric drive of the miner electric locomotive with dual-mode supply. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017. P. 52–55. DOI: 10.1109/MEES.2017.8248950.
2. Iorgulescu D., Samoilescu G., Solcanu V., Balaceanu M., Barbulescu C., Bordianu A. Applications of the Asynchronous Motor in the Anchoring Installation – Simulation and Advantages. *2020 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*. 2020. DOI: 10.1109/ISFEE51261.2020.9756133.
3. Bordianu A., Iorgulescu D., Puscasu S. Use of asynchronous electric motors in naval electric propulsion systems. *2020 IEEE 21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. 2020. DOI: 10.1109/CPEE50798.2020.9238762.
4. Kukishev D., Meshcheryakov V., Boikov A., Evseev A. Energy saving in the scalar control system of an asynchronous electric drive. *2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. 2018. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571784.
5. Nikolaienko O., Antonov M. Asynchronous Electric Drive Based on Cascade Multi-Level Frequency Converter. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2019. P. 310–313. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896457.
6. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Mykhalkiv S., Ravlyuk V. A method for calculating the parameters of the sine filter of the frequency converter, taking into account the criterion of starting current limitation and pulse-width modulation frequency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 1, No. 8 (109). P. 6–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225327.
7. Meshcheryakov V., Sibirtsev D., Valtchev S., Gracheva E. Control system for a frequency synchronized asynchronous electric drive. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021. Vol. 23. P. 116–126. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-116-126.
8. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Mykhalkiv S., Hordiienko D., Shelest D., Khomenko I. Research of energy characteristics of three-phase voltage source inverters with modified pulse

width modulation. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 422–427. DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570071.

9. Wang Q., Li H. A Kind of Soft Started Regulated Power Supply. *2020 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)*. 2020. P. 926–929. DOI: 10.1109/ICPICS50287.2020.9202366.

10. Tytiuk V., Rozhnenko Z., Baranovska M., Berdai A., Chorny O., Saravas V. Soft Starters of Powerful Electric Motors and Economic Aspects of Their Application. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. 2020. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240859.

11. Mohammadi M., Moghani J. S., Ansari S. A., Milimonfared J., Dehbashi A. Fuzzy logic based sensorless soft starter for constant frequency wind power plants. *2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*. 2018. P. 538–543. DOI: 10.1109/PEDSTC.2018.8343854.

12. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Tugay D. V., Hordiienko D. A. Method for optimization of switching frequency in frequency converters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. No. 1 (181). P. 103–110. DOI: 10.33271/nvngu/2021-1/103.

13. Rashevskaya M., Yanchenko S., Tsyruk S. Assessment of non-stationary harmonic distortion related to adjustable speed induction motor and soft starters. *2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*. 2018. DOI: 10.1109/SIELA.2018.8447097.

14. Meshcheryakov V. N., Evseev A. M., Boikov A. I. Active energy filter for compensation of harmonic distortion in motor soft starter. *2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)*. 2018. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341701.

15. Varalakshmi K., Bharathi B., Himaja T. Study of Soft-Starter based Induction Generator for Wind Energy Conversion System. *2021 Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON)*. 2021. DOI: 10.1109/ASIANCON51346.2021.9544993.

16. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D. Control and accounting of parameters of electricity consumption in distribution networks. *2021 XXXI International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*. 2021. P. 114–117. DOI: 10.1109/MMA52675.2021.9610907.

17. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Syniavskiy A. V., Philipjeva M. V. Use of modern technologies in the problems of automation of data collection in intellectual power supply systems. *Modern engineering and innovative technologies*. 2022. Is. 19. Part 1. P. 38–51. DOI: 10.30890/2567-5273.2022-19-01-058.

18. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Khoruzhevskiy H. Study of energy parameters in alternative power source microgrid systems with multilevel inverters. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2020. Vol. 5. Is. 3. P. 118–121.

19. Liu N., Wang X., Hang C., Kong M., Li Z., Nie P. Asynchronous Starting Characteristics and Soft Start Method of the Brushless Doubly-Fed Motor. *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2018. P. 1538–1542. DOI: 10.23919/ICEMS.2018.8549055.

20. Hu X., Si H., Ye Q., Tian X., Fang T. Research on Fuzzy Control System for Constant Current Soft Start of Motor. *2019 5th International Conference on Green Materials and Environmental Engineering*. 2019. Vol. 453. P. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/453/1/012064.

21. Tuton M., Sharith D., Jubaer K. Artificial neural network based soft-starter for induction motor. *2015 2nd International Conference on Electrical Information and Communication Technologies (EICT)*. 2015. P. 228–233. DOI: 10.1109/EICT.2015.7391951.

22. Zhang W. Design of Programmable Soft Starter Control System. *Frontier Computing*. 2021. P. 1981–1988. DOI: 10.1007/978-981-16-0115-6_232.
23. Kosykh E. A., Udovichenko A. V. Research of a Soft Starter of an Induction Motor Based on Multi-Zone Transistor AC Voltage Regulator. *2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. 2020. P. 358–362. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153510.
24. Abdel A., Elgamal M., Abdel A.-H., Mahmoud E. E., Chen Z., Hassan M. A Proposed ANN-Based Acceleration Control Scheme for Soft Starting Induction Motor. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 4253–4265. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3046848.
25. Richardson M., Patterson V., Parchment A. Microcontroller Based Space Vector Pulse Width Modulation Speed Control of Three-phase Induction Motor. *SoutheastCon 2021*. 2021. DOI: 10.1109/SoutheastCon45413.2021.9401922.
26. Luke A. S., Majumdar I., Gupta S. K., Peter J., Athikkal S. Investigation on Space Vector Based Hybrid PWM Algorithm for Induction Motor Control. *2020 International Conference on Power Electronics and Renewable Energy Applications (PEREA)*. 2020. DOI: 10.1109/PEREA51218.2020.9339783.
27. Gugaliya A., Singh G., Shah V., Tamboli M., Bandekar A., Baviskar P. Availability Improvement of Induction Motors through Condition Monitoring. *2022 2nd Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON)*. 2022. DOI: 10.1109/ASIANCON55314.2022.9908908.
28. Smetanin V., Victor D., Lytkin V., Lukonin D., Dvoeglazov C. Induction motors for use in the strong power fields equipment for processing spent nuclear fuel in the special module of the prototype mixing device for an energy complex. *2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED)*. 2021. DOI: 10.1109/ACED50605.2021.9462289.
29. Tytiuk V., Zachepa I., Rudenko N., Chenchevoi V., Prokopenko V., Kobiliansky B. Mathematical Modeling of a Special Induction Motor With a Double Squirrel Cage Rotor. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2021. DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598749.
30. Shestakov A. V. Modeling and Experimental Analysis of Dynamic Characteristics of Asynchronous Motor. *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2019. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743061.

Плахтій Олександр Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 612-02-12. E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Шелест Дмитро Андрійович, аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Тел.: +38 (066) 973-05-67. E-mail: shelllogist@gmail.com. ORCID: 0000-0001-6095-658X.

Синявський Андрій Владиславович, аспірант кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (066) 634-39-00. E-mail: andreivladislavovich10@gmail.com. ORCID: 0000-0001-9588-6737.

Plakhtii Olexandr Andrievych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (057) 730-10-76. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Hordiienko Denys Anatolievych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 612-02-12. E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Shelest Dmytro Andriyovych, postgraduate of Department of Electricity Transmission, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». Tel.: +38 (066) 973-05-67. E-mail: shelllogist@gmail.com. ORCID: 0000-0001-6095-658X.

Syniavskyi Andrii Vladyslavovych, postgraduate of Department of Transport Communications, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (066) 634-39-00. E-mail: andreivladislavovich10@gmail.com. ORCID: 0000-0001-9588-6737.

Статтю прийнято 20.10.2022 р.