

DOI: 10.31319/2519-2884.47.2025.13

УДК 621.313.333:621.316.7

Загребаєв М.С., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,
e-mail: mihail19091997zagrebaev@gmail.com

Сотник О.А., асистент кафедри електроніки та електронних комунікацій,
e-mail: gajutsot@gmail.com

Звонецький М.С., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,
e-mail: mzv2@ukr.net

Зальоткін В.В., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,
e-mail: vladzaletkin@gmail.com

С'янов О.М., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0003-4120-4926,
e-mail: alexandr.sianov@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Zahrebaiev Mykhailo, Postgraduate student

Sotnyk Oleksandr, Assistant, Department of Electronics and Electronic Communications

Zvonetskiy Mykhailo, Postgraduate student

Zalotkin Vladislav, Postgraduate student

S'yanov Oleksandr, Doctor of Science, Professor, Department of Electronics and Electronic Communications

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ

У роботі досліджується асинхронний двигун з короткозамкненим ротором у режимах пуску з обмеженням струму від тиристорного регулятора напруги. Запропоновано інтегровану модель у середовищах Ansys Simplorer-Maxwell2D та MATLAB Simulink, яка поєднує асинхронний двигун та тиристорний регулятор напруги. Досліджено вплив обмеження пускового струму на електромагнітні та механічні характеристики двигуна, зокрема струм в обмотці статора, пусковий момент і швидкість обертання ротора.

Запропонований підхід дослідження за допомогою Ansys Simplorer-Maxwell2D та MATLAB Simulink може бути використаний для оптимізації пускових режимів електроприводів, підвищення їх енергоефективності та зменшення механічних навантажень. Перспективи подальших досліджень включають аналіз замкненої системи тиристорного регулятора напруги — асинхронний двигун.

Ключові слова: асинхронний двигун; тиристорний перетворювач напруги; імпульсно-фазове керування; обмеження струму; спільне моделювання.

The paper propose investigates a squirrel-cage induction motor operating under start-up conditions with current limitation provided by a thyristor voltage controller. An integrated model is proposed using Ansys Simplorer-Maxwell2D and MATLAB Simulink environments, combining the induction motor with the thyristor-based voltage control system. The influence of start-up current limitation on the electromagnetic and mechanical characteristics of the motor is analyzed, including stator winding current, starting torque, and rotor speed.

The proposed approach, utilizing Ansys Simplorer-Maxwell2D and MATLAB Simulink, can be applied to optimize the start-up modes of electric drives, improve their energy efficiency, and reduce mechanical stress. Future research prospects include the analysis of the closed-loop system comprising the thyristor voltage controller and the induction motor.

Keywords: asynchronous motor; thyristor voltage regulator; pulse-phase control; current limitation; coupled modeling.

Постановка проблеми

Асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим ротором широко застосовуються в промислових електроприводах, завдяки своїй надійності, простоті конструкції та високій ефектив-

ності. Проте пускові режими АД супроводжуються значними струмами, які можуть у 5—7 разів перевищувати номінальні значення, що призводить до теплових і механічних перевантажень, а також зниження енергоефективності. Використання тиристорних регуляторів напруги (ТРН) дозволяє регулювати напругу, що подається на двигун, шляхом керування кутом відкривання тиристорів, що забезпечує обмеження пускового струму.

Математичні моделі побудовані на основі перетворення координат у вигляді кіл не враховують нелінійність електромагнітних параметрів. Для підвищення точності розрахунку характеристик АД необхідне застосування сучасних числових методів і програмних комплексів, таких як Ansys Simplorer-Maxwell2D та MATLAB Simulink. Інтегроване моделювання у цих середовищах дозволяє поєднати електромагнітний аналіз АД з ТРН та системи керування, що забезпечує комплексне дослідження впливу тиристорного ТРН на перехідні процеси.

Метою дослідження є розробка інтегрованої моделі тиристорного ТРН-АД у Ansys Simplorer-Maxwell2D та Simulink, а також аналіз впливу обмеження пускового струму на електромеханічні характеристики двигуна.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У нинішній час тиристорні регулятори напруги (ТРН) оснащуються мікроконтролерами [1], що дозволяє розширити можливості електропривода.

У системі ТРН-асинхронний двигун (АД) розгін здійснюється за функцією часу, заданого сталого пускового струму або моменту, забезпечується плавне регулювання частоти обертання. До системи додаються захисні функції: максимальний струмовий захист, струмозалежний часовий захист, захист від обриву фаз двигуна та мережі, захист від перевищення вхідної напруги. Таким чином, впровадження мікроконтролера та різноманітних датчиків у структуру ТРН дозволяє суттєво розширити функціонал і перетворити ТРН на пристрій керування та захисту електродвигуна [2].

Найбільш поширеною силовою схемою тиристорного регулятора напруги є парне зустрічно-паралельне ввімкнення тиристорів у кожен фазу трифазного асинхронного двигуна.

При зміні кута відкриття тиристорів α у діапазоні від кута відставання струму статора від напруги φ до 180° діюча фазна напруга першої гармоніки змінюється від номінальної напруги мережі живлення до нуля [3].

Для створення реверсивного ТРН (рис. 1) необхідно застосувати п'ять пар тиристорів, з'єднаних зустрічно-паралельно.

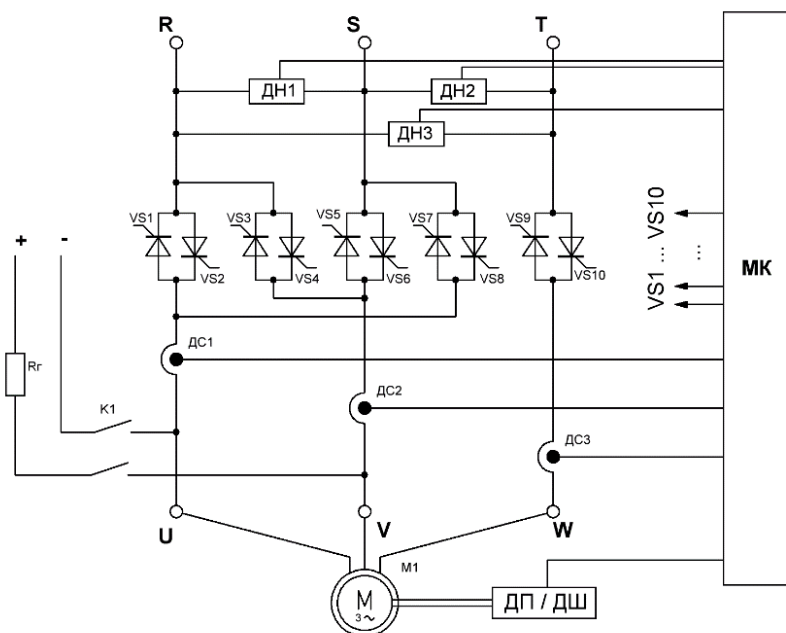


Рис. 1. Реверсивний ТРН

Такий ТРН забезпечує пуск асинхронного двигуна, реверсування, динамічне гальмування та гальмування зустрічним включенням.

Для обертання ротора двигуна в один бік («Вперед») керуючі імпульси подаються на відкриття першої, третьої та п'ятої пар тиристорів у фазах А, В та С. При цьому тиристири другої та четвертої пар мають бути зачинені. У цьому випадку до обмоток статора двигуна буде прикладена напруга з послідовністю фаз а, b, с.

Для реверсу двигуна, тобто для обертання ротора в інший бік («Назад»), необхідно подати імпульси керування на другу, четверту та п'яту пари тиристорів, а тиристири першої та третьої пар мають бути зачинені. Тепер напруга на виході ТРН (на вході двигуна) матиме послідовність фаз b, а, с.

Для динамічного гальмування двигуна в схемі застосовується резистор R_r .

У всіх режимах роботи двигуна цей резистор шунтується тиристорами п'ятої групи, тому на роботу двигуна він не впливає. Якщо ж після обертання ротора в напрямку «Вперед» потрібно створити режим динамічного гальмування, слід зачинити тиристири п'ятої пари — тоді шунтування резистора R_r припиниться, а тиристири зворотного напрямку струму в парах один і три також мають бути зачинені. У цьому випадку тиристири у фазах А і В працюватимуть як випрямлячі (тиристири другої та четвертої пар зачинені).

У такому стані тиристорів по обмотках статора двигуна проходитиме постійний струм, що забезпечує виникнення постійного магнітного потоку статора та гальмівного моменту. Величина струму обмежується резистором R_r .

Дослідження ТРН-АД активно проводяться для оптимізації пускових режимів і підвищення енергоефективності електроприводів.

У роботах [1, 3] пропонується розробка польової моделі АД у Maxwell2D, для моделювання перехідних режимів при живленні від мережі.

У роботі [4] розглядається використання тиристорних регуляторів напруги для зменшення пускових струмів АД, де підкреслюється важливість моделювання електромагнітних процесів за допомогою методу скінченних елементів (FEM) у Maxwell2D.

У [5] виконано спільне моделювання пускових режимів АД з ТРН у середовищах Simulink і Ansys Simplorer, що дозволяє оцінити вплив імпульсно-фазового керування на перехідні характеристики АД.

У дослідженні [5] показано, що обмеження пускового струму в АД шляхом зміни кута відкриття тиристорів сприяє зниженню механічних навантажень на ротор і підвищенню терміну служби двигуна.

Робота [6] зосереджена на порівнянні прямого пуску АД від мережі та пуску з обмеженням струму від ТРН, де підтверджується ефективність ТРН для зменшення теплових втрат.

У [7] досліджується вплив тривалості обмеження струму на пускові характеристики АД, зокрема момент і швидкість обертання ротора, ці дослідження направлені на оптимізації роботи електроприводів у промислових умовах.

Дослідження [8—10] підтверджують перспективність спільного моделювання для аналізу складних нелінійних процесів у системах електроприводів. Використання Ansys Maxwell2D для розрахунку електромагнітного поля дозволяє врахувати насичення магнітопроводу, розсіювання поля в пазах статора, витіснення струму в пазах ротора, скопозив, короткозамкнуті кільця, а Simulink забезпечує реалізацію алгоритмів керування.

Проте, як впливає тривалість обмеження струму на пускові характеристики, не достатньо досліджено, що визначає актуальність даного дослідження.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є дослідження характеристик АД при живленні від ТРН із застосуванням інтегрованої Ansys Simplorer-Maxwell2D та Simulink. Результати спрямовані на оптимізацію пускових режимів, зменшення пускових струмів і підвищення енергоефективності системи.

Виклад основного матеріалу

Дослідження пускових характеристик АД з ТРН зосереджено на аналізі впливу обмеження пускового струму на електромагнітні та механічні характеристики двигуна. Для дослідження режимів пуску ТРН-АД в програмному середовищі Ansys Simplorer створено електрич-

ну схему взаємодії (рис. 2) моделі системи керування (рис. 2, MDL1) та польової моделі АД (рис. 2, FEA1), яка враховує насичення магнітопроводу, розсіювання поля в пазах статора, витіснення струму в пазах ротора, скос пазів, короткозамкнуті кільця. Система імпульсно-фазового керування тиристорами (рис. 3, Matlab Simulink) забезпечує за експоненціальним законом зменшення кута відкривання від 90° до 0° , що дозволяє регулювати пусковий струм.

Створення моделі (рис. 2—4) проводилося з урахуванням особливостей спільного моделювання в програмних продуктах Ansys Simplorer та Matlab Simulink. Першочергово необхідно створити новий проект за таким алгоритмом «Ansys Electronics Desktop > New». Далі у вікні нового проекту на вкладці Desktop обираємо тип дизайну, а саме Simplorer Design, який буде об'єднувати у собі всі інші компоненти, включаючи модулі взаємного моделювання та польову модель АД (Maxwell2D Design). Після створення основного листа дизайну додаємо необхідні електричні компоненти, такі як індуктивності — inductor1, inductor2, inductor3, та резистори (опори) — R4, R5, R6, відмічені на рис. 2. Основним компонентом схеми (рис.2) є електромеханічна польова модель АД, розрахована за параметрами двигуна типорозміру 4AA63A4Y3 [1,2]. Також необхідним кроком є додавання до схеми блоків завдання моменту інерції — MASS_ROTБ та блоку навантаження на АД — F_ROTБ.

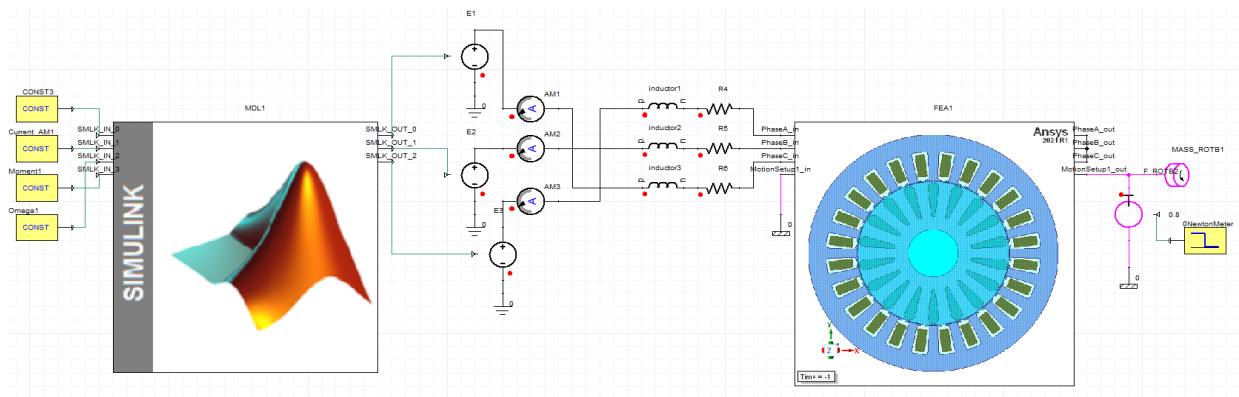


Рис. 2. Структурна схема моделі системи керування ТРН-АД та польової моделі АД (FEA1) в середовищі Ansys Simplorer

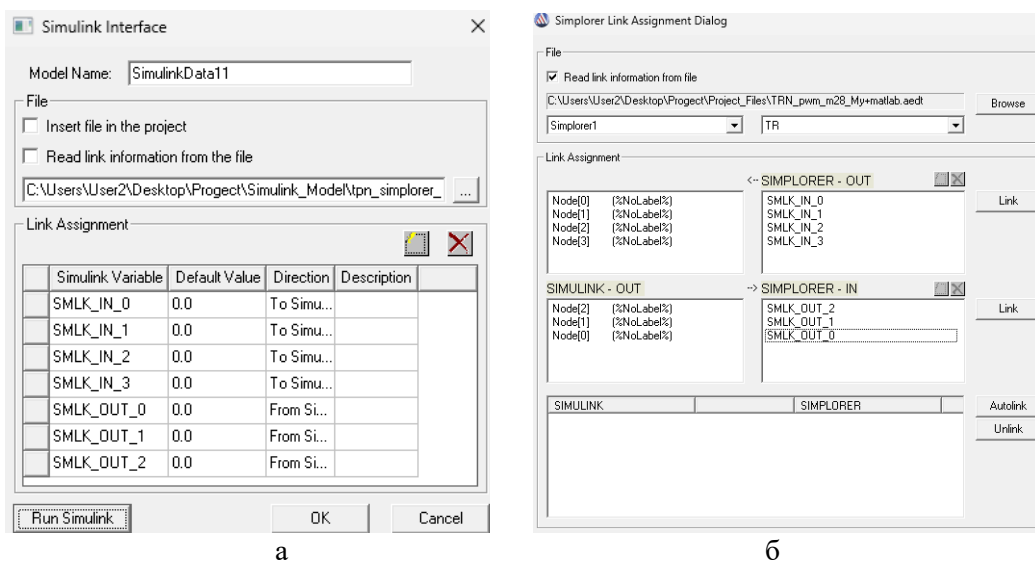


Рис. 3. Параметри блоків зв'язку для передачі даних під час взаємного моделювання між Simulink і Ansys Simplorer: а — структура модуля взаємодії Ansoft Co-Simulation Interface, б — параметри модуля взаємного моделювання AnsoftSFunction

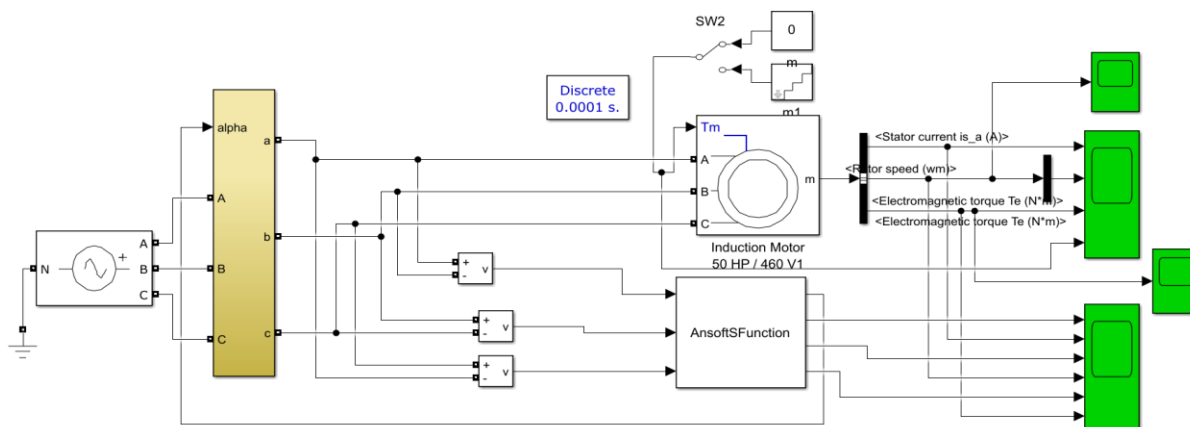


Рис. 4. Модель системи керування ТРН-АД у Simulink із застосуванням модуля взаємного моделювання AnsoftSFunction

Після вищенаведених кроків паралельно зі створенням електромагнітної моделі у середовищі Ansys Simplorer формується модель системи керування у середовищі MATLAB Simulink. Для цього запускається MATLAB та відкривається середовище Simulink, у якому створюється новий проект (рис. 4). У межах цього проекту, в окремому модулі реалізується ТРН-АД.

Електрична частина моделі реалізується за допомогою бібліотеки Simscape Electrical, яка містить необхідні елементи силової електроніки, блоки керування та засоби вимірювання. Для підтвердження достовірності результатів моделювання в середовищі Simulink додатково додається спрощена математична модель АД (з постійними параметрами), що враховує електромагнітні параметри, отримані на основі [2]. У систему також інтегруються вимірювальні блоки (Scope), які забезпечують фіксацію основних характеристик і дають змогу виконати порівняльний аналіз отриманих даних. Для організації взаємодії між середовищами Simulink та Ansys Simplorer використовується спеціальний модуль AnsoftSFunction, зокрема блок S-Function (рис. 3, б), який забезпечує обмін даними щодо напруги, струму, моменту та швидкості. У параметрах цього блоку необхідно вказати коректний шлях до файлів моделі АД, які застосовуються у процесі інтегрованого моделювання, а також визначити параметри обміну змінними між MATLAB і Ansys (рис. 3, а), що забезпечує синхронізацію сигналів між двома частинами системи керування.

Після завершення етапу додавання й налаштування програмних компонентів виконується запуск інтегрованого моделювання. Перед запуском у середовищі Ansys Simplorer слід упевнитися у правильності з'єднання всіх елементів схеми, після чого модель запускається через MATLAB Simulink з перевіркою коректності взаємодії між обома платформами.

У дослідженні основна увага приділена порівнянню пускових характеристик від часу, таких як струму, електромагнітний момент і швидкість обертання ротора в режимі прямого пуску та в режимі з обмеженням струму, що різняться тривалістю керування кутом відкриття тиристорів. При дослідженні використовувався АД типорозміру 4AA63A4U3 [2] потужністю 250 Вт та швидкістю 1500 об/хв.

При пуску від мережі [2] амплітудне значення струму більше в 4,5 разів від номінального (рис. 5, а). Зі зміною кута обертання ротора (рис. 5, в) на електромагнітний момент (рис. 5, б) накладаються гармоніки, що створені зубцевою структурою статора та ротора. Такий пуск забезпечує найшвидший вихід на номінальну швидкість, але створює значні теплові та механічні навантаження.

Введення обмеження струму протягом двох періодів (рис. 6, а) за допомогою ТРН дозволило знизити максимальний струм до $3,5I_n$. На початку пуску електромагнітний момент знизився (рис. 6, б) і на його форму наклались гармоніки, які утворилися від несинусоїдальної форми напруги ТРН. При цьому час пуску зріс на 6 %. Слід зазначити, що під час пуску АД від ТРН кут відкриття тиристорів змінювався за експоненціальним законом.

Режим пуску ТРН-АД з обмеженням струму протягом перших чотирьох періодів показано на рис. 7. У даному режимі амплітуда струму зменшилась до $2,8 I_n$, зросла амплітуда гармоніки в формі електромагнітного моменту.

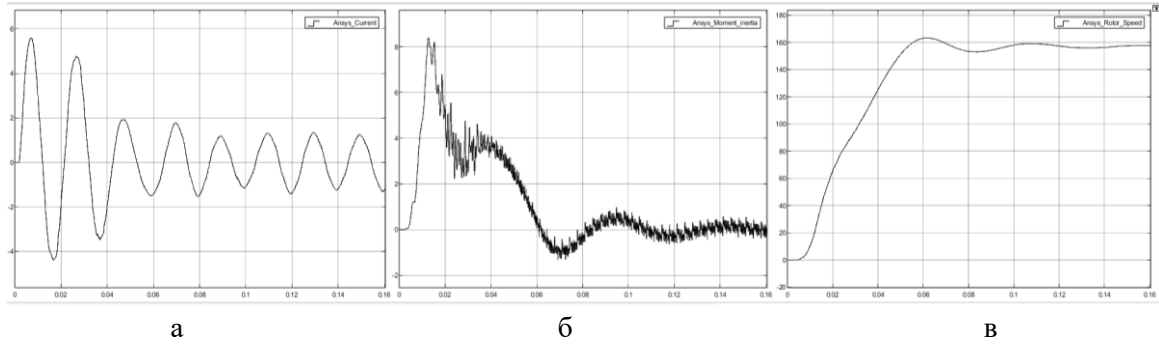


Рис. 5. Перехідні характеристики пуску АД від ТРН, без обмеження напруги і струму ($\alpha=0$): а — пусковий струм, б — електромагнітний момент, в — швидкість

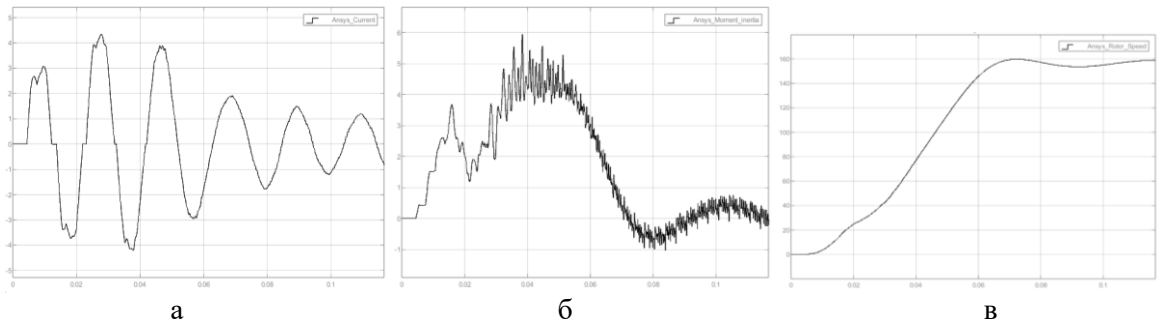


Рис. 6. Перехідні характеристики пуску АД від ТРН, з обмеженням струму на перших двох періодах: а — пусковий струм, б — електромагнітний момент, в — швидкість

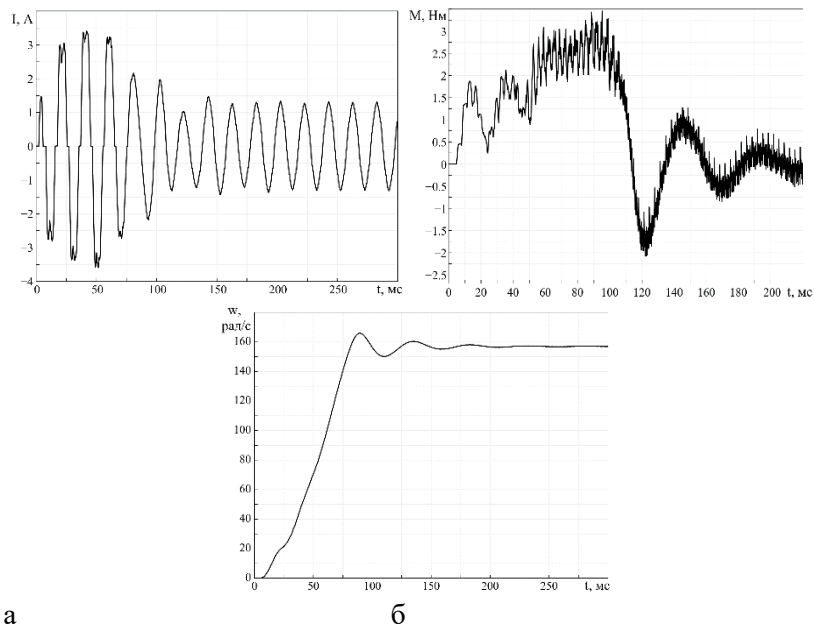


Рис. 7. Перехідні характеристики пуску АД від ТРН, з обмеженням струму на чотирьох періодах, де: а — пусковий струм, б — електромагнітний момент, в — швидкість

Найбільш ефективним із досліджених режимів є пуск із обмеженням струму протягом перших чотирьох періодів, який значно знижує теплові та механічні навантаження, зберігаючи прийнятну тривалість пуску.

Результати дослідження показали, що при зменшенні пускового струму зменшується пусковий момент на початку пуску, що обмежує використання ТРН-АД тільки для механізмів насоса та вентилятора. Отримана модель може бути використана для оптимізації пускових режимів роботи АД.

Висновки

Розроблено інтегровану модель ТРН-АД у середовищах Ansys Simplorer-Maxwell2D та Simulink, в якій враховано насичення магнітопроводу, розсіювання поля в пазах статора, витіснення струму в пазах ротора, скоп пазів, короткозамкнуті кільця АД та виконано поєднання системи керування, перетворювача напруги та АД. Модель дозволила продемонструвати свої можливості при дослідженні розімкнутої системи АД-ТРН.

Список використаної літератури

1. Загребяев М.С., Звонецкий М.С., Рязанцев О.В., С'янов О.М. Влияние электромагнитных параметров асинхронного двигателя с короткозамкнутой клеткой на переходные процессы. Сборник научных работ Днепропетровского государственного технического университета (технические науки). Кам'янське, Дніпровський державний технічний університет, 2024. № 2(45), С. 136–145
2. Performance Evaluation of an Induction Motor Drive for Traction Application / Academia.edu. — URL: https://www.academia.edu/67039178/Performance_Evaluation_of_an_Induction_Motor_Drive_for_Traction_Application
3. Zahrebaiev Mykhailo, Zvonetskiy Mykhailo, S'yanov Oleksandr. (2024). Mathematical modeling of transient processes in a squirrel-cage induction motor using a field-based approach. Mathematical Modeling. DSTU. № 2(51) 2024. 66–76
4. Finite Elements Model Co-Simulation of an Induction Motor Drive for Traction Application / RefreeDrive Project. — URL: https://www.refreedrive.eu/wp-content/downloads/Finite_element_model_co-simulation_of_an_induction_motor_drive_for_traction_application_aiecon2019_RFDa.pdf
5. Simulation of Direct Torque Control of Induction Motor Using Simulink, Simplorer, and Maxwell Software / A.K. Singh, P. Kumar, C.U. Reddy, K. Prabhakar. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/302479453>
6. Direct Torque Control of Induction Motor Simulink Model / MathWorks File Exchange. — URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/78396-direct-torque-control-of-induction-motor-simulink-model>
7. Modeling and Simulation of Induction Motor Based on Finite Element Analysis / IJPEDS. — URL: <https://ijpeds.iaescore.com/index.php/IJPEDS/article/view/5826>
8. Induction Machine Direct Torque Control / MathWorks Documentation. — URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/inductionmachinedirecttorquecontrol.html>
9. Torque Control of Induction Motor Using Simulink/Matlab / CS Journals. — URL: <https://csjournals.com/IJITKM/ICFTEM/pdf/2.%20ecccc/38-%20357-Torque%20Control%20of%20Induction%20Motor%20Using%20Simulink.pdf>
10. Space Vector Modulation Based Direct Torque Control of Induction Motor / Academia.edu. — URL: https://www.academia.edu/33109158/Space_Vector_Modulation_Based_Direct_Torque_Control_of_Induction_Motor_using_Matlab_Simulink_Maxwell_Simplorer

INVESTIGATION OF AN INDUCTION MOTOR SUPPLIED BY A THYRISTOR VOLTAGE CONTROLLER IN TRANSIENT MODES

Abstract

This paper presents a comprehensive study of the transient performance of a squirrel-cage induction motor (IM) powered by a thyristor voltage controller (TVC) during start-up under various current-limiting strategies. An advanced coupled simulation model was developed and implemented using the integrated environments of Ansys Simplorer–Maxwell2D and MATLAB Simulink. This hybrid approach enables precise co-simulation of the electromagnetic field dynamics inside the motor — accounting for core saturation, stator and rotor slot leakage, skin effect in rotor bars, skewed slots, and end-ring effects — together with the control logic and power electronics of the TVC. The primary objective of the research is to evaluate how different durations of start-up current limitation affect key operational parameters, including stator phase current, electromagnetic torque, and rotor speed evolution during acceleration.

The study compares direct-on-line (DOL) start-up with controlled start-up scenarios where the firing angle of the thyristors is gradually reduced according to an exponential law, thereby limiting inrush current over the first two and four fundamental voltage periods, respectively. Simulation results demonstrate that extending the current-limiting interval from two to four periods effectively reduces the peak start-up current from $4.5 \cdot I_n$ (in DOL mode) to as low as $2.8 \cdot I_n$, significantly alleviating thermal and mechanical stress on the motor and driven equipment. However, this improvement comes at the cost of a moderate increase in start-up time (approximately 6 % longer for the two-period limitation case) and a temporary reduction in initial electromagnetic torque, which restricts the applicability of such soft-start schemes primarily to variable-torque loads like pumps and fans.

The developed co-simulation framework proves to be a powerful and flexible tool for analyzing complex interactions between power converters and electric machines in transient regimes. It provides a high-fidelity platform for optimizing start-up algorithms, enhancing energy efficiency, and improving the reliability of industrial electric drives. The findings underscore the importance of integrated modeling that bridges field-based electromagnetic analysis with circuit- and control-level simulation. Future work will focus on extending the model to closed-loop control configurations, incorporating real-time feedback of current and speed to dynamically adjust the thyristor firing angle and further refine the trade-off between start-up smoothness and acceleration performance.

References

- [1] Zahrebaiev, M.S., Zvonetskiy, M.S., Ryazantsev, O.V., & Sianov, O.M. (2024). *Vplyv elektromagnitnykh parametriv asynkhronnoho dvyhuna z korotkozamknutoiu klitkoiu na perekhidni protsesy* [Influence of electromagnetic parameters of a squirrel-cage induction motor on transient processes]. *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu (Tekhnichni nauky)*, 2(45), 136–145. [in Ukrainian].
- [2] Academia.edu. (2021). *Performance Evaluation of an Induction Motor Drive for Traction Application*. Retrieved from https://www.academia.edu/67039178/Performance_Evaluation_of_an_Induction_Motor_Drive_for_Traction_Application [in English].
- [3] Zahrebaiev, M., Zvonetskiy, M., & Sianov, O. (2024). Mathematical modeling of transient processes in a squirrel-cage induction motor using a field-based approach. *Mathematical Modeling. Dniprovsky State Technical University*, 2(51), 66–76. [in English].
- [4] RefreeDrive Project. (2019). *Finite Elements Model Co-Simulation of an Induction Motor Drive for Traction Application*. Retrieved from https://www.refreedrive.eu/wp-content/downloads/Finite_element_model_co-simulation_of_an_induction_motor_drive_for_traction_application_aiecon2019_RFDa.pdf. [in English].
- [5] Singh, A. K., Kumar, P., Reddy, C. U., & Prabhakar, K. (2016). *Simulation of Direct Torque Control of Induction Motor Using Simulink, Simplorer, and Maxwell Software*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/302479453> [in English].

- [6] MathWorks File Exchange. (2020). *Direct Torque Control of Induction Motor Simulink Model*. Retrieved from <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/78396-direct-torque-control-of-induction-motor-simulink-model> [in English].
- [7] IJPEDS. (2020). *Modeling and Simulation of Induction Motor Based on Finite Element Analysis*. Retrieved from <https://ijpeds.iaescore.com/index.php/IJPEDS/article/view/5826> [in English].
- [8] MathWorks. (n.d.). *Induction Machine Direct Torque Control*. Retrieved from <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/inductionmachinedirecttorquecontrol.html> [in English].
- [9] CS Journals. (2020). *Torque Control of Induction Motor Using Simulink/Matlab*. Retrieved from <https://csjournals.com/IJITKM/ICFTEM/pdf/2.%20ecee/38-%20357-Torque%20Control%20of%20Induction%20Motor%20Using%20Simulink.pdf> [in English].
- [10] Academia.edu. (2018). *Space Vector Modulation Based Direct Torque Control of Induction Motor Using Matlab Simulink, Maxwell, Simplorer*. Retrieved from https://www.academia.edu/33109158/Space_Vector_Modulation_Based_Direct_Torque_Control_of_Induction_Motor_using_Matlab_Simulink_Maxwell_Simplorer [in English].

Надійшла до редколегії 11.06.2025
Прийнята після рецензування 14.10.2025
Опублікована 23.10.2025