

Надточій Анатолій Вікторович, к.т.н., доц., в.о. завідуючого кафедри автоматики та електроустаткування, +38(050)245-173-2, tasman.leh.85@gmail.com, ORCID ID:0000-0003-1905-0895

*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
пр. Незалежності, 44, м. Херсон, 73003*

Надточій Віктор Анатолійович, к.т.н., доц., доцент кафедри автоматики та електроустаткування, +38(097)093-20-15, nva074@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3869-3546

*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
пр. Незалежності, 44, м. Херсон, 73003*

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНОЇ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ РОТОРА У DQ-СИСТЕМІ КООРДИНАТ

***Анотація.** У статті розроблено математичну dq-модель асинхронної машини з урахуванням нелінійної зміни параметрів ротора, зумовленої ефектом витіснення струму у стрижнях роторної обмотки. Досліджено вплив зміни активного опору та індуктивності розсіювання ротора на електромагнітний момент, ковзання, тривалість перехідних процесів і динаміку пускового режиму асинхронного електропривода.*

***Ключові слова:** асинхронна машина, притаманні нелінійності, гармоніки напруги, ефект витіснення струму, dq-модель, елект-привод, MATLAB/Simulink*

Nadtochy Anatolii, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Automation and Electrical Equipment, +38(050)245-17-32, tasman.leh.85@gmail.com, ORCID ID:0000-0003-1905-0895

*Kherson Educational and Scientific Institute of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding
44 Nezalezhnosti Avenue, Kherson, 73003*

Nadtochii Victor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Electrical Equipment, +38(097)093-20-15, nva074@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3869-3546

*Kherson Educational and Scientific Institute of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding
44 Nezalezhnosti Avenue, Kherson, 73003*

MATHEMATICAL MODELING OF AN INDUCTION MACHINE TAKING INTO ACCOUNT NONLINEAR CHANGES IN ROTOR PARAMETERS IN THE DQ-COORDINATE SYSTEM

***Abstract.** The paper presents a mathematical dq-model of an induction machine taking into account the nonlinear variation of rotor parameters caused by the current displacement effect in the rotor bars.*

The influence of changes in rotor active resistance and leakage inductance on electromagnetic torque, slip, transient process duration, and starting dynamics of the induction electric drive is investigated. Simulation results demonstrate that considering rotor parameter variation improves the accuracy of describing electromechanical processes during transient operating conditions and allows a more detailed analysis of the machine starting mode.

Keywords: *induction machine, dq-model, rotor parameter variation, current displacement effect, rotor leakage inductance, rotor active resistance, transient processes, electric drive, nonlinear model, electromechanical processes.*

Вступ. Асинхронні машини є основою сучасних електроприводів промислового, транспортного та енергетичного призначення завдяки високій надійності, простоті конструкції та ефективності роботи [1], [2]. У сучасних системах автоматизованого електропривода особливого значення набуває забезпечення точності математичного опису електромеханічних процесів, що виникають у пускових та перехідних режимах роботи асинхронних машин. Це пов'язано зі зростанням вимог до енергоефективності, динамічних характеристик та якості систем керування електроприводами [3], [4].

Класичні dq-моделі асинхронних машин базуються на припущенні сталості параметрів роторного кола та рівномірного розподілу струму у стрижнях роторної обмотки. Однак у реальних умовах експлуатації, особливо під час пуску та роботи при підвищених значеннях ковзання, у роторі виникає ефект витіснення струму, що призводить до нерівномірного розподілу густини струму у провідниках ротора та зміни ефективного активного опору й індуктивності розсіювання [5], [6]. Неврахування цих нелінійних ефектів знижує точність моделювання електромагнітних і механічних процесів асинхронної машини.

У роботах [7], [8] показано, що нелінійна зміна параметрів ротора суттєво впливає на електромагнітний момент, час розгону та характер перехідних процесів асинхронного електропривода. Дослідження [9], [10] підтверджують, що врахування нелінійностей у dq-моделях дозволяє більш точно описувати динаміку асинхронних машин у перехідних режимах та покращує якість аналізу систем керування.

Сучасні підходи до моделювання електричних машин ґрунтуються на використанні математичних моделей у просторі станів, реалізованих у середовищах MATLAB/Simulink та Simscape Electrical [11], [12]. Використання

таких моделей дозволяє досліджувати взаємозв'язок електромагнітних та механічних процесів, а також оцінювати вплив зміни параметрів ротора на характеристики електропривода [13], [14].

Разом із тим аналіз сучасних досліджень свідчить, що питання врахування нелінійної зміни параметрів роторної обмотки, зумовленої ефектом витіснення струму, у dq-моделях асинхронних машин досліджено недостатньо. Більшість відомих моделей використовують спрощені або лінеаризовані залежності параметрів ротора, що обмежує можливість аналізу електромеханічних процесів у широкому діапазоні режимів роботи [15], [16].

У зв'язку з цим актуальною є задача розроблення математичної dq-моделі асинхронної машини з урахуванням нелінійної зміни параметрів роторної обмотки, зумовленої ефектом витіснення струму, що дозволить підвищити точність моделювання перехідних процесів електропривода та дослідити вплив зміни параметрів ротора на динамічні характеристики асинхронної машини.

Аналіз останніх досліджень в галузі асинхронних електроприводів свідчать про зростання інтересу до підвищення точності математичного моделювання електромеханічних процесів, особливо у пускових і перехідних режимах. У роботах [1], [3] показано, що сучасні асинхронні електроприводи функціонують у широкому діапазоні навантажень і швидкостей, тому використання моделей зі сталими параметрами не завжди дозволяє коректно описати їхню динаміку.

Значна увага у сучасних публікаціях приділяється нелінійним властивостям електричних машин, зокрема зміні параметрів обмоток, насиченню магнітної системи, температурним впливам та залежності електромагнітних характеристик від режиму роботи [2], [14]. Такі фактори безпосередньо впливають на електромагнітний момент, втрати енергії, тривалість перехідних процесів і стійкість електропривода.

Окремий напрям досліджень пов'язаний з урахуванням ефекту витіснення струму в роторі асинхронної машини. У роботах [4], [6] встановлено, що під час пуску, коли ковзання має підвищені значення, частота струму в роторній обмотці

зростає, що призводить до нерівномірного розподілу струму у стрижнях ротора. Наслідком цього є зміна ефективного активного опору та індуктивності розсіювання роторної обмотки, що має враховуватися при моделюванні перехідних процесів.

У публікаціях [5], [7], [8] розглядаються підходи до вдосконалення dq -моделей асинхронних машин шляхом урахування змінних параметрів ротора. Показано, що введення залежностей активного опору та індуктивності розсіювання від ковзання дозволяє точніше відтворити характер розгону, зміну електромагнітного моменту та динаміку механічної частини електропривода.

Результати досліджень [9], [10] підтверджують доцільність використання чисельного моделювання та електромагнітного аналізу для визначення параметрів асинхронних машин. Такі підходи дають змогу уточнювати параметри за результатами розрахунків електромагнітного поля та використовувати їх у моделях простору станів.

У роботах [11], [17], [20] розглянуто питання діагностування, надійності та контролю стану асинхронних електроприводів. Вони підтверджують, що точність математичної моделі є важливою передумовою для коректного аналізу режимів роботи, виявлення відхилень параметрів і прогнозування технічного стану машини.

Разом із тим аналіз останніх публікацій показує, що більшість досліджень або зосереджується на загальних питаннях ефективності та керування асинхронними електроприводами, або розглядає окремі нелінійні фактори без їх безпосереднього включення до dq -моделі. Недостатньо розкритим залишається питання формалізованого врахування нелінійної зміни параметрів ротора, зумовленої ефектом витіснення струму, при моделюванні пускових і перехідних режимів.

Отже, актуальним є подальше вдосконалення математичних моделей асинхронних машин шляхом введення залежностей ефективного активного опору та індуктивності розсіювання ротора від ковзання. Такий підхід дозволяє підвищити точність опису електромеханічних процесів і створює підґрунтя для

подальшого синтезу систем керування асинхронними електроприводами з урахуванням притаманних нелінійностей.

Мета роботи полягає в розробленні математичної dq -моделі асинхронної машини з урахуванням нелінійної зміни активного опору та індуктивності розсіювання роторної обмотки, зумовленої ефектом витіснення струму, що дозволить підвищити точність моделювання електромеханічних процесів у пускових та перехідних режимах роботи асинхронного електропривода.

Основна частина. Дослідження виконано на основі математичної dq -моделі асинхронної машини з урахуванням нелінійної зміни параметрів роторної обмотки, зумовленої ефектом витіснення струму. Як об'єкт дослідження використано трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу АІР132М4 потужністю 11 кВт. Моделювання електромеханічних процесів виконувалося у середовищі MATLAB Simulink із використанням чисельного методу Рунге-Кутта 4-го порядку [11], [12].

Класичні dq -моделі асинхронних машин переважно базуються на припущенні сталості параметрів ротора, що не дозволяє коректно описувати електромеханічні процеси у пускових та перехідних режимах [5], [7]. При підвищених значеннях ковзання у стрижнях ротора виникає ефект витіснення струму, який призводить до нерівномірного розподілу густини струму по перерізу провідника та зміни ефективного активного опору і індуктивності розсіювання роторної обмотки [4], [6].

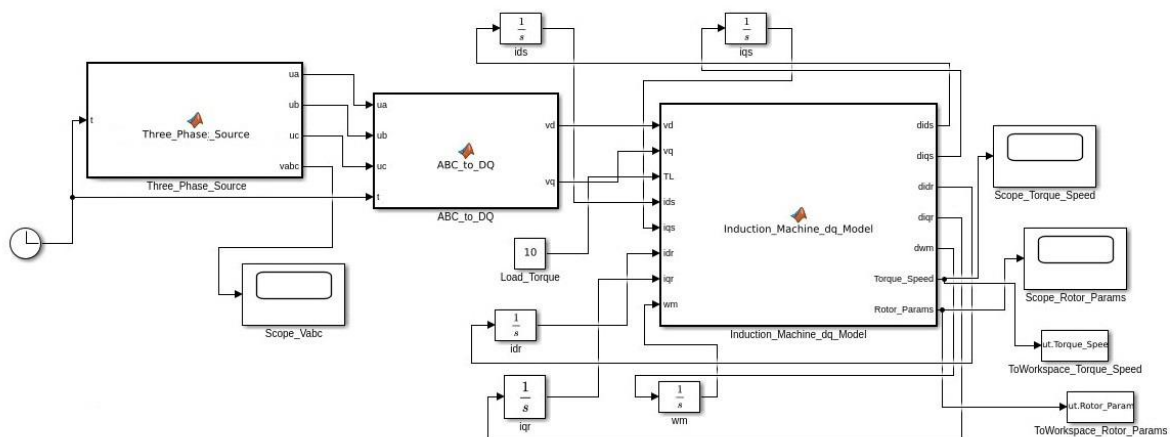


Рисунок 1 – Структурна схема моделі асинхронної машини у середовищі MATLAB/Simulink

На рис. 1 наведено структурну схему математичної dq -моделі асинхронної машини, реалізованої у середовищі MATLAB/Simulink. Модель включає блоки трифазного джерела живлення, координатних перетворень abc/dq , електромагнітної підсистеми статора та ротора, модуля розрахунку потокозчеплень і електромагнітного моменту, а також механічної частини електропривода. У структурі моделі передбачено врахування нелінійної зміни активного опору та індуктивності розсіювання роторної обмотки залежно від ковзання, що дозволяє досліджувати вплив ефекту витіснення струму на перехідні процеси асинхронної машини.

Електромагнітні процеси асинхронної машини у dq -системі координат описуються системою диференціальних рівнянь [5], [8]:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{ds}}{dt} &= u_{ds} - R_s i_{ds} + \omega_e \psi_{qs} \\ \frac{d\psi_{qs}}{dt} &= u_{qs} - R_s i_{qs} + \omega_e \psi_{ds} \\ \frac{d\psi_{dr}}{dt} &= -R_r(s) i_{dr} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr} \\ \frac{d\psi_{qr}}{dt} &= -R_r(s) i_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr} \end{aligned} \quad (1)$$

де u_{ds}, u_{qs} – проєкції напруги статора; $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$ – проєкції струмів; $\psi_{qs}, \psi_{ds}, \psi_{qr}, \psi_{dr}$ – потокозчеплення; R_s – активний опір статора; $R_r(s)$ – ефективний активний опір ротора; ω_e – синхронна кутова швидкість; ω_r – механічна кутова швидкість ротора.

Потокозчеплення визначаються виразами:

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{dr} &= L_r(s) i_{dr} + L_m i_{ds} \end{aligned} \quad (2)$$

де L_m – взаємна індуктивність; $L_r(s)$ – індуктивність розсіювання ротора, що залежить від ковзання.

Для врахування ефекту витіснення струму використано апроксимаційні залежності параметрів ротора від ковзання [4], [15]:

$$\begin{aligned} R_r(s) &= R_{r0}(1 + K_R s^2) \\ L_r(s) &= L_{r0}(1 - K_L s) \end{aligned} \quad (3)$$

де R_{r0}, L_{r0} – номінальні параметри ротора; K_R, K_L – емпіричні коефіцієнти, що визначають інтенсивність зміни параметрів ротора залежно від ковзання.

Коефіцієнти K_R та K_L визначалися на основі аналізу літературних даних [4], [6], [7] та результатів електромагнітного моделювання роторної обмотки. Для досліджуваного двигуна використовувались значення:

$$K_R = 0,85;$$

$$K_L = 0,32.$$

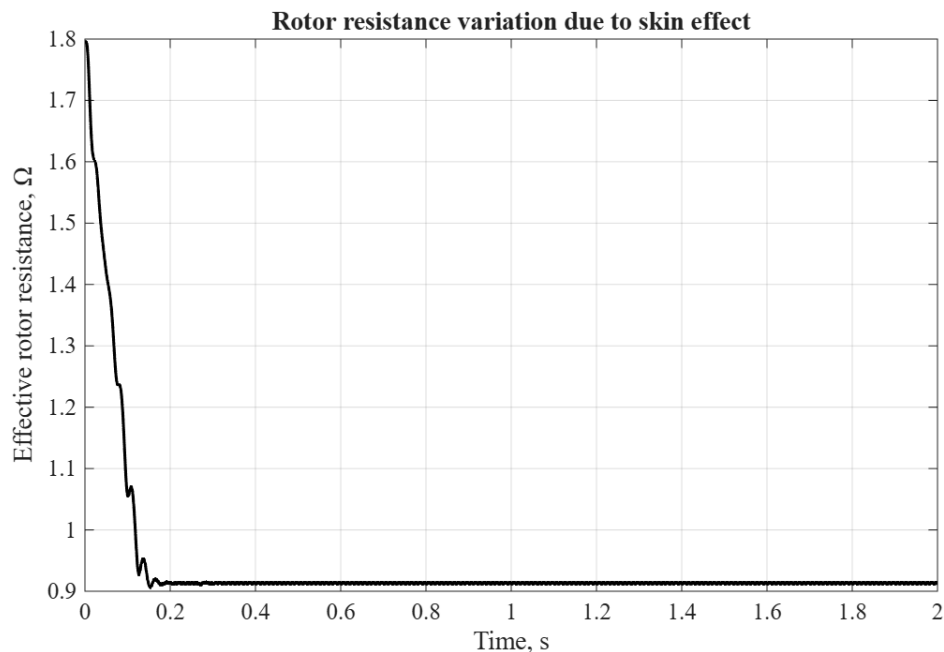


Рисунок 2 – Залежність ефективного активного опору ротора від ковзання

На рис. 2 наведено часову залежність ефективного активного опору ротора асинхронної машини у пусковому режимі. У початковий момент часу спостерігається підвищене значення активного опору, що обумовлено ефектом витіснення струму у стрижнях короткозамкненого ротора при високих значеннях ковзання. У процесі розгону машини та зменшення ковзання ефективний активний опір ротора поступово знижується та наближається до усталеного

значення. Отримані результати підтверджують суттєвий вплив нелінійної зміни параметрів ротора на динамічні характеристики асинхронної машини у перехідних режимах роботи.

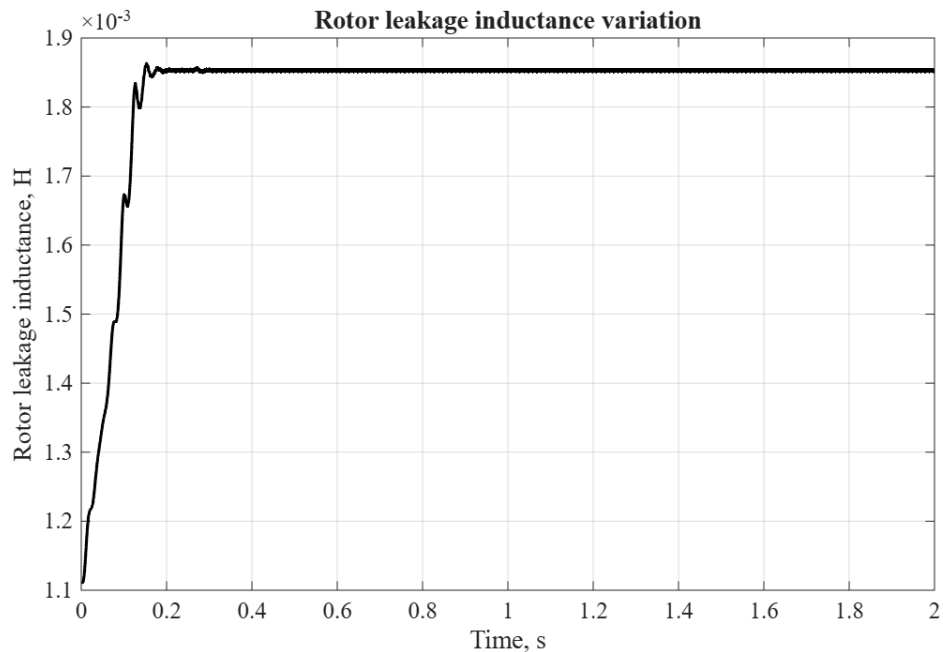


Рисунок 3 – Залежність індуктивності розсіювання ротора від ковзання

На рис. 3 наведено часову залежність індуктивності розсіювання роторної обмотки асинхронної машини у процесі пуску та переходу до усталеного режиму роботи. У початковий момент часу при високих значеннях ковзання спостерігається зменшення індуктивності розсіювання, що пов'язано з нерівномірним розподілом струму у провідниках ротора під дією ефекту витіснення струму. У процесі розгону ротора та зменшення ковзання значення індуктивності поступово стабілізується та наближається до усталеного режиму. Отримані результати підтверджують необхідність врахування нелінійної зміни параметрів роторної обмотки при математичному моделюванні перехідних процесів асинхронної машини.

Електромагнітний момент асинхронної машини визначався виразом [3], [8]:

$$M_e = \frac{3}{2} p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (4)$$

Механічна частина електропривода описувалась рівнянням:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M_e - M_L - B\omega_r, \quad (5)$$

де J – момент інерції; M_L – момент навантаження; B – коефіцієнт в'язкого тертя.

Для оцінювання впливу нелінійної зміни параметрів ротора проведено порівняльний аналіз:

- класичної dq -моделі зі сталими параметрами ротора;
- запропонованої моделі зі змінними параметрами $R_r(s)$ та $L_r(s)$.

Результати моделювання показали, що врахування ефекту витіснення струму суттєво впливає на динаміку пускового режиму асинхронного електропривода. У початковий момент пуску ефективний активний опір ротора збільшується приблизно у 1,7–1,9 раза відносно номінального значення, тоді як індуктивність розсіювання змінюється в межах 20–30 %. Найбільш інтенсивна зміна параметрів спостерігається при ковзанні ($s > 0,5$) [4], [18].

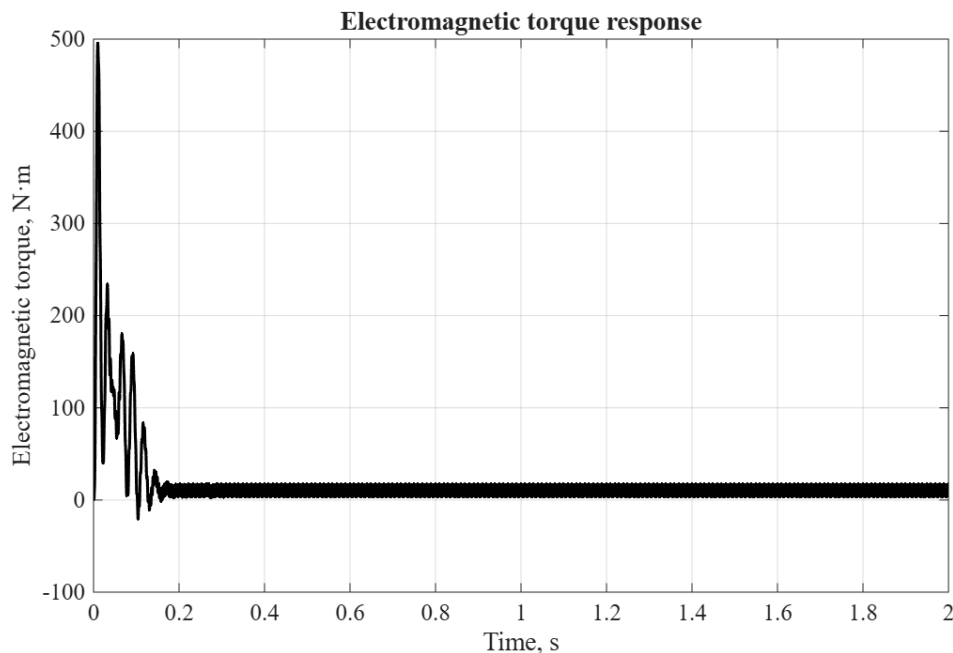


Рисунок 4 – Часова залежність електромагнітного моменту асинхронної машини

На рис. 4 наведено часову залежність електромагнітного моменту асинхронної машини у пусковому режимі. У початковий момент часу спостерігається різке зростання електромагнітного моменту, зумовлене великим значенням ковзання та підвищеним струмом ротора. У процесі розгону двигуна амплітуда коливань моменту поступово зменшується, а система переходить до

усталеного режиму роботи. Отримані результати свідчать про суттєвий вплив нелінійної зміни параметрів роторної обмотки на формування перехідних процесів та динамічні характеристики асинхронної машини.

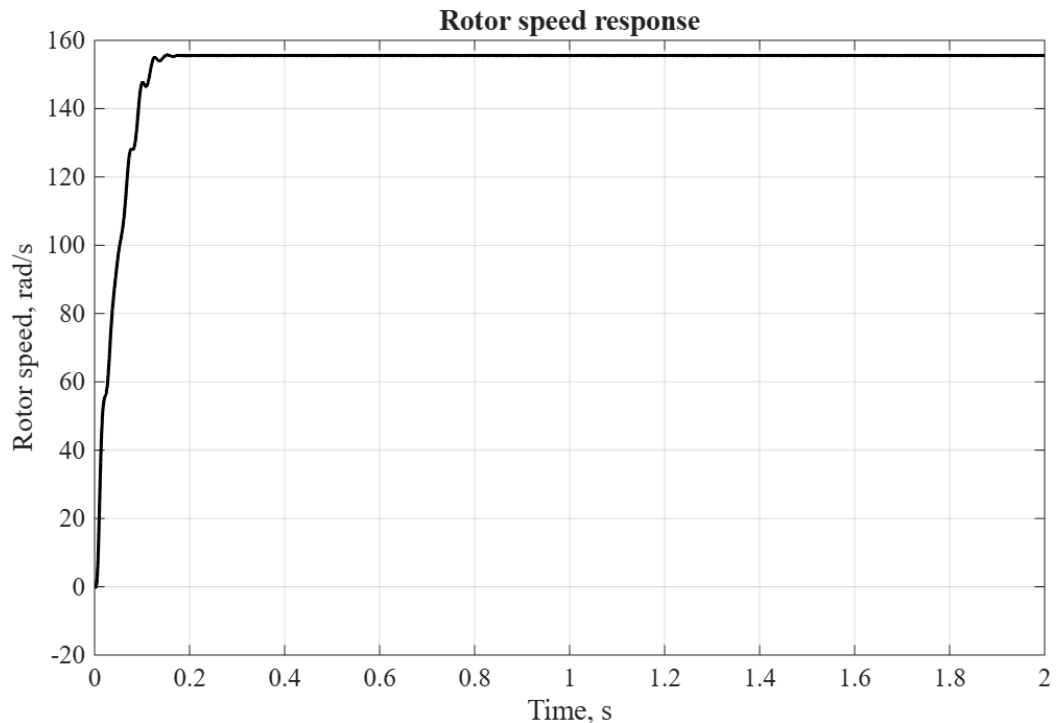


Рисунок 5 – Перехідний процес кутової швидкості ротора

На рис. 5 наведено часову залежність кутової швидкості ротора асинхронної машини у процесі пуску. У початковий момент часу швидкість ротора дорівнює нулю, після чого відбувається інтенсивний розгін двигуна під дією електромагнітного моменту. У міру зменшення ковзання швидкість ротора поступово наближається до усталеного значення, а перехідний процес характеризується зменшенням коливань та стабілізацією режиму роботи. Отримані результати підтверджують вплив нелінійної зміни параметрів роторної обмотки на динаміку розгону асинхронної машини.

Порівняльний аналіз показав, що класична dq -модель зі сталими параметрами ротора занижує тривалість перехідного процесу та не дозволяє повною мірою врахувати зміну електромагнітного моменту у пусковому режимі. Використання запропонованої моделі забезпечує більш точний опис електромеханічних процесів при високих значеннях ковзання та дозволяє врахувати нелінійний характер зміни параметрів роторної обмотки [7], [8], [15].

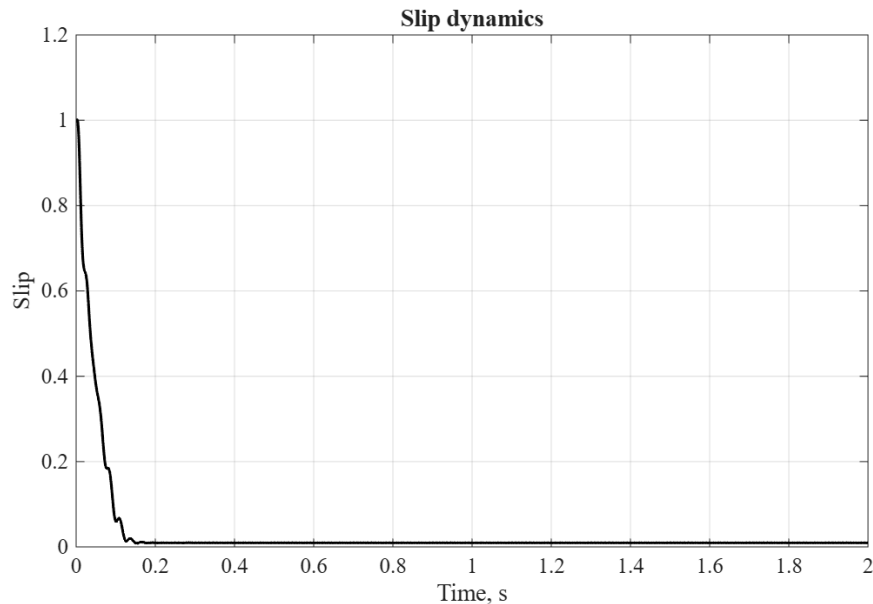


Рисунок 6 – Динаміка зміни ковзання асинхронної машини у пусковому

На рис. 6 наведено часову залежність ковзання асинхронної машини під час пуску та переходу до усталеного режиму роботи. У початковий момент часу ковзання має максимальне значення, що відповідає нерухомому стану ротора та супроводжується підвищеними значеннями струму і електромагнітного моменту. У процесі розгону ротора ковзання поступово зменшується та наближається до усталеного значення, характерного для номінального режиму роботи. Отримані результати підтверджують взаємозв'язок між зміною ковзання та нелінійною зміною параметрів роторної обмотки під впливом ефекту витіснення струму.

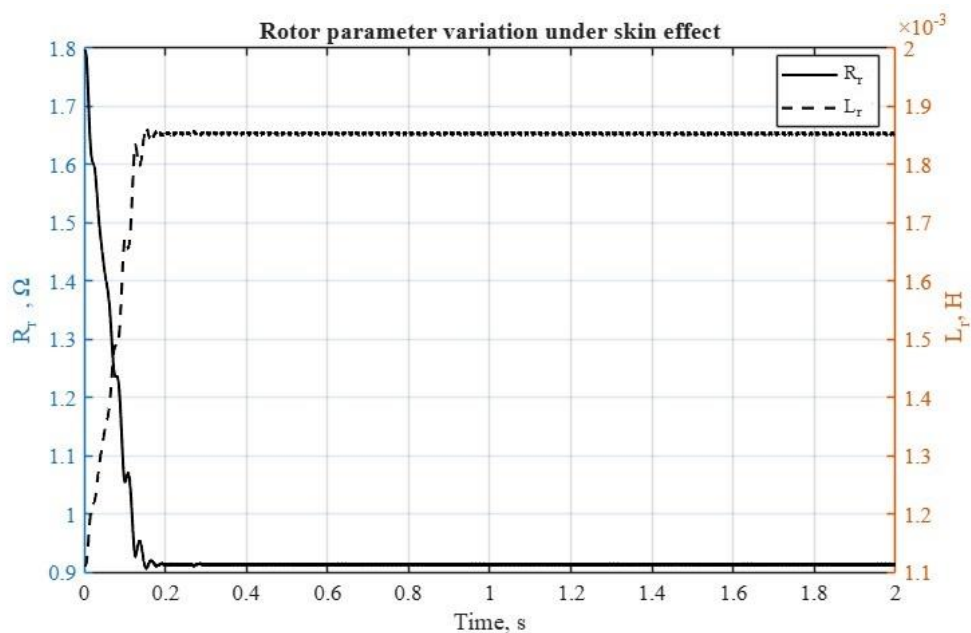


Рисунок 7 – Спільна зміна ефективного активного опору та індуктивності розсіювання ротора

На рис. 7 наведено спільні часові залежності ефективного активного опору та індуктивності розсіювання роторної обмотки асинхронної машини у пусковому режимі. У початковий момент часу при високих значеннях ковзання спостерігається збільшення ефективного активного опору ротора та одночасне зменшення індуктивності розсіювання, що обумовлено нерівномірним розподілом струму у стрижнях ротора під дією ефекту витіснення струму. У процесі розгону машини та зменшення ковзання параметри ротора поступово наближаються до усталених значень. Отримані результати підтверджують взаємозв'язок між зміною параметрів роторної обмотки та динамічними режимами роботи асинхронної машини.

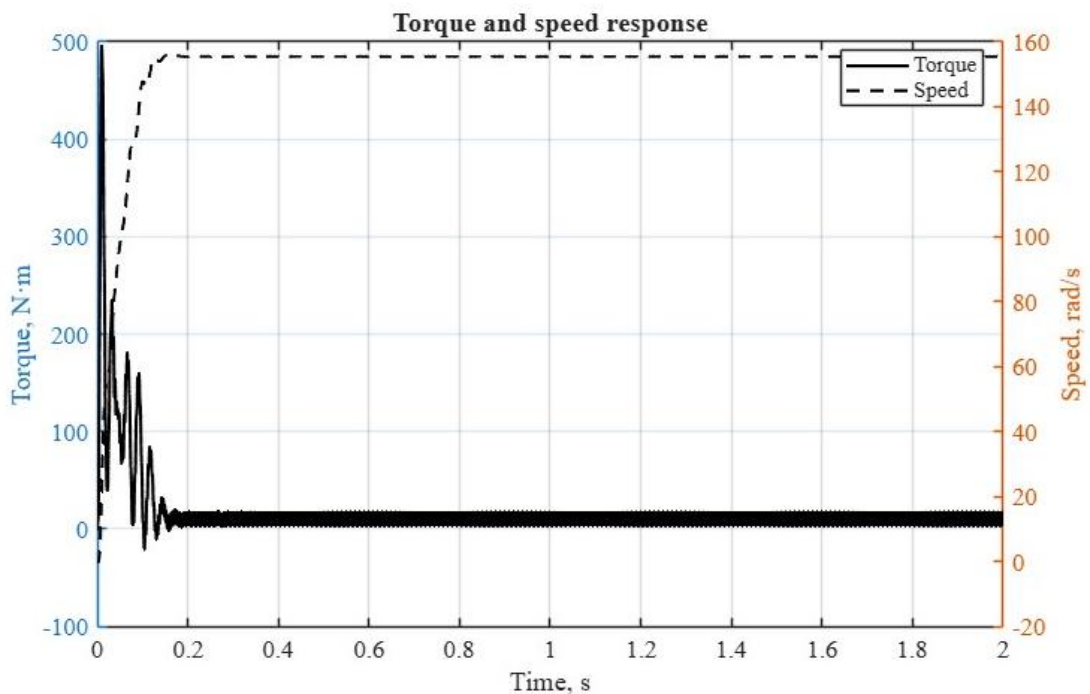


Рисунок 8 – Спільний перехідний процес електромагнітного моменту та кутової швидкості ротора

На рис. 8 наведено спільні часові залежності електромагнітного моменту та кутової швидкості ротора асинхронної машини у процесі пуску. У початковий момент часу спостерігається різке зростання електромагнітного моменту, що забезпечує інтенсивний розгін ротора. У процесі зменшення ковзання амплітуда коливань моменту поступово знижується, а кутова швидкість ротора наближається до усталеного значення. Отримані результати демонструють взаємозв'язок між електромагнітними та механічними процесами асинхронної

машини та підтверджують вплив нелінійної зміни параметрів роторної обмотки на динаміку електропривода у перехідних режимах роботи.

У табл. 1 наведено порівняння характеристик класичної dq -моделі асинхронної машини та запропонованої моделі з урахуванням нелінійної зміни параметрів роторної обмотки під впливом ефекту витіснення струму.

Таблиця 1 – Порівняння характеристик класичної та запропонованої моделей

Параметр	Класична dq -модель	Запропонована dq -модель з урахуванням нелінійної зміни параметрів ротора
Активний опір ротора	сталий	змінюється залежно від ковзання
Індуктивність розсіювання ротора	стала	змінюється залежно від ковзання
Урахування ефекту витіснення струму	відсутнє	враховано
Максимальний електромагнітний момент	нижчий	вищий у пусковому режимі
Характер перехідного процесу	спрощений	більш наближений до реального
Тривалість пускового режиму	занижена	враховує вплив нелінійностей
Точність опису динамічних процесів	обмежена	підвищена
Точність опису процесів при великих ковзаннях	низька	висока
Врахування зміни параметрів ротора	відсутнє	реалізовано через залежності $R_r(s)$ та $L_r(s)$
Можливість аналізу нелінійних режимів	обмежена	розширена

Результати порівняння показують, що запропонована модель забезпечує більш точний опис електромеханічних процесів у пускових та перехідних режимах роботи асинхронної машини

Висновки. Розроблено математичну dq -модель асинхронної машини з урахуванням нелінійної зміни параметрів роторної обмотки, зумовленої ефектом витіснення струму. Встановлено, що зміна ефективного активного опору та індуктивності розсіювання ротора суттєво впливає на електромагнітний момент, ковзання та динаміку пускового режиму асинхронного електропривода. Показано, що використання моделі зі змінними параметрами ротора забезпечує більш точний опис перехідних процесів порівняно з класичною dq -моделлю зі сталими параметрами. Отримані результати можуть бути використані при подальшому

вдосконаленні систем керування асинхронними електроприводами та математичних моделей електромеханічних систем.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Azab M. (2025) “A Review of Recent Trends in High-Efficiency Induction Motor Drives”. *Vehicles*. Vol. 7. No. 1. doi:10.3390/vehicles7010015.
2. Kodkin V., Anikin A. (2022) “Experimental Studies of Nonlinear Dynamics of Asynchronous Electric Drives with Variable Load”. *Processes*. Vol. 10. No. 6. doi:10.3390/pr10061068.
3. Ben Slimene M. (2022) “Saturation Effects in Electrical Machines”. *Energies*, Vol. 15. No. 24. doi:10.3390/en15249412.
4. Wang Q., Sun X., Zhu Z Q. (2021) “Analysis of Rotor Skin Effect in Induction Machines under Dynamic Operating Conditions”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 36. No. 4. pp. 3105–3114, doi:10.1109/TEC.2021.3071874.
5. Liu H., Xu L., Ismail N. (2020) “Improved dq Modeling of Induction Machines Considering Rotor Parameter Variations”. *Energies*. Vol. 13. No. 18. doi:10.3390/en13184762.
6. Choudhury A., Pillay P. (2019) “Investigation of Rotor Bar Skin Effect on Induction Motor Performance”. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 55. No. 5. pp. 4878–4886, doi:10.1109/TIA.2019.2917613.
7. Kumar R., Singh G.K. (2022) “Transient Analysis of Induction Motor Considering Nonlinear Rotor Parameters”. *Electric Power Systems Research*. Vol. 210. doi:10.1016/j.eprsr.2022.108067.
8. Chen Y., Zhao W., Xu D. (2023) “Electromechanical Transient Modeling of Induction Machines with Rotor Nonlinearities”. *Machines*. Vol. 11. No. 7. doi:10.3390/machines11070689.
9. Yarymbash D., Kotsur M., Yarymbash S. (2017) “Features of Three-Dimensional Simulation of Electromagnetic Fields of Induction Motors”. *Electrical Engineering and Power Engineering*. No. 2. pp. 43–50. doi:10.15588/1607-6761-2016-2-5.
10. Kotsur M., Yarymbash D. (2020) “Determination of Induction Motor Parameters by Electromagnetic Field Simulation”. *IEEE Problems of Automated Electrodrive*. pp. 1–4. doi:10.1109/PAEP49887.2020.9240811.
11. Venugopal G. (2023) “Fault Identification and Classification of Asynchronous Motor Drive Using Optimisation Approach with Improved Reliability”. *Energies*. Vol. 16. No. 6. doi:10.3390/en16062660.
12. Tazerart F., Kerrouche F., Azib A., Rekioua T. (2024) “Improving Efficiency Through the Optimisation of Energy Losses in an Induction Machine for Electric Vehicle Propulsion”. *Journal of Renewable Energies*. Vol. 27. No. 1. pp. 67–80. doi:10.54966/jreen.v27i1.1158.
13. Yu X., Chen D., Wu X., Ai M. (2024) “The Influence of Loss Distribution on the Temperature Field of High-Speed Induction Motor”. *IEEE Access*. Vol. 12. pp. 40196–40203, doi:10.1109/ACCESS.2024.3373544.
14. Soltani M., Nuzzo S., Barater D., Franceschini G. (2022) “Investigation of the Temperature Effects on Copper Losses in Hairpin Windings”. *Machines*. Vol. 10. No. 8. doi:10.3390/machines10080715.
15. Al-Quraan T.M. (2022) “Energy-Saving Load Control of Induction Electric Motors for Drives of Working Machines to Reduce Thermal Wear”. *Inventions*. Vol. 7. No. 4. doi:10.3390/inventions7040092.
16. Usman A., Saxena A. (2025) “Technical Roadmaps of Electric Motor Technology for Next Generation Electric Vehicles”. *Machines*. Vol. 13. No. 2. doi:10.3390/machines13020156.
17. Reyes-Malanche J.A. (2023) “Short-Circuit Fault Diagnosis on Induction Motors through Electric Current Phasor Analysis and Fuzzy Logic”. *Energies*. Vol. 16. No. 1. doi:10.3390/en16010516.
18. Elorza A.L. (2023) “Study of Partial Discharge Inception Voltage in Inverter Fed Electric Motor Insulation Systems”. *Applied Sciences*. Vol. 13. No. 4. doi:10.3390/app13042417.

19. Morikawa K., Katsura S. (2023) “Thermoelectric Cooling Application to Motors for High-Power Operation”. *IEEJ Journal of Industry Applications*. Vol. 12. No. 2. pp. 145–152, doi:10.1541/ieejia.22004623.

20. Bahgat B.H. (2024) “Revolutionising Motor Maintenance: A Comprehensive Survey of State-Of-The-Art Fault Detection in Three-Phase Induction Motors”. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. Vol. 15. No. 3. pp. 1968–1989, doi:10.11591/ijpeds.v15.i3.pp1968-1989.

REFERENCES:

1. Azab M. (2025) “A Review of Recent Trends in High-Efficiency Induction Motor Drives”. *Vehicles*. Vol. 7. No. 1. doi:10.3390/vehicles7010015.

2. Kodkin V., Anikin A. (2022) “Experimental Studies of Nonlinear Dynamics of Asynchronous Electric Drives with Variable Load”. *Processes*. Vol. 10. No. 6. doi:10.3390/pr10061068.

3. Ben Slimene M. (2022) “Saturation Effects in Electrical Machines”. *Energies*, Vol. 15. No. 24. doi:10.3390/en15249412.

4. Wang Q., Sun X., Zhu Z Q. (2021) “Analysis of Rotor Skin Effect in Induction Machines under Dynamic Operating Conditions”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 36. No. 4. pp. 3105–3114, doi:10.1109/TEC.2021.3071874.

5. Liu H., Xu L., Ismail N. (2020) “Improved dq Modeling of Induction Machines Considering Rotor Parameter Variations”. *Energies*. Vol. 13. No. 18. doi:10.3390/en13184762.

6. Choudhury A., Pillay P. (2019) “Investigation of Rotor Bar Skin Effect on Induction Motor Performance”. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 55. No. 5. pp. 4878–4886, doi:10.1109/TIA.2019.2917613.

7. Kumar R., Singh G.K. (2022) “Transient Analysis of Induction Motor Considering Nonlinear Rotor Parameters”. *Electric Power Systems Research*. Vol. 210. doi:10.1016/j.epsr.2022.108067.

8. Chen Y., Zhao W., Xu D. (2023) “Electromechanical Transient Modeling of Induction Machines with Rotor Nonlinearities”. *Machines*. Vol. 11. No. 7. doi:10.3390/machines11070689.

9. Yarymbash D., Kotsur M., Yarymbash S. (2017) “Features of Three-Dimensional Simulation of Electromagnetic Fields of Induction Motors”. *Electrical Engineering and Power Engineering*. No. 2. pp. 43–50. doi:10.15588/1607-6761-2016-2-5.

10. Kotsur M., Yarymbash D. (2020) “Determination of Induction Motor Parameters by Electromagnetic Field Simulation”. *IEEE Problems of Automated Electrodrive*. pp. 1–4. doi:10.1109/PAEP49887.2020.9240811.

11. Venugopal G. (2023) “Fault Identification and Classification of Asynchronous Motor Drive Using Optimisation Approach with Improved Reliability”. *Energies*. Vol. 16. No. 6. doi:10.3390/en16062660.

12. Tazerart F., Kerrouche F., Azib A., Rekioua T. (2024) “Improving Efficiency Through the Optimisation of Energy Losses in an Induction Machine for Electric Vehicle Propulsion”. *Journal of Renewable Energies*. Vol. 27. No. 1. pp. 67–80. doi:10.54966/jreen.v27i1.1158.

13. Yu X., Chen D., Wu X., Ai M. (2024) “The Influence of Loss Distribution on the Temperature Field of High-Speed Induction Motor”. *IEEE Access*. Vol. 12. pp. 40196–40203, doi:10.1109/ACCESS.2024.3373544.

14. Soltani M., Nuzzo S., Barater D., Franceschini G. (2022) “Investigation of the Temperature Effects on Copper Losses in Hairpin Windings”. *Machines*. Vol. 10. No. 8. doi:10.3390/machines10080715.

15. Al-Quraan T.M. (2022) “Energy-Saving Load Control of Induction Electric Motors for Drives of Working Machines to Reduce Thermal Wear”. *Inventions*. Vol. 7. No. 4. doi:10.3390/inventions7040092.

16. Usman A., Saxena A. (2025) “Technical Roadmaps of Electric Motor Technology for Next Generation Electric Vehicles”. *Machines*. Vol. 13. No. 2. doi:10.3390/machines13020156.

17. Reyes-Malanche J.A. (2023) “Short-Circuit Fault Diagnosis on Induction Motors through Electric Current Phasor Analysis and Fuzzy Logic”. *Energies*. Vol. 16. No. 1. doi:10.3390/en16010516.
18. Elorza A.L. (2023) “Study of Partial Discharge Inception Voltage in Inverter Fed Electric Motor Insulation Systems”. *Applied Sciences*. Vol. 13. No. 4. doi:10.3390/app13042417.
19. Morikawa K., Katsura S. (2023) “Thermoelectric Cooling Application to Motors for High-Power Operation”. *IEEJ Journal of Industry Applications*. Vol. 12. No. 2. pp. 145–152, doi:10.1541/ieejia.22004623.
20. Bahgat B.H. (2024) “Revolutionising Motor Maintenance: A Comprehensive Survey of State-Of-The-Art Fault Detection in Three-Phase Induction Motors”. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. Vol. 15. No. 3. pp. 1968–1989, doi:10.11591/ijpeds.v15.i3.pp1968-1989.

Стаття надійшла до редакції: 08.04.2026; рецензування: 15.04.2026; прийнята до публікації 21.04.2026. Автори прочитали и дали згоду рукопису. The article was submitted on 08.04.2026; revised on 15.04.2026; and accepted for publication on 21.04.2026. The authors read and approved the final version of the manuscript.