

## Спрощене моделювання тиристорного асинхронного електроприводу

**А. О. Бойко**<sup>1</sup>, доктор технічних наук, професор

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0048-9259>; e-mail: [a.o.boyko@op.edu.ua](mailto:a.o.boyko@op.edu.ua)

Scopus Author ID: 57202752287

**В. П. Пліс**<sup>1</sup>, доктор філософії

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0675-4407>; e-mail: [plis.v.p@op.edu.ua](mailto:plis.v.p@op.edu.ua)

**П. В. Брем**<sup>1</sup>, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-6275-8036>; e-mail: [6255523@as.op.edu.ua](mailto:6255523@as.op.edu.ua)

**Є. О. Соколов**<sup>1</sup>, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-2444-912X>; e-mail: [yevgen.sokolov84@gmail.com](mailto:yevgen.sokolov84@gmail.com)

**Д. В. Токарчук**<sup>1</sup>, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-4257-6364>; e-mail: [6194806@as.op.edu.ua](mailto:6194806@as.op.edu.ua)

<sup>1</sup> Національний університет «Одеська політехніка»

**Анотація.** У роботі розроблено спрощену модель асинхронного електроприводу з тиристорним перетворювачем напруги, орієнтовану на баланс між точністю розрахунків та обчислювальною ефективністю. Вихідна напруга перетворювача представляється набором гармонік, що подаються на асинхронний двигун, що виключає необхідність детального моделювання комутаційних процесів кожного вентиля. Такий підхід дозволяє використовувати як повну модель двигуна, так і апроксимуючу, зберігаючи симетрію машини та основні характеристики досліджуваних режимів. Особливу увагу приділено моделюванню джерела живлячих напруг і розробці методів визначення фази струму статора. Розглянуто два підходи: визначення еквівалентної фази за активною та реактивною складовими еквівалентного опору та обчислення миттєвої фази за проєкціями фазних струмів та напруг. Наведено структурні схеми моделей для розрахунку статичних характеристик та динамічних режимів, включаючи пуск, реверс та зміни кутів керування вентилів. Запропонована модель дозволяє досліджувати динаміку струмів та моменту при полігармонійному живленні, враховуючи вплив вищих гармонік та фазових зрушень, а також інтегрується із системами автоматизації. Результати роботи демонструють, що спрощені моделі асинхронного тиристорного електроприводу можуть бути ефективним інструментом як для аналізу, так і для синтезу тиристорних електромеханічних систем.

**Ключові слова:** асинхронний електропривод, електромеханічна система, тиристорний перетворювач, моделювання, спрощена модель, критична енергетична інфраструктура, зовнішні негативні впливи, ієрархічне моделювання.

*Цитування статті:* Бойко А. О., Пліс В. П., Брем П. В., Соколов Є. О., Токарчук Д. В. (2026). Спрощене моделювання тиристорного асинхронного електроприводу. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 46(122), с.14-25. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.46.122.2026.2>

### Вступ

Метод математичного моделювання є найпоширенішим методом дослідження тиристорних асинхронних електроприводів (ТПН-АД). Завдяки високому рівню точності та фактично необмеженій здатності враховувати не лінійності

будь-якої природи, дослідження, виконане з використанням математичної моделі, часто розглядають як експеримент на моделі. Вибір математичної моделі для практичних розрахунків, вочевидь, залежить від оцінки трьох головних її показників: простоти та зручності використання

© Бойко А. О., Пліс В. П., Брем П. В., Соколов Є. О., Токарчук Д. В., 2026

Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

моделі, точності одержуваних результатів та машинного часу або швидкодії.

Враховуючи, що практично неможливо створити всеосяжну модель, до цих показників можна додати ще один - можливість внесення змін та доповнень користувачем до моделі з метою наближення її до своїх певних завдань (дослідження статичної або динамічної, електромеханічних, електромагнітних процесів або енергетики, у розімкнутій або замкнутій системі, кількість контурів регулювання та види зворотних зв'язків, параметри регуляторів, облік особливостей механічної частини електроприводу, технологічних режимів та ін.).

У цьому сенсі, наприклад, модель електроприводу ТПН-АД у трифазних координатах з урахуванням електромагнітних перехідних процесів і комутації вентилів перетворювача може бути оцінена як точна, але складна та нешвидкодіюча. Виникає необхідність розробки нехай не таких точних, але менш складних і більш швидкодіючих моделей.

У сучасних умовах зростаюча роль асинхронних електроприводів у системах критичної енергетичної інфраструктури вимагає створення моделей, здатних адекватно описувати їхню поведінку при впливі зовнішніх збурень та нестационарних режимів. У таких системах від моделей очікується не лише відтворення електромагнітних процесів, а й можливість оцінки надійності та стійкості роботи приводу під впливом режимних відхилень.

Ідея спрощення полягає в тому, щоб уявити фактичну форму вихідної напруги перетворювача як набір гармонік, що подаються на асинхронний двигун. За такого полігармонічного підходу зникає необхідність формувати комутаційні функції, керувати зміною структури моделі та ув'язувати електромагнітні стани при перемиканнях. Модель двигуна може застосовуватися у повному та деталізованому вигляді в будь-якій системі координат, придатній для аналізу, за умови симетричності електричної машини та досліджуваного режиму її роботи.

Точність підсумкових даних визначається коректністю розрахунку живлячих напруг, числом включених гармонік і ступенем врахування нелінійних властивостей машини.

Підвищити швидкодію моделі вдається не тільки за рахунок спрощення алгоритмів, але й завдяки можливості застосовувати більший крок інтегрування, що стає допустимим при переході від дискретної напруги до згладженого гармонійного подання.

## 1 Аналіз літератури та постановка проблеми

Особливість роботи асинхронних електроприводів із напівпровідниковими перетворювачами, пов'язана з перемиканням вентилів, нестационарністю кінт статора та ротора, впливає на складність їх моделювання. [1]. Математична модель, що описує миттєві стани при комутації, зазвичай вимагає системи диференціальних рівнянь для кожного можливого стану вентилів, що робить її розрахунок ресурсомістким і громіздким [2]. При цьому для завдань інженерного аналізу, синтезу систем керування та оптимізації параметрів приводу цілком достатня спрощена (редукована) модель. Наприклад, у роботі [3] була отримана передатна функція електромагнітної частини асинхронного двигуна, яка дозволяє якісно та кількісно оцінити властивості тиристорного електроприводу та прогнозувати можливі нестійкі режими без моделювання режимів повної комутації.[4]. Такий підхід суттєво знижує складність аналізу, але при цьому адекватно відображає поведінку моменту у перехідних режимах. У роботі [5] представлена математична модель системи «тиристорний перетворювач – асинхронний двигун», в якій враховуються комутаційні процеси та перехідні режими, проте автори підкреслюють, що для деяких прикладних завдань (наприклад, для оцінки динаміки пуску або керування) може бути краща простіша модель з усередненим описом перетворювача. Це говорить про явну потребу в балансуванні між точністю та обчислювальною ефективністю. Методологічна необхідність розробки спрощених моделей також підтверджується в роботах, присвячених адаптивному керуванню та автоматизації асинхронного електроприводу [6]. У роботі [7] застосовуються моделі асинхронного двигуна та перетворювача, з урахуванням низки припущень (лінійність параметрів, ідеалізація комутації). Це дозволяє їх застосовувати для дослідження статичної, але дає великі похибки у динаміці. Найпростіші моделі не завжди можуть адекватно відображати поведінку системи при складних перехідних ситуаціях. Наприклад, у роботі [8] аналіз плавного запуску двигуна за допомогою тиристорного регулятора показує, що параметри інтенсивності пуску значно впливають на піки струмів та моменту. Спрощені моделі повинні коректно відображати ці залежності, щоб бути корисними в проектуванні алгоритмів керування [9]. Серед сучасних тенденцій також трапляються спроби створення спрощених моделей, придатних одночасно для аналізу режимів роботи та синтезу параметрів

системи керування [10]. Цей підхід ілюструє, що зниження порядку моделі можливе без втрати ключових параметрів, якщо правильно вибрати базові змінні та припущення. Актуальність розробки спрощених моделей асинхронного тиристорного електроприводу відображена у роботах [11, 12]. Відображається їхня необхідність для практичного застосування, де баланс між точністю та швидкодією має вирішальне значення. Розробка таких моделей з формалізацією домену застосування (обмеження точності, набір режимів валідації) – перспективний напрямок подальших досліджень та інженерної практики.

## 2 Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – синтез спрощених моделей асинхронного електроприводу з тиристорним перетворювачем напруги.

Потрібно вирішити основні задачі:

- розробка моделей джерел живлячих напруг;
- синтез структур спрощених моделей тиристорного електроприводу;
- розробка способів контролю фази струму асинхронного двигуна.

## 3 Матеріали та методи досліджень

Модель джерела живлячих напруг, разом з моделлю асинхронного двигуна, є ключовим елементом, що визначає якість і достовірність всієї моделі електромеханічної системи. Для симетричної схеми тиристорного перетворювача на шість вентилів та зіркового з'єднання обмоток статора без нульового дроту характерно, що найбільші амплітуди вищих гармонік виникають при чисто індуктивному навантаженні. У такому разі п'ята гармоніка може досягати приблизно 0,376, сьома – 0,27, а одинадцята – близько 0,17 від амплітуди номінальної напруги. Оскільки реактивний опір зростає пропорційно до номера гармоніки, максимальні значення струмів цих гармонік при індуктивному навантаженні становлять приблизно 0,075; 0,039 та 0,0154 відповідно. Якщо фазовий кут струму зменшити, наприклад, до 30 ел. град., то амплітуди вищих гармонік напруги дещо скорочуються (приблизно до 0,32; 0,2; та 0,15), проте зростання повного опору з номером гармоніки вже менш значне. Тому струми вищих гармонік збільшуються та можуть досягати приблизно 0,121; 0,055 та 0,0269 – величин, які для асинхронних двигунів можна вважати верхньою межею. Оцінка діючого значення суми трьох основних вищих гармонік (5-й, 7-й та 11-й) дає величину близько 0,136; облік лише двох (5-й та

7-й) – приблизно 0,133; однієї лише 5-ї – близько 0,121. Ці дані дозволяють зробити висновок, що для приблизних енергетичних розрахунків достатньо враховувати лише п'яту гармоніку. Вклад вищих гармонік в електромагнітний момент також невеликий не тільки через зростання реактивних опорів, але і внаслідок квадратичної залежності моменту від напруги. Орієнтовно максимальний внесок моменту від 5-ї гармоніки становить близько 1–2%, від 7-ї – 0,7–1%, від 11-ї – близько 0,2–0,3%. Тому при розрахунку моменту та аналізі динаміки електроприводу необхідність врахування вищих гармонік зазвичай відсутня. Моделі джерел живлення повинні мати на вході параметр керування – кут керування  $\alpha$  (при синхронізації з напругою) або  $\gamma$  (при синхронізації зі струмом), а також поточне значення фазового кута  $\phi$  струму навантаження як збурювальний вплив. На виході, залежно від поставленого завдання, формуються амплітуди та фази першої та вищих гармонік або тільки амплітуди. Включення моделі джерела до складу загальної моделі електроприводу може здійснюватися різними способами [13].

У ширшому контексті моделювання електромеханічних систем доцільно застосування принципів ієрархічного моделювання, що дозволяє поєднувати детальний апаратний опис електроприводу зі спрощеними уявленнями на рівні системного аналізу. Це забезпечує можливість інтеграції моделі ТПН-АД у більш складні багаторівневі структури керування.

У першому випадку необхідні вихідні координати джерела розраховуються у процесі моделювання електроприводу на кожному кроці розрахунку чи рідше, наприклад, при зміні на задану величину керуючого чи збурювального впливів. Такий спосіб можна вважати більш точним, але і більш громіздким, тому що в ньому містяться процедури ітераційних методів при вирішенні трансцендентних рівнянь та отримання інтегралів синусних та косинусних складових гармонік. За умови врахування гармонік, вищих за першу, обсяг обчислень зростає майже пропорційно кількості гармонік, що беруться до розрахунку. Кількість вихідних координат, що розраховуються ( $U_1$ ,  $U_1^2$ ,  $U$ ,  $\psi_1$  та ін.) однієї гармоніки суттєво не впливають на час розрахунку.

У другому варіанті допускається застосування попередньо сформованого масиву вихідних даних із заданою точністю, тобто з визначеним кроком за керуючими та збурювальними параметрами. Звернення до такого масиву дозволяє отримувати необхідні значення безпосередньо, без додаткових розрахунків або з мінімаль-

ною інтерполяцією. Цей підхід забезпечує найбільшу швидкодію, але потребує значного обсягу пам'яті. Зберігати та передавати таку інформацію для подальшого формування напруг необхідно у цифровому вигляді.

У третьому випадку заздалегідь розрахований масив вхідних та вихідних координат ТПН апроксимується деякими аналітичними функціями, що дають наближені залежності між вхідними та вихідними координатами. Описувана модель джерела живлення характеризується як проста та швидкодіюча. Достоїнствами методу є точність, компактність зберігання інформації та можливість передачі її будь-якими способами крім програмного. Далі синтез спрощених моделей асинхронного електроприводу з ТПН ґрунтується на цьому методі.

#### 4 Результати досліджень

При живленні двигуна декількома гармонійними складовими враховується, що не всі вони мають однаковий порядок чергування фаз. Для АТ із трифазними симетричними обмотками для визначення порядку чергування фаз використовується вираз

$$k = 6c \pm 1 \quad (1)$$

де  $k$  – номер гармоніки;  
 $c = 0, 1, 2, \dots$

Гармоніки з номерами, отриманими із застосуванням  $+1$  (7, 13, 19, ...), утворюють прямо обертове магнітне поле, а отримані із застосуванням  $-1$  (5, 11, 17, ...) – зворотно обертове поле. При подачі живлення на модель АД, наприклад, в осях  $\alpha, \beta, 0$ , слід при врахуванні 1-ї та 5-ї гармонік записувати

$$\begin{aligned} U_{1\alpha} &= U_1 U_m \cos(\omega_0 t + \psi_1) + U_5 U_m \sin(5\omega_0 t + \psi_5); \\ U_{1\beta} &= U_1 U_m \sin(\omega_0 t + \psi_1) + U_5 U_m \cos(5\omega_0 t + \psi_5) \end{aligned} \quad (2)$$

З урахуванням інтеграції електроприводів до сучасних автоматизованих та цифрових систем управління важливим стає забезпечення їх стійкості до зовнішніх негативних впливів. Моделі, подібні до запропонованої, повинні дозволяти аналізувати поведінку приводу в умовах зміни параметрів керування, зовнішніх впливів і перехідних процесів, що є характерним для комплексних кіберфізичних систем. При розрахунках статичних та динамічних режимів асинхронного двигуна з нульовими початковими електромагнітними умовами та живленням від мережі зазвичай не враховують фазу напруги живлення. Для таких випадків вводять поняття інваріантності характеристик та процесів щодо фази живлення –

це правило справедливе і при полігармонійному живленні. Його обґрунтування спирається на модель «багатостаторної» електричної машини, де кожен статор живиться однією власною гармонікою, а сумарний момент визначається як алгебраїчна сума моментів «окремих машин». В рамках кожної з цих часткових моделей ситуація еквівалентна живленню від мережі, і роль фази виявляється вторинною. Практичні розрахунки при полігармонійному харчуванні підтверджують: облік фаз гармонік дає несуттєвий вплив на результати як у статиці, так і в динаміці. У той же час, при більш загальному підході фази гармонійних складових вихідної напруги ТПН як і їх амплітуди залежать не тільки від керуючого впливу, а й від збурювального – зміни фази струму навантаження, а вони в динаміці можуть змінюватися в значних межах і з великою швидкістю і це може вплинути на якість напруги живлення [7]. Складові напруги живлення можуть стати не гармонійними. Оцінимо приблизно діапазони та похідні зміни фази напруги при зміні керуючих  $\alpha, \gamma$  та збурювального  $\varphi$  впливів на прикладі першої гармоніки. Деякі положення очевидні і в цих випадках обмежимося лише ілюстраціями, які підтверджують їх без доказів. До них відносяться випадки стрибкоподібної зміни керуючих та збурювальних впливів. Наприклад, при стрибку керуючого впливу  $\Delta\alpha = 90$  ел. град. або  $\Delta\gamma = 60$  ел. град. максимальний стрибок фази першої гармонійної напруги  $\Delta\psi_1$  до 60 ел. град. спостерігається у разі навантаження з  $\varphi = 30$  ел. град. і зменшується майже до нуля при чисто індуктивному навантаженні.

Аналогічно, стрибкоподібна зміна фази струму при постійному керуючому впливі призведе не тільки до стрибка амплітуди, але і фази напруги живлення. Максимальна зміна фази першої гармоніки напруги  $\Delta\psi_1 = 60$  ел. град. спостерігається в граничному режимі при стрибку фази струму  $\Delta\varphi = 90$  ел. град. Стрибок фази струму, як граничний випадок в асинхронному електроприводі важко собі уявити, але близьке наближення до нього можливе, наприклад, при розгоні на робочій ділянці механічної характеристики. Двигун 4АМУ100L4 потужністю 4 кВт без додаткових махових мас має на робочій ділянці електромеханічну постійну часу  $T_m = 0,003$  с. При скиданні навантаження навіть без урахування перерегулювання швидкість двигуна змінюється від  $\omega_n$  до  $\omega_0$ , а фаза струму від  $\varphi_n = 32$  ел. град. до  $\varphi_0 \approx 88$  ел. град., тобто на 55 ел. град. У цьому випадку максимальна швидкість зміни фази струму навантаження становить

16666 ел. град./с або 166,6 ел. град. за половину періоду живильної мережі. Така швидкість зміни фази, залежно від знака, рівносильна, майже повному гальмуванню або руху з подвоєною швидкістю вектора струму. Всі ці випадки можна віднести до розряду очевидних, коли можна припустити, що стосовно однієї фази навантаження стрибкоподібна зміна фази напруги створює розрив і зміщення синусоїди напруги живлення, як показано на рис. 1.

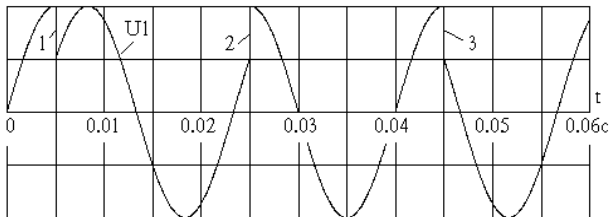


Рис. 1 - Графік основної гармоніки напруги при стрибкоподібній зміні його фази на величину  $\pm\pi/3$

На рисунку представлена синусоїда напруги частотою 50 Гц, у якій у трьох верхніх напівхвилях стрибкоподібно змінена фаза: 1 – на  $-\pi/3$ ; 2 – на  $+\pi/3$ , тобто здійснено повернення у початковий стан та 3 – на  $+\pi/3$ . Очевидно, що при досить швидкій зміні фази за іншими залежностями форма напруги в однофазному ланцюгу буде помітно спотворена [14].

У симетричній трифазній системі напруга живлення складається з першої гармоніки фазної напруги  $U_1 = U_{1m} \sin(\omega_0 t + \psi_1)$ , або по фазах:

$$\begin{aligned} U_{A1} &= U_{1m} \sin(\omega_0 t + \psi_1) \\ U_{B1} &= U_{1m} \sin(\omega_0 t - 2\pi/3 + \psi_1) \\ U_{C1} &= U_{1m} \sin(\omega_0 t - 4\pi/3 + \psi_1) \end{aligned} \quad (3)$$

Результуючий вектор трифазної системи напруг першої гармоніки

$$\begin{aligned} \bar{U}_{1\Sigma} &= U_{1m} \left[ \sin(\omega_0 t + \psi_1) + e^{j\frac{2\pi}{3}} \sin(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3} + \psi_1) + e^{j\frac{4\pi}{3}} \sin(\omega_0 t - \frac{4\pi}{3} + \psi_1) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

Після перетворень

$$\bar{U}_{1\Sigma} = \frac{3}{2} U_{1m} [\sin(\omega_0 t + \psi_1) - j \cos(\omega_0 t + \psi_1)] \quad (5)$$

Здійснивши поворот на  $\pi/2$  і помноживши на  $2/3$  визначається узагальнений вектор першої гармонійної складової

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= U_{1m} \left[ \cos(\omega_0 t + \psi_1 - \frac{\pi}{2}) + j \sin(\omega_0 t + \psi_1 - \frac{\pi}{2}) \right] = U_{1m} e^{j(\omega_0 t + \psi_1 - \frac{\pi}{2})} \end{aligned} \quad (6)$$

У виразі (6) з'явилася складова  $\pi/2$  через відмінність початку відліку фази в трифазній та двофазній системах координат. Головне у цьому виразі те, що він показує, що зміна фази гармонійної складової не впливає на амплітуду узагальненого вектора, а змінює його кутове положення. У динаміці це призводить до зміни миттєвого значення швидкості обертання вектора. У реальній системі, коли відбувається тиристорна комутація фаз напруги мережі живлення з рівномірним обертанням узагальненого вектора, стрибки вихідної напруги ТПН можливі при переходах від трифазного до двофазного включення, коли вектор зупиняється при переходах від двофазного включення до трифазного, коли узагальнений вектор стрибком відновлює своє кутове положення.

Незважаючи на наявність згаданих ефектів, переконливо зафіксувати вплив змін фази напруги першої гармоніки – як за керуючими параметрами, так і за збурювальним впливом – на результати розрахунків не вдається. Це ставить під сумнів коректність визначення поточної фази струму. Досі її оцінювали на основі параметрів схеми заміщення, і при статичних або помірно змінюваних динамічних режимах такий підхід зазвичай дає прийнятну точність [15]. Однак у ряді динамічних ситуацій, коли похідні змінних стають значними або коли фаза струму визначається не лише співвідношенням активних та реактивних опорів, а й присутністю вільних складових, такий метод вже не забезпечує потрібної достовірності. Характерний приклад - автоколивальний режим на штучно сформованій механічній характеристиці, де спрощена модель фактично не може адекватно описати поведінку системи.

Таким чином, вирішується завдання контролю фази струму за миттєвими положеннями узагальнених векторів напруги та струму, перевірки працездатності та порівняння спрощених моделей при двох способах визначення фази струму. Розглянемо два способи контролю або виміру поточної фази струму статора. Перший спосіб, відомий і широко застосовується, полягає у визначенні фази за еквівалентними значеннями активних та реактивних опорів схеми заміщення

$$\varphi_e = \arctg \frac{x_e}{r_e}, \quad (7)$$

де для Т-подібної схеми заміщення:

$$r_e = r_1 + \frac{x_0^2 r_2' / s}{(x_2' + x_0)^2 + (r_2' / s)^2};$$

$$x_e = x_1 + x_0 - \frac{x_0^2 (x_2' + x_0)}{(x_2' + x_0)^2 + (r_2' / s)^2};$$

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega}.$$

Фазу струму, визначену в такий спосіб, можна охарактеризувати як еквівалентну фазу. Як згадувалося, в цьому випадку застосування в напругах живлення фази гармонік не впливає на результати розрахунків. Структурну схему моделі для розрахунку штучних статичних механічних характеристик по першій гармоніці зображено на рис. 2. Тут ланка  $F(s)$  відображає функцію (7),  $F(\alpha, \gamma, \varphi)$  – рівняння, що апроксимує вихідну напругу ТПН,  $F(U_1^2, s)$  – рівняння механічної характеристики [4]. Аналогічно виглядає схема для розрахунку моменту п'ятої та інших гармонік. У цьому випадку необхідно змінити коефіцієнти рівняння вихідної напруги ТПН та параметри схеми заміщення. Момент АД буде сумою моментів від окремих гармонік. Структурна схема моделі ЕП до розрахунку динамічних режимів представлена на рис. 3. Модель АД може бути представлена в будь-якій із систем координат, а вихідна напруга перетворювача представлена у формі вектора, тобто вона може містити будь-яку необхідну кількість гармонік. Динамічні властивості ТПН у спрощених схемах можна врахувати

з аналогією з керованими випрямлячами як властивості інерційної ланки з постійною часу  $T_{ТПН} = T_c/6$ , де  $T_c$  – період напруги мережі живлення. Момент двигуна в цій моделі сумарний, оскільки використовується одна модель із полігармонійним живленням. Функціональна схема моделі електромеханічної системи з керованими процесами пуску та реверсу представлена на рис. 4. У цій моделі можливе керування з постійним або змінним кутом керування тиристорів та автоматична зміна порядку чергування фаз.

При другому способі враховується, що при моделюванні формуються миттєві значення проєкцій фазних струмів і напруг, і як наслідок миттєвої фази струму. У цьому випадку, незалежно від використовуваної системи координат, завжди можна розрахувати амплітуду та фазу узагальненого вектора струму статора відносно узагальненого вектора напруги живлення. У загальному випадку фаза струму відносно дійсної осі  $u$  у системі координат, що обертається з довільною швидкістю  $(u, v, \theta)$

$$\varphi_{i(u)} = \arctg \frac{i_{1v}}{i_{1u}}. \quad (8)$$

Фаза напруги відносно тієї ж осі з урахуванням сталості частоти обертання цього вектора

$$\varphi_{u(u)} = \omega_0 t + \varphi_{u(u)(0)}, \quad (9)$$

де  $\varphi_{u(u)(0)}$  – початкова фаза напруги відносно осі  $u$ .

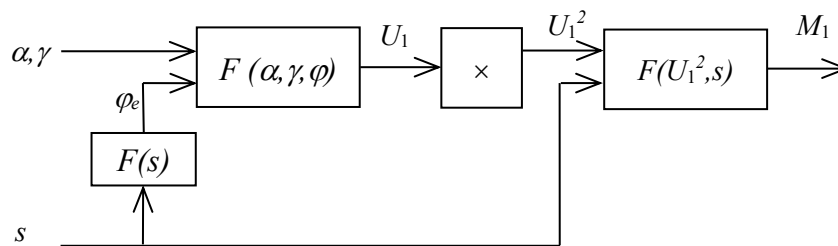


Рис. 2 - Функціонально-структурна схема розімкнутої системи електроприводу ТПН-АД

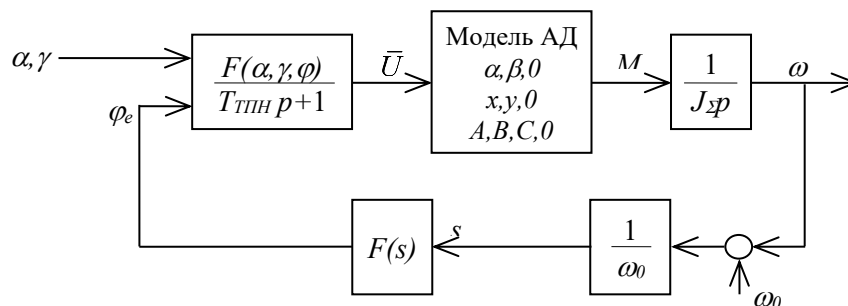


Рис. 3 - Структурна схема моделі електроприводу ТПН-АД для розрахунку динамічних режимів

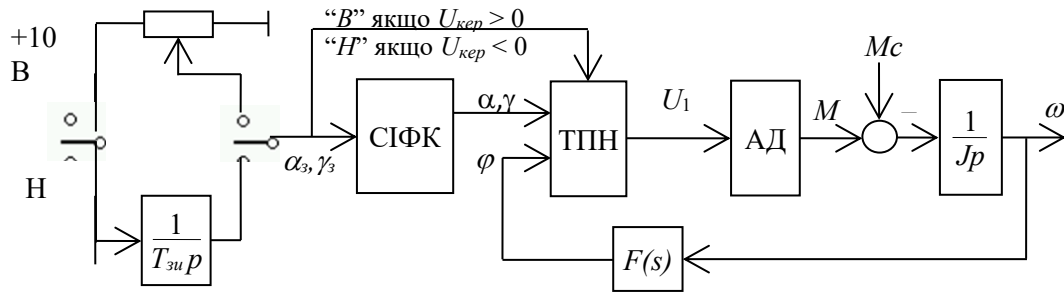


Рис. 4 - Функціональна схема розімкнутої системи електроприводу ТПН-АД

Якщо фаза напруги живлення змінюється, її необхідно визначати аналогічно (8)

$$\varphi_{u(u)} = \arctg \frac{u_{1y}}{u_{1u}} \quad (10)$$

Фаза вектора струму відносно вектора напруги

$$\varphi = \varphi_{u(u)} - \varphi_{i(u)} \quad (11)$$

При використанні системи координат  $x, y, 0$ , що обертається з синхронною швидкістю, і постійної швидкості вектора напруги живлення він може бути поєднаний з віссю  $x$ . Тоді фаза струму відносно напруги

$$\varphi = \arctg \frac{i_{1y}}{i_{1x}} \quad (12)$$

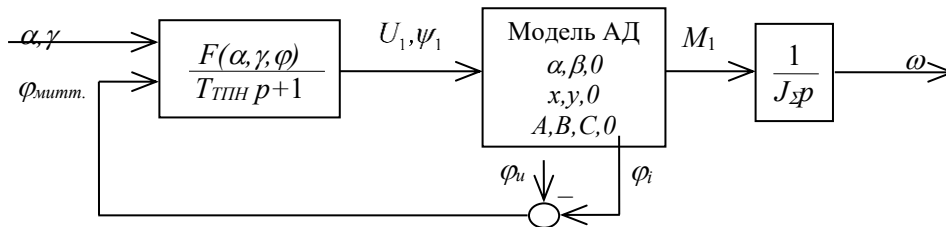


Рис. 5 - Структурна схема моделі електроприводу з використанням миттєвої фази струму статора

Особливістю моделей, у яких використовується миттєве значення фази струму  $\varphi_{mittm.}$ , є те, що вони враховують лише основну гармонійну складову вихідної напруги тиристорного перетворювача [16]. Це пов'язано з тим, що гармонійний аналіз і рівняння, що описують вихідну напругу, засновані на використанні в якості незалежної змінної фази струму першої гармоніки. Якщо спробувати додати п'яту або більш вищі гармоніки, це призведе до спотворення фази струму і замість підвищення точності внесе додаткові помилки. Це визначає особливість моделі електроприводу, що розглядається: вона призначена не для максимального уточнення розрахунків, а для розширення діапазону умов, в яких вона може застосовуватися [17].

У загальному випадку у разі зміни фази напруги у цій системі координат

$$\varphi = \varphi_{u(x)} - \varphi_{i(x)} \quad (13)$$

У нерухомій системі координат  $\alpha, \beta, 0$  фази струму та напруги відносно осі  $\alpha$  безперервно змінюються і можуть бути визначені

$$\varphi = \varphi_{u(\alpha)} - \varphi_{i(\alpha)} \quad (14)$$

Якщо використовується трифазна система координат, то попередньо за проєкціями змінних на осі  $A, B, C, 0$  розраховується узагальнений вектора потім він проєктується на ортогональні осі. Структурна схема моделі електроприводу при використанні миттєвої фази струму статора представлена на рис. 5.

У перехідних режимах фаза струму може змінюватися дуже суттєво. Аналіз у синхронній системі координат показує, що вектор струму під час динамічних процесів, наприклад при пуску, здатний перебувати у двох або навіть трьох квадрантах. У нерухомій системі координат і струм, і напруга можуть розташовуватися в будь-якому з чотирьох квадрантів і змінювати напрямок руху. У зв'язку з цим при використанні тангенціальних функцій у розрахункових програмах необхідно передбачати захист від ділення на нуль та реалізовувати визначення квадрантів.

Описані методи обчислення фази струму дають однакові результати при режимах, що встановилися, але відрізняються в динаміці, особливо на початку розгону, при підході до синх-

ронної швидкості і в моменти перерегулювання. На початку пуску при  $s = 1$  еквівалентна форма  $\varphi_e$  визначає значення фази, що відповідає цьому ковзанню. Початкове миттєве значення фази за другим способом дорівнює нулю, так як вектори струму та напруги при підключенні навантаження в момент  $t = 0$  збігаються. Перехід у другий квадрант у режимі без урахування електромагнітних процесів завжди відбувається при  $\varphi_e = \pi/2$ . З урахуванням електромагнітних перехідних процесів динамічна механічна характеристика в першому квадранті лежить вище статичної, швидкість ротора вище синхронної, а режим АД двигунний. В цей же час еквівалентне значення фази, обчислене при  $s < 0$ , вказує на генераторний режим. І навпаки, при переході з другого квадранту в перший фактичний режим двигуна генераторний, а фаза, обчислена за еквівалентними опорами при  $s > 0$ , говорить про наявність двигунного режиму. Миттєва фаза, визначена за другим способом таких розбіжностей не дає, що вказує на область застосування способів розрахунку фази струму як збурювального у спрощених моделях. Перший, за еквівалентними опорами, можна застосовувати для статичних режимів і керованих, із пригніченням електромагнітних перехідних процесів динамічних режимів, у яких відсутнє перерегулювання. Другий, за миттєвими значеннями струму та напруги, застосовний для випадків, в яких проявляються електромагнітні перехідні процеси.

Хоча другий спосіб формально виглядає більш точним і пріоритетним для застосування в порівнянні з першим, це не завжди так. Фаза струму служить показником співвідношення активної та реактивної складових еквівалентного опору, на основі яких обчислюються гармоніки вихідної напруги тиристорного перетворювача. Ці гармоніки, у свою чергу, є інтегральними величинами, усередненими за період. При застосуванні другого способу зміни фази в перехідних режимах відображають не лише динаміку  $r_s$  та  $x_s$ , але й вплив аперіодичних складових струму статора, не врахованих при вихідному гармонійному аналізі. У реальних перехідних процесах фаза може змінюватися до  $\pi$  і більше, охоплюючи три квадранти комплексної площини, тоді як при гармонійному аналізі розглядається діапазон від  $0$  до  $\pi/2$ , де вектор струму завжди знаходиться в одному квадранті [17]. Виникає питання: чи коректно використовувати миттєві значення фази, що залежать від електромагнітних процесів, для обчислення вихідної напруги ТПН в режимі, що встановився? Відповідь на запитання очевидна.

По-перше, у реальному електроприводі ТПН-АД при незмінному куті керування форма струмів фаз визначається не тільки відношенням  $r_s$  до  $x_s$ , а й аперіодичними складовими, що розрізняються за фазами. Саме вони є джерелом електромагнітних перехідних процесів. По-друге, при кутах керування  $\alpha \leq \pi/2$  випадок, у якому  $\varphi > \pi/2$  (і  $\varphi > \alpha$ ) легко вирішується, тому що в даному випадку, завжди на модель подається повна напруга, а гармонійні складові відсутні.

### Висновки

Розроблено спрощену модель асинхронного електроприводу з тиристорним перетворювачем напруги, що поєднує точну модель асинхронного двигуна та модель перетворювача, на основі апроксимуючої функції.

У розробленій моделі вихідна напруга перетворювача формується як полігармонічна, причому амплітуда та фаза кожної гармоніки описується поліномом 4-го ступеня як функція кута керування та фази струму статора. Похибка моделювання не перевищує 3...5%.

Запропоновано новий спосіб визначення поточної, миттєвої фази струму статора для спрощеної моделі за миттєвими положенням узагальнених векторів струму та напруги першої гармоніки.

### Конфлікти інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів стосовно поточного дослідження, включаючи фінансові, особисті, авторські чи будь-які інші, які могли б вплинути на дослідження, а також на результати, представлені в цій статті.

### Фінансування

Дослідження проводилося за рахунок особистих коштів авторів.

### Наявність даних

В статті доступні усі дані, як у числовій, так і в графічній формі.

### Використання штучного інтелекту

Автори заявляють про використання інструменту штучного інтелекту: ChatGPT model (OpenAI GPT-5, версія 2025), номер 5.0.1. Інструмент штучного інтелекту використовувався при формуванні Анотації. Результати, надані інструментом штучного інтелекту, зменшили вплив лексичних та граматичних помилок.

### Внесок авторів

Бойко А. О.: наукове керівництво, розробка методології, формування початкової версії тексту, загальне адміністрування та фінансування;  
Пліс В. П.: концептуалізація та дослідження,

візуалізація матеріалу, редагування основного тексту статті; Брем П. В.: формування та оформлення списку літератури; Соколов Є. О.: формування анотації та вступу; Токарчук Д. В.: формування та редакція загальних висновків.

### Список використаної літератури

1. Malyar, V.S., O. Ye. Namola and Maday, V.S. (2020). MODELLING OF DYNAMIC MODES OF AN INDUCTION ELECTRIC DRIVE AT PERIODIC LOAD. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 0(3), pp.9–14. doi:<https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.3.02>.
2. Сивокобиленко, В. Ф. (2017). *Математичне моделювання асинхронного електроприводу з глибокопазним ротором при несиметричній напрузі живлення*. [онлайн] Kharkov.ua. Доступно за адресою: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/34038> [Доступ отримано: 20 лютого 2026 р.].
3. Fachini, F., Marcelo de Castro, Tetiana Bogodorova and Vanfretti, L. (2024). Modeling of Induction Motors and Variable Speed Drives for Multi-Domain System Simulations Using Modelica and the OpenIPSL Library. *Electronics*, 13(9), pp.1614–1614. doi:<https://doi.org/10.3390/electronics13091614>.
4. Клепіков, В. Б. та Банев, Ев. Ф. (2010). Моделювання енергозберігаючого електроприводу метрополітену за системою тиристорний перетворювач напруги – асинхронний двигун з фаззі регулюванням. [онлайн] *18-а Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD–2010)*. Харків: НТУ «ХПІ», (2), С.164–164. Доступно за адресою: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/23203> [Доступ отримано: 20 лютого 2026 р.].
5. Teriaiev, V.I. and Dovbyk, A.Yu. (2020). SPECIAL CONSIDERATIONS FOR THE MATHEMATICAL MODELING AND CONTROL OF THE MULTISECTIONAL ASYNCHROOUS MOTOR (Eng). *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, (4). doi:<https://doi.org/10.31649/2307-5392-2020-4-25-31>.
6. Кіпенський, А. В. та Король, Є. І. (2019). Моделювання процесів у трифазному тиристорному перетворювачі змінної напруги з фазоступінчастим регулюванням вихідної потужності. *Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: *Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*, 0(20 (1345)), с. 84–91. doi:<https://doi.org/10.20998/2409-9295.2019.20.12>.
7. Jafar, A.S., Abdullah Salman, G. and Ismael, A. issa (2023). Dynamic Simulation of Three Phase Induction Machines Based on Reduced Order Model for Power Systems Analysis. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, pp.134–141. doi:<https://doi.org/10.24237/djes.2023.16212>.
8. Perdukova, D. and Fedor, P. (2014). A Model-Based Fuzzy Control of an Induction Motor. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 12(5). doi:<https://doi.org/10.15598/aeec.v12i5.1229>.
9. Konuhova, M. (2025). Induction Motor Dynamics Regimes: A Comprehensive Study of Mathematical Models and Validation. *Applied Sciences*, [online] 15(3), pp.1527–1527. doi:<https://doi.org/10.3390/app15031527>.
10. Марущак, Я. та Павліш, В. (2021). Порівняльний аналіз системи тиристорний перетворювач напруги — асинхронний двигун із послідовним та паралельним коригуванням. *Журнал електричні та електромеханічні системи*, с.62–73. doi: <https://doi.org/10.23939/sepes2021.01.061>.
11. Лобов, В. Й., Лобова, К. В. (2017). ВПЛИВ ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ПУЛЬСАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МОМЕНТУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ ПАРАМЕТРИЧНОМУ УПРАВЛІННІ. *Електротехніка і Електромеханіка*, (4), 34–41. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.4.06>
12. Harumwidiah, A. and Kurniawan, A. (2016). MODELING AND ANALYSIS OF AC-AC SOFT STARTER FOR INDUCTION MOTOR BASED ON THYRISTOR AND IGBT. *ASEAN Journal of Systems Engineering*, 3(2), p.60. doi:<https://doi.org/10.22146/ajse.v3i2.17161>.
13. Бойко, А., Бесараб, О. та Пліс, В. (2022). ОСОБЛИВОСТІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОМНОГО ДВИГУНА З ВРАХУВАННЯМ ЙОГО НЕЛІНІЙНОСТЕЙ. *Одеський політехнічний університет. Праці*, 2(66), с. 32–43. doi:<https://doi.org/10.15276/opus.2.66.2022.04>.
14. Петров, Л. П., Ладензон, В. А., Подзолов, Р. Г. та Яковлев, А. В. (1997). *Моделювання асинхронних електроприводів з тиристорним керуванням*. Київ: Вища освіта, с.158.
15. Толочко, О. І. (2016). *Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник*. Київ: НТУУ «ХПІ», с.150.

16. Андрющенко, О.А., Бойко, А.О. та Бересан, О.О. (2013). *Математичне моделювання системи електроприводу ТПН–АД у пакеті Matlab Simulink*. [онлайн] Доступно за адресою: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/74/66/15st-11.pdf> [Доступ отримано 20 лютого 2026].
17. Бойко, А. О. (2024). Питання стійкості та спеціальні режими роботи асинхронного електроприводу з ТПН: монографія. *Dspace.opu.ua*, [online] pp.1–138. Доступно за адресою: <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/14593> [Доступ отримано 20 лютого 2026].

## References

1. Malyar, V.S., O. Ye. Hamola and Maday, V.S. (2020). MODELLING OF DYNAMIC MODES OF AN INDUCTION ELECTRIC DRIVE AT PERIODIC LOAD. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 0(3), pp.9–14. doi:<https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.3.02>.
2. Sivokobylenko, V. F. (2017). Mathematical modeling of an asynchronous electric drive with a deep-slot rotor at an asymmetric supply voltage [Matematychnе modelyuvannya asynkhronnoho elektropryvodu z hlybokopaznym rotorom pry nesymetrychniy napruzi zhyvlennya]. [online] Kharkov.ua. Available at: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/34038> [Accessed 20 Febr. 2026].
3. Fachini, F., Marcelo de Castro, Tetiana Bogodorova and Vanfretti, L. (2024). Modeling of Induction Motors and Variable Speed Drives for Multi-Domain System Simulations Using Modelica and the OpenIPSL Library. *Electronics*, 13(9), pp.1614–1614. doi:<https://doi.org/10.3390/electronics13091614>.
4. Klepykov, V. B. and Banev, Ye. F. (2010). Modeling of an energy-saving electric drive of the subway using the system of a thyristor voltage converter - an asynchronous motor with fuzzy regulation. [online] *18th Int. Scient.-Pract. Conf. "Information Technologies: Science, Engineering, Technology, Education, Health" (MicroCAD–2010)* [Modelyuvannya enerhozberihayuchoho elektropryvodu metropolitenu za systemoyu tyrstornyy peretvoryuvach napruhy – asynkhronnyy dvyhun z fazzi rehulyuvannyam. [online] *18-a Mizhnar. nauk.-prakt. konf. «Informatsiyi tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya» (MicroCAD–2010)*]. Kharkiv: NTU "KhPI", (2), p.164–164. Available at: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/23203> [Accessed 20 Febr. 2026].
5. Teriaiev, V.I. and Dovbyk, A.Yu. (2020). SPECIAL CONSIDERATIONS FOR THE MATHEMATICAL MODELING AND CONTROL OF THE MULTISECTIONAL ASYNCHROOUS MOTOR (Eng). Scientific Works of Vinnytsia National Technical University, (4). doi:<https://doi.org/10.31649/2307-5392-2020-4-25-31>.
6. Kypensky, A. V. and Korol, Ye. I. (2019). Modelling of processes in the AC-voltage three-phase thyristor converter with phase-step regulation of output power. *Bulletin of NTU 'Kharkiv Polytechnic Institute' Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion*, 0(20 (1345)), pp.84–91. doi:<https://doi.org/10.20998/2409-9295.2019.20.12>.
7. Jafar, A.S., Abdullah Salman, G. and Ismael, A. issa (2023). Dynamic Simulation of Three Phase Induction Machines Based on Reduced Order Model for Power Systems Analysis. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, pp.134–141. doi:<https://doi.org/10.24237/djes.2023.16212>.
8. Perdukova, D. and Fedor, P. (2014). A Model-Based Fuzzy Control of an Induction Motor. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 12(5). doi:<https://doi.org/10.15598/aeec.v12i5.1229>.
9. Konuhova, M. (2025). Induction Motor Dynamics Regimes: A Comprehensive Study of Mathematical Models and Validation. *Applied Sciences*, [online] 15(3), pp.1527–1527. doi:<https://doi.org/10.3390/app15031527>.
10. Marushchak, Ya. and Pavlish, V. (2021). Comparative analysis of systems thyristor voltage converter - induction motor with serial and parallel correction [Porivnyal'nyy analiz system tyrstornyy peretvoryuvach napruhy - asynkhronnyy dvyhun z poslidovnym ta paralel'nym koryhuvannyam]. *Journal of electrical power and electromechanical systems [Zhurnal elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy]*, pp.62–73. doi:<https://doi.org/10.23939/sepes2021.01.061>.
11. Lobov, V.I. and Lobova, K.V. (2017). THE THYRISTOR CONVERTER INFLUENCE ON THE PULSATIONS OF THE ELECTROMAGNETIC TORQUE OF THE INDUCTION MOTOR AT PARAMETRICAL CONTROL. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 0(4), pp.34–41. doi:<https://doi.org/10.20998/2074-272x.2017.4.06>.
12. Harumwidiah, A. and Kurniawan, A. (2016). MODELING AND ANALYSIS OF AC-AC SOFT STARTER FOR INDUCTION MOTOR BASED ON THYRISTOR AND IGBT. *ASEAN Journal of Systems Engineering*, 3(2), p.60. doi:<https://doi.org/10.22146/ajse.v3i2.17161>.

13. Boiko, A., Besarab, O. and Plis, V. (2022). PECULIARITIES OF MATHEMATICAL MODELING OF AN INDUCTION MOTOR TAKING INTO ACCOUNT ITS NONLINEARITIES. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet Pratsi*, 2(66), pp.32–43. doi:<https://doi.org/10.15276/opu.2.66.2022.04>.
14. Petrov, L.P., Ladenzon, V.A., Podzolov, R.G. and Yakovlev, A.V. (1997). *Modeling of asynchronous electric drives with thyristor control [Modelyuvannya asynkhronnykh elektropryvodiv z tyristo-rnym keruvannyam]*. Kyiv: Higher Education [Vyshcha Osvita], p.158.
15. Tolochko, O. I. (2016). *Modeling of electromechanical systems. Mathematical modeling of asynchronous electric drive systems: a textbook [Modelyuvannya elektromekhanichnykh system. Matematychnye modelyuvannya system asynkhronnoho elektropryvodu: navchal'nyy posibnyk]*. Kyiv: NTUU "KPI", p.150.
16. Andryushchenko, O. A., Boyko, A. O. and Beresan, O. O. (2013). *Mathematical modeling of the TPN-AD electric drive system in the Matlab Simulink package [Matematychnye modelyuvannya systemy elektropryvodu TPN-AD u paketi Matlab Simulink]*. [online] Available at: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/74/66/15st-11.pdf> [Accessed 20 Febr. 2026].
17. Boyko, A. O. (2024). Stability issues and special operating modes of an asynchronous electric drive with TPN: monograph [Pytannya stiykosti ta spetsial'ni rezhymy roboty asynkhronnoho elektropryvodu z TPN: monohrafiya]. *Dspace.opu.ua*, [online] pp.1–138. Available at: <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/14593> [Accessed 20 Febr. 2026]

Отримано (Received) 15.10.2025

Отримано після доопрацювання (Received after revision) 13.02.2026

Прийнято (Accepted) 20.02.2026

Опубліковано (Published) 31.05.2026

## Simplified Modeling of a Thyristor Asynchronous Electric Drive

**А. О. Бойко**<sup>1</sup>, *Doctor of Technical Science, Professor*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0048-9259>; e-mail: [a.o.boyko@op.edu.ua](mailto:a.o.boyko@op.edu.ua)

Scopus Author ID: 57202752287

**В. П. Пліс**<sup>1</sup>, *доктор філософії*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0675-4407>; e-mail: [plis.v.p@op.edu.ua](mailto:plis.v.p@op.edu.ua)

**П. В. Брем**<sup>1</sup>, *аспірант*

ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-6275-8036>; e-mail: [6255523@as.op.edu.ua](mailto:6255523@as.op.edu.ua)

**С. О. Соколов**<sup>1</sup>, *аспірант*

ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-2444-912X>; e-mail: [yevgen.sokolov84@gmail.com](mailto:yevgen.sokolov84@gmail.com)

**Д. В. Токарчук**<sup>1</sup>, *аспірант*

ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-4257-6364>; e-mail: [6194806@as.op.edu.ua](mailto:6194806@as.op.edu.ua)

<sup>1</sup> Національний університет «Одеська політехніка»

**Abstract.** *The paper develops a simplified model of an asynchronous electric drive with a thyristor voltage converter, focused on the balance between calculation accuracy and computational efficiency. The output voltage of the converter is represented by a set of harmonics supplied to the asynchronous motor, which eliminates the need for detailed modeling of the switching processes of each switch. This approach allows using both a full motor model and an approximate one, preserving the symmetry of the machine and the main characteristics of the studied modes. Special attention is paid to modeling the supply voltage source and developing methods for determining the stator current phase. Two approaches are considered: determining the equivalent phase by the active and reactive components of the equivalent resistance and calculating the instantaneous phase by the projections of phase currents and voltages. Structural diagrams of models for calculating static characteristics and dynamic modes, including starting, reversing, and changing the control angles of the switches, are presented. The proposed model allows you to study the dynamics of currents and torques during polyharmonic power supply, taking into account the influence of higher harmonics and phase shifts, and also integrates with automation systems. The results of the work demonstrate that simplified models of an asynchronous thyristor electric drive can be an effective tool for both analysis and synthesis of thyristor electromechanical systems.*

**Keywords:** *asynchronous electric drive, electromechanical system, thyristor converter, modeling, simplified model, critical energy infrastructure, external negative impacts, hierarchical modeling.*

*Article citation:* Boyko A. O., Plis V. P., Brem P. V., Sokolov E. O., Tokarchuk D. V. (2026). Simplified Modeling of a Thyristor Asynchronous Electric Drive. *Electrotechnic and Computer Systems*, 2026, 46(122), pp.15-26. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.46.122.2026.2>

Про авторів (About the authors)



**Бойко Андрій Олександрович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.  
E-mail: [a.o.boyko@op.edu.ua](mailto:a.o.boyko@op.edu.ua), тел. + 38 067 743 4744

**Andrii Boiko**, Doctor of Technical Science, Professor of the Department of the Power Supply and Energy Management, Odessa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: [a.o.boyko@op.edu.ua](mailto:a.o.boyko@op.edu.ua), ph. + 38 067 743 4744

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0048-9259>



**Пліс Валерій Павлович**, доктор філософії, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.  
E-mail: [plis.v.p@op.edu.ua](mailto:plis.v.p@op.edu.ua), тел. + 38 066 207 6474

**Valeriy Plis**, PhD, Associate Professor of the Department of the Power Supply and Energy Management, Odessa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: [plis.v.p@op.edu.ua](mailto:plis.v.p@op.edu.ua), ph. + 38 066 207 6474

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0675-4407>



**Брем Павло Володимирович**, аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.  
E-mail: [6255523@as.op.edu.ua](mailto:6255523@as.op.edu.ua), тел. + 38 093 707 0781

**Pavlo Brem**, Postgraduate of the Department of Power Supply and Energy Management, Odessa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: [6194806@as.op.edu.ua](mailto:6194806@as.op.edu.ua), ph. +38 095 009 9364

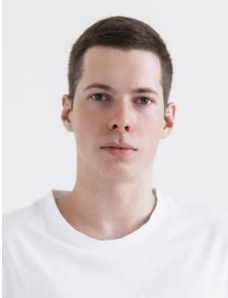
**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-6275-8036>



**Соколов Євген Олександрович**, аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.  
E-mail: [yevgen.sokolov84@gmail.com](mailto:yevgen.sokolov84@gmail.com), тел. + 38 098 955 6041

**Evgen Sokolov**, Postgraduate of the Department of Power Supply and Energy Management, Odessa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: [yevgen.sokolov84@gmail.com](mailto:yevgen.sokolov84@gmail.com), ph. + 38 098 955 6041

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-2444-912X>



**Токарчук Данііл Володимирович**, аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.  
E-mail: [6194806@as.op.edu.ua](mailto:6194806@as.op.edu.ua), тел. +38 095 009 9364

**Danil Tokarchuk**, Postgraduate of the Department of Power Supply and Energy Management, Odessa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: [6194806@as.op.edu.ua](mailto:6194806@as.op.edu.ua), ph. +38 095 009 9364

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-4257-6364>