

УДК 621.313.3

## ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕННЯ КОВЗАННЯ ПРИ МІНІМІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

ШИЛКОВА Л.В.

PhD, доцент, доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації Донбаської державної машинобудівної академії, Краматорськ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0009-3502>, e-mail: [larisa.shylkova@gmail.com](mailto:larisa.shylkova@gmail.com);

МИХАЙЛИЧЕНКО О.С.

аспірант кафедри електричних машин Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0660-0441>, e-mail: [Oleksii.Mykhailychenko@ieec.khpi.edu.ua](mailto:Oleksii.Mykhailychenko@ieec.khpi.edu.ua);

**Мета роботи.** Метою роботи є проведення теоретичних досліджень та розробка методики визначення оптимального значення робочого ковзання при мінімізації електричних втрат в умовах зміни навантаження на валу ротора асинхронного двигуна.

**Методи дослідження.** Для дослідження були застосовані основи теорії математичного моделювання узагальненої електричної машини змінного струму, класичні методи оптимізації, основи теорії автоматизованого керування, методи пошуку мінімізації втрат в асинхронному електроприводі, методи інтерполяції та апроксимації розрахункових даних.

**Отримані результати.** Розроблено методику визначення оптимального значення робочого ковзання при мінімізації електричних втрат в умовах зміни навантаження на валу ротора асинхронного двигуна в квазіусталеному режимі роботи. Отримано універсальну цільову функцію мінімізації електричних втрат в асинхронному двигуні залежно від частоти ковзання. У ході вирішення задачі оптимізації за допомогою класичних методів оптимізації від однієї змінної, отримано вираз оптимальної частоти ковзання, а також співвідношення між величинами струмів та параметрами фаз обмоток статора та ротора асинхронного двигуна, які одержані на основі загальноприйнятого математичного опису узагальненої електричної машини змінного струму для усталеного режиму його роботи. Доведено працездатність запропонованої методики на прикладі АД типу АИР225М2 потужністю 55кВт, для якого отримано залежність електричних втрат в квазіусталеному режимі роботи при статичному навантаженні  $M_c = 0,5M_n$ . Встановлено, що оптимальне значення ковзання АД буде дорівнювати  $s = 0,038$ .

**Наукова новизна.** Для асинхронних двигунів для різних значень потужності, отримано універсальну цільову функцію мінімізації електричних втрат в обмотках асинхронного двигуна залежно від частоти ковзання, яка дозволить визначити робочу характеристику, яка відображає залежність максимально допустимого ККД від значення моменту опору на валу асинхронних двигунів будь-якої потужності.

**Практична цінність.** Результати роботи можуть бути використані для систем асинхронного електроприводу з датчиками швидкості обертання ротора з метою автоматизованої саморегуляції швидкості обертання ротора асинхронного двигуна під оптимальне значення ковзання у всьому діапазоні зміни навантаження робочого механізму.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, електричні втрати, мінімізація, ковзання, усталений режим роботи, енергоефективність.

### I. ВСТУП

В умовах сучасного глобального енергоспоживання та посилення екологічних стандартів питання енергозбереження виходять на перший план у промисловій політиці провідних країн світу. Згідно з даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), на частку електроприводів припадає понад 40% загального світового споживання електроенергії, а в промисловому секторі цей показник сягає 70% [1]. Основу цього парку складають системи змінного струму з асинхронними двигунами (АД) із короткозамкненим

ротором. Завдяки своїй надійності, відносній дешевизні та простоті конструкції, вони знаходять застосування у всіх сферах - від систем вентиляції до важкого машинобудування [2]. Однак, незважаючи на високу ефективність АД у номінальних режимах, їхня робота у складі регульованих електроприводів часто супроводжується значними втратами [2].

Незважаючи на високу ефективність сучасних АД класів IE3 та IE4, реальні показники енергоспоживання у системах електроприводу часто залишаються субоптимальними. Це пов'язано з тим, що значна частина обладнання експлуатується в режимах

©Шилкова Л.В., Михайличенко О.С., 2026

Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC-BY-SA 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2026-1-5>

змінного навантаження або за підвищеної встановленої потужності. Робота асинхронного двигуна при часткових навантаженнях (нижче 50-60% від номінальної) супроводжується різким зниженням ККД та коефіцієнта потужності  $\cos\phi$  [3].

Існуючі методи керування, такі як скалярне та класичне векторне, орієнтовані переважно на забезпечення динамічних характеристик та точності підтримки швидкості (ковзання) [4]. Однак у них завжди закладено алгоритми мінімізації втрат у часі. Працюючи зі змінним моментом навантаження традиційні стратегії підтримують магнітний потік на номінальному рівні, що веде до невиправдано високих втрат у сталі та зниження загальної ефективності електро-механічної системи при малих навантаженнях [5].

У зв'язку з цим є необхідність пошуку балансу між динамічною точністю, а саме визначення оптимального значення робочого ковзання в умовах змінного навантаження та енергетичною ефективністю (мінімізації втрат в АД). Тому актуальним завданням є проведення теоретичного досліджень і розроблення методики визначення оптимальних значень робочого ковзання при мінімізації втрат в АД, що дозволить в системах електроприводу за допомогою датчиків швидкості обертання ротора виробляти саморегуляцію швидкості обертання ротора АД під оптимальне значення ковзання у всьому діапазоні зміни навантаження.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблема мінімізації сумарних втрат в електро-механічних перетворювачах змінного струму залишається однією з найбільш інтенсивно досліджуваних областей силової електроніки та автоматизованого керування. Останні дослідження авторів наукових праць фокусують увагу не тільки на вдосконаленні конструкції електричних двигунів для досягнення класу енергоефективності IE4 і IE5, але і на розробці інтелектуальних алгоритмів керування, здатних адаптуватися до умов експлуатації, що змінюються в режимі реального часу.

Аналіз існуючих публікацій дозволяє класифікувати підходи до енергозбереження на три основні групи.

До першої групи належать модельно-орієнтовані методи. Дослідження в роботах [6] та [7], спрямовані на уточнення математичних моделей асинхронного двигуна (АД) шляхом включення в них нелінійних залежностей втрат у сталі від частоти та насичення магнітопроводу. У разі запропонований алгоритм аналітично знаходить оптимальне значення потокозчеплення, і навіть оптимальне значення функції мінімізації втрат. Як зазначають автори, до гідності даного методу можна віднести високу швидкодію та відсутність коливань електромагнітного моменту, що є критичним для прецизійних систем. Недоліком такого методу є висока чутливість до точності ідентифі-

кації параметрів (особливо активних опорів статора і ротора АД), значення яких можуть змінюватися при нагріванні. Як зазначається в [8], помилка визначення параметрів на 20% може нівелювати весь ефект від оптимізації.

До другої групи належать пошукові методи. У роботах [8] та [9] запропоновано альтернативний підхід, який передбачає ітераційний пошук мінімуму вхідної потужності електроприводу змінного струму із застосуванням АД. У сучасних реалізаціях часто використовують алгоритми пошуку екстремуму. Перевагою даного методу є інваріантність до параметрів АД. Метод ефективно працює навіть за умов старіння ізоляції чи зміни умов охолодження. До недоліку можна віднести низьку збіжність та появу «гойкань» поблизу точки оптимуму. У роботі [8] запропоновано вирішення цієї проблеми через використання гібридних систем, де пошуковий алгоритм працює лише в режимах, що встановилися.

До третьої групи належать методи MPC (Model Predictive Control) та методи на основі використання штучного інтелекту. У публікації [10] авторами продемонстровано, що використання MPC дає змогу знизити сумарні втрати на 7–12% у перехідних режимах порівняно з класичним векторним управлінням ЕМС.

У роботах [11] та [12] авторами проведено аналіз сумарних втрат у системі частотного перетворювача – асинхронного двигуна, а також особливості впливу різних стратегій модуляції на додаткові втрати в сталі та електричні втрати. Автори відзначають, що перехід від стандартної синусоїдальної ШІМ (SPWM) до просторово-векторної модуляції (SVPWM) дозволяє не тільки збільшити коефіцієнт використання напруги ланки постійного струму, а й знизити коефіцієнт гармонік струму (THD), що безпосередньо корелює зі зменшенням високочастотних втрат у магнітопроводі АД. У публікації [11] запропоновано алгоритм адаптивної частоти комутації, який знижує динамічні втрати у ключах інвертора під час роботи на низьких швидкостях.

Сучасний тренд на спрощення апаратної частини ЕМС на базі АД веде до відмови від датчиків швидкості та положення ротора. Однак, як показано в [9], [12] відсутність точної інформації про швидкість може призводити до помилок у розрахунку ковзання і, як наслідок, до роботи поза зоною оптимального ККД. Для вирішення цієї проблеми у роботах [13] - [15] пропонуються системи спостереження над станом, які інтегрують алгоритми мінімізації втрат безпосередньо до структури оцінки магнітного потоку статора АД.

У [16] авторами запропоновано розширену модель втрат потужності в АД. Вона включає визначення електричних та магнітних втрат у статорі та роторі, а також дозволяє враховувати додаткові механічні втрати у динамічних режимах роботи. Така модель містить рівняння зі змінним до 8-го ступеня щодо

енергетично оптимального значення магнітного потоку ротора асинхронної машини. Авторами запропоновано методику за спрощеним способом визначення змінних, що входять до основного рівняння функції відгуку сумарних втрат в ЕМС. Як заявляють автори, даний спосіб призначений для практичного застосування в енергозберігаючих ЕМС. Однак даний аналітичний метод показує прийнятну точність результатів лише у певному діапазоні значень потокозчеплення ротора. В іншому випадку доводиться використовувати чисельні методи вирішення задачі мінімізації втрат.

Отже, розглянуті існуючі методи мінімізації втрат потужності неможливо визначити оптимальне значення ковзання у всьому діапазоні зміни навантаження на валу АД. Тому актуальним завданням є проведення теоретичного досліджень і розроблення методики визначення оптимальних значень робочого ковзання при мінімізації втрат в АД, що дозволить в системах електроприводу за допомогою датчиків швидкості обертання ротора виробляти саморегуляцію швидкості обертання ротора АД під оптимальне значення ковзання у всьому діапазоні зміни навантаження.

### III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є проведення теоретичних досліджень та розробка методики визначення оптимального значення робочого ковзання при мінімізації втрат потужності в умовах зміни навантаження на валу ротора асинхронного двигуна.

### IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для формулювання завдання оптимізації з метою мінімізації втрат потужності в умовах зміни навантаження на валу ротора, запишемо загальноприйнятну математичну модель АД із короткозамкненим ротором згідно зі схемою заміщення з припущенням про відсутність насичення магнітної системи АД. Система рівнянь балансу напруги в системі координат  $d-q$  для узагальненої електричної машини на основі АД з короткозамкненим ротором для квазістаціонарного режиму його роботи мають вигляд:

$$\begin{cases} u_{1d} = R_1 \cdot i_{1d} - \omega_1 \cdot (L_1 \cdot i_{1q} + M_m \cdot i_{2q}); \\ u_{1q} = R_1 \cdot i_{1q} + \omega_1 \cdot (L_1 \cdot i_{1d} + M_m \cdot i_{2d}); \\ 0 = R_2 \cdot i_{2d} - \omega_2 \cdot (L_2 \cdot i_{2q} + M_m \cdot i_{1q}); \\ 0 = R_2 \cdot i_{2q} + \omega_2 \cdot (L_2 \cdot i_{2d} + M_m \cdot i_{1d}); \end{cases} \quad (1)$$

де  $u_{1d}$ ,  $u_{1q}$  – напруга фаз обмотки статора АД;  $i_{1d}$ ,  $i_{1q}$ ,  $i_{2d}$ ,  $i_{2q}$  – відповідно струми фаз обмоток статора та струми фаз обмоток ротора АД;  $R_1$ ,  $R_2$  – відповідно активні опори обмоток статора та ротора АД;  $L_1$ ,  $L_2$  – відповідно індуктивності фаз обмоток статора та ротора АД;  $M_m$  – взаємна індуктивність між фазами

обмоток статора та ротора АД;  $\omega_1$  – частота обертання системи координат  $d-q$ .  $\omega_2$  – частота ковзання ( $\omega_2 = \omega_1 - \omega$ ),  $\omega$  – частота обертання ротора АД.

Електромагнітний момент визначається виразом:

$$M_{em} = p_1 \cdot M_m \cdot (i_{2d} \cdot i_{1q} - i_{1d} \cdot i_{2q}) \quad (2)$$

де  $p_1$  – кількість пар полюсів обмотки статора АД;

Припустимо, що напруги фаз обмотки статора не перевищують допустимих значень. Отже, систему рівнянь (1) узагальненої електричної машини на основі АД з короткозамкненим ротором для квазістаціонарного режиму при оптимізації можна не враховувати. Тоді система рівнянь (1) набуває вигляду:

$$\begin{cases} 0 = R_2 \cdot i_{2d} - \omega_2 \cdot (L_2 \cdot i_{2q} + M_m \cdot i_{1q}); \\ 0 = R_2 \cdot i_{2q} + \omega_2 \cdot (L_2 \cdot i_{2d} + M_m \cdot i_{1d}). \end{cases} \quad (3)$$

При цьому значення електромагнітного моменту, що визначається виразом (2), буде відповідати своєму оптимальному значенню:

$$M_{em}|^{opt} = p_1 \cdot M_m \cdot (i_{2d} \cdot i_{1q} - i_{1d} \cdot i_{2q}) \quad (4)$$

Така задача оптимізації буде вирішуватись при зафіксованих значеннях кутової швидкості обертання ротора  $\omega = \text{const}$ . У цьому випадку кутову швидкість системи координат  $d-q$ , можна визначити за наступним співвідношенням:

$$\omega_1 = \omega_2 + \omega \quad (5)$$

Таким чином можна записати умову оптимізації за мінімізацією втрат потужності АД, яка потребує попереднього визначення струмів обмотки статора та ротора в системі координат  $d-q$ , тобто  $i_{1d}$ ,  $i_{1q}$ ,  $i_{2d}$ ,  $i_{2q}$ . Отже функція критерію оптимізації буде мати наступний вигляд:

$$\min(\Delta P|_{\omega_2=\text{const}}) = R_1 \cdot (i_{1d}^2 + i_{1q}^2) + R_2 \cdot (i_{2d}^2 + i_{2q}^2) \quad (6)$$

Враховуючи критерій оптимізації за (6) можна сформулювати наступну задачу оптимізації при заданих значеннях  $\omega$  та  $M_{em}|^{opt}$  та відповідно до них попередньо відомих значеннях струмів  $i_{1d}$ ,  $i_{1q}$ ,  $i_{2d}$ ,  $i_{2q}$  статора та ротора АД, а також кутової частоти ковзання  $\omega_2$ . Така задача оптимізації буде мати вигляд відповідно системи рівнянь обмежувальних функцій:

$$\begin{cases} F_1 = \left\{ p_1 \cdot M_m \cdot (i_{1q} \cdot i_{2d} - i_{1d} \cdot i_{2q}) - M_{em} \right\}^{opt} \rightarrow 0; \\ F_2 = \left\{ R_1 \cdot i_{1q} + \omega_1 \cdot (L_1 \cdot i_{1d} + M_m \cdot i_{2d}) \right\} \rightarrow 0 \\ F_3 = \left\{ R_2 \cdot i_{2d} - \omega_2 \cdot (L_2 \cdot i_{2q} + M_m \cdot i_{1q}) \right\} \rightarrow 0 \\ F_4 = \left\{ \omega_1 - \omega - \omega_2 \right\} \rightarrow 0 \end{cases} \quad (7)$$

Від формулювання постановки задачі оптимізації за (7) можна перейти до рішення задачі оптимальної зміни кутової частоти ковзання  $\omega_2$ , яка може бути представлена функцією від кутової частоти обертання ротора АД  $\omega$  з врахуванням умови критерію мінімізації потужності електричних втрат (6) в обмотках статора та ротора при заданому значенні електромагнітного моменту  $M_{em}^{opt}$ . Для цього скористаємося визначеною системою рівнянь (3) та рівняннями (4) та (5).

В цьому випадку приймемо умову, що вектор струму статора буде мати напрям уздовж осі  $d$ , тобто:

$$\begin{cases} i_{1d} = I_{1m}; \\ i_{1q} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

де  $I_{1m}$  – амплітудне значення струму статора АД;

Відповідно до (8), рівняння (2) та систему рівнянь (3) можна представити наступним чином:

$$\begin{cases} 0 = R_2 \cdot i_{2d} - \omega_2 \cdot L_2 \cdot i_{2q}; \\ 0 = R_2 \cdot i_{2q} + \omega_2 \cdot (L_2 \cdot i_{2d} + M_m \cdot I_{1m}); \\ M_{em} = -p_1 \cdot M_m \cdot I_{1m} \cdot i_{2q} \end{cases} \quad (9)$$

З рівняння (9) можна визначити струми ротора АД, тобто  $i_{2d}$  та  $i_{2q}$ :

$$i_{2d} = -\frac{\omega_2^2 \cdot L_2 \cdot M_m}{R_2^2 + \omega_2^2 \cdot L_2^2} \cdot I_{1m}, \quad (10)$$

$$i_{2q} = -\frac{\omega_2 \cdot R_2 \cdot M_m}{R_2^2 + \omega_2^2 \cdot L_2^2} \cdot I_{1m}. \quad (11)$$

У такому випадку величина вектору струму ротора може бути визначена з наступного співвідношення:

$$I_{2m} = \sqrt{i_{2d}^2 + i_{2q}^2} = \frac{\omega_2 \cdot M_m}{\sqrt{R_2^2 + \omega_2^2 \cdot L_2^2}} \cdot I_{1m} \quad (12)$$

Електричні втрати в АД можна визначити за допомогою наступного співвідношення:

$$\begin{aligned} \Delta P &= R_1 \cdot (i_{1d}^2 + i_{1q}^2) + R_2 \cdot (i_{2d}^2 + i_{2q}^2) = \\ &= R_1 \cdot I_{1m}^2 + R_2 \cdot I_{2m}^2 \end{aligned} \quad (13)$$

Рівняння (13) з врахуванням (12) можна записати у наступному вигляді:

$$\Delta P = R_1 \cdot I_{1m}^2 + R_2 \cdot \frac{\omega_2^2 \cdot M_m^2}{R_2^2 + \omega_2^2 \cdot L_2^2} \cdot I_{1m}^2 \quad (14)$$

Електромагнітний момент для системи рівнянь (9) з врахуванням (10) та (11) можна визначити за допомогою наступного співвідношення:

$$M_{em} = \frac{p_1 \cdot M_m^2 \cdot I_{1m}^2 \cdot R_2 \cdot \omega_2}{R_2^2 + \omega_2^2 \cdot L_2^2} \quad (15)$$

З рівнянь (14) та (15) видно, що потужність втрат та електромагнітний момент залежать від кутової частоти ковзання  $\omega_2$ . Таким чином, можна представити питому потужність втрат в якості цільової функції, яка представляє собою критерій оптимальності:

$$\begin{aligned} \min \left( \frac{\Delta P}{M_{em}} \Big|_{\omega_2 = const} \right) &= \frac{R_1 \cdot R_2^2}{\omega_2} + \dots \\ \dots + \frac{R_1 \cdot \omega_2^2 \cdot L_2^2 + R_2 \cdot \omega_2^2 \cdot M_m^2}{\omega_2} \end{aligned} \quad (16)$$

Мінімізація цільової функції (16) буде виконуватись при умові, якщо похідна від цільової функції буде дорівнювати нулю, тобто:

$$\frac{d \left( \frac{\Delta P}{M_{em}} \Big|_{\omega_2 = const} \right)}{d\omega_2} = 0 \quad (17)$$

Таким чином можна отримати рівняння щодо визначення оптимального значення частоти ковзання:

$$\omega_2^{opt} = \sqrt{\frac{R_1 \cdot R_2^2}{R_1 \cdot L_2^2 + R_2 \cdot M_m^2}}. \quad (18)$$

Аналіз виразу (19) показує, що оптимальна частота ковзання не залежить від необхідного моменту на валу, а також від частоти обертання  $\omega$ , тобто буде мати постійне значення. У такому випадку струми  $i_{1d}$ ,  $i_{1q}$ ,  $i_{2d}$ ,  $i_{2q}$  статора та ротора АД теж будуть мати постійне значення. Крім того, відповідно до системи рівнянь (1) можуть бути визначені напруги фаз обмотки статора  $u_{1d}$  та  $u_{1q}$ .

При заданому значенні електромагнітного моменту  $M_{em}^{opt}$  відповідно до (16) можемо визначити величину модуля вектору струму:

$$I_{1m} = \sqrt{\frac{R_2^2 + (\omega_2^{opt})^2 \cdot L_2^2}{p_1 \cdot M_m^2 \cdot R_2 \cdot (\omega_2^{opt})^2}} \cdot M_{em}^{opt} \quad (19)$$

Використовуючи рівняння (18) та (12), можна отримати наступне співвідношення між модулем векторів струмів та опором фаз обмоток статора та ротора узагальненої електричної машини на основі АД:

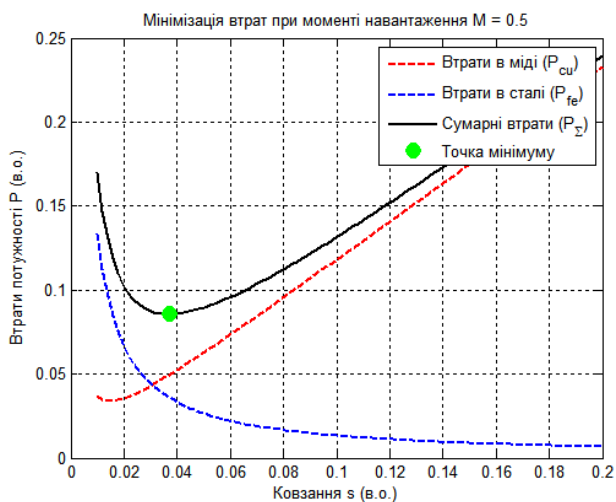
$$\frac{I_{1m}}{I_{2m}} = \sqrt{\frac{R_2}{R_1} + 2 \cdot \frac{L_2^2}{M_m^2}}. \quad (20)$$

Рівняння (20) містить співвідношення струмів обмоток статора і ротора узагальненої електричної машини. Окремо ці струми можна визначити з наступного співвідношення:

$$I_{1m} = \frac{2}{3} \sqrt{i_{1d}^2 + i_{1q}^2}, \quad (21)$$

$$I_{2m} = \frac{2}{3} \sqrt{i_{2d}^2 + i_{2q}^2}, \quad (22)$$

За наведеною методикою та за допомогою [13]-[16] у програмному середовищі MatLAB створено скрипт розрахунку задачі оптимізації втрат потужності для АД. На рис. 1 наведені результати розрахунку оптимального значення ковзання АД типу АИР225М2 потужністю 55 кВт при статичному навантаженні  $M = 0.5M_n$ .



**Рисунок 1.** Результати розрахунку оптимального значення ковзання АД типу АИР225М2 потужністю 55 кВт

Таким чином, для постановки та вирішення задачі оптимізації потужності електричних втрат АД залежно від частоти ковзання доцільно використовувати математичний опис узагальненої електричної машини в усталеному режимі його роботи. Критеріями оптимізації можуть бути потужність електричних втрат (або питома потужність електричних втрат) АД. У ході вирішення задачі оптимізації за допомогою класичних методів, отримано вираз оптимальної частоти ковзання, а також співвідношення між величинами струмів та параметрами фаз обмоток статора та

ротора АД, які одержані на основі загальноприйнятого математичного опису узагальненої електричної машини змінного струму для усталеного режиму його роботи.

**Конфлікт інтересів.** Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

## V. ВИСНОВКИ

За результатами теоретичних досліджень була розроблена методика визначення оптимального значення робочого ковзання при мінімізації втрат потужності в умовах зміни навантаження на валу ротора АД в квазіусталеному режимі роботи. Дана методика дозволяє визначити робочу характеристику, що відображає залежність максимально допустимого ККД від значення моменту опору асинхронних двигунів будь-якої потужності та конструктивного виконання.

Для асинхронних двигунів для різних значень потужності отримана універсальна цільова функція мінімізації потужності електричних втрат асинхронного двигуна залежно від частоти ковзання. Критеріями оптимізації можуть бути потужність електричних втрат (або питома потужність електричних втрат) в обмотках статора та ротора АД. У ході вирішення задачі оптимізації за допомогою класичних методів, отримано вираз оптимальної частоти ковзання, а також співвідношення між величинами струмів та параметрами фаз обмоток статора та ротора асинхронного двигуна, які одержані на основі загальноприйнятого математичного опису узагальненої електричної машини змінного струму для усталеного режиму його роботи.

На прикладі АД типу АИР225М2 потужністю 55 кВт отримано залежність потужності втрат в квазіусталеному режимі роботи при статичному навантаженні  $M = 0.5M_n$ . Визначено оптимальне значення ковзання АД, яке дорівнює  $s=0,038$ .

Отримані результати роботи можуть бути використані для систем асинхронного електроприводу з датчиками швидкості обертання ротора, з метою автоматизованої саморегуляції швидкості обертання ротора АД під оптимальне значення ковзання у всьому діапазоні зміни навантаження робочого механізму.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Pitis C. D. Power savings obtained from supply voltage variation on squirrel cage induction motors / C. D. Pitis, M. W. Zeller // 2008 IEEE Canada Electric Power Conference, Vancouver, BC, Canada, 2008, pp. 1-3, doi: 10.1109/EPC.2008.4763392 DOI:10.1109/EPC.2008.4763392.
- [2] Hanić Temelkovski Z. Investigation of Power Losses in Three-phase Induction Motor Taking into Consideration the Harmonics / Temelkovski, Z. Hanić and G. Rafajlovski // 2025 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), Dubrovnik, Croatia, 2025, pp. 1-5, doi:

- 10.1109/EDPE66853.2025.11224245
- [3] Inoue K. A design methodology of an optimal torque minimizing energy loss under torque limit for an induction motor / K. Inoue, M. Minamiyama and T. Kato // 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, CA, USA, 2009, pp. 163-167, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316081.
- [4] Sree P. B. Efficiency Improvement of Electrical Vehicles Using Novel Permanent Magnet Motors and Compared with BLDC Motors by Reducing Power Loss / P. B. Sree and N. P. G. Bhavani // 2023 6th International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), Gautam Buddha Nagar, India, 2023, pp. 2534-2538, doi: 10.1109/IC3I59117.2023.10397721.
- [5] Bazzi A. M. A survey of real-time power-loss minimizers for induction motors / A. M. Bazzi, P. T. Krein // 2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, Baltimore, MD, USA, 2009, pp. 98-106, doi: 10.1109/ESTS.2009.4906500.
- [6] Zhang, L. Computationally Efficient and Loss-Minimizing Model Predictive Control for Induction Motors in Electric Vehicle Applications / L. Zhang, Y. Wang, // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025 - Vol. 72, Issue 3, pp. 2440-2451. doi: <https://doi.org/10.3390/en18061444>
- [7] Petrov, I. Refined Research and Optimization of Energy Modes of a Frequency-Regulated Induction Motor with Variable Load / I. Petrov // Proceedings of the 2024 International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), 2024 -pp. 112-118.
- [8] Chen, X., & Gupta, S. A Hybrid Search Efficiency Optimization Strategy for Induction Motor Drives Based on Improved Fuzzy-Golden Section Algorithm / X. Chen, S. Gupta // IEEE Access, 2024 - Vol. 12, pp. 45890-45902.
- [9] Silva, J. M. Comparison between predictive and scalar control strategies for minimizing losses in induction motors under dynamic load conditions / J. M Silva // Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2025 - Vol. 36, No. 1, pp. 88-101. Doi:10.1080/21642583.2025.2481942
- [10] Kumar R. Sensitivity Analysis of Loss-Minimization Algorithms to Parameter Variations in High-Performance AC Drives / R. Kumar, B. Singh // IEEE Transactions on Industry Applications, 2013 - Vol. 59, Issue 4, pp. 4120-4130. doi:10.1109/IECON.2013.6699982.
- [11] Muller, H. Energy optimization of induction motor in transient state under field-oriented control: A non-intrusive approach / H. Muller // Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2024 - 16(2), 024501. doi:10.1109/ISPA59904.2024.10536747.
- [12] Liu, H., & Zhao, T. (2006). "Impact of Advanced PWM Strategies on Harmonic Iron Losses in High-Speed Induction Motor Drives / H. Liu, T. Zhao, // IEEE Transactions on Power Electronics, 2025 - Vol. 40, Issue 2, pp. 1540-1555. doi:10.1109/IAS.2006.256619.
- [13] Marek, J. Efficiency Optimization of VFD-Fed Induction Motors through Adaptive Switching Frequency Control / J. Marek, P. Novak // Energies, 2024 - 17(4), 932.
- [14] Abed, K., Intelligent fuzzy back-stepping observer design based induction motor robust nonlinear sensorless control / K. Abed, H. K. E. Zine, // Electrical Engineering & Electromechanics, - 2024, No.2, pp. 10-15. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.2.02>.
- [15] Wang, Q. Energy-Efficient Vector Control of Induction Motor Without Speed Sensor Based on Deep Reinforcement Learning / Q. Wang, X. Li // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, - 2025 - Vol. 13, Issue 1, pp. 210-222.
- [16] Sakthivel V. P. Using MPSO algorithm to optimize three-phase squirrel cage induction motor design / V. P. Sakthivel S. Subramanian // 2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology, Nagercoil, India, - 2011 -, pp. 261-267, doi: 10.1109/ICETECT.2011.5760126.

*Надійшла (Received) 12.01.2026;*

*Прийнята (Accepted) 16.02.2026;*

*Опублікована (Published) 30.03.2026;*

## DETERMINATION OF THE OPTIMAL SLIP VALUE FOR MINIMIZING ELECTRICAL LOSSES IN AN INDUCTION MOTOR

SHYMKOVA L.V.

Ph.D, Associate professor, Associate professor of the Department of Electromechanical Automation Systems of the Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0009-3502>, e-mail: [larisa.shylkova@gmail.com](mailto:larisa.shylkova@gmail.com);

MYKHAILYCHENKO O.S.

PhD student at the Department of Electrical Machines, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0660-0441>, e-mail: [Oleksii.Mykhailychenko@iecc.khpi.edu.ua](mailto:Oleksii.Mykhailychenko@iecc.khpi.edu.ua);

**Purpose.** The aim of the work is to conduct theoretical research and develop a methodology for determining the optimal operating slip value to minimize electrical losses under varying load conditions on the induction motor rotor shaft.

**Methodology.** The research was conducted using the fundamentals of mathematical modeling theory for a generalized AC electrical machine, classical optimization methods, the basics of automated control theory, loss minimization techniques in induction motor drives, and methods for the interpolation and approximation of calculated data.

**Findings.** A methodology has been developed for determining the optimal operating slip value to minimize electrical losses under varying rotor shaft load conditions in a quasi-steady-state mode of induction motor operation. A universal objective function for minimizing electrical losses in the induction motor as a function of slip frequency has been obtained. In the process of solving the optimization problem using classical single-variable optimization methods, an expression for the optimal slip frequency was derived, as well as the relationships between current magnitudes and the parameters of the induction motor stator and rotor winding phases. These were obtained based on the conventional mathematical description of a generalized AC electrical machine for its steady-state operation. The effectiveness of the proposed methodology has been proven using the example of an AIR225M2 induction motor with a power rating of 55 kW, for which the electrical loss dependence in a quasi-steady-state mode under a static load of  $M_c = 0.5M_{nom}$  was obtained. It was established that the optimal slip value for this induction motor is  $s = 0.038$ .

**Originality.** For induction motors of various power ratings, a universal objective function has been derived to minimize electrical losses as a function of slip frequency. This function enables the determination of a performance characteristic representing the dependence of the maximum attainable efficiency on the load torque on the shaft for induction motors of any power range.

**Practical value.** The research findings can be implemented in induction motor drive systems equipped with rotor speed sensors to enable automated self-regulation of the motor speed. This ensures the rotor operates at the optimal slip value across the entire load range of the driven mechanism.

**Keywords:** induction motor, electrical losses, minimization, slip, steady-state operation, energy efficiency.

## REFERENCES

- [1] Pitis C. D., Zeller M. W. (2008). Power savings obtained from supply voltage variation on squirrel cage induction motors. 2008 IEEE Canada Electric Power Conference, Vancouver, BC, Canada, 1-3, doi: 10.1109/EPC.2008.4763392.
- [2] Temelkovski, Z. Hanić and G. Rafajlovski. (2025). Investigation of Power Losses in Three-phase Induction Motor Taking into Consideration the Harmonics. 2025 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), Dubrovnik, Croatia, 1-5, doi: 10.1109/EDPE66853.2025.11224245
- [3] K. Inoue, M. Minamiyama and T. Kato (2009). A design methodology of an optimal torque minimizing energy loss under torque limit for an induction motor. 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, CA, USA, 163-167, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316081.
- [4] P. B. Sree and N. P. G. Bhavani (2023). Bhavani. Efficiency Improvement of Electrical Vehicles Using Novel Permanent Magnet Motors and Compared with BLDC Motors by Reducing Power Loss. 2023 6th International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), Gautam Buddha Nagar, India, 2534-2538, doi: 10.1109/IC3I59117.2023.10397721.
- [5] A. M. Bazzi, P. T. Krein (2009). A survey of real-time power-loss minimizers for induction motors. 2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, Baltimore, MD, USA, 2009, pp. 98-106, doi: 10.1109/ESTS.2009.4906500.
- [6] Zhang, L., & Wang, Y. (2025). Computationally Efficient and Loss-Minimizing Model Predictive Control for Induction Motors in Electric Vehicle Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 72, (3), 2440-2451. doi: https://doi.org/10.3390/en18061444
- [7] Petrov, I., et al. (2024). Refined Research and Optimization of Energy Modes of a Frequency-Regulated Induction Motor with Variable Load. Proceedings of the 2024 International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), 112-118.
- [8] Chen, X., & Gupta, S. (2024). A Hybrid Search Efficiency Optimization Strategy for Induction Motor Drives Based on Improved Fuzzy-Golden Section Algorithm. IEEE Access, 12, 45890-45902.
- [9] Silva, J. M., et al. (2025). Comparison between predictive and scalar control strategies for minimizing losses in induction motors under dynamic load conditions. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 36, (1), 88-101. doi:10.1080/21642583.2025.2481942.
- [10] Kumar, R., & Singh, B. (2013). Sensitivity Analysis of Loss-Minimization Algorithms to Parameter Variations in High-Performance AC Drives. IEEE Transactions on Industry Applications, 59, (4), 4120-4130. doi:10.1109/IECON.2013.6699982
- [11] Muller, H. (2024). Energy optimization of induction motor in transient state under field-oriented control: A non-intrusive approach. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 16(2), 024501. doi:10.1109/ISPA59904.2024.10536747
- [12] Liu, H., & Zhao, T. (2006). Impact of Advanced PWM Strategies on Harmonic Iron Losses in High-Speed Induction Motor Drives. IEEE Transactions on Power Electronics, 40, (2), 1540-1555.

doi:10.1109/IAS.2006.256619

- [13] Marek, J., & Novak, P. (2024). Efficiency Optimization of VFD-Fed Induction Motors through Adaptive Switching Frequency Control. *Energies*, 17(4), 932.
- [14] Abed, K., & Zine, H. K. E. (2024). Intelligent fuzzy back-stepping observer design based induction motor robust nonlinear sensorless control. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (2), 10–15. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.2.02>.
- [15] Wang, Q., & Li, X. (2025). Energy-Efficient Vector Control of Induction Motor Without Speed Sensor Based on Deep Reinforcement Learning. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 13(1), 210-222.
- [16] Sakhivel V. P. and Subramanian S. (2011). Using MPSO algorithm to optimize three-phase squirrel cage induction motor design, 2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology, Nagercoil, India, 261-267, doi: 10.1109/ICETECT.2011.5760126.