УДК 621.313.333
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).17

INFLUENCE OF SUPPLY VOLTAGE NONSINUSOIDALITY ON THERMAL LOSSES IN INDUCTION MOTORS

ВПЛИВ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ НА ТЕПЛОВІ ВТРАТИ В АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНАХ

Oksana R. Maksysko
Oksana.Maksisko@i.ua
ORCID: 0000-0002-8763-7826

О. Р. Максисько,
канд. техн. наук, доцент

Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies, Lviv
Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені Степана Гжицького, м. Львів

Abstract. The work investigates the influence of non-sinusoidal supply voltage on the magnitude and structure of thermal losses in induction motors. The relevance of the topic is determined by the spread of nonlinear loads and converter technology in local power supply networks of industrial and municipal facilities, where non-sinusoidal voltage causes current harmonics, additional heating of the windings, and accelerated aging of the insulation of induction motors. The *aim of the work* was to quantitatively assess the change in total thermal losses of an induction motor as a function of the voltage harmonic distortion level and to develop engineering-based guidelines for reducing the permissible load. *Research methodology*. The study used regulatory approaches to power quality assessment, data from peer-reviewed scientific publications, and a calculation model of a three-phase squirrel-cage motor with a rated power of 11 kW. The analysis employed harmonic representations of voltage and current, relations for determining copper, iron, mechanical and additional load losses, and an engineering assessment of temperature rise based on the relative change in total losses. *Results*. It was established that in the studied induction motor, as the voltage total harmonic distortion in the supply network increases to 5 %, 8 %, 12 % and 15 %, the total thermal losses increase by 79.6 W, 127.6 W, 191.6 W and 239.9 W, respectively, compared with sinusoidal supply. The additional load losses and iron losses were shown to increase most intensively. The stator and rotor copper losses also increase due to the higher RMS current and the appearance of negative-sequence components. At voltage total harmonic distortion above 8 % without adjustment of the operating mode, a noticeable decrease in efficiency is observed, which creates a practical need for motor derating. The *scientific novelty of the study* lies in proposing a simplified engineering model that links levels of harmonic voltage distortion to the redistribution of components of induction motor losses and to the threshold for reducing the permissible load. The *practical value of the work* lies in developing a thermal risk assessment scheme and selecting harmonic compensation measures suitable for operational practice.
Key words: voltage nonsinusoidality; harmonics; induction motor; thermal losses; power quality; derating.

Анотація. У роботі досліджено вплив несинусоїдальності напруги живлення на величину та структуру теплових втрат в асинхронних електродвигунах. Актуальність теми зумовлена поширенням нелінійних навантажень і перетворювальної техніки в локальних мережах електропостачання промислових і комунальних об'єктів, де несинусоїдальність напруги спричиняє появу гармонік струму, додаткове нагрівання обмоток і прискорене старіння ізоляції асинхронних електродвигунів. *Метою роботи* було кількісне оцінювання зміни сумарних теплових втрат асинхронного двигуна залежно від рівня гармонічного спотворення напруги та визначення інженерно обґрунтованих орієнтирів для зниження допустимого навантаження. *Методика дослідження*. Як матеріали дослідження використано нормативні підходи до оцінювання якості електроенергії, дані фахових наукових публікацій, а також розрахункову модель трифазного короткозамкненого двигуна потужністю 11 кВт. Під час аналізу застосовано гармонічне подання напруги та струму, співвідношення для визначення електричних, магнітних, механічних і додаткових навантажувальних втрат, а також інженерне оцінювання теплового перевищення на основі відносної зміни сумарних втрат. *Результати*. Установлено, що в досліджуваному асинхронному електродвигуні за зростання коефіцієнта повного гармонічного спотворення напруги в мережі живлення до 5 %, 8 %, 12 % і 15 % сумарні теплові втрати збільшуються відповідно на 79,6 Вт, 127,6 Вт, 191,6 Вт і 239,9 Вт порівняно із синусоїдальним режимом живлення. Показано, що найінтенсивніше зростають додаткові навантажувальні та магнітні втрати. Збільшуються також електричні втрати статора і ротора внаслідок підвищення діючого значення струму та появи складових зворотної послідовності. Установлено, що за значень коефіцієнта

повного гармонічного спотворення напруги понад 8 % без коригування режиму роботи спостерігається помітне зниження коефіцієнта корисної дії, що зумовлює практичну потребу в дерейтингу двигуна. *Наукова новизна* дослідження полягає в розробленні спрощеної інженерної моделі, яка пов'язує рівні гармонічного спотворення напруги з перерозподілом складових втрат асинхронного двигуна та порогом зниження допустимого навантаження. *Практична значущість* роботи полягає у формуванні схеми оцінювання теплового ризику та вибору заходів компенсації гармонік, придатної для експлуатаційної практики.

Ключові слова: несинусоїдальність напруги; гармоніки; асинхронний електродвигун; теплові втрати; якість електроенергії; дерейтинг.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Асинхронні електродвигуни залишаються базовими елементами промислових електроприводів, вентиляційних систем, насосних агрегатів, компресорних установок, транспортних механізмів і допоміжного обладнання. Нині значна частина таких двигунів працює в мережах, де форма напруги вже не є близькою до ідеальної синусоїди. Це зумовлено широким використанням силових перетворювачів, частотно-керованих приводів, імпульсних джерел живлення, дугових установок, зварювального обладнання, а також підключенням нелінійних споживачів у локальних електротехнічних системах.

Гармонічні складові напруги формують у повітряному проміжку асинхронної машини додаткові магнітні поля, які можуть обертатися як у напрямку основного поля, так і в протилежному. Гармоніки прямої послідовності збільшують електромагнітне навантаження та посилюють магнітні втрати. Гармоніки зворотної послідовності, навпаки, створюють зустрічний обертовий потік, підвищують втрати в роторі, погіршують умови формування електромагнітного моменту, спричиняють пульсації потужності та додаткове теплове навантаження. У науково-технічній літературі найнебезпечнішими для короткозамкнених двигунів вважають низькі непарні гармоніки, насамперед 5-ту і 7-му, оскільки вони поєднують значну амплітуду з істотним впливом на тепловий стан машини [1, с. 866; 2, с. 9536].

Нормативні документи NEMA та IEC встановлюють, що наявність гармонік у напрузі живлення призводить до зростання електричних втрат, зниження коефіцієнта корисної дії (ККД), підвищення температури двигуна та необхідності обмеження навантаження [3, с. 4; 4, с. 7; 5, с. 3]. Ці положення підтверджують експериментальні та аналітичні дослідження, у яких зафіксовано погіршення енергетичних показників асинхронних двигунів, зростання коливань електромагнітного моменту, підвищення вібрацій і прискорене старіння ізоляції [1, с. 866; 6; 7, с. 381].

Водночас у практичній експлуатації актуальним є не стільки детальне польове моделювання, скільки розроблення інженерно придатної методики швидкого оцінювання впливу гармонічних спотворень. Зокрема, важливими є визначення приросту теплових втрат за заданого рівня коефіцієнта повного гармонічного спотворення напруги THDU, ідентифікація найчутливіших складових втрат і встановлення граничних значень спотворення, за яких доцільним є введення дерейтингу двигуна.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблему впливу несинусоїдальної та несиметричної напруги на асинхронні двигуни останніми роками розглядають переважно в контексті якості електроенергії, енергоефективності, теплового навантаження та допустимого зниження навантаження. Економічну доцільність застосування фільтрокомпенсувальних пристроїв на шинах трансформаторних підстанцій обґрунтували В. Ю. Ноженко, О. В. Бялобржеський та А. І. Гладир [8, с. 103]. Це підтверджує прикладну значущість зниження гармонічного навантаження для забезпечення ефективних режимів роботи асинхронних двигунів. Зміну потужності, електромагнітного моменту і вібраційних характеристик двигуна за поєднання гармонічного спотворення і несиметрії напруги показали П. Доноло та співавтори (P. Donolo et al.) [1, с. 866]. Наслідки гармонік для електроприводних систем з асинхронними двигунами деталізували Х. Г. Белею та співавтори (H. G. Beleiu et al.), пов'язавши погіршення якості напруги зі зростанням втрат і зниженням експлуатаційної надійності [6].

Окремий напрям сучасних досліджень стосується співвідношення між нормативними обмеженнями якості електроенергії та реальною тепловою стійкістю двигуна. На неповну відповідність стандартів якості електроенергії умовам енергоефективної роботи асинхронних двигунів указують П. Гнацінський (P. Gnaciński) і Т. Тарасюк (T. Tarasiuk) [9, с. 10]. Подальше дослідження цієї проблематики засвідчило, що коливання напруги та відхилення її параметрів можуть істотно впливати на струми, момент, вібрації та температурний режим машини [10, с. 1255].

У працях, присвячених гармонічним спотворенням саме в системах електропривода, акцент зміщується від загального показника THDU до спектрального складу напруги та чутливості окремих складових втрат. Дію гармонік на двигуни класів IE2, IE3 та IE4 порівняли Х. Муньос Табора та співавтори (J. Muñoz Tabora et al.), довівши, що однаковий рівень спотворення може по-різному впливати на ефективність і температуру машин різного класу [11]. Необхідність дерейтингу короткозамкнених двигунів за наявності

вищих гармонік у напрузі живлення обґрунтував Т. Драбек (T. Drabek), пов'язавши допустиме навантаження з додатковими втратами від обертових гармонік [12; 13].

Суміжні дослідження підтверджують, що інтергармоніки, несиметрія напруги, просторові гармоніки та їхнє поєднання здатні погіршувати тепловий і механічний стан асинхронного двигуна, однак такі роботи переважно зосереджені на окремих режимах або спеціалізованих типах спотворення [7, с. 381; 14; 15]. З огляду на це прикладне завдання швидкого розрахункового визначення зв'язку між інтегральним рівнем THDU, структурою теплових втрат і коефіцієнтом допустимого навантаження залишається актуальним.

Розрахункові та експериментальні підходи до визначення втрат також розвиваються в напрямі уточнення моделей. Вплив несиметрії і спотворення напруги на характеристики втрат трифазного короткозамкненого двигуна дослідили Д. Чжан (D. Zhang), Р. Ань (R. An) і Т. У (T. Wu) [16, с. 264]. Алгоритм оцінювання ефективності двигуна безпосередньо в умовах спотвореної та несиметричної напруги запропонували М. Аль-Бадрі (M. Al-Badri), П. Піллай (P. Pillay) та П. Анже (P. Angers) [17, с. 5338]. Визначення гармонічних втрат в асинхронному двигуні, що живиться від інвертора, розглянув Б. А. Насір (B. A. Nasir), і цей підхід є важливим для інженерного оцінювання приводів з перетворювачами частоти [2, с. 9536].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на значну кількість праць щодо впливу гармонік, недостатньо розкритим залишається прикладний зв'язок між інтегральним рівнем THDU, зміною структури теплових втрат і допустимим зниженням навантаження конкретного асинхронного двигуна. У багатьох дослідженнях основну увагу приділено або електромагнітному моменту, або струмовим показникам, тоді як для експлуатаційної практики важливо мати швидкий інженерний інструмент для оцінювання теплового ризику без повного польового моделювання. Саме тому в цій роботі увагу зосереджено на розрахунковому порівнянні складових втрат для типового трифазного короткозамкненого двигуна потужністю 11 кВт і на визначенні порогових рівнів THDU, за яких номінальне навантаження доцільно обмежувати.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є кількісне оцінювання впливу несинусоїдальності напруги живлення на теплові втрати асинхронного електродвигуна та визначення порогових рівнів гармонічного спотворення, за яких експлуатація за номінального навантаження стає енергетично та теплово неефективною. Для досягнення мети дослідження поставлено такі завдання: сформувати розрахункову модель впливу гармонік на складові втрат; виконати аналіз сумарних теплових втрат за різних рівнів THDU; визначити зміну ККД, теплового перевищення та коефіцієнта допустимого навантаження; розробити практичні рекомендації щодо експлуатації та компенсації гармонік.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження проведено на основі розрахунково-аналітичного підходу. Об'єктом дослідження є теплові втрати трифазного асинхронного короткозамкненого електродвигуна за несинусоїдального живлення, а предметом – зміна структури цих втрат залежно від рівня повного гармонічного спотворення напруги THDU. Матеріалами дослідження слугували положення стандартів, що регламентують допустимі режими живлення електродвигунів [3–5], наукові праці щодо впливу гармонік на електромагнітні, енергетичні та теплові показники асинхронних машин, а також паспортні параметри типового трифазного короткозамкненого двигуна загальнопромислового виконання потужністю 11 кВт. Отримані результати мають розрахунковий, а не експериментальний характер, однак відображають закономірності зміни втрат і можуть бути використані як інженерний орієнтир для оцінювання теплового ризику.

Для забезпечення відтворюваності розрахунку було задано однакову базову потужність на валу, незмінну частоту мережі 50 Гц, номінальну напругу 400 В і фіксовану структуру базових втрат. Повторюваність аналізу забезпечено п'ятьма розрахунковими сценаріями: синусоїдальним режимом $THDU = 0$ % і чотирма режимами несинусоїдального живлення з $THDU = 5$ %, 8 %, 12 % і 15 %. Таке групування дало змогу порівняти помірний, підвищений і високий рівні гармонічного спотворення за однакової вихідної моделі двигуна.

Первинні дані опрацьовано балансовим методом: для кожного сценарію окремо визначено електричні втрати статора, електричні втрати ротора, втрати в сталі, механічні втрати та додаткові навантажувальні втрати, після чого обчислено сумарні втрати, відносний приріст втрат, розрахункове температурне перевищення, ККД і коефіцієнт допустимого навантаження. Механічні втрати в усіх сценаріях прийнято сталими, оскільки швидкісний режим двигуна в розрахунковій постановці не змінювався. Потенційні джерела похибки, пов'язані з невідомими параметрами конкретного двигуна, обмежено використанням єдиної структури втрат і порівнянням усіх сценаріїв з одним базовим режимом.

За базові параметри двигуна прийнято такі номінальні значення: потужність на валу $P_2 = 11$ кВт, лінійна напруга $U_n = 400$ В, частота $f_1 = 50$ Гц, коефіцієнт корисної дії $\eta_n = 0{,}89$, коефіцієнт потужності $\cos\varphi = 0{,}84$, чотириполюсне виконання та

короткозамкнений ротор. Основні вихідні параметри розрахункової моделі наведено в табл. 1. За цих умов вхідна активна потужність становила 12,36 кВт, а сумарні втрати – близько 1,36 кВт. Для подальшого аналізу сумарні втрати було розподілено на п'ять складових: електричні втрати статора, електричні втрати ротора, втрати в сталі, механічні втрати та додаткові навантажувальні втрати. Така структура є доцільною, оскільки дає змогу оцінити чутливість окремих фізичних механізмів втрат до дії гармонічних складових напруги.

Таблиця 1. Вихідні параметри розрахункової моделі асинхронного двигуна

Параметр	Значення
Номінальна потужність на валу, кВт	11
Номінальна напруга живлення, В	400
Частота мережі, Гц	50
Кількість полюсів	4
Номінальний ККД	0,89
Коефіцієнт потужності	0,84
Сумарні втрати в базовому режимі, Вт	1360
Базове перевищення температури, °С	80

Несинусоїдальність напруги живлення описано через розклад миттєвої напруги в гармонічний ряд, у якому діюче значення напруги розглядали як суму основної складової та вищих гармонік. Для інтегрального оцінювання використано показник повного гармонічного спотворення напруги THDU:

$$THDU = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \times 100\ \%, \qquad (1)$$

де $THDU$ – коефіцієнт повного гармонічного спотворення напруги, %;

U_h – діюче значення напруги гармоніки h-го порядку, В;

h – порядок гармоніки;

U_1 – діюче значення напруги основної гармоніки, В.

Теплові втрати в асинхронному двигуні за несинусоїдального живлення визначено як суму втрат у провідниках, магнітопроводі, механічних втрат і додаткових навантажувальних втрат:

$$P_\Sigma = P_{\mathrm{Cu},s} + P_{\mathrm{Cu},r} + P_{\mathrm{Fe}} + P_{mech} + P_{add}, \qquad (2)$$

де P_Σ – сумарні теплові втрати в асинхронному двигуні, Вт;

$P_{\mathrm{Cu},s}$ – електричні втрати в обмотці статора, Вт;

$P_{\mathrm{Cu},r}$ – електричні втрати в обмотці ротора, Вт;

P_{Fe} – втрати в сталі магнітопроводу, Вт;

P_{mech} – механічні втрати, Вт;

P_{add} – додаткові навантажувальні втрати, Вт.

Для електричних втрат статора і ротора за основу взято квадратичну залежність від діючого значення відповідних струмів, тобто зі збільшенням гармонічної складової струму зростання цих втрат набувало нелінійного характеру. У спрощеному інженерному вигляді прийнято:

$$P_{\mathrm{Cu},s} = 3I_{sh}^2 R_s; \quad P_{\mathrm{Cu},r} = 3I_{rh}^2 R_r, \qquad (3)$$

де $P_{\mathrm{Cu},s}$ – електричні втрати в обмотці статора, Вт;

$P_{\mathrm{Cu},r}$ – електричні втрати в обмотці ротора, Вт;

I_{sh} – діюче значення струму h-ї гармоніки статора, А;

I_{rh} – діюче значення струму h-ї гармоніки ротора, А;

R_s – активний опір фази обмотки статора, Ом;

R_r – приведений до сторони статора активний опір ротора, Ом;

h – порядок гармоніки.

Втрати в сталі оцінено з урахуванням того, що гармоніки напруги збільшують частоту перемагнічування окремих складових магнітного потоку, а отже, посилюють гістерезисні та вихрові втрати. У розрахунковому прикладі використано узагальнений коефіцієнт підсилення, який ураховує підвищену чутливість магнітних втрат до спотворення напруги:

$$P_{\mathrm{Fe},h} = P_{\mathrm{Fe},1} \cdot [1 + k_{\mathrm{Fe}} \cdot THDU], \qquad (4)$$

де $P_{\mathrm{Fe},h}$ – втрати в сталі за наявності гармонічного спотворення напруги, Вт;

$P_{\mathrm{Fe},1}$ – втрати в сталі за синусоїдального живлення, Вт;

k_{Fe} – узагальнений коефіцієнт чутливості магнітних втрат до гармонічного спотворення напруги;

$THDU$ – коефіцієнт повного гармонічного спотворення напруги, %.

Для порівняльних оцінювань прийнято $k_{\mathrm{Fe}} = 1{,}8$. Для додаткових навантажувальних втрат, що охоплюють поверхневі втрати, паразитні циркуляційні струми, неоднорідність розподілу струму в пазах і локальні ефекти в провідниках, використано ще вищий коефіцієнт чутливості до спотворення напруги, оскільки саме ця складова найшвидше реагує на зміну спектрального складу живлення.

Зміну теплового стану двигуна оцінено за відносним приростом сумарних втрат. Для інженерної інтерпретації використано залежність степеневого типу:

$$\Delta\Theta_H = \Delta\Theta_1 \cdot \frac{p_{\Sigma H}^m}{p_{\Sigma 1}}, \qquad (5)$$

де $\Delta\theta_H$ – розрахункове перевищення температури двигуна за несинусоїдального живлення, °С;

$\Delta\theta_1$ – перевищення температури за синусоїдального живлення, °С;

$P_{\Sigma H}$ – сумарні втрати двигуна за наявності гармонічного спотворення напруги, Вт;

$P_{\Sigma 1}$ – сумарні втрати двигуна за синусоїдального живлення, Вт;

m – показник степеневої залежності, що характеризує теплову інерційність двигуна.

Алгоритм розрахунку охоплював такі етапи: 1) визначення базового балансу втрат для номінального синусоїдального режиму; 2) задання рівня THDU та узагальненого спектрального складу з домінуванням 5-ї і 7-ї гармонік; 3) коригування струмових, магнітних і додаткових навантажувальних втрат відповідно до прийнятих коефіцієнтів чутливості; 4) підсумовування складових втрат; 5) розрахунок ККД, температурного перевищення і коефіцієнта допустимого навантаження; 6) порівняння отриманих значень із базовим режимом.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Розрахунковий спектр було зведено до чотирьох рівнів THDU: 5 %, 8 %, 12 % і 15 %. У межах моделі передбачено, що основний внесок у спотворення формують 5-та і 7-ма гармоніки, а гармоніки 11-го і 13-го порядків мають меншу, але враховану частку. Така постановка відповідає інженерному підходу до оцінювання дії гармонік на двигуни, коли поряд із повним гармонічним спотворенням беруть до уваги спектральний склад напруги [3, с. 4]. З підвищенням рівня THDU структура втрат змінюється нерівномірно, що пояснюється різним фізичним впливом окремих груп гармонік. Гармоніки зворотної послідовності, передусім 5-та і 11-та, створюють зустрічне обертове поле, яке індукує в роторі струми з підвищеною ефективною частотою, посилює нагрівання ротора, пульсації моменту та додаткові навантажувальні втрати. Натомість гармоніки прямої послідовності, зокрема 7-ма і 13-та, формують поле, що обертається в напрямку основного поля, тому вони переважно впливають на діюче значення струму статора, перерозподіл магнітного потоку та зростання втрат у сталі. Вищі непарні гармоніки, навіть за меншої амплітуди, посилюють локальні високочастотні ефекти, поверхневі та паразитні втрати. Узагальнену характеристику впливу основних груп гармонік на теплові втрати асинхронного двигуна наведено в табл. 2.

Наведена класифікація має принципове значення для інтерпретації результатів дослідження. Якщо аналіз обмежується лише інтегральним показником THDU без урахування порядку гармонік, вплив спотворення напруги на тепловий стан асинхронного двигуна може бути оцінено неповно. Однаковий рівень гармонічного спотворення, сформований різними спектральними поєднаннями, не обов'язково зумовлює однакові втрати. З огляду на це в практичному моніторингу доцільно враховувати не лише повне гармонічне спотворення, а й частку низьких гармонік зворотної послідовності. Основні результати розрахунків наведено в табл. 3, яка відображає зміну окремих складових втрат зі зростанням *THDU*.

За базового синусоїдального живлення найбільшою складовою втрат у вибраному асинхронному двигуні є електричні втрати статора. З підвищенням рівня THDU механічні втрати залишаються практично незмінними, тоді як складові, пов'язані зі струмовими та магнітними процесами, послідовно зростають. Електричні втрати статора збільшуються порівняно плавно внаслідок зростання діючого значення струму, а електричні втрати ротора додатково реагують на вплив гармонік зворотної послідовності. Найвищу чутливість демонструють втрати в сталі та додаткові навантажувальні втрати, оскільки вони безпосередньо пов'язані з високочастотними складовими магнітного поля, нерівномірністю розподілу струму та локальними поверхневими ефектами. Отже, приріст сумарних втрат формується не однією складовою, а сукупною дією кількох фізичних механізмів, серед яких найзначущими є магнітні та додаткові навантажувальні втрати.

За *THDU* = 5 % сумарні теплові втрати збільшуються на 79,6 Вт, що відповідає приросту 5,9 % порівняно з базовим синусоїдальним режимом. Такий приріст ще не є критичним, проте він уже означає постійне додаткове тепловиділення в машині, яке за тривалої роботи в умовах обмеженого охолодження

Таблиця 2. Характер впливу основних груп гармонік на теплові втрати асинхронного двигуна

Група гармонік	Фізичний механізм	Очікуваний тепловий ефект
5-та, 11-та (зворотна послідовність)	Зустрічне обертове поле	Зростання струмів ротора, пульсації моменту, інтенсивне нагрівання ротора
7-ма, 13-та (пряма послідовність)	Співнапрямлене обертове поле	Зростання діючого струму статора, посилення магнітних втрат, додаткові втрати в пазовій зоні
Вищі непарні гармоніки	Локальні високочастотні складові	Посилення поверхневих і паразитних втрат, локальний перегрів провідників та осердя

Таблиця 3. Розрахункова зміна складових втрат за різних рівнів спотворення напруги

THDU, %	$P_{Cu,s}$, Вт	$P_{Cu,r}$, Вт	P_{Fe}, Вт	P_{mech}, Вт	P_{add}, Вт	$P\Sigma$, Вт	ΔP, Вт
0	420,0	310,0	250,0	170,0	210,0	1360,0	0,0
5	434,8	320,8	272,5	170,0	241,5	1439,6	79,6
8	443,8	327,4	286,0	170,0	260,4	1487,6	127,6
12	456,0	336,0	304,0	170,0	285,6	1551,6	191,6
15	465,3	342,6	317,5	170,0	304,5	1599,9	239,9

може позначитися на ресурсі ізоляції. За *THDU* = 8 % приріст сумарних втрат досягає 127,6 Вт, або 9,4 %, що супроводжується переходом до режиму підвищеного теплового навантаження.

У режимах *THDU* = 12 % і *THDU* = 15 % сумарні втрати становлять відповідно 1551,6 Вт і 1599,9 Вт. Це означає, що за незмінної корисної потужності двигун додатково перетворює на тепло майже чверть кіловата. За тривалої роботи в такому режимі збільшується ймовірність перегріву обмоток, локального старіння ізоляції, зменшення допустимого часу безперервної роботи та прискореного зношування підшипникових вузлів через супровідні вібраційні явища.

На рис. 1 наведено залежність сумарних теплових втрат асинхронного двигуна від рівня THDU. У дослідженому діапазоні значень THDU сумарні втрати послідовно зростають зі збільшенням рівня спотворення напруги. Отримана залежність має характер, близький до лінійного, що свідчить про стале підвищення теплового навантаження на двигун у міру погіршення якості електроенергії. Відтак навіть помірне зростання THDU не є нейтральним

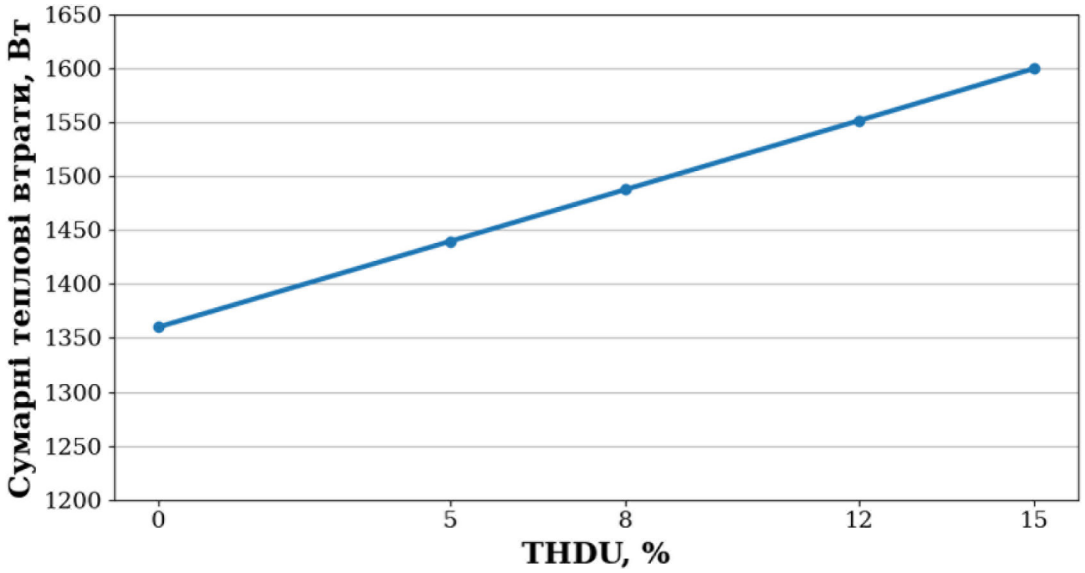


Рис. 1. Залежність сумарних теплових втрат асинхронного двигуна від рівня *THDU*

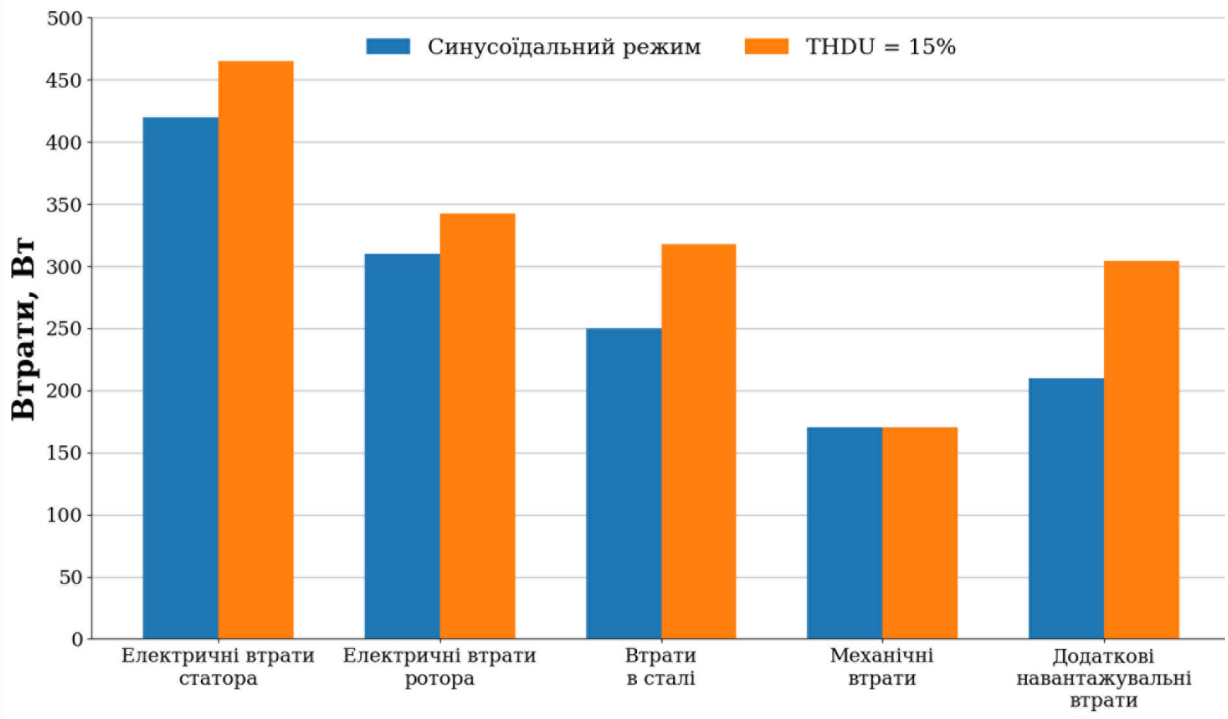


Рис. 2. Порівняння структури втрат у синусоїдальному режимі та за *THDU* = 15 %

для теплового стану асинхронного двигуна, і його необхідно враховувати під час оцінювання допустимих режимів роботи машини.

Додаткову аналітичну цінність має порівняння структури втрат у синусоїдальному режимі та за *THDU* = 15 %, наведене на рис. 2. За несинусоїдального живлення найвідчутніше зростають втрати в сталі та додаткові навантажувальні втрати, тоді як механічні втрати залишаються практично незмінними. Це свідчить, що погіршення теплового стану асинхронного двигуна визначається не лише збільшенням струмового навантаження, а й посиленням магнітних і поверхневих втрат, які неможливо повноцінно оцінити лише за діючим значенням струму. Такий розподіл складових втрат підтверджує, що за наявності гармонічного спотворення напруги контролю лише струму навантаження недостатньо для своєчасного виявлення теплового ризику.

Оскільки в експлуатаційній практиці важливим є не лише абсолютне значення втрат, а й їхній вплив на допустимі режими роботи двигуна, у табл. 4 подано зміну ККД, умовного теплового перевищення та коефіцієнта допустимого навантаження залежно від рівня THDU. Коефіцієнт допустимого навантаження визначено як відношення сумарних втрат у базовому режимі до сумарних втрат за наявності спотворення напруги. У такій інтерпретації цей показник може бути використаний як спрощений індикатор частки номінального навантаження, яку доцільно зберегти для запобігання перевищенню теплових втрат, властивих синусоїдальному режиму живлення.

Розрахунки енергетичних і теплових показників засвідчили, що зі зростанням THDU ККД асинхронного двигуна знижується, температурне перевищення збільшується, а коефіцієнт допустимого навантаження зменшується від 1,0 до 0,85. Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що в межах однієї інженерної процедури поєднано інтегральний показник THDU, зміну структури втрат і розрахунок допустимого навантаження, що дає змогу визначати пороговий діапазон дерейтингу без повного польового моделювання. Така побудова результатів відокремлює власний розрахунковий внесок дослідження від подальшого порівняння з науковою літературою, наведеного в розділі обговорення.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані дані загалом узгоджуються з висновками, до яких дійшли П. Доноло та співавтори (P. Donolo et al.), щодо погіршення моментних і вібраційних характеристик асинхронного двигуна за гармонічного спотворення і несиметрії напруги [1, с. 870–871], а також із результатами, у яких Х. Г. Белею та співавтори (H. G. Beleiu et al.) показали істотний вплив спотвореної та несиметричної напруги на електричні й механічні параметри електроприводної системи [7, с. 387–389]. Подібність полягає в тому, що в усіх цих роботах гармоніки розглянуто не як нейтральну особливість напруги, а як чинник додаткового теплового та електромеханічного навантаження.

Порівняння з дослідженнями, які провели Х. Муньос Табора та співавтори (J. Muñoz Tabora et al.), засвідчує, що реакція двигуна на гармоніки залежить не лише від інтегрального рівня THDU, а й від класу енергоефективності та структури втрат конкретної машини [11]. Інші результати цієї наукової групи також підтверджують, що високоефективні двигуни під час роботи за неідеальної якості живлення можуть по-різному реагувати на однакові порушення напруги [18, с. 121871]. У цьому дослідженні таку ідею реалізовано через поділ сумарних втрат на електричні, магнітні, механічні та додаткові навантажувальні складові, що дає змогу пояснити, чому за THDU = 15 % найпомітніше зростають саме втрати в сталі та додаткові навантажувальні втрати, тоді як механічна складова залишається сталою.

Правомірність вихідної гіпотези про те, що навіть помірна несинусоїдальність живлення переводить двигун у менш сприятливий тепловий режим, а подальше зростання THDU посилює ризик прискореного старіння ізоляції та скорочення допустимого ресурсу тривалої роботи, підтверджує розрахункове перевищення температури асинхронного двигуна, яке послідовно зростає зі збільшенням рівня THDU. Попри те, що абсолютні значення температурного перевищення залежать від конкретної системи вентиляції та умов монтажу, сама тенденція є однозначною: несинусоїдальність напруги не лише підвищує втрати, а й погіршує тепловий режим двигуна.

Отримані значення коефіцієнта допустимого навантаження узгоджуються з роботами, у яких

Таблиця 4. Енергетичні та теплові показники двигуна за різних рівнів THDU

***THDU*, %**	***P*Σ, Вт**	**ККД, %**	**Перевищення температури, °С**	**Коефіцієнт допустимого навантаження**
0	1360,0	89,00	80,0	1,000
5	1439,6	88,43	83,7	0,945
8	1487,6	88,09	86,0	0,914
12	1551,6	87,64	88,8	0,877
15	1599,9	87,30	91,1	0,850

Джерело: *складено автором на основі паспортних даних двигуна та сумарних втрат, наведених у табл. 3; ККД визначено як відношення корисної потужності на валу до суми корисної потужності та сумарних втрат.*

Т. Драбек (T. Drabek) пов'язує дерейтинг короткозамкнених двигунів із додатковими втратами від вищих гармонік у напрузі живлення [12; 13]. Сучасні підходи до оцінювання дерейтингу, зокрема ANFIS-моделювання, засвідчують, що гармонічні спотворення і температурний чинник необхідно розглядати разом під час визначення безпечного навантаження [19]. У цьому дослідженні практична межа формується на рівні *THDU* понад 8 %, коли доцільним стає посилений контроль температури корпусу й обмоток, а за *THDU* = 12–15 % – зниження навантаження до 0,88–0,85 від номінального або застосування засобів компенсації гармонік.

Вплив несинусоїдальності не обмежується лише додатковим нагріванням обмоток. Збільшення втрат у сталі та додаткових навантажувальних втрат змінює розподіл температури в різних частинах машини, зокрема в зубцевій зоні, лобових частинах обмоток і короткозамкнених елементах ротора. Це означає, що навіть якщо середня температура корпусу ще перебуває в межах норми, в окремих місцях двигуна вже можуть виникати локальні перегріви. З огляду на це інженерне оцінювання теплових втрат має бути першим етапом, після якого за потреби доцільно переходити до детальнішого термомоніторингу або польового моделювання.

Порівняно з роботами, у яких аналіз виконано за допомогою уточнених моделей втрат, алгоритмів оцінювання in situ або моделювання методом скінченних елементів (FEM) [16, с. 264; 17, с. 5338; 14], обмеженням цього дослідження є розрахунковий характер моделі та використання узагальнених коефіцієнтів чутливості. Водночас перевагою є простота застосування в експлуатаційній практиці: запропонований підхід дає змогу швидко оцінити, чи потребує двигун додаткового теплового контролю, дерейтингу або компенсації гармонік. Порівняння зі структурними оцінками втрат у сучасних асинхронних машинах [20, с. 1253] підтверджує доцільність поділу сумарних втрат на окремі фізичні складові.

ВИСНОВКИ

Установлено, що несинусоїдальність напруги живлення призводить до послідовного зростання теплових втрат в асинхронному електродвигуні. Найчутливішими до гармонічних спотворень є втрати в сталі та додаткові навантажувальні втрати. З огляду на це оцінювання впливу гармонік лише за діючим значенням струму не дає повної картини, оскільки значна частка додаткового нагрівання пов'язана з магнітними та паразитними високочастотними процесами. Узагальнення розрахункових даних засвідчило, що зростання THDU супроводжується системним погіршенням теплового та енергетичного стану двигуна. Практичне значення результатів полягає в тому, що за підвищеної несинусоїдальності напруги експлуатація асинхронного двигуна за номінального навантаження втрачає енергетичну доцільність і потребує додаткового контролю теплового режиму або коригування умов роботи. Найбільший негативний вплив на тепловий стан двигуна мають гармоніки 5-го та 7-го порядків, оскільки саме вони істотно посилюють роторні струми, пульсації електромагнітного моменту та магнітні втрати. Отже, практичний контроль якості електроенергії для асинхронних приводів має охоплювати не лише інтегральний показник THDU, а й спектральний аналіз напруги за окремими гармоніками.

Показано, що за *THDU* понад 8 % доцільно запроваджувати посилений контроль теплового стану двигуна. За *THDU* = 12–15 % технічно обґрунтованим є або зниження допустимого навантаження до 0,88–0,85 від номінального, або застосування фільтрокомпенсувальних заходів. Відтак дерейтинг асинхронного двигуна за умов підвищеної несинусоїдальності напруги доцільно розглядати як необхідний засіб збереження ресурсу електричної машини.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на поєднання розрахункових моделей втрат з експериментальним термомоніторингом і на врахування спільної дії гармонік, несиметрії напруги та частотно-керованого живлення.

REFERENCES

[1] Donolo, P., Bossio, G., De Angelo, C., García, G., & Donolo, M. (2016). Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations. *Electric Power Systems Research*, vol. 140, pp. 866–873. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.04.018

[2] Nasir, B. A. (2022). Determination of the harmonic losses in an induction motor fed by an inverter. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 12, no. 6, pp. 9536–9545. https://doi.org/10.48084/etasr.5012

[3] ANSI/NEMA MG 1-2016. (2018). *Motors and generators. National Electrical Manufacturers Association*. https://www.nema.org/docs/default-source/standards-document-library/ansi_nema-mg-1-2016-contents-and-foreword.pdf

[4] International Electrotechnical Commission. (2022). *IEC 60034-1:2022 Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*. https://webstore.iec.ch/en/publication/65446

[5] International Electrotechnical Commission. (2006). *IEC/TS 60034-17:2006 Rotating electrical machines – Part 17: Cage induction motors when fed from converters – Application guide*. https://webstore.iec.ch/en/publication/12309

[6] Beleiu, H. G., Maier, V., Pavel, S. G., Birou, I., Pică, C. S., & Dărab, P. C. (2020). Harmonics consequences on drive systems with induction motor. *Applied Sciences*, vol. 10, no. 4, art. 1528. https://doi.org/10.3390/app10041528

CC BY

[7] Beleiu, H. G., Pavel, S. G., Birou, I. M. T., Miron, A., Darab, P. C., & Sallah, M. (2022). Effects of voltage unbalance and harmonics on drive systems with induction motor. *Journal of Taibah University for Science*, vol. 16, no. 1, pp. 381–391. https://doi.org/10.1080/16583655.2022.2064670

[8] Nozhenko, V. Yu., Bialobrzheskyi, O. V., & Hladyr, A. I. (2021). Ekonomichna dotsilnist vstanovlennia filtrokompensuiuchykh prystroiv na shynakh transformatornykh pidstantsii [Economic feasibility of installing filter-compensating devices on the buses of transformer substations]. *Visnyk Kremenchutskoho Natsionalnoho Universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*, no. 5(130), pp. 103–108. https://doi.org/10.30929/1995-0519.2021.5.103-108 [in Ukrainian].

[9] Gnaciński, P., & Tarasiuk, T. (2016). Energy-efficient operation of induction motors and power quality standards. *Electric Power Systems Research*, vol. 135, pp. 10–17. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.03.022

[10] Gnaciński, P., Pepliński, M., Muc, A., Hallmann, D., & Klimczak, P. (2024). Induction motors under voltage fluctuations and power quality standards. IEEE *Transactions on Energy Conversion*, vol. 39, no. 2, pp. 1255–1264. https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3342932

[11] Muñoz Tabora, J., de Lima Tostes, M. E., Ortiz de Matos, E., Mota Soares, T., & Bezerra, U. H. (2020). Voltage harmonic impacts on electric motors: A comparison between IE2, IE3 and IE4 induction motor classes. *Energies*, vol. 13, no. 13, art. 3333. https://doi.org/10.3390/en13133333

[12] Drabek, T. (2023). Derating of squirrel-cage induction motors due to high harmonics in supply voltage. *Energies*, vol. 16, no. 18, art. 6604. https://doi.org/10.3390/en16186604

[13] Drabek, T. (2023). Derating of squirrel-cage induction motor due to rotating harmonics in power voltage supply. *Energies*, vol. 16, no. 2, art. 735. https://doi.org/10.3390/en16020735

[14] Garbiec, T., & Jagiela, M. (2021). Accounting for slot harmonics and nonsinusoidal unbalanced voltage supply in high-speed solid-rotor induction motor using complex multi-harmonic finite element analysis. *Energies*, vol. 14, no. 17, art. 5404. https://doi.org/10.3390/en14175404

[15] Brkovic, B., & Jecmenica, M. (2022). Calculation of rotor harmonic losses in multiphase induction machines. *Machines*, vol. 10, no. 5, art. 401. https://doi.org/10.3390/machines10050401

[16] Zhang, D., An, R., & Wu, T. (2018). Effect of voltage unbalance and distortion on the loss characteristics of three-phase cage induction motor. IET *Electric Power Applications*, vol. 12, no. 2, pp. 264–270. https://doi.org/10.1049/iet-epa.2017.0464

[17] Al-Badri, M., Pillay, P., & Angers, P. (2017). A novel in situ efficiency estimation algorithm for three-phase induction motors operating with distorted unbalanced voltages. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 6, pp. 5338–5347. https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2728786

[18] Muñoz Tabora, J. M., Tostes, M. E. de L., Bezerra, U. H., de Matos, E. O., Pereira Filho, C. L., Soares, T. M., & Rodrigues, C. E. M. (2021). Assessing energy efficiency and power quality impacts due to high-efficiency motors operating under nonideal energy supply. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 121871–121882. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3109622

[19] Shaier, A. A., Flah, A., Kraiem, H., Enany, M. A., & Elymany, M. M. (2025). Novel technique for precise derating torque of induction motors using ANFIS. *Scientific Reports*, vol. 15, art. 8550. https://doi.org/10.1038/s41598-025-92821-z

[20] Aarniovuori, L., Niemelä, M., Pyrhönen, J., Cao, W., & Agamloh, E. B. (2018). Loss components and performance of modern induction motors. *In 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (pp. 1253–1259). https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8507189

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Donolo, P., Bossio, G., De Angelo, C., García, G., & Donolo, M. (2016). Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations. *Electric Power Systems Research*, vol. 140, pp. 866–873. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.04.018

[2] Nasir, B. A. (2022). Determination of the harmonic losses in an induction motor fed by an inverter. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 12, no. 6, pp. 9536–9545. https://doi.org/10.48084/etasr.5012

[3] ANSI/NEMA MG 1-2016. (2018). *Motors and generators. National Electrical Manufacturers Association*. https://www.nema.org/docs/default-source/standards-document-library/ansi_nema-mg-1-2016-contents-and-foreword.pdf

[4] International Electrotechnical Commission. (2022). *IEC 60034-1:2022 Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*. https://webstore.iec.ch/en/publication/65446

[5] International Electrotechnical Commission. (2006). *IEC/TS 60034-17:2006 Rotating electrical machines – Part 17: Cage induction motors when fed from converters – Application guide*. https://webstore.iec.ch/en/publication/12309

[6] Beleiu, H. G., Maier, V., Pavel, S. G., Birou, I., Pică, C. S., & Dărab, P. C. (2020). Harmonics consequences on drive systems with induction motor. *Applied Sciences*, vol. 10, no. 4, art. 1528. https://doi.org/10.3390/app10041528

[7] Beleiu, H. G., Pavel, S. G., Birou, I. M. T., Miron, A., Darab, P. C., & Sallah, M. (2022). Effects of voltage unbalance and harmonics on drive systems with induction motor. *Journal of Taibah University for Science*, vol. 16, no. 1, pp. 381–391. https://doi.org/10.1080/16583655.2022.2064670

[8] Ноженко, В. Ю., Бялобржеський, О. В., Гладир, А. І. (2021). Економічна доцільність встановлення фільтрокомпенсуючих пристроїв на шинах трансформаторних підстанцій. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*, № 5(130), С. 103–108. https://doi.org/10.30929/1995-0519.2021.5.103-108

[9] Gnaciński, P., & Tarasiuk, T. (2016). Energy-efficient operation of induction motors and power quality standards. *Electric Power Systems Research*, vol. 135, pp. 10–17. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.03.022

[10] Gnaciński, P., Pepliński, M., Muc, A., Hallmann, D., & Klimczak, P. (2024). Induction motors under voltage fluctuations and power quality standards. IEEE *Transactions on Energy Conversion*, vol. 39, no. 2, pp. 1255–1264. https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3342932

[11] Muñoz Tabora, J., de Lima Tostes, M. E., Ortiz de Matos, E., Mota Soares, T., & Bezerra, U. H. (2020). Voltage harmonic impacts on electric motors: A comparison between IE2, IE3 and IE4 induction motor classes. *Energies*, vol. 13, no. 13, art. 3333. https://doi.org/10.3390/en13133333

[12] Drabek, T. (2023). Derating of squirrel-cage induction motors due to high harmonics in supply voltage. *Energies*, vol. 16, no. 18, art. 6604. https://doi.org/10.3390/en16186604

[13] Drabek, T. (2023). Derating of squirrel-cage induction motor due to rotating harmonics in power voltage supply. *Energies*, vol. 16, no. 2, art. 735. https://doi.org/10.3390/en16020735

[14] Garbiec, T., & Jagiela, M. (2021). Accounting for slot harmonics and nonsinusoidal unbalanced voltage supply in high-speed solid-rotor induction motor using complex multi-harmonic finite element analysis. *Energies*, vol. 14, no. 17, art. 5404. https://doi.org/10.3390/en14175404

[15] Brkovic, B., & Jecmenica, M. (2022). Calculation of rotor harmonic losses in multiphase induction machines. *Machines*, vol. 10, no. 5, art. 401. https://doi.org/10.3390/machines10050401

[16] Zhang, D., An, R., & Wu, T. (2018). Effect of voltage unbalance and distortion on the loss characteristics of three-phase cage induction motor. IET *Electric Power Applications*, vol. 12, no. 2, pp. 264–270. https://doi.org/10.1049/iet-epa.2017.0464

[17] Al-Badri, M., Pillay, P., & Angers, P. (2017). A novel in situ efficiency estimation algorithm for three-phase induction motors operating with distorted unbalanced voltages. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 6, pp. 5338–5347. https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2728786

[18] Muñoz Tabora, J. M., Tostes, M. E. de L., Bezerra, U. H., de Matos, E. O., Pereira Filho, C. L., Soares, T. M., & Rodrigues, C. E. M. (2021). Assessing energy efficiency and power quality impacts due to high-efficiency motors operating under nonideal energy supply. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 121871–121882. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3109622

[19] Shaier, A. A., Flah, A., Kraiem, H., Enany, M. A., & Elymany, M. M. (2025). Novel technique for precise derating torque of induction motors using ANFIS. *Scientific Reports*, vol. 15, art. 8550. https://doi.org/10.1038/s41598-025-92821-z

[20] Aarniovuori, L., Niemelä, M., Pyrhönen, J., Cao, W., & Agamloh, E. B. (2018). Loss components and performance of modern induction motors. *In 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (pp. 1253–1259). https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8507189

© Максисько О. Р.
Дата першого надходження статті до видання: 01.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)