

С. Є. ДЗЕНІС, В. П. ШАЙДА, О. Ю. ЮР'ЄВА

ШЛЯХИ ПОДОЛАННЯ БАР'ЄРУ ПРИ ПЕРЕХОДІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ДО КЛАСУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ IE5

Застосування енергоефективних електродвигунів у промисловості дозволяє більш раціонально використовувати енергетичні ресурси і скоротити викиди парникових газів. Зважаючи на те, що у промисловості переважно використовуються асинхронні двигуни із фіксованою частотою обертання, завдання підвищення їхньої енергоефективності є актуальним. Встановлено, що головним обмежувальним фактором підвищення енергоефективності асинхронних двигунів до рівня IE5, є його тепловий стан. Аналіз шляхів підвищення ефективності асинхронних двигунів вказує на необхідність їх комплексного застосування. Найбільш доцільним є проведення оптимізації та удосконалення елементів системи повітряного охолодження асинхронних двигунів. Для проведення дослідження потрібно комплексно застосовувати системи моделювання електромагнітного та температурного поля асинхронних двигунів. Враховуючи певні недоліки теплових моделей асинхронних двигунів необхідно поєднувати моделювання із експериментальними дослідженнями як за допомогою класичних датчиків температури, так і методу термографії.

Ключові слова: енергоефективний двигун, енергоефективність асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, тепловий стан, система повітряного охолодження, рекомендації.

S. E. DZENIS, V. P. SHAIDA, O. YU. YURIEVA

WAYS TO OVERCOME THE BARRIER DURING THE TRANSITION OF ASYNCHRONOUS MOTORS TO THE ENERGY EFFICIENCY CLASS IE5

Purpose. To provide a comprehensive analytical review on ways to increase the energy efficiency of induction motors and identify those suitable for transitioning fixed speed induction motors to IE5 level. **Methodology.** A thorough study of research and development in the field of increasing the energy efficiency of induction motors for various purposes was conducted. The experience of the development of traction induction motors of electric vehicles as dynamically developing is extrapolated. **Results.** It was established that the main limiting factor in increasing the energy efficiency of induction motors to the IE5 level is its thermal state. Analysis of ways to improve the efficiency of induction motors indicates the need for their complex application. It is most expedient to optimize and improve the elements of the air-cooling system of induction motors. To carry out the research, it is necessary to comprehensively apply electromagnetic and temperature field modeling systems of induction motors. Given certain shortcomings of thermal models of induction motors, it is necessary to combine modeling with experimental studies using both classical temperature sensors and the method of thermography. **Originality.** The combination of modern methods of modeling the thermal state of induction motors and experimental studies makes it possible to determine reserves for increasing the efficiency of existing motors. Using these results, it is possible to improve induction motors to the IE5 efficiency level. **Practical value.** Manufacturers and researchers see difficulties with the transition of induction motors of industrial purpose to the IE5 efficiency level, so they focused their attention on synchronous electric motors. The results of our research prove that, despite certain barriers, this transition can be made, albeit with certain difficulties.

Key words: energy-efficient motor, electric energy efficiency squirrel-cage induction motor, thermal state, air cooling, recommendations.

Вступ. Впровадження енергоефективних електродвигунів у різні сфери діяльності суспільства є загальноосвітовим трендом [1–5]. Застосування енергоефективних електродвигунів дозволяє більш раціонально використовувати енергетичні ресурси, тобто зменшити витрати електроенергії та її споживання, що є важливим через зростання вартості та доступності цих ресурсів. Іншою перевагою є скорочення викидів парникових газів, хоча це складно обчислити точно [2, 3].

Аналіз представлений у [1] показує, що найбільша частка електроенергії споживається у промисловості. Діаграму розподілу споживання електроенергії показано на рис. 1.

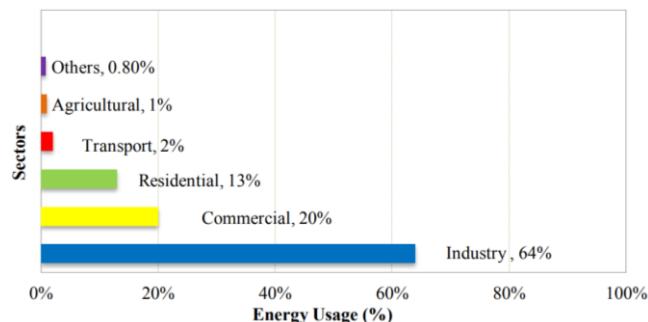


Рис. 1. Діаграма розподілу споживання електроенергії за секторами суспільної діяльності [1]

Якщо розглядати частку електроенергії, яку споживають електричні машини у виробництві, тобто у промисловому секторі, то вона становитиме 74 % [5], як це показано на рис. 2.

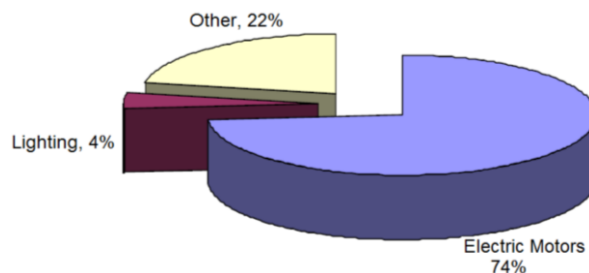


Рис. 2. Електроспоживання у промисловому секторі [5]

У [1] розглянуто вісім стратегій забезпечення енергоефективності, які охоплюють весь життєвий цикл електродвигуна. Аналізуються тренди енергозбереження минулого, сьогодення та майбутнього. І якщо тренди минулого спрямовані на впровадження спеціалізованих електроприводів, то загальним трендом для сьогодення та майбутнього автори роботи визначають напрямок проектування і застосування енергоефективних електродвигунів – двигунів, що мають більший ККД, ніж звичайні.

Найпоширенішими у різних сферах промисловості

та сільського господарства є асинхронні двигуни (АД) змінного струму з короткозамкненим ротором [3–7]. Тому навіть незначне підвищення ККД АД, додаючись в межах навіть однієї країни, дасть суттєвий економічний ефект. Основні переваги застосування енергоефективних АД наведено у роботах [3, 7–10].

Загалом, впровадження енергоефективних електродвигунів витратне для споживача, тому що треба замінити старий електродвигун (у більшості випадків ще діючий) новим, а його переваги дадуть зиск лише через декілька років використання. Тому уряди світових країн впроваджують відповідні стандарти та законодавчі правила, які примушують застосовувати енергоефективні електродвигуни.

Сучасні стандарти на енергоефективні електродвигуни поширюються на різні типи електродвигунів змінного струму. Хоча АД займають домінуюче положення серед електродвигунів змінного струму, в останні роки інші типи електродвигунів (синхронні з постійним магнітами, синхронно-реактивні та ін.) активно впроваджуються у різних сферах як промисловості, так і на транспорті.

Наразі існує низка європейських стандартів (подібні стандарти є і в інших країнах світу), які визначають енергоефективність (обов'язковий рівень ККД) електродвигунів змінного струму. Стандарт ІЕС 60034-30-1 [10] регламентує енергоефективність одношвидкісних електродвигунів змінного струму, що живляться від мережі. Із розгляду виключені двигуни для транспортних засобів і ті, що живляться від акумулятора. Також виключенням є електродвигуни, які інтегровані з приводним механізмом (насоси, вентилятори і компресори). Бо в цих випадках немає можливості визначити ККД окремих елементів електропривода.

Для електродвигунів зі змінною швидкістю, тобто регульованою частотою обертання, діє стандарт ІЕС 60034-30-2 [10]. Він має ті самі обмеження, що і перша частина стандарту. Україна як держава, що подала заявку на вступ до Європейського Союзу, провела роботу із гармонізації державних стандартів. Тому наразі діють вітчизняні стандарти ДСТУ EN 60034-30-1:2022 та ДСТУ CLC ІЕС/TS 60034-30-2:2022.

Подібний поділ стандарту пов'язаний із тим, що електродвигуни змінного струму з регульованою частотою обертання порівняно із одношвидкісними дозволяють досягнути більшого підвищення ККД привода в цілому і отримати значну економію ресурсів, що використовуються у виробничому процесі. Наприклад, якщо мова йдеться про насос системи водопостачання, то можна варіювати обсяг води залежно від необхідних потреб виробництва та часу доби. Тому вимоги до рівня ККД одношвидкісних АД, в яких немає можливості економити виробничі ресурси, більш жорсткі.

Наразі переважно використовуються саме одношвидкісні АД. В країнах-членах ЄС кількість нерегульованих електроприводів доки переважає регульовані, про що сказано у [11] і показано на рис. 3. В інших країнах регульованих приводів менше.

За існуючою системою класифікації електродвигунів змінного струму виділяють п'ять рівнів енергоефективності [10]:

- 1) ІЕ1 – стандартна ефективність;
- 2) ІЕ2 – висока ефективність;
- 3) ІЕ3 – преміальна ефективність;
- 4) ІЕ4 – супер преміальна ефективність;
- 5) ІЕ5 – ультра преміальна ефективність.

Але стандарти лише визначають рівень енергоефективності електродвигунів, а не забезпечують їхнього впровадження у виробництво.

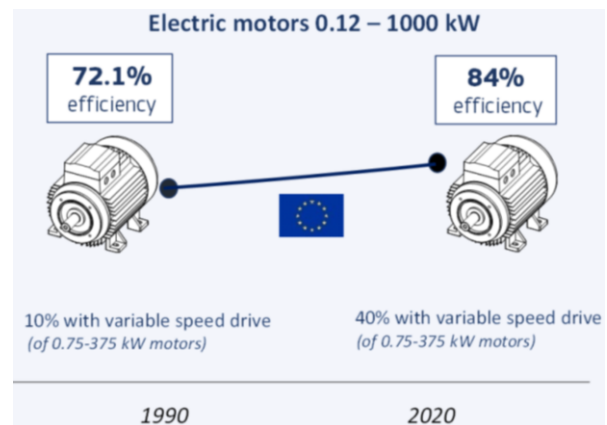


Рис. 3. Рівень використання електроприводів у ЄС зі змінною частотою обертання (регульовані привода) [11]

Відповідно до регламенту ЄС 640/2009 з 1 липня 2021 р. енергоефективність трифазних електродвигунів з номінальною потужністю від 0,75 кВт до 1000 кВт, за деякими виключеннями, має відповідати класу ефективності ІЕ3 або вище. А вже з 1 липня 2023 р. набув чинності третій етап європейських правил екодизайну для двигунів – (ЄС) 2019/1781 та (ЄС) 2021/341 – енергоефективність трифазних електродвигунів з номінальною вихідною потужністю від 75 кВт до 200 кВт повинна буде відповідати класу ІЕ4 або вище [10–12].

Виконуючи вимоги директив ЄС, провідні виробники електродвигунів змінного струму перейшли на виготовлення АД, що відповідають класу енергоефективності ІЕ4. Наприклад, корпорація «Siemens AG» (Німеччина) почала випуск цих електродвигунів ще у 2021 році [12]. Водночас досліджувалась можливість розробки електродвигунів змінного струму вищого класу енергоефективності ІЕ5, основним представником яких є асинхронний двигун. Тому дослідження існуючих бар'єрів на шляху переходу одношвидкісних АД на клас енергоефективності ІЕ5 і способів їх подолання є актуальним. Тема дослідження відповідає сучасним потребам розвитку суспільства.

Аналогічна робота виконувалася при переході АД до класу енергоефективності ІЕ4 [13], що є підтвердженням актуальності теми.

Зрозуміло, що перехід АД до наступного класу енергоефективності – це як підйом угору, здійснення кожного наступного кроку вимагає більш вагомих зусиль і потребує проведення суттєвих досліджень.

Аналіз попередніх досліджень. Розглянувши нау-

кові роботи щодо розробки та впровадження енергоефективних електродвигунів класу ефективності IE5 [1, 4–6, 14], ми встановили, що дослідники перенесли фокус уваги на синхронні електродвигуни. Перенесення уваги саме на цей тип електродвигунів пояснюється тим, що вони не мають обмотки на роторі, а отже і втрат. Це є однією з основних причин, яка забезпечує спрощення шляху підвищення рівня їх ККД [2, 6]. Синхронні двигуни також мають менший фізичний об'єм, ніж традиційні АД, більш надійні та простіші у виробництві. Саме з цих причин їх вважають майбутніми лідерами серед електродвигунів зі змінною швидкістю.

Фактично основні виробники вже виготовляють ці електродвигуни. Так у роботі [6] розглядаються синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM) і синхронні реактивні двигуни (SynRM). А у роботі [5] вентиляційно-індукторний двигун (switched reluctance machine SRM). І навіть більше, у своєму прес-релізі компанія «ABB» повідомила про початок виготовлення синхронних реактивних двигунів (SynRM) без магнітів, що мають рівень ефективності IE6 [15], опису цього рівня ефективності ще нема у стандартах.

На нашу думку, виробники намагаються оминати наявні труднощі з удосконалення АД, тому і звернули увагу на синхронні двигуни. Це дозволяє їм вже зараз виготовляти електродвигуни класу IE5 і економити. Підтвердження цьому висновку спостерігається у роботі [1]. На рис. 4 наведено діаграму руху з досягнення певного рівня енергоефективності електродвигунами. Вказано, що IE5 – це рівень золотого стандарту, якому поки відповідають синхронні двигуни з постійними магнітами і які є регульованими.

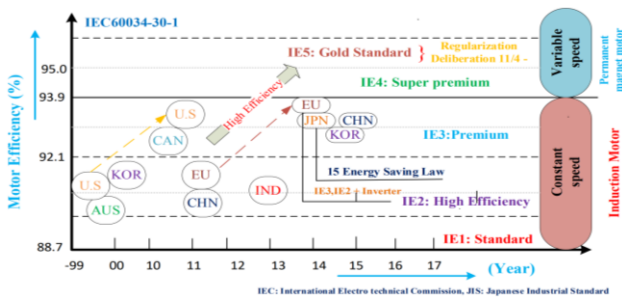
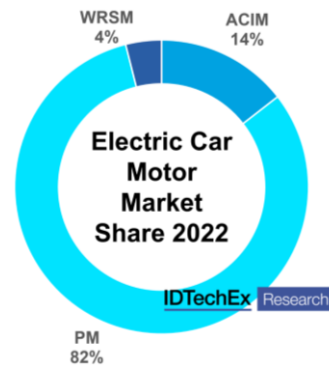


Рис. 4. Поступовий рух з досягнення різного рівня енергоефективності електродвигунами [1]

Ще одним фактом, що підтверджує наш висновок, є заміна асинхронного двигуна на синхронний як тягового електродвигуна електромобілів більшістю світових виробників. На рис. 5 показано процентне співвідношення різних типів тягових електродвигунів, що застосовуються виробниками електромобілів [16].



ACIM – alternating current induction motor; PM – permanent magnet; WRSM – wound rotor synchronous motor
Рис. 5. Співвідношення різних типів електродвигунів, що використовувалися у електромобілях у 2023 році [14]

Синхронні електродвигуни з постійними магнітами мають певні недоліки, це в першу чергу вартість і температурні обмеження постійних магнітів. Тому вчені не зупиняються і продовжують дослідження щодо підвищення крутного моменту та питомої потужності тягових АД для електромобілів [4]. З огляду на те, що головним для цих електродвигунів є компактність та ефективність, основну увагу приділено розробці та адаптації сучасних систем охолодження повітрям, водою, оливою та комбінаціями цих охолодних середовищ

Вказана тенденція відмови від АД на користь синхронних поки стосується лише електродвигунів зі змінною швидкістю. Про заміну одношвидкісних АД синхронними електродвигунами мова не йдеться. Тому що навіть заміна одношвидкісних АД аналогічними, але більш енергоефективними, пробуксовує через економічні проблеми, інерційність підприємств та їх небажанням обтяжувати номенклатуру наявних АД.

У промисловості досі кількісно переважають одношвидкісні АД (або із фіксованою частотою обертання), і синхронні електродвигуни поки їм не конкуренти [2]. Виробники та дослідники більшу увагу приділяють саме електродвигунам із змінною частотою обертання, тим паче ми спостерігаємо тенденцію поступового зростання їхньої частки у загальному обсязі. Хоча найбільший резерв економії енергоресурсів все ж таки за АД із фіксованою частотою обертання.

Констатуємо, що серед одношвидкісних електродвигунів превалюють саме АД, і наукові роботи з підвищення їх рівня ефективності мають значну глибину, фундаментальність і поширеність. Серед виконаних наукових досліджень треба відзначити роботу [3], у якій проаналізовано 151 наукову працю, основною метою яких було підвищення рівня енергоефективності електропривода з асинхронним двигуном. Розглянуті авторами дослідження роботи було класифіковано за напрямками, серед яких визначено п'ять груп:

- 1) безпосередньо самі асинхронні двигуни;
- 2) компоненти або елементи електропривода;
- 3) режими роботи електропривода;
- 4) забезпечення (підтримка) процесу роботи;
- 5) зміни у технології виробництва.

Розподіл розглянутих у [3] публікацій показує, що

найбільше робіт присвячено застосуванню енергозбережних режимів роботи (39 % від загальної кількості). Друге місце займає напрям вдосконалення компонентів електропривода (22 %). Третє місце – роботи в напрямку використання енергоефективних АД (18 %). Цікавою є група, що стосується забезпечення процесу роботи, значна частина робіт присвячена моніторингу та діагностиці роботи електропривода.

Ми зосередилися на першому напрямку – удосконаленню самого АД. Основним об'єктом дослідження нами обрано АД з фіксованою частотою обертання, які зазвичай не комплектуються системами керування, у кращому випадку мають пристрій плавного пуску, а у більшості випадків комплектуються лише пристроєм захисту. Другий напрямок не є предметом наших досліджень. Третій напрямок досліджень найосвітленіший. Четвертий напрямок, присвячений моніторингу та діагностиці роботи електропривода, наразі актуальний, але вірогідність присутності вказаних систем у електроприводі зростає із потужністю АД або ступеня важливості привода. П'ятий напрямок доволі специфічний, залежить від конкретного призначення АД, що обмежує його масштабування та поширення.

У статті ми не будемо розглядати вплив навантаження на ефективність АД через те, що це залежить від тих, хто експлуатує АД, і це питання вже детально досліджено.

Метою статті є інформаційно-аналітичний огляд існуючих способів підвищення енергоефективності АД і визначення тих, що можна застосувати для переходу асинхронних двигунів з фіксованою частотою обертання до класу IE5. Визначення факторів, що обмежують цей перехід, та добір інструментарію для подальших досліджень.

Огляд шляхів підвищення ефективності АД з короткозамкненим ротором. Складнощі задачі підвищення ефективності (ККД) АД з короткозамкненим ротором стають зрозумілими при аналізі вже виконаних досліджень. Вони чітко окреслюють існуючі шляхи, які здебільшого вже відомі і їх добре досліджено. У роботах [13] і [17] виділяють:

1. Використання міді для виготовлення короткозамкненої обмотки ротора. У [6] зазначено, що використання міді замість алюмінію для обмотки ротора дозволяє суттєво зменшити втрати у обмотці ротора. Для енергоефективних АД це рішення є обов'язковим.

2. Збільшення корпусу або габариту АД. Ця тенденція чітко прослідковується у провідних виробниках АД, коли вони для збільшення ККД електродвигуна переходять на наступну, більшу висоту осі обертання чи збільшують його довжину. Це збільшує кількість активних матеріалів, але зменшує втрати в АД. Характерною є робота вітчизняних вчених [7], які дослідили вплив збільшення довжини осердя статора на ККД асинхронного двигуна. Ними встановлено, що найбільші значення ККД досягаються при збільшенні осердя статора на 10 % – 25 %, а подальше збільшення призводить до погіршення ККД.

3. Заміна марки та товщини сталі осердя статора. Магнітні втрати в осерді магнітопроводу АД станов-

лять близько 20 % від загальної величини втрат [17]. Тому для їх зменшення обирають марки електротехнічної сталі з меншими питомими втратами і товщиною, меншою за 0,5 мм. У роботі [6] запропоновано використання аморфних матеріалів з високою магнітною проникністю для зменшення втрат в осерді статора. У роботі [14] представлено прототип електродвигуна з осердям із аморфного сплаву та аксіальним повітряним проміжком (нова конструкція). Низький рівень втрат навіть дозволив відмовитися від вентилятора зовнішнього обдування.

4. Оптимізація конструкції статора та ротора. Тут розуміється визначення оптимального співвідношення кількості пазів статора та ротора, їх розмірів разом з оптимізацією обмотки статора. Це дозволяє зменшити втрати, покращити пускові параметри та механічну характеристику АД. Наявність сучасних програмних комплексів моделювання електромагнітних полів зробило ці дослідження стандартним елементом проектування АД.

5. Удосконалення вентилятора охолодження та застосування кращих вальниць (підшипників). Це доволі дієвий напрям. Покращення ефективності зовнішнього вентилятора охолодження та зменшення втрат на тертя у вальницях може дати суттєвий приріст ефективності АД. Оптимізації конструкції вентилятора приділяють значну увагу. В роботі [18] виконано огляд нових тенденцій у розвитку систем охолодження електродвигунів. Вказано, що переважним методом охолодження для двигунів змінного струму є повітряне охолодження за допомогою зовнішніх ребер, каналів циркуляції повітря, повітряних зазорів і робочих коліс вентиляторів.

Якщо проаналізувати запропоновані шляхи підвищення ефективності АД, можна одразу виділити найперспективніший напрямок, який є комбінацією декількох шляхів – застосування нових матеріалів або матеріалів з покращеними характеристиками. І тут немає нічого дивного, бо найбільший стрибок у розвитку АД завжди відбувався при впровадженні нової системи ізоляції, що має більшу нагрівостійкість [6]. Але такий крок завжди призводив до зростання вартості електродвигуна, незалежно від його типу. Сюди також відноситься застосування електротехнічної сталі із покращеними характеристиками або аморфної сталі.

Зазначимо ті обмеження, що існують натеper. Насамперед це обмеження економічного характеру, які не дозволяють застосовувати систему ізоляції класу нагрівостійкості H у звичайних АД, наразі це лише клас F. Таким самим є застосування аморфної сталі та суттєве змінювання конструкції АД. Одношвидкісні АД – це електродвигуни закритого виконання з поверхневим зовнішнім обдуванням повітрям, про що чітко вказано у стандарті ІЕС 60034-30-1. Застосування для охолодження води або оливи не передбачено, хоча використання пасивних систем охолодження у АД є доволі цікавим і прогресивним.

Зразковою для нас є робота [19], де виконано тепловий аналіз п'яти АД різної потужності закритого виконання із вентилятором зовнішнього обдування.

Автори якої вказують, що для розробки більш ефективних електродвигунів необхідне точне прогнозування теплових характеристик двигуна на стадії проектування. Тому вони рекомендують при розробці нових АД спочатку виконати комплекс досліджень попередніх АД, яке складається з розрахункового моделювання та експериментального дослідження. Вони вказують, що існують фактори, які складно врахувати, наприклад, швидкість охолодного повітря між ребрами корпусу, які впливають на реальний тепловий стан АД [19]. Отримані розрахункові моделі автори уточнювали за результатами експериментального дослідження АД. Цей факт підтверджують у [20], вказуючи, що точна природа теплових процесів, що відбуваються при роботі електродвигуна часто невідома. Тому таким важливим є використання математичних моделей, що дозволяють визначити температуру вузлів АД.

Розрахунок теплового стану АД у [19] виконувався за допомогою програмного забезпечення «MotorCAD». Дослідники вказують, що навіть не зовсім точні теплові моделі АД можна використовувати при проектуванні нових електродвигунів, оцінюючи вплив різних змін у конструкції АД. Також вони дослідили, як змінюються теплові характеристики АД при переході з живлення від мережі на живлення від частотно-перетворювача.

У роботі [21] зазначено, що максимальне підвищення питомої потужності та обертового моменту є головною метою при проектуванні системи електропривода. Основним обмежувальним фактором є температурні межі компонентів привода. Не знаючи реального теплового стану, не можливо забезпечити його максимальне використання АД. Надмірне використання запасів по перегріву АД може призвести до пришвидшеного зношування ізоляції та навіть пошкодження двигуна. Особо важливо це для багатошвидкісних АД або тих, що можуть працювати з перевантаженням. Інша ситуація для АД із фіксованою частотою обертання, умови його роботи відомі, а рівень навантаження незмінний. Відповідно можна зменшити тепловий запас АД до мінімуму.

Наукова робота [22], що була опублікована у 2024 році, присвячена тепловому аналізу та стратегії охолодження АД з короткозамкненим ротором для електромобілів. Не зважаючи на маркетингові дослідження [16], вчені не залишають використовувати АД. Автори розглядають різні стратегії керування температурним режимом АД, важливе значення приділяють визначенню втрат енергії, найнагіртіших точок у двигуні та оцінці впливу перегріву на ефективність АД. У роботі надано порівняльну таблицю різних схем охолодження АД, серед яких використовується повітря, вода, олива, нано-рідина та їхня комбінація [22]. Не зважаючи на те, що АД призначені для електромобілів, окремі висновки та рекомендації надаються і для промислових АД, бо сутність фізичних процесів і виникаючих проблем однакова. У першу чергу вказуються проблеми охолодження обмотки статора, особливо її лобових частин. Автори розглядають два методи розрахунку теплового стану АД метод теплового

кола із зосередженими параметрами (LPCM) та метод кінцевих елементів (FEM). У роботі [21] для теплового моніторингу стану електродвигуна пропонується використовувати моделі, отримані методом моделювання теплової мережі із зосередженими параметрами (LPTN). Цей метод доволі простий, ефективний, не потребує великих обчислювальних ресурсів, але залежить від досвіду користувача.

У [4] розглядають види втрат електродвигунів змінного струму. Пояснюється важливість визначення розподілу температури в асинхронному двигуні і різне технічне забезпечення що використовується для його отримання (Thermography, FEM, Ansys). Розглядаються різноманітні системи охолодження та їх застосування.

В роботі [23] детально розглядається процес моделювання АД у програмному продукті MAXWELL. Оцінюється вплив на енергетичні параметри АД різного типу матеріалу обмотки та сталі осердя магнітопроводу. Корисним є представлена методика визначення втрат в елементах електродвигуна, які є джерелами тепла.

Із збільшенням потужності АД часткове співвідношення різних видів втрат зменшується [13]. Цей факт треба враховувати при розробці серії АД. Вказується про необхідність комплексного застосування програм моделювання електромагнітного та температурного поля електродвигуна.

У роботі [19] розглядається конструкція системи повітряного охолодження. Вона містить декілька основних елементів окремо та в різних комбінаціях: зовнішні ребра на корпусі двигуна, канали для циркуляції повітря в статорі та роторі, внутрішні та зовнішні робочі колеса вентилятора (рис. 6).

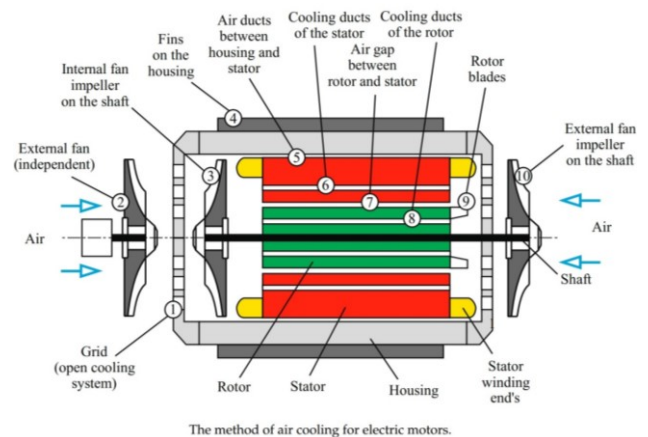


Рис. 6. Система повітряного охолодження електродвигунів змінного струму [19]

Характеристики вентилятора обдування та геометрія ребер корпусу АД мають велике значення. Поліпшення конструкції та оптимізація цих елементів дозволяє збільшити ККД системи охолодження в межах 10 %–30 % [19]. Також проводять оптимізацію геометрії ротора для покращення аеродинамічних властивостей і зменшення вентиляційних втрат.

В [24] виконана робота по розробці прогнозування чисельної методології для отримання теплових характе-

ристик електродвигунів, яка базується на моделюванні електромагнітного поля, з наступним отриманням тривимірного теплового поля. Методологія тестувалася на прикладі АД та перевірялася експериментальними дослідженнями.

Важливість теплового стану АД привело до його використання як індикативного обмежувального фактору у різних системах моніторингу та діагностики. Так у роботі [21] розглядається сучасний стан і майбутні виклики теплового моніторингу електричних машин. Вимірювання температури частин електричної машини для захисту його від перевантаження потребує створення їх спрощених теплових моделей. Раніше температурний моніторинг вважався складним та ненадійним, але час йде і ситуація змінюється. У роботі [25] розглядається новий метод теплового захисту для асинхронних двигунів.

Поява телевізорів дозволила отримати додатковий інструмент для оцінки теплового стану електродвигуна відповідно його моніторингу. За допомогою термографії можна визначити різні теплові аномалії. Все більше дослідників використовують термографію як додатковий інструмент для проведення експериментальних досліджень. У роботі [26] розглядається теорія, основні алгоритми роботи з інфрачервоною термографією. Наведені приклади теплових зображень характерних для різних несправностей асинхронного двигуна. Найбільш цінним вважаємо безконтактність методу, простоту використання, хоча обробка, а правильно аналіз зображень потребує певного досвіду. Але використання термографії для моніторингу трифазних АД можна вважати звичайною справою [27].

Висновки.

1. Зважаючи на наявність в промисловості переважної частки АД з фіксованою частотою обертання дослідження з подальшого підвищення їх енергоефективності є актуальними та необхідними.

2. Головним обмежувальним фактором підвищення енергоефективності АД до рівня IE5 є його тепловий стан.

3. Аналіз шляхів підвищення ефективності АД вказує на необхідність їх комплексного застосування. Найбільш доцільним, вважаємо проведення оптимізації та удосконалення елементів системи повітряного охолодження АД.

4. Для проведення дослідження потрібно комплексно застосовувати системи моделювання електромагнітного та температурного поля АД, що наразі є певним стандартом у таких дослідженнях. Враховуючи певні недоліки теплових моделей АД необхідно поєднувати моделювання із експериментальними дослідженнями як за допомогою класичних датчиків температури, так і методу термографії.

Список літератури

1. Baranidharan, M., Rajesh kanna, R., Raja Singh, R. Energy Saving on Industrial Drive Technologies - Past, Present, and Future Perspective. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 906(1):012005. doi: 10.1088/1757-899X/906/1/012005.
2. De Almeida, Anibal & Fong, João & Brunner, Conrad & Werle,

- Rita & Werkhoven, M. New technology trends and policy needs in energy efficient motor systems - A major opportunity for energy and carbon savings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, vol. 115, 109384. doi: 10.1016/j.rser.2019.109384.
3. Dinolova P., Ruseva V., Dinolov O. Energy Efficiency of Induction Motor Drives: State of the Art, Analysis and Recommendations. Energies 2023, 16(20):7136. doi: 10.3390/en16207136.
4. Edison Gundabattini, Ravi Kuppan, Darius Gnanaraj Solomon, Akhtar Kalam, D.P. Kothari, Rosli Abu Bakar. A review on methods of finding losses and cooling methods to increase efficiency of electric machines, Ain Shams Engineering Journal, 2021, vol. 12, is. 1, pp. 497-505. doi: 10.1016/j.asej.2020.08.014.
5. Solomon, Darius & Greco, A. & Masselli, Claudia & Gundabattini, Edison & Rassiah, Raja Singh & Ravi, Kuppan. A Review on Methods to Reduce Weight and to Increase Efficiency of Electric Motors Using Lightweight Materials, Novel Manufacturing Processes, Magnetic Materials and Cooling Methods. Annales de Chimie - Science des Matériaux. 2019, vol. 44, no. 1, pp. 1-14. doi: 10.18280/acsm.440101.
6. De Souza, D.F.; Salotti, F.A.M.; Sauer, I.L.; Tatizawa, H.; de Almeida, A.T.; Kanashiro, A.G. A Performance Evaluation of Three-Phase Induction Electric Motors between 1945 and 2020. Energies, 2022, vol. 15, no. 6: 2002. doi: 10.3390/en15062002.
7. Опольський Я. В., Васюра А. С. Сучасні підходи до підвищення ефективності роботи асинхронних двигунів. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2018. № 1. С. 81–88. doi: 10.31649/1681-7893-2018-35-1-81-88.
8. Diachenko G. G., Aziukovskiy O. O. Review of methods for energy-efficiency improvement in induction machines. Scientific Bulletin of the National Mining University, 2020, is. 1, pp. 80-88. doi: 10.33271/nvngu/2020-1/080.
9. X. Zhou, M. Sun, Y. Ma and Z. Gao, Research on asynchronous motor energy-saving technology, 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC), Chongqing, China, 2017, pp. 4015-4020, doi: 10.1109/CCDC.2017.7979203.
10. Horia Gavrilă, Veronica Manescu (Paltanea), Gheorghe Paltanea, Gheorghe Scutaru, Ioan Peter. New Trends in Energy Efficient Electrical Machines. Procedia Engineering, 2017, vol. 181, pp. 568-574. doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.435.
11. Electric Motors and variable speed drives. Ecodesign requirements apply to these products / An official website of the European Union. Available at: https://energy-efficient-products.ec.europa.eu/ecodesign-and-energy-label/product-list/electric-motors_en. (accessed 03.02.2024).
12. High-efficiency motor series from Siemens now consistently available in efficiency class IE4. / Press release «Siemens AG», Reference number: HQDIPR202103306164EN. Available at: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:6ddf0c9fa-e3dd-45e4-b7ac-b1b5dd42b032/HQDIPR202103306164EN.pdf>. (accessed 03.02.2024).
13. Dorrell, D. G. A Review of the Methods for Improving the Efficiency of Drive Motors to Meet IE4 Efficiency Standards. Journal of Power Electronics, 2014, vol. 14, no. 5. pp. 842–851. doi: 10.6113/jpe.2014.14.5.842.
14. Enomoto, Y. & Tokoi, H. & Imagawa, Takao & Suzuki, T. & Obata, T. & Souma, K. Amorphous motor with IE5 efficiency class. Hitachi Review, 2015, vol. 64, no. 8, pp. 480-487. Available at: https://www.hitachi.com/rev/pdf/2015/r2015_08_109.pdf. (accessed 03.02.2024).
15. ABB is first to reach anticipated IE6 hyper-efficiency with magnet-free motors / Press release «ABB», Zurich, Switzerland. Available at: <https://new.abb.com/news/detail/116123/abb-is-first-to-reach-anticipated-ie6-hyper-efficiency-with-magnet-free-motors>. (accessed 06.03.2024).
16. Dr James Edmondson and Shazan Siddiqi. Electric Motors for Electric Vehicles 2024-2034 / Research reports IDTechEx. Available at: <https://www.idtechex.com/en/research-report/electric-motors-for-electric-vehicles-2024-2034/941>. (accessed 03.02.2024).
17. De Almeida, A.T., Ferreira, F., & Baoming, G. Beyond Induction Motors - Technology Trends to Move Up Efficiency. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, vol. 50, no. 3, pp. 2103-2114, doi: 10.1109/TIA.2013.2288425.
18. Boglietti, Aldo & Cavagnino, A. & Staton, D. Thermal analysis of TEFC induction motors. 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, Salt Lake City,

- UT, USA, 2003, vol. 2, pp. 849-856. doi: 10.1109/IAS.2003.1257630.
19. Konovalov, D.; Tolstorebrov, I.; Eikevik, T.M.; Kobalava, H.; Radchenko, M.; Hafner, A.; Radchenko, A. Recent Developments in Cooling Systems and Cooling Management for Electric Motors. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 19, 7006. doi: 10.3390/en16197006.
 20. Nogal, L.; Magdziarz, A.; Rasolomampionona, D.D.; Łukaszewski, P.; Sapuła, L.; Szreder, R. The Laboratory Analysis of the Thermal Processes Occurring in Low-Voltage Asynchronous Electric Motors. *Energies* 2021, 14, 2056. doi: 10.3390/en14082056.
 21. Wallscheid Oliver. Thermal Monitoring of Electric Motors: State-of-the-Art Review and Future Challenges. *IEEE Open Journal of Industry Applications*. 2021, vol. 2, pp. 204-223. doi: 10.1109/OJIA.2021.3091870.
 22. Konda Y. R., Ponnaganti V. K., Reddy P. V. S, Singh R. R., Mercorelli P., Gundabattini E., Solomon D. G. Thermal Analysis and Cooling Strategies of High-Efficiency Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors – A Review. *Computation*, 2024, 12(1):6. doi: 10.3390/computation12010006.
 23. M. Aishwarya, R.M. Brisilla, Design of Energy-Efficient Induction motor using ANSYS software, *Results in Engineering*. 2022, vol. 16, 100616. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100616>.
 24. Iacovano, Clara & Berni, Fabio & Cicalese, Giuseppe & Nuzzo, Stefano & Fontanesi, Stefano. An integrated 2D/3D numerical methodology to predict the thermal field of electric motors. *Case Studies in Thermal Engineering* 56, 2024, 104233. doi: 10.1016/j.csite.2024.104233.
 25. Litsin, K.V. Developing New Thermal Protection Method for AC Electric Motors. *Machines* 2021, 9, 51. doi: 10.3390/machines9030051.
 26. Balakrishnan, G.K.; Yaw, C.T.; Koh, S.P.; Abedin, T.; Raj, A.A.; Tiong, S.K.; Chen, C.P. A Review of Infrared Thermography for Condition-Based Monitoring in Electrical Energy: Applications and Recommendations. *Energies* 2022, 15, 6000. doi: 10.3390/en15166000.
 27. Adam Glowacz, Zygfried Glowacz. Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal imaging. *Infrared Physics & Technology*, 2017, vol. 81, pp. 7-16. doi: 10.1016/j.infrared.2016.12.003.
 2018. vol. 1, pp. 81–88. doi: 10.31649/1681-7893-2018-35-1-81-88.
 8. Diachenko G. G., Aziukovskiy O. O. Review of methods for energy-efficiency improvement in induction machines. *Scientific Bulletin of the National Mining University*, 2020, is. 1, pp. 80-88. doi: 10.33271/nvngu/2020-1/080.
 9. X. Zhou, M. Sun, Y. Ma and Z. Gao, Research on asynchronous motor energy-saving technology, 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC), Chongqing, China, 2017, pp. 4015-4020, doi: 10.1109/CCDC.2017.7979203.
 10. Horia Gavrila, Veronica Manescu (Paltanea), Gheorghe Paltanea, Gheorghe Scutaru, Ioan Peter. New Trends in Energy Efficient Electrical Machines. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 181, pp. 568-574. doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.435.
 11. Electric Motors and variable speed drives. Ecodesign requirements apply to these products / An official website of the European Union. Available at: https://energy-efficient-products.ec.europa.eu/ecodesign-and-energy-label/product-list/electric-motors_en. (accessed 03.02.2024).
 12. High-efficiency motor series from Siemens now consistently available in efficiency class IE4. / Press release «Siemens AG», Reference number: HQDIPR202103306164EN. Available at: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:6df0c9fa-e3dd-45e4-b7ac-b1b5dd42b032/HQDIPR202103306164EN.pdf>. (accessed 03.02.2024).
 13. Dorrell, D. G. A Review of the Methods for Improving the Efficiency of Drive Motors to Meet IE4 Efficiency Standards. *Journal of Power Electronics*, 2014, vol. 14, no. 5. pp. 842–851. doi: 10.6113/jpe.2014.14.5.842.
 14. Enomoto, Y. & Tokoi, H. & Imagawa, Takao & Suzuki, T. & Obata, T. & Souma, K. Amorphous motor with IE5 efficiency class. *Hitachi Review*, 2015, vol. 64, no. 8, pp. 480-487. Available at: https://www.hitachi.com/rev/pdf/2015/r2015_08_109.pdf. (accessed 03.02.2024).
 15. ABB is first to reach anticipated IE6 hyper-efficiency with magnet-free motors / Press release «ABB», Zurich, Switzerland. Available at: <https://new.abb.com/news/detail/116123/abb-is-first-to-reach-anticipated-ie6-hyper-efficiency-with-magnet-free-motors>. (accessed 06.03.2024).
 16. Dr James Edmondson and Shazan Siddiqi. Electric Motors for Electric Vehicles 2024-2034 / Research reports IDTechEx. Available at: <https://www.idtechex.com/en/research-report/electric-motors-for-electric-vehicles-2024-2034/941>. (accessed 03.02.2024).
 17. De Almeida, A.T., Ferreira, F., & Baoming, G. Beyond Induction Motors - Technology Trends to Move Up Efficiency. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2013, vol. 50, no. 3, pp. 2103-2114, doi: 10.1109/TIA.2013.2288425.
 18. Boglietti, Aldo & Cavagnino, A. & Staton, D. Thermal analysis of TEFC induction motors. 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, Salt Lake City, UT, USA, 2003, vol. 2, pp. 849-856. doi: 10.1109/IAS.2003.1257630.
 19. Konovalov, D.; Tolstorebrov, I.; Eikevik, T.M.; Kobalava, H.; Radchenko, M.; Hafner, A.; Radchenko, A. Recent Developments in Cooling Systems and Cooling Management for Electric Motors. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 19, 7006. doi: 10.3390/en16197006.
 20. Nogal, L.; Magdziarz, A.; Rasolomampionona, D.D.; Łukaszewski, P.; Sapuła, L.; Szreder, R. The Laboratory Analysis of the Thermal Processes Occurring in Low-Voltage Asynchronous Electric Motors. *Energies* 2021, 14, 2056. doi: 10.3390/en14082056.
 21. Wallscheid Oliver. Thermal Monitoring of Electric Motors: State-of-the-Art Review and Future Challenges. *IEEE Open Journal of Industry Applications*. 2021, vol. 2, pp. 204-223. doi: 10.1109/OJIA.2021.3091870.
 22. Konda Y. R., Ponnaganti V. K., Reddy P. V. S, Singh R. R., Mercorelli P., Gundabattini E., Solomon D. G. Thermal Analysis and Cooling Strategies of High-Efficiency Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors – A Review. *Computation*, 2024, 12(1):6. doi: 10.3390/computation12010006.
 23. M. Aishwarya, R.M. Brisilla, Design of Energy-Efficient Induction motor using ANSYS software, *Results in Engineering*. 2022, vol. 16, 100616. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100616>.
 24. Iacovano, Clara & Berni, Fabio & Cicalese, Giuseppe & Nuzzo, Stefano & Fontanesi, Stefano. An integrated 2D/3D numerical methodology to predict the thermal field of electric motors. *Case*

References (transliterated)

1. Baranidharan, M., Rajesh kannan, R., & Raja Singh, R. Energy Saving on Industrial Drive Technologies - Past, Present, and Future Perspective. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 906(1):012005. doi: 10.1088/1757-899X/906/1/012005.
2. De Almeida, Anibal & Fong, João & Brunner, Conrad & Werle, Rita & Werkhoven, M. New technology trends and policy needs in energy efficient motor systems - A major opportunity for energy and carbon savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 115, 109384. doi: 10.1016/j.rser.2019.109384.
3. Dinolova P., Ruseva V., Dinolov O. Energy Efficiency of Induction Motor Drives: State of the Art, Analysis and Recommendations. *Energies* 2023, 16(20):7136. doi: 10.3390/en16207136.
4. Edison Gundabattini, Ravi Kuppan, Darius Gnanaraj Solomon, Akhtar Kalam, D.P. Kothari, Rosli Abu Bakar. A review on methods of finding losses and cooling methods to increase efficiency of electric machines, *Ain Shams Engineering Journal*, 2021, vol. 12, is. 1, pp. 497-505. doi: 10.1016/j.asej.2020.08.014.
5. Solomon, Darius & Greco, A. & Masselli, Claudia & Gundabattini, Edison & Rassiah, Raja Singh & Ravi, Kuppan. A Review on Methods to Reduce Weight and to Increase Efficiency of Electric Motors Using Lightweight Materials, Novel Manufacturing Processes, Magnetic Materials and Cooling Methods. *Annales de Chimie - Science des Matériaux*. 2019, vol. 44, no. 1, pp. 1-14. doi: 10.18280/acsm.440101.
6. De Souza, D.F.; Salotti, F.A.M.; Sauer, I.L.; Tatizawa, H.; de Almeida, A.T.; Kanashiro, A.G. A Performance Evaluation of Three-Phase Induction Electric Motors between 1945 and 2020. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 6: 2002. doi: 10.3390/en15062002.
7. Opolskyi Ya. V., Vasiura A. S. Suchasni pidkhody do pidvyshchennia efektyvnosti roboty asynkhronnykh dvyhuniu [Modern approaches to increasing the efficiency of asynchronous motors]. *Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnologii*.

- Studies in Thermal Engineering 56, 2024, 104233. doi: 10.1016/j.csite.2024.104233.
25. Litsin, K.V. Developing New Thermal Protection Method for AC Electric Motors. *Machines* 2021, 9, 51. doi: 10.3390/machines9030051.
26. Balakrishnan, G.K.; Yaw, C.T.; Koh, S.P.; Abedin, T.; Raj, A.A.; Tiong, S.K.; Chen, C.P. A Review of Infrared Thermography for Condition-Based Monitoring in Electrical Energy: Applications and Recommendations. *Energies* 2022, 15, 6000. doi: 10.3390/en15166000.
27. Adam Glowacz, Zygryd Glowacz. Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal imaging. *Infrared Physics & Technology*, 2017, vol. 81, pp. 7-16. doi: 10.1016/j.infrared.2016.12.003.

Поступила (received) 12.05.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Дзеніс Сергій Євгенович (Dzenis Sergii Evgenovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри електричних машин, ORCID: [0000-0002-8255-559X](https://orcid.org/0000-0002-8255-559X), e-mail: serhii.dzenis@ieec.khpi.edu.ua.

Шайда Віктор Петрович (Shaida Viktor Petrovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, ORCID: [0000-0002-4281-5545](https://orcid.org/0000-0002-4281-5545), e-mail: vpsh1520@gmail.com.

Юр'єва Олена Юрїївна (Yurieva Olena Yuriyivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, ORCID: [0000-0002-4156-8087](https://orcid.org/0000-0002-4156-8087), e-mail: ele6780@gmail.com.