

УДК 621.313

Я.В. ОПОЛЬСЬКИЙ, А.С. ВАСЮРА

## СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

*Вінницький національний технічний університет,  
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна  
E-mail: < opolsky.yarik@gmail.com >*

**Анотація.** Розглянуто сучасні підходи до підвищення ефективності роботи асинхронних двигунів, проведено аналіз найбільш дієвих способів покращення експлуатаційних показників двигунів та прикладів реалізації.

**Ключові слова:** електродвигун, асинхронний двигун, коефіцієнт корисної дії, частотний перетворювач, контролер-оптимізатор.

**Анотация.** Рассмотрены современные подходы к повышению эффективности работы асинхронных двигателей, проведен анализ наиболее действенных способов улучшения эксплуатационных показателей двигателей и примеров реализации.

**Ключевые слова:** электродвигатель, асинхронный двигатель, коэффициент полезного действия, частотный преобразователь, контролер-оптимизатор.

**Abstract.** The main modern approaches to improving the efficiency and reliability of asynchronous motors are considered, a comparative analysis of the most effective methods for improving the efficiency of asynchronous motors and real examples their application has been carried out.

**Keywords:** electric motor, asynchronous motor, efficiency factor, frequency converter, controller-optimizer.

DOI: 10.31649/1681-7893-2018-35-1-81-88

### ВСТУП

Біля 70% усієї виробленої електроенергії споживається електродвигунами, які використовуються в різноманітному устаткуванні на промислових майданчиках усього світу. Існує широкий вибір з конструкцій двигунів різних типів та найбільш використовуваним є асинхронний двигун (АД) завдяки, насамперед, високій надійності в роботі та не значним експлуатаційним витратам. Коефіцієнт корисної дії АД вище, ніж у двигунів інших типів. Висока ефективність в поєднанні з простотою виготовлення та низькою ціною визначає безумовний пріоритет АД. На сьогодні вони застосовуються практично в усіх галузях промисловості, виробництва, сільського господарства тощо. АД є головними перетворювачами електричної енергії в механічну і саме вони значною мірою визначають рівень енергозбереження.

Разом з тим, АД мають і певні недоліки. До них слід віднести: значний пусковий струм; недостатній пусковий момент; неузгодженість механічного моменту з механічним навантаженням, що призводить до лавиноподібного підвищення струму та надлишкових механічних перевантажень під час пуску; помітного зниження ККД в періоди пониженого навантаження; витрати енергій, які обумовлюються тертям рухомих елементів, перемагнічуванням магнітопроводу та осердя якоря в змінному магнітному полі та, в свою чергу, супроводжуються виділенням тепла, підсиленням шуму та вібрацій в процесі їх роботи, тощо. Подібні фактори значно понижують ефективність роботи АД [1].

Оптимізація ефективності використання АД може забезпечити суттєву реальну економію вартості робочого циклу на протязі всього терміну експлуатації двигуна [2].

Метою даної публікації є ознайомлення вітчизняних фахівців з можливими шляхами мінімізації енерговитрат, а відповідно, підвищення ККД, ефективності та надійності експлуатації асинхронних двигунів.

### АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ АД

Розглянемо можливі варіанти підвищення ефективності роботи та покращення головних експлуатаційних показників АД.

Перетворення енергії в АД, як і в інших електричних машинах, пов'язане з комплексом втрат енергій: механічних, магнітних та електричних. Оцінку таких втрат можна зробити завдяки аналізу окремих складових та, в кінцевому рахунку, коефіцієнта корисної дії двигуна.

З мережі живлення на обмотку статора надходить електрична потужність  $P_1$ . Частина цієї потужності витрачається на покриття магнітних втрат в осерді статора  $P_{c1}$  та покриття електричних втрат на нагрів обмотки статора:

$$P_{e1} = m_1 I_1^2 r_1.$$

Частина так званої електромагнітної потужності через магнітний потік передається ротору:  
 $P_{e1} = P_1 - (P_{c1} + P_{e1})$ .

Частина цієї потужності витрачається на покриття електричних втрат в обмотці ротора:  
 $P_{e2} = m_2 I_2^2 r_2$ ,

а решта перетворюється в механічну потужність, так звану повну механічну потужність двигуна:  
 $P_2' = P_{e1} - P_{e2}$ .

Отже, повну механічну потужність можна визначити, як:

$$P_2' = m_1 I_1^2 r_2 \left[ \frac{1-s}{s} \right] = P_{e2} \left[ \frac{1-s}{s} \right].$$

Після нескладних перетворень, потужність втрат у роторі набуває вигляду:

$$P_{e2} \left[ \left( 1 - \frac{s}{s} \right) \right] = P_{e1} - P_{e2}, \text{ або}$$

$$P_{e2} = s P_{e1}.$$

Вочевидь, потужність електричних втрат у роторі пропорційна ковзанню. Отже, робота асинхронного двигуна більш економічна при малому ковзанні.

Крім того, в роторі двигуна також мають місце магнітні втрати, але через низьку частоту струму в обмотці ротора ( $f_2 = f_1 s$ ) ці втрати настільки незначні, що на практиці без суттєвої похибки, зазвичай, ними нехтують.

Механічна потужність на валу двигуна  $P_2$  менша повної механічної потужності  $P_2'$  на величину механічних  $P_{мех}$  та додаткових  $P_{д}$  втрат:

$$P_2 = P_2' - (P_{мех} + P_{д}),$$

тут  $P_{мех}$  – втрати, які обумовлені тертям в підшипниках та опором повітря обертовим вузлам ротора, а  $P_{д}$  – додатковими втратами через наявність у двигуні полів розсіювання та пульсацій поля в зубцях осердь ротора і статора.

Отже, корисна потужність АД дорівнює:

$$P_2 = P_1 - \sum P,$$

де  $\sum P$  – сума втрат в АД:

$$\sum P = P_{c1} + P_{e1} + P_{e2} + P_{мех} + P_{д},$$

а коефіцієнт корисної дії АД визначається співвідношенням:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}. [3]$$

Аналіз наведених моделей підказує можливі шляхи підвищення ефективності двигунів, насамперед, за рахунок зниження витрат енергії.

### ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ПОКРАЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АД

Серед чинників, що впливають на ККД та ефективність використання АД, важливо враховувати ступінь завантаження АД, паспортні номінальну потужність двигуна та швидкість обертання, відхилення напруги живлення від номінального рівня значень, головні параметри конструктиву моделі, ступінь зносу двигуна тощо.

Існує ряд шляхів забезпечення ефективного енергозбереження електроприводу на базі АД, наприклад: удосконалення двигуна без зміни геометрії складових двигуна; удосконалення двигуна зі зміною геометрії статора і ротора двигуна; застосування серійного двигуна підвищеної потужності тощо. Кожен з цих підходів має свої переваги, недоліки та обмеження по застосуванню. Вибір оптимального варіанту можливий лише через економічну оцінку кожного з варіантів.

Покращення експлуатаційних характеристик АД, насамперед, досягається завдяки застосуванню більш якісних матеріалів і удосконаленню конструкції двигуна. Зокрема, чим чистішою є мідь в обмотці,

тим менший її опір, а відповідно, і витрати електроенергії; більш якісна магнітна сталь дозволяє зменшити витрати енергії на перемагнічування осердя. Перспективною є також робота над зміною геометрії зубців осердя двигуна з метою збільшення концентрації магнітного поля та зниження витрат на розсіювання енергії [4,5]. ККД двигуна може помітно змінитися після перемотування обмоток.

Оцінка впливу змін конструктиву АД на його ефективність:

Удосконалення та оптимізація асинхронних двигунів зміною геометрії статора та ротора дає значний ефект, двигун матиме кращі енергетичні та динамічні характеристики. Однак, фінансові витрати на модернізацію та переобладнання виробництва для його випуску складуть значні суми. Разом з тим, існують підходи, які не потребують значних фінансових витрат, але дозволяють забезпечити певне енергозбереження.[5,6] Проведені дослідження енергоефективних АД, створених внаслідок модернізації базового двигуна, шляхом зміни: довжини осердя статора ( $l$ ), кількості витків в фазі обмотки статора ( $w$ ) та діаметру дроту. На першому етапі була проведена модернізація АД з короткозамкненим ротором за рахунок зміни лише його активної довжини осердя статора до 180%. Результати у вигляді залежностей значень максимального ККД ( $\eta_{max}$ ) та номінального ( $\eta_n$ ) ККД від довжини модернізованого двигуна наведені на рис. 1.

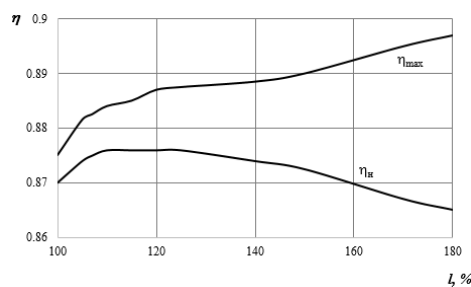


Рис. 1 – Залежності  $\eta_{max}$  та  $\eta_n$  при зміні довжини осердя статора

Модернізований АД має номінальний ККД вищий, ніж базовий двигун при зміні довжини статора до 160%, найбільші значення - в діапазоні  $l=110 - 125\%$ . Але зміна лише довжини осердя і, як наслідок, зменшення втрат у сталі, незважаючи на деяке підвищення ККД, не є найбільш вдалим підходом до удосконалення АД. Більш ефективною є одночасна зміна довжини осердя та обмоткових даних (кількості витків обмотки та поперечного перерізу проводу обмотки статора). Зокрема, були розглянуті варіанти збільшення довжини осердя  $l$  до 130%, та зміни числа витків - в інтервалі  $w = 60 - 110\%$ . У базового двигуна такі параметри:  $w = 108$  витків, та ККД  $\eta_n=0,875$ . [7] Результати досліджень наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Залежність ККД від зміни довжини осердя та кількості витків обмотки статора

Довжина осердя статора ( $l$ )	Кількість витків обмотки статора ( $w$ )	ККД
100%	72	0,805
105%	72	0,819
125%	84	<b>0,879</b>
130%	84	<b>0,885</b>
125%	96	<b>0,876</b>
130%	96	<b>0,885</b>

Результати досліджень підтверджують доцільність запропонованого удосконалення серійних двигунів. ККД такого двигуна відносно базового зростає на 0,7-1,7% та складає 0,876 - 0,885 при збільшенні робочої довжини осердя статора на 110 - 130% відносно базового типорозміру та зниженні кількості витків обмотки статора на 10% [8].

Оцінка ефективності використання АД з підвищеним ККД:

Як вже було зазначено, нові більш енергоефективні АД з високим ККД, на відміну від старих АД зі звичайним ККД, працюють з меншим ковзанням, що дає можливість збільшення швидкості обертання при певному навантаженні, а отже, і підвищення продуктивності. Однак, використання АД з високим ККД в деяких процесах (зі зміною подачі), буде не виправдано через більшу швидкість обертання, поки існуючі АД, як і раніше, будуть слабо завантажені (тобто, працювати з низьким ККД).

Оскільки вхідна потужність пропорційна швидкості у кубі, проста заміна старого двигуна на новий з високим ККД не обов'язково призведе до зниження споживання енергії. З іншого боку, якщо можливість більшого завантаження на користь, то заміна старого АД зі звичайним ККД на новий з високим ККД може бути виправданою. [5]

На рис.2 показано приклад можливого підвищення ефективності, якщо застарілий двигун зі звичайною ефективністю замінюється на новий, що має більш високий ККД.

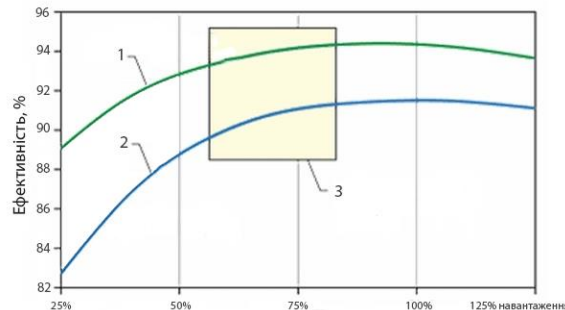


Рис. 2. Ефективність при повному і частковому завантаженні двигуна з низьким та високим ККД  
1 – АД з високим ККД; 2 – АД з низьким ККД; 3 – зона з фіксованою швидкістю обертання

Оцінка впливу ступені завантаженості АД:

Ефективність двигуна помітно змінюється разом з відносним навантаженням на двигун у порівнянні з номінальним режимом (див. рис.3). Як показують практичні дослідження в межах зниження навантаження до 50% ефективність більшості АД залишається лінійною, а в ряді варіантів досягає піку на рівні позначки 75%. При навантаженні нижче 50% АД можуть працювати тільки протягом короткого проміжку часу і не можуть експлуатуватися при навантаженнях менше 20% від номінального. Отже, оцінка реального впливу відносного навантаження на двигун має принципово важливе значення під час експлуатації АД.

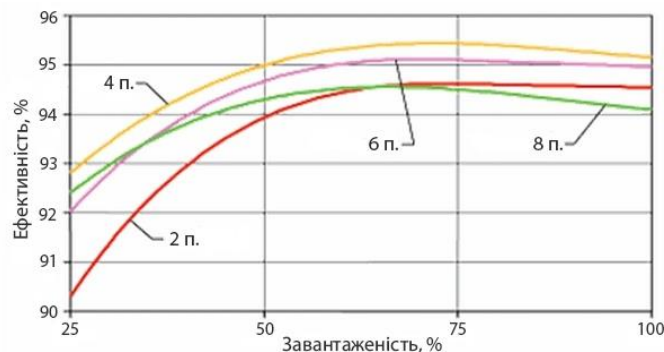


Рис. 3. Ефективність електродвигуна в залежності від завантаженості

Оцінка впливу швидкості обертання та номінальної потужності АД:

Вплив швидкості обертання на досягнуту ефективність також можна оцінити з рис.2. 4-х полюсний АД при номінальних 1800 об/хв виходить на найвищий КДП, а 2-х полюсний при номінальних 3600 об/хв дає нижчу ефективність. Отже, хоча АД з номінальною частотою обертання 3600 об/хв можуть бути більш ефективними (і мати меншу закупівельну вартість), ніж АД зі швидкістю обертання 1800 об/хв, останні - можуть бути більш ефективними, не кажучи вже про більш тривалий термін служби. [5]

Слід також зазначити, що номінальна потужність АД також впливає на його експлуатаційну ефективність: АД з великою номінальною потужністю працюють з більшою ефективністю, ніж двигуни з меншою потужністю.

Оцінка впливу коефіцієнта потужності:

Хоча коефіцієнт потужності (PF) безпосередньо не впливає на ККД двигуна, проте він впливає на вхідну потужність двигуна, а відтак, на втрати в мережі. Зростання втрат відбувається в наслідок того, що при меншому PF потрібен більший споживаний струм, що неминуче призводить до підвищення втрат

енергії в мережі. Як і ККД, коефіцієнт потужності двигуна також знижується зі зменшенням навантаження на двигун практично за лінійним законом приблизно до 50% навантаження.

Можливі наступні варіанти збільшення PF: використовувати АД за визначенням з високим PF; не використовувати потужні АД (PF знижується разом зі зниженням навантаження на АД); застосовувати компенсуючі конденсатори паралельно з обмотками АД; підвищувати повне навантаження PF до 95%; перетворити привід у привід з частотним регулюванням. Застосування пускових конденсаторів АД є одним з найбільш поширених способів збільшення PF і має ряд переваг: збільшення PF; зменшення реактивного струму від електрообладнання через кабелі та пускачі АД.

Оцінка впливу підвищення напруги:

Підвищення ККД АД досягається також з підвищенням робочої напруги. Чим вище напруга, тим нижче струм і, відповідно нижче втрати в мережі. Однак, висока напруга призводить до зростання ціни частото-регульованого приводу та робить експлуатацію двигуна більш небезпечною.

### РЕАЛІЗАЦІЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ АД

Як було показано вище, для підвищення ефективності роботи АД, важливе значення має забезпечення його навантаження на рівні не менше 75% від номіналу та підвищення коефіцієнта потужності за рахунок регулювання напруги, а в разі можливості, і частоти струму живлення. [9]

Реалізація таких заходів здійснюється використанням спеціального обладнання. Зокрема, для досягнення поставленої мети необхідне застосування:

- частотних перетворювачів (ЧП), які дозволяють плавно змінювати швидкість обертання двигуна шляхом зміни частоти струму живлення;
- пристроїв плавного пуску (ППП), що обмежують швидкість зростання пускового струму та його максимальне значення.

Розглянемо приклади сучасних технічних рішень з покращенням характеристик АД з точки зору ефективності роботи та економічної доцільності.

Частотні перетворювачі для асинхронних двигунів:

Принцип роботи методу частотного регулювання швидкості АД полягає в тому, що змінюючи частоту напруги живлення  $f_1$  при незмінній кількості пар полюсів  $p$ , можна пропорційно змінювати кутову швидкість  $\omega_0$  обертового магнітного поля статора та відповідно швидкість обертання ротора двигуна:

$$\omega_0 = 2\pi \frac{f_1}{p}.$$

Регулювання швидкості при цьому не супроводжується збільшенням ковзання АД, тому втрати потужності при регулюванні є невеликими. Такий спосіб забезпечує плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні, а механічні характеристики зберігають природну жорсткість. Але для дотримання високих енергетичних показників АД – коефіцієнта потужності, корисної дії, перевантажувальної здатності – змінювати необхідно одночасно з частотою напруги і саму підведену напругу. Закон зміни напруги визначається характером моменту навантаження  $M_n$  на валу двигуна.

При постійному моменті навантаження  $M_n = \text{const}$ , напруга на статорі має змінюватися пропорційно частоті:

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const}.$$

При моменті навантаження вентиляторного типу співвідношення має вигляд:

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \text{const}.$$

При моменті навантаження, обернено пропорційному швидкості, залежність має вигляд:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const}.$$

Таким чином, для плавного безступеневого регулювання швидкості двигуна, ЧП повинен забезпечувати одночасне регулювання частоти та напруги на статорі АД. Найпростіший варіант використання ЧП – коли перетворювачем управляється один АД в залежності від заданих параметрів і отриманої від датчика інформації[9].

Одним з найбільш дієвих засобів підвищення ефективності роботи АД є ЧП, який трансформує однофазну або трифазну напругу з частотою 50 Гц в напругу з необхідними амплітудою та частотою (зазвичай від 1 Гц до 300 - 400 Гц, а в разі необхідності і до 3 000 Гц). [9]

До складу ЧП входять: мікропроцесор, який забезпечує управління електронними ключами, контроль роботи обладнання, його діагностику та захист; схеми, що функціонують в режимі ключів і відкривають тиристори або транзистори. В ряді випадків ефективнішими є тиристорні ЧП, оскільки вони можуть працювати з високими напругами і струмами та мають ККД до 98%. При не надто високих напругах та потужностях така перевага менша.

Більш досконалішими є пристрої з векторним керуванням, які регулюють не тільки частоту і амплітуду вихідної напруги, а й фази струму, що протікає через обмотки статора АД. Вони встановлюються на прокатні стани, конвеєри, підйомне та пакувальне обладнання тощо.

В разі необхідності виконувати контрольоване гальмування двигуна, використовується функція сповільнення, яка забезпечує зупинку механізму за рахунок зміни частоти до потрібного рівня. Проте, якщо вимагається інтенсивне сповільнення, може знадобитись частотний перетворювач, обладнаний вбудованим або зовнішнім блоком гальмування. В режимі динамічного гальмування двигун переходить в генераторний режим і трансформує механічну енергію в електричну, яка повертається в коло постійного струму, або повертає енергію в мережу шляхом рекуперації. Такий підхід актуальний для станкового і конвеєрного обладнання.

ЧП з оберненим зв'язком дозволяє підтримувати постійну швидкість обертання при змінному навантаженні з більш високою точністю, ніж ЧП без оберненого зв'язку, тим самим підвищуючи якість технологічного процесу в замкнених системах. Такі пристрої використовуються в робототехніці, дерево- та металообробці, в системах високоточного позиціонування.

Таким чином, ЧП для АД забезпечують зниження витрат електроенергії, плавний запуск приводу і високу точність регулювання, підвищує пусковий момент і стабілізує швидкість обертання при змінному навантаженні. В кінцевому рахунку, це дозволяє суттєво підвищити ККД машини. До недоліків ЧП можна віднести високу початкову вартість (зазвичай - у кілька разів вища за вартість АД), а також - створення електромагнітних завад в процесі роботи [5].

Пристрої плавного пуску: контролери-оптимізатори:

Для забезпечення плавного пуску, розгону і зупинки АД простіше використовувати ППП. Вони обмежують швидкість збільшення пускового струму протягом певного проміжку часу.

Традиційні ППП практично не вирішують задачу підвищення ККД. [10] Крім того, вони застосовуються тільки для управління приводами з невеликим навантаженням на валу. Однак, сьогодні існують різновиди ППП, які дозволяють підвищити енергоефективність двигунів шляхом узгодження крутного моменту з моментом навантаження за рахунок зміни напруги живлення і, як наслідок, зниження споживання електроенергії при мінімальних навантаженнях на 30-40%. При цьому швидкість обертання ротора АД залишається незмінною, а коефіцієнт потужності підвищується. Такі пристрої називають контролерами-оптимізаторами (КО). КО – це регулятори напруги живлення АД, що здійснюють контроль за фазами струму і напруги. Вони забезпечують повне управління приводом на всіх етапах роботи та захищають його від перевантаження, значних коливань напруги, обриву або порушення послідовності фаз тощо. При роботі приводу в режимі змінюваних навантажень КО забезпечує припинення відбору потужності з мережі живлення в моменти, коли напівпровідникові переходи тиристорів закриті, що, зрозуміло, підвищує енергоефективність двигунів. КО гнучко реагують на зміну напруги (швидкість реакції складає соті долі секунди), знижують витрати електроенергії на 30-40%, зменшують вплив реактивного навантаження на мережу, підвищують ККД приводу, дозволяють суттєво зменшити витрати на конденсаторні компенсуювальні пристрої, продовжують термін служби обладнання і підвищують екологічність виробництва. КО дозволяють знизити енергоспоживання без зміни швидкості електроприводу, коли він недовантажений. КО відрізняються більш доступною ціною ніж ПЧ. Єдиним обмеженням застосування КО є неможливість його використання в разі необхідності змінювати швидкість обертання АД.

Отже, якщо швидкість приводу необхідно змінювати, то єдиним рішенням є використання ПЧ. Якщо такої необхідності немає, то кращим рішенням буде використання КО, які мають більш доступну вартість, ніж ПЧ.

В якості прикладів застосування КО можна назвати варіанти приводів дробарок, вентиляторів, стрічкових транспортерів, обробних верстатів, крутильних агрегатів, лебідок та іншого обладнання, що використовується в промисловості, сільському господарстві тощо. Одночасно, такі пристрої запобігають перевантаженню кронштейнів при запуску мішалок, нейтралізують гідроудари в трубопроводах, забезпечують плавний запуск потужно навантаженого обладнання, на що не здатні звичайні ППП.

## ВИСНОВКИ

Висока ефективність та надійність в поєднанні з простотою виготовлення та низькою вартістю визначає безумовний пріоритет асинхронних двигунів, які є головними перетворювачами електричної

енергії в механічну та значною мірою визначають рівень енергозбереження практично в усіх галузях промисловості, виробництва, сільського господарства тощо.

Оптимізація ефективності використання двигунів та покращення важливих експлуатаційних показників роботи електроприводів з АД може забезпечити реальну суттєву економію вартості робочого циклу на протязі всього терміну експлуатації двигуна.

Лише проведення комплексу необхідних заходів на основі економічної оцінки та аналізу ряду чинників, що впливають на експлуатаційні параметри двигунів і ефективність їх експлуатації, дозволяє здійснити оптимальний вибір для досягнення визначеної мети.

Реалізація ефективних заходів здійснюється завдяки використанню спеціального обладнання, зокрема: частотних перетворювачів, які дозволяють плавно змінювати швидкість обертання двигуна шляхом зміни частоти струму і напруги живлення, та пристроїв плавного пуску, що обмежують швидкість зростання пускового струму та його максимальне значення.

Якщо швидкість електроприводу потрібно змінювати в процесі роботи, то єдиним можливим рішенням є застосування перетворювача частоти. Якщо швидкість обертання двигуна змінювати не можна або робити це не обов'язково, то кращим рішенням є використання контролерів-оптимізаторів, які мають більш доступну вартість, ніж перетворювачі частоти.

Особливість сьогодення полягає в тому, що економити доводиться не тільки на витратах електроенергії, а й на самих засобах економії та підвищення енергоефективності. Тому, перед тим, як зробити вибір на користь того чи іншого підходу до підвищення ККД АД та енергоефективності системи в цілому, важливо прорахувати окупність вкладень та обрати варіант з мінімальними витратами.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Как повысить КПД электродвигателя (2015) <https://www.kp.ru/guide/asinkhronnyi-ielektrodvigatel.html> Доступ 10 березня 2018 року.
2. Опольський Я.В. (2018, березень) Шляхи покращення експлуатаційних характеристик АД. Матеріали XLVII НТК ВНТУ, м.Вінниця.
3. Потери и КПД асинхронного электродвигателя (2017) [http://www.chrp.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=330:poteri-i-kpd-asinhr-eldvigat&catid=12:statiiimaterialied&Itemid=18](http://www.chrp.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=330:poteri-i-kpd-asinhr-eldvigat&catid=12:statiiimaterialied&Itemid=18) Доступ 02 квітня 2018 року
4. КПД электродвигателей и что влияет на его значение (2018) <https://cable.ru/articles/id-1322.php>. Доступ 24 квітня 2018 року
5. Как повысить эффективность электродвигателя (2018) <http://www.fluidbusiness.ru/usefull/articles/kak-povysit-effectivnost-electrodvigatelya> Доступ 10 травня 2018 року
6. Муравлева О.О. (2005) Энергоэффективные асинхронные двигатели для регулируемого электропривода. Томский политехнический университет.
7. Muravlev O.P., Muravleva O.O., Vekhter E.V. Energetic (2005). Parameters of Induction Motors as the Basis of Energy Saving in a Variable Speed Drive. Gdynia, Poland, 61-63.
8. Muravlev O.P., Muravleva O.O. (2005) Power Effective Induction Motors for Energy Saving. 9th Russian Korean Intern. Symp. Science and Technology KORUS. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2, 56–60.
9. Усуфов М.М. (2014). Применение современных частотных преобразователей как способ повышения энергосбережения в сфере ЖКХ. Санкт-Петербургский государственный экономический университет (СПбГЭУ),.
10. Соколовский Г.Г. (2006). Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия.
11. Nailen, R. L. (2002). "Just how important is drive motor efficiency?" Electrical apparatus, Barker Publications, Inc., Chicago, 32.

### REFERENCES

1. Как повысить КПД электродвигателя. (2015). <https://www.kp.ru/guide/asinkhronnyi-ielektrodvigatel.html> Accessed 10 March 2018
2. Opol's'kyu YA.V. (2018, March) Shlyakhy pokrashchennya ekspluatatsiynikh kharakterystyk AD. Materialy XLVII NTK VNTU, m.Vinnytsya.
3. Potery y KPD asynkhronnoho elektrodvyhatelya. (2017). [http://www.chrp.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=330:poteri-i-kpd-asinhr-eldvigat&catid=12:statiiimaterialied&Itemid=18](http://www.chrp.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=330:poteri-i-kpd-asinhr-eldvigat&catid=12:statiiimaterialied&Itemid=18) Accessed 02 April 2018

4. KPD élektrodvyhateley y chto vlyuaet na eho znachenye. (2018) <https://cable.ru/articles/id-1322.php>. Accessed 24 April 2018
5. Kak povysyt' éffektyvnost' élektrodvyhatelya. (2018) <http://www.fluidbusiness.ru/usefull/articles/kak-povysit-effectivnost-electrodvigatelya> Accessed 10 May 2018
6. Muravleva O.O. (2005) Énerhoéffektyvnye asynkhronnye dvyhately dlya rehulyruemoho élektropryvoda. Tomskyy polytekhnycheskyy unyversytet.
7. Muravlev O.P., Muravleva O.O., Vekhter E.V. Energetic (2005). Parameters of Induction Motors as the Basis of Energy Saving in a Variable Speed Drive. Gdynia, Poland, 61-63.
8. Muravlev O.P., Muravleva O.O. (2005) Power Effective Induction Motors for Energy Saving. 9th Russian Korean Intern. Symp. Science and Technology KORUS. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2, 56–60.
9. Usufov M.M. (2014). Prymenenye sovremennykh chastotnykh preobrazovateley kak sposob povysheniya énerhosberezheniya v sfere ZHKKH. Sankt-Peterburhskyy hosudarstvennyy ékonomycheskyy unyversytet (SPbHÉU).
10. Sokolovskyy N.H. (2006). Élektropryvody peremennoho toka s chastotnym rehulyrovanyem. M.: Akademya.
11. Nailen, R. L. (2002). "Just how important is drive motor efficiency?" Electrical apparatus, Barker Publications, Inc., Chicago, 32.

Надійшла до редакції 05.06.2018

**ЯРОСЛАВ ВІТАЛІЙОВИЧ ОПОЛЬСЬКИЙ** — бакалавр факультету комп'ютерних систем і автоматики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**АНАТОЛІЙ СТЕПАНОВИЧ ВАСІЮРА** — к.т.н., професор, професор кафедри АІВТ, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця