

УДК 621.313.33

С. Т. ТОЛМАЧОВ, д-р техн. наук, проф., О. В. ІЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ В УКРАЇНІ: СТАН, МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Метою публікації є дослідження основних бар'єрів на шляху підвищення енергоефективності сучасного парку короткозамкнених асинхронних двигунів (АД) на фоні постійно зростаючої вартості електричної енергії та з урахуванням традиційних технологій, організаційно-правових обмежень та техніко-економічних можливостей.

Методи дослідження. Проаналізовані головні риси проблеми, сучасний стан парку АД та особливості їх експлуатації. Основний акцент зроблено важливому економічному аспекті проблеми – постійно зростаючій вартості електроенергії у загальному балансі витрат. Проаналізовано особливості енергетичної політики країн ЄС щодо впровадження енергоефективних АД. На основі порівняння ККД короткозамкнених АД класів енергоефективності IE2, IE3 і вітчизняних АД серії АР в діапазоні 0,75 – 375 кВт проілюстровано перевищення в 3-5 % в діапазоні потужностей 0-5 кВт енергоефективності двигунів провідних світових фірм у порівнянні з вітчизняними аналогами. Розглянуті альтернативні підходи до модернізації АД як часткового вирішення проблеми ресурсо- та енергозбереження. Обґрунтовано важливість розробки гнучкої системи визначення життєвого циклу АД та політики формування їх вторинного ринку. Як одне з пріоритетних завдань широкого моніторингу АД визначено розробку надійних і доступних методів встановлення реального завантаження двигунів в умовах експлуатації. Як пріоритетний рекомендовано використання тензорезисторних датчиків крутного моменту. Проаналізована також можливість використання альтернативних систем виміру моменту.

Наукова новизна полягає у формулюванні комплексу недостатньо досліджених, проблемних та дискусійних питань, що безпосередньо відносяться до АД і пов'язані з підвищенням їх енергоефективності.

Практична значимість роботи витікає із актуальності і масштабу проблеми, яка має всі ознаки загальнонаціональної.

Результати роботи полягають у визначенні основних бар'єрів на шляху підвищення енергоефективності парку АД та розробці шляхів їх усунення або пом'якшення. Сформульовано тезу, що зростання вартості електричної енергії гостро ставить на порядок денний питання зміни традиційних підходів до проблеми проектування та експлуатації АД, зокрема в частині надійного техніко-економічного обґрунтування доцільності їх використання в конкретних умовах експлуатації на основі базового критерія – максимуму ефективності перетворення енергії (ККД).

Ключові слова: асинхронний двигун, класи енергоефективності, модернізація, життєвий цикл, вторинний ринок, датчики крутного моменту.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Доля асинхронних електродвигунів (АД) у світовій номенклатурі складає біля 90 %, а за потужністю – біля 50 %. Такі унікальні показники використання АД, в першу чергу короткозамкнених, обумовлені простотою їх конструкції, надійністю, відносно низькою вартістю. Разом з тим енергетичні показники вітчизняних АД загальнопромислового використання малої і середньої потужності (ККД і $\cos \varphi$) недостатньо високі (наприклад, у порівнянні з європейськими); при цьому вони додатково зменшуються при недовантаженні, невідповідності якості електроенергії нормативним вимогам, при неякісних ремонтах та ін. Тому в контексті актуальної для України проблеми низької енергоефективності існує вагомий і практично не реалізований потенціал енергозбереження, пов'язаний з суттєвим підвищенням енергетичних параметрів парку АД.

Масштаби проблеми проілюструємо простими прикладами. Так, при річному виробництві електричної енергії в Україні в останні довоєнні роки на рівні 160 млрд кВт·год і орієнтовному споживанні її АД близько 60 млрд кВт·год підвищення ККД лише на 1% при середній вартості 1 кВт·год для промисловості 4,0 грн річна економія складе більше 2 млрд грн. Потенційна ж можливість підвищення ККД може бути у 2-3 рази більшою, якщо врахувати той факт, що енергетичні параметри найбільш поширених двигунів потужністю до 5 кВт (біля 60 % загального парку АД) на 3-5 % менший за параметри аналогічних двигунів у розвинених країнах.

Наведемо також додаткову інформацію щодо сучасного стану парку АД в Україні. Основу АД загальнопромислового використання складають двигуни серій АІР, АД, АДТ, 4А, 5А, 6А, АМУ, ІЕС АО, ВАО, АІМ, АІУМ, ВА, ВР та ін. – всього приблизно 30 млн од. За потужністю: АД малої потужності (1-5 кВт) – 60 %, середньої (до 20 кВт) – 20 %, потужні (20-100 кВт) – 7 %, надпотужні (більше 100 кВт) – 1 %. Номінальні енергетичні показники (на прикладі серії АІР): АД малої потужності – ККД = (72-85,7) %, $\cos \varphi = (0,69-0,88)$; середньої потужності – ККД = (90-92) %, $\cos \varphi = (0,8-0,9)$; потужних – ККД = (90-93,9) %, $\cos \varphi = (0,9-0,91)$; надпотужних – ККД = (94-95,4) %, $\cos \varphi = (0,91-0,92)$.

Таким чином, найбільш масовими є АД потужністю 1-5 кВт з найбільш низькими значеннями ККД, які споживають до 40 % електроенергії. Важливо також зазначити, що половина АД приводить в дію вентилятори (32 %) і насоси (16 %). Але незважаючи на те, що саме даний сегмент має найбільш високий потенціал енергозбереження за рахунок впровадження регульованого електропривода, на практиці цей потенціал реалізований лише на 10-12%.

Експлуатація АД в Україні має наступні характерні риси:

- у різних галузях промисловості від 10 % до 50 % АД потребують щорічного ремонту;
- фактичний середній строк служби двигунів не перевищує 6-7 років;
- у середньому післяремонтні енергетичні показники АД зменшуються на 3-4 %;
- середнє завантаження АД становить 30-40 % (в Європі не менше 60 %);
- системи ефективного моніторингу та діагностики технічного стану й енергетичних показників АД широко не використовуються;
- післяремонтна паспортизація часто проводиться в обмеженому обсязі.

Надана вище інформація однозначно свідчить про нагальну необхідність вирішення великого комплексу проблем у сфері виробництва і практичного використання АД, що стане суттєвим внеском у проблему підвищення енергоефективності в Україні в цілому.

Аналіз досліджень і публікацій. Різні аспекти теорії і практики АД були об'єктом активних досліджень численних авторів як в Україні, так і за кордоном. Вітчизняна бібліографія з цієї тематики налічує десятки монографій і сотні публікацій, що свідчить про багатогранність і складність даної проблеми. Широко розглянуті методи ідентифікації параметрів АД та розробки різних математичних моделей. Значно меншу увагу приділено можливостям отримання доступної й достовірної інформації щодо навантаження двигуна в конкретних умовах експлуатації. Питанням безконтактного визначення моменту (потужності) на валу працюючих електродвигунів присвячені публікації [1, 2]. Значна кількість публікацій присвячена питанням експлуатаційної надійності та діагностики робочих параметрів АД. Так, загальні питання побудови систем технічного діагностування розглянуті в [3-6], а діагностування енергоефективності електромеханічних систем з АД – в роботах [7-10]. Способи зниження втрат енергії в АД у контексті загальної проблеми підвищення їх енергоефективності розглянуті в [11].

Але незважаючи на активний інтерес до зазначеної проблеми слід визнати, що радикальних успіхів у її вирішенні за останні 30 років в Україні не досягнуто. При цьому за межами активних досліджень залишаються деякі практичні питання, що безпосередньо пов'язані з підвищенням енергоефективності АД. Зокрема, дискусійними є питання розробки загальноприйнятого критерію енергоефективної роботи АД, зміни існуючої концепції розробки та використання електродвигунів у зв'язку з постійним зростанням вартості електричної енергії, детального техніко-економічного обґрунтуванням тривалості життєвого циклу, що тісно пов'язане з політикою формування вторинного ринку АД. Невирішеними є питання щодо широкого впровадження енергоефективних двигунів підвищеної надійності в енергозберіжних технологіях, можливостей підвищення енергоефективності АД при їх ремонті та модернізації як часткового вирішення проблеми. Проблемними залишаються питання оновлення стандартів, наприклад, діючого ГОСТ 25941-83, який регламентує визначення ККД, але є застарілим і не враховує новітніх досягнень і можливостей в галузях електроніки, вимірювальної й обчислювальної техніки, а також вітчизняний стандарт ДСТУ 3886-99 «Енергозбереження. Системи електроприводу. Методи аналізу та вибору», який базується на приблизних емпіричних залежностях для відносно нових електродвигунів. Актуальною залишається проблема розробки недорогих датчиків моменту з прийнятними параметрами вартості, точності й універсальності.

Постановка задачі. Реалізація великого за обсягом потенціалу енергозбереження в електромеханічних системах з АД ускладнюється залежністю від багатьох взаємопов'язаних чинни-

ків, як зовнішніх – несприятливих фінансово-економічних можливостей, відсутності або недосконалої необхідної нормативно-правової бази, недостатньо високого рівня проектування та культури експлуатації, обмеженості мотиваційного фактору, відхилення параметрів якості електричної енергії, невідповідності параметрів АД і навантаження тощо – так і внутрішніх, серед яких головним є ККД як основна характеристика ефективності перетворення енергії у самому двигуні. Більшість із перелічених ускладнюючих факторів даної проблеми проаналізована в наукових джерелах, тому в даній публікації акцент зроблено на комплексі питань, які є недостатньо дослідженими, проблемними або дискусійними безпосередньо відносно АД і вирішення яких сприяло б прогресу у напрямку підвищення енергоефективності й експлуатаційної надійності електромеханічних систем з асинхронними приводами.

Метою публікації є дослідження основних бар'єрів на шляху підвищення енергоефективності сучасного парку АД та можливостей їх усунення на фоні постійно зростаючої вартості електричної енергії з урахуванням існуючих технологій, традицій, організаційно-правових обмежень та техніко-економічних можливостей.

Викладення матеріалу та результати. При загальній характеристиці процесу експлуатації АД в Україні слід відзначити важливий економічний аспект, пов'язаний з високою вартістю електричної енергії, яка до того ж має постійну тенденцію до зростання. В останні 20-30 років у світовому електромашинобудуванні саме фактор вартості електричної енергії став вирішальним при виробництві та експлуатації АД. Так, річна вартість електроенергії при експлуатації загальнопромислового двигуна АІР90L2 (3,0 кВт, 3000 об/хв, $\eta_n = 0,83$) за умови його роботи в номінальному режимі протягом 8 500 годин становить 122 892 грн (за вартості електроенергії 4 грн/кВт-год) при вартості самого двигуна від 2 100 до 6 584 грн. При експлуатації аналогічного двигуна з класом енергоефективності ІЕ3 ($\eta_n = 0,871$) річна економія електроенергії становитиме 5 654 грн. Для більш потужного двигуна АІР355L2 (315 кВт, 3000 об/хв, $\eta_n = 0,954$) при вартості двигуна 445 920 грн річна вартість електроенергії становить приблизно 11,2 млн грн. Експлуатація ж аналогічного двигуна класу ІЕ3 ($\eta_n = 0,96$) забезпечує економію приблизно 70 000 грн. Таким чином, річна вартість споживаної електроенергії в 25-30 разів перевищує вартість самого двигуна, причому цей показник практично не залежить від потужності АД. У той же час термін окупності двигунів малої і середньої потужності суттєво менший, ніж аналогічний показник для потужних двигунів.

Таке співвідношення загальних витрат до сумарної вартості нового двигуна з витратами на його ремонті й обслуговування стало, на відміну від України, ключовим фактором зміни основної концепції в системі розробки та використання АД в розвинених країнах. Якщо за домінуючою в Україні концепцією основною вимогою при модернізації електродвигунів є мінімізація розрахункових витрат, то в США, ЄС та ін. в основі підходу – енергоефективний асинхронний двигун, в якому основний акцент зроблено на підвищення ККД, коефіцієнта потужності та надійності.

Домінуюча роль ККД електродвигунів активно реалізується в розвинених країнах вже протягом останніх двох-трьох десятиліть. Так, в США ще в 1997 році прийнято Акт енергетичної політики щодо енергоефективних двигунів (ЕЕД). У 2007–2008 рр. в ЄС введений стандарт ІЕС 60034-30, який передбачав три стандарти енергоефективності – ІЕ1, ІЕ2, ІЕ3. У 2009 році на основі цього стандарту розроблений стандарт ІЕС 60034-30:2009 з наступною класифікацією ККД: ІЕ1 – «стандартний»; ІЕ2 – «підвищений»; ІЕ3 – «преміум»; ІЕ4 – «супер-преміум» класи ККД. Показники ККД за цими стандартами постійно зростають. Наприклад, енергоефективний АД (ЕЕАД) потужністю 375 кВт класу енергоефективності ІЕ2 має ККД 95 %, а ІЕ3 – 96 % [12].

На сьогодні вже анонсовано рекордний рівень енергоефективності ІЕ5, досягнутий данською фірмою Grundfos, синхронні електродвигуни якої MGE Grundfos потужністю від 0,75 до 11 кВт впроваджуються з 2017 року. Анонсовано зменшення енергоспоживання на 15% [13].

Активній динаміці енергозбереження сприяє енергетична політика країн ЄС з жорсткими вимогами щодо впровадження ЕЕАД. Так, з червня 2011 року заборонені до реалізації на території країн ЄС двигуни, що не відповідають вимогам класу енергоефективності ІЕ2 по стандарту ІЕС 60034-30. А двигуни потужністю 0,75 – 375 кВт, що не відповідають класу ефективності

IE3 або класу ефективності IE2 за умови їх оснащення засобами регулювання швидкості, заборо-
ронені до реалізації з 2017 року.

На перший погляд у цій економічній політиці показники вартості повністю відсутні, але саме сукупність високих енергетичних показників АД та їх надійності гарантують високу енерго-
ефективність і, що надзвичайно важливо в умовах ринкових відносин, конкурентоспромож-
ність. Урахування цього факту повинно стати визначальним при формуванні та реалізації полі-
тики енергозбереження в електромашинобудуванні України.

У цьому контексті позитивною подією в галузі вітчизняної електроенергетики став затвер-
джений постановою КМУ від 27.02.2019, № 157 (набув чинності з 15.09.2019) «Технічний регла-
мент щодо вимог до екодизайну для електродвигунів» (далі Регламент). Згідно з Регламентом
через два роки з дня його чинності «... всі електродвигуни з номінальною потужністю від
0,75 кВт до 375 кВт, за деякими виключеннями, повинні мати номінальний коефіцієнт корисної
дії не нижче рівня IE3 або відповідати рівню IE2 електродвигунів, оснащених регулятором
швидкості». Регламентується також, що для «забезпечення відповідності вимогам до екодизай-
ну для електродвигунів *вимірювання і розрахунки проводяться із застосуванням методик, які
встановлені в національних стандартах...*».

Для ілюстрації «відстані», яку необхідно подолати вітчизняним виробникам та постачаль-
никам АД для приведення їх у відповідність з вимогами Регламенту, в табл. 1 наведені значен-
ня ККД поширених двигунів серії AIP та відповідних альтернативних двигунів класів енергое-
фективності IE2 та IE3. Параметри наведені для режиму роботи S1.

Таблиця 1

Вибіркові дані щодо ККД АД класів енергоефективності IE2, IE3 та АД серії AIP

P _н , кВт	IE2/IE3/AIP			P _н , кВт	IE2/IE3/AIP		
	n, об/хв				n, об/хв		
	3000	1500	1000		3000	1500	1000
0,75	77,4/80,7/75,0	79,6/82,5/73,0	75,9/78,9/69,0	90	94,1/95,0/93,9	94,1/95,0/93,9	94,0/94,9/93,8
1,5	81,3/84,2/78,5	82,8/85,3/78,5	79,8/82,5/76,0	110	94,3/95,2/94,0	94,5/95,4/94,0	94,3/95,1/94,0
3,0	84,6/87,1/82,6	85,5/87,7/82,6	83,3/85,6/81,0	132	94,6/95,4/94,5	94,7/95,6/94,8	94,6/95,4/94,2
5,5	87,0/89,2/85,7	87,7/89,6/85,7	86,0/88,0/84,0	160	94,8/95,6/94,6	94,9/95,8/94,9	94,8/95,6/94,5
11	89,4/91,2/88,4	89,8/91,4/88,4	88,7/90,3/87,5	200	95,0/95,8/94,8	95,1/96,0/94,9	95,0/95,8/94,5
22	91,3/92,7/90,5	91,6/93,0/90,5	90,9/92,2/90,0	250	95,0/95,8/95,2	95,1/96,0/95,2	95,0/95,8/94,5
45	92,9/94,0/92,5	93,1/94,2/92,5	92,7/93,7/92,5	315	95,0/95,8/95,4	95,1/96,0/95,2	95,0/95,8/-
75	93,8/94,7/93,6	94,0/95,0/93,6	93,7/94,6/93,5	375	95,0/95,8/-	95,1/96,0/-	95,0/95,8/-

Хоч і з запізненням на 10-15 років, введення в дію Регламенту повинно позитивно вплину-
ти на формування енергетичної політики України щодо виробництва та присутності на ринку
АД з підвищеною енергоефективністю. Але в часових рамках, встановлених Регламентом для
виходу на енергоефективні показники ККД, повне його виконання було проблематичним навіть
в довоєнні роки. І хоча умови воєнного стану значно ускладнили виконання цієї програм, тим
не менше стає все більш зрозуміло, що чим скоріше проблема підвищення енергоефективності
АД стане однією з пріоритетних енергетичних проблем України, тим краще. Одним із позитив-
них кроків у даному напрямку є перехід до класу ефективності IE3 ТОВ «Еквівес» в Україні
[12].

Як часткове вирішення проблеми деякі фірми надають послуги з модернізації наявних в
експлуатації електродвигунів для підвищення рівня їх енергоефективності. Спектр пропозицій
достатньо широкий, зокрема, забезпечення максимального ККД при заданому навантаженні,
підвищення ККД в режимі часткових навантажень, заходи щодо узгодження параметрів АД і
виконавчого механізму. Певний енергоощадний ефект при модернізації АД досягається шля-
хом збільшення довжини сердечника статора, числа витків у фазі обмотки статора і діаметра
дроту при збереженні заводської геометрії пазів. Досвід ряду країн, у т.ч. України, показав, що
проблеми енергоресурсозбереження в АД значною мірою вирішуються шляхом використання
мідної короткозамкнутої обмотки ротора замість литої алюмінієвої. Зокрема, в [14] підтвер-
джено збільшення потужності в 1,3–1,7 раза, ККД – на 1,5–3,0 %, перевантажувальної здатності
– в 1,4–1,7 раза і показників надійності – в 1,5–2,5 раза без зміни *установочно-
прислужувальних розмірів*.

Стримуючим фактором підвищення енергоефективності АД є відсутність адаптованої до
сучасних умов політики формування вторинного ринку. Значна частина парку АД в Україні має

вік 10-20 років і більше. Практично всі вони проходили неодноразові (часто недостатньо якісні) ремонти, наслідком яких було погіршення їх енергетичних показників і надійності. Обсяг відремонтованих АД на цьому ринку коливається в межах 6-8 % і його наповнення залежить в основному від двох факторів: якості виконання ремонтних робіт і прийнятої концепції формування вторинного ринку. Експлуатація таких систем вимагає значних фінансових витрат на підтримку їх працездатності, питання ж енергоефективності нерідко є вторинним. На сьогодні існують різні погляди щодо критеріїв визначення доцільних термінів експлуатації АД, крайніми з яких є: відмовив двигун – купи новий (за принципом «скупий платить двічі») і протилежний: відмовив – ремонтуй за будь-яких умов, без жорстких гарантій і вимог до ремонтної організації (поширений в Україні). Проміжна і, мабуть, найбільш раціональна система впроваджується в США, де з середини 2014 р. розгорнута пілотна програма щодо якісного ремонту АД з гарантованим підвищенням їх енергоефективності протягом всього періоду експлуатації. Програма передбачає за 10 років таку модернізацію АД сумарною потужністю біля 6000 ГВт. Цей ефект буде досягнуто за рахунок підвищення ефективності перемотки обмоток статорів АД (допускається можливість декількох перемоток). Проведено заходи з вибору та сертифікації сервісних центрів, впроваджуються системи фінансового заохочення та гарантування якості ремонтів.

Проблема економічно обґрунтованої політики формування вторинного ринку АД тісно пов'язана з питанням тривалості життєвого циклу двигунів і організації ефективної діагностики його параметрів і робочого стану. Ця проблематика є одним з найбільш активних напрямів дослідження АД (див, зокрема, [3-10]). Але швидке і невпинне зростання вартості електричної енергії вимагає більш конкретного цільового спрямування цих, без сумніву, важливих робіт. По-перше, впровадження систем моніторингу і діагностики не може бути масовим, особливо в умовах працюючих АД. З іншого боку, може бути різною і мотивація впровадження таких систем – ідентифікація параметрів, оперативне реагування на їх погіршення, оцінка ефективності перетворення енергії в електродвигуні, своєчасне виявлення передаварійного стану і т.і. Але тут очевидна присутність своєрідного «конфлікту інтересів» між зменшенням потенційних відмов шляхом запровадження ефективних систем моніторингу та діагностування і формування динамічного (прив'язаного до поточної вартості електричної енергії) прогнозованого на невелику перспективу висновку щодо недоцільності подальшого використання працюючого електродвигуна.

Важливим кроком на шляху підвищення енергоефективності АД є визначення реального завантаження двигунів в умовах експлуатації. Оскільки більшість приводних АД мають завищену номінальну потужність, їх енергетичні показники АД можуть на 5-7 % і більше відрізнятися від номінальних або декларованих. При цьому суттєво збільшується також споживання реактивної енергії, яке навіть при оптимальному навантаженні перевищує 50 % від активної. Негативно відбиваються на споживанні реактивної енергії і неякісні ремонти та ін.

Проблема надійного визначення реального завантаження двигунів ускладнюється тим, що коефіцієнт навантаження k_n є відношенням потужностей P_2 і $P_{2н}$, більш-менш достовірні значення яких в умовах експлуатації, як правило, відсутні. Щодо реальної потужності P_2 на валу двигуна, то регламентовані стандартами методи її вимірювання практично неможливо використати при масовому енергетичному обстеженні. Номінальна ж потужність $P_{2н}$ достовірно відома лише для АД з невеликим ресурсом роботи при забезпеченні нормативних умов експлуатації. Тому завдання визначення номінальної потужності $P_{2н}$ після неодноразових ремонтів є одним з базових питань теорії і практики електричних двигунів, яке на сьогодні не має загальноприйнятого рішення. Така ситуація може привести до хибних висновків. Наприклад, якщо два двигуни працювали з $k_{n1} = 0,45$ і $k_{n2} = 0,75$, а якісні дослідження показали зменшення $P_{2н}$ на 30 % (що цілком можливо), то нові значення коефіцієнтів навантаження $k'_{n1} = 0,45/0,7 = 0,63$ і $k'_{n2} = 0,75/0,7 > 1$. Тобто, оцінка реального завантаження двигунів радикально змінилася: якщо до паспортизації перший двигун підлягав заміні як недовантажений, а другий розглядався як оптимально навантажений, то після уточнення номінальної потужності вже підлягав заміні другий двигун, а перший наблизився до зони оптимального навантаження.

Технічно складна задача надійного визначення потужності на валу двигуна в умовах експлуатації найбільш точно і ефективно вирішується шляхом безпосереднього виміру моменту на валу. В останні десятиліття успіхи інтегральної електроніки забезпечили появу на зовнішніх

ринках великого спектру датчиків крутного моменту з високими технічними параметрами та функціональними можливостями. На сьогодні провідні позиції займають тензорезисторні датчики крутного моменту. Великий спектр високоточних датчиків у широкому діапазоні зміни крутного моменту пропонують фірми Lorenz Messtechnik GmbH, НВМ (ФРН), Magtrol (США), Datum Electronics (Великобританія) та ін. [15]. Але, на жаль, висока вартість цих пристроїв є суттєвою перешкодою на шляху їх широкого впровадження.

Одним із новітніх і перспективних напрямків вимірювання крутного моменту є використання поверхневих акустичних хвиль (ПАХ). Цей науковий напрямок значно активізувався останнім часом в автомобілебудуванні. У виробництво і використання цих пристроїв включилися такі потужні корпорації як Honeywell, Michelin, Texas Instruments, Sensor Technology [16] та ін.

В останні роки активізувалися також пропозиції щодо оптичних та індуктивних інкодерів, які можуть стати альтернативою розглянутим вище датчикам. Зокрема, великий спектр індуктивних інкодерів Zettlex пропонує американська фірма Celera Motion [17].

Висновки та напрямок подальших досліджень. Недостатньо високі енергетичні показники короткозамкнених асинхронних двигунів обумовлюють великий і практично не реалізований потенціал енергозбереження в Україні.

Основними бар'єрами на шляху підвищення енергоефективності парку АД є відсутність жорсткої державної політики щодо використання енергоефективних двигунів, недостатнє використання модернізації як часткового вирішення проблеми шляхом якісних ремонтів з гарантованим рівнем енергоефективності, відсутність адаптованої до сучасних умов політики формування вторинного ринку та пов'язаних з цим методів визначення життєвого циклу, неможливість організації постійного моніторингу реального навантаження двигунів в умовах експлуатації, недосконалість нормативно-правового забезпечення та ін.

Невпинне зростання вартості електричної енергії гостро ставить питання зміни традиційних підходів до проблеми проектування та експлуатації АД, зокрема в частині надійного техніко-економічного обґрунтування доцільності їх використання в конкретних умовах експлуатації на основі базового критерія – максимуму ефективності перетворення енергії (ККД).

Напрямки подальших досліджень повинні бути спрямовані на усунення або пом'якшення зазначених вище бар'єрів на шляху підвищення енергоефективності парку АД. Адже відсутність чітких і однозначних рішень з комплексу зазначених питань створює умови, при яких і без того недостатньо високі у порівнянні з кращими закордонними аналогами енергетичні показники АД в дійсності можуть бути значно нижчими від декларованих і, як правило, невідомими.

Список літератури

1. Толмачов С. Т. Система безконтактного виміру моменту на валу електродвигунів в умовах експлуатації / С. Т. Толмачов, І. М. Бурчак // Вісн. Кривор. нац. універ. Зб. наук. праць. – 2017. – Вип. 44. – С. 131–137.
2. Калинов А. П. Метод косвенного определения мощности на валу асинхронного двигателя / А. П. Калинов, В. А. Огарь, В. В. Лотоус // Вісник НТУ «ХП», 2017. 27(1249). С. 401–405.
3. Закладний О. М. Універсальний діагностувальний комплекс для прискорених випробувань електродвигунів / О. М. Закладний, О. О. Закладний // Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро. – 2007. – №4. – С. 35–39.
4. Кучерук В. Ю. Елементи теорії побудови систем технічного діагностування електромоторів. Монографія / В. Ю. Кучерук // – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2003. – 195 с.
5. Чорний О. П., Курбанова І. Г. Комп'ютеризовані комплекси для діагностики машин // ЕЛЕКТРОінформ. – 2004. – №1. – С. 19–22.
6. Калинов А. П. Системи діагностики, моніторингу та керування ресурсом роботи електромеханічних комплексів на основі показників якості перетворення енергії. Підсумки роботи і перспективи розвитку наукового напрямку / А. П. Калинов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Науково-виробн. журнал. – 2009. – №3. – С. 22 – 30.
7. Закладний О. О. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем: Монографія / О. О. Закладний // – К.: Видавництво «Лібра». – 2013. – 195 с.
8. Праховник А. В. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами / А. В. Праховник, О. М. Закладний, О. О. Закладний // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2011. – № 1. С. 66–72.
9. Закладний О. О. Програмне забезпечення функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами / О. О. Закладний, О. М. Закладний // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2011. – № 2. С. 102–108.
10. Закладний О. М. Технічні засоби функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем / О. М. Закладний, О. О. Закладний, В. М. Пермяков // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2012. – № 1. С. 47–54.

11. Лут М. Т. Зниження втрат енергії в асинхронних електроприводах / М. Т. Лут, О. Ю. Синявський / Енергетика і автоматика // –2013. – № 3. С. 144–149.
12. Енергоэффективные электродвигатели IE3, IE4. https://ledermann.com.ua/?utm_source=google&utm
13. Электродвигатели Grundfos стандарта IE5. <https://planetaklimata.com.ua/news/?sect=25&msg...0>
14. Чувашев В.А. Энергоэффективные асинхронные двигатели / В.А. Чувашев, Ю.Н. Папазов, А.А. Велков // Вісник СевДТУ. Вип. 88: Механіка, енергетика, екологія: зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во Сев-НТУ. – 2008. – С. 92 – 96.
15. MCS10 Multi-Axis Sensor: Measures 6 Forces and Moments with Accuracy Class 0.1 Guaranteed for Each Channel. – Режим доступу: <https://www.hbm.com/en/5626/multi-axis-sensor-mcs10/>
16. Kalinin V., Beckley J. Wireless Interrogation of SAW Strain Sensors for Automotive Applications Using TMS320C28x Controller. – TI Developer Conference, Dallas, 2006. – Режим доступу: <http://www.transense.co.uk/downloads/articles/TIDC.pdf>
17. Индуктивные кодеры Zettlex. – Режим доступу: <https://www.celeramotion.com/zettlex/>

Рукопис подано до редакції 18.04.2023

УДК 550.834

А. О. РОМАНЕНКО, канд. техн. наук, маркшейдер кар'єру,
ПРАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат»
В.Д. СИДОРЕНКО, д-р техн. наук, проф.,
Криворізький національний університет

ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПО СЕЙСМІЧНИХ СИГНАЛАХ ТА ВИЯВЛЕННЯ МІКРОРУЙНУВАНЬ МАСИВУ ГЛЕЮВАТСЬКОГО КАР'ЄРУ

Метою досліджень є визначення оптимальних частотних діапазонів та чутливості сейсмодатчиків, що необхідні для виконання замірів фізичних параметрів стану гірського масиву та провести дослідження, спрямовані на виділення мікросейсмічних подій в межах досліджуваної ділянки. У статті розглядаються напрямки напрацювань відомих українських вчених в галузі сейсмічного контролю стану масиву та звукометричних методів для визначення фізико-механічних властивостей гірських порід, що займалися питаннями мікросейсмічного та розглядається можливість визначення щільності та пружності гірських порід за допомогою аналізу мікросейсмічних сигналів.

Методи використовувались при виконанні досліджень наступні: для збору і аналізу звукової інформації та вивчення стану та характеристик гірничого масиву використано методи акустичної емісії, що полягає в зборі звукових сигналів, які виникають в результаті деформації гірничого масиву; сейсмічні методи, які використовують збір звукових сигналів, що виникають в результаті сейсмічних подій, таких як землетруси, для вивчення структури та характеристик гірничого масиву; метод зондування (розміщення зонду в межах ділянки дослідження), для збору звукових сигналів, які виникають у гірничому масиві, що дозволяє вивчати структуру та характеристики гірничого масиву.

Наукова новизна статті полягає у виборі оптимальних технічних параметрів для сейсмодатчиків та визначенні частотних діапазонів для проведення досліджень в Глеюватському кар'єрі. Розробка алгоритму ідентифікації явищ та параметрів вибірки технологічних процесів дає можливість оцінювати напружено-деформований стан гірського масиву.

Практичне значення отриманих результатів полягає в отриманні оптимальних параметрів технічного обладнання для мікросейсмічного контролю гірських порід в кар'єрах, що дозволяє підвищити ефективність виробництва та зменшити ризик аварій через оцінку напружено-деформованого стану гірського масиву.

Результати по статті включає: визначені оптимальні параметри сейсмодатчиків та частотний діапазон для досліджень сейсмічних подій в Глеюватському кар'єрі, а також плани щодо детальної класифікації явищ та розроблення алгоритму їх ідентифікації.

Ключові слова: звукометрія, кар'єр, сейсміка, явища, мікросейсми, сейсмореєстратор, гірські породи.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Вивчення фізико-механічних властивостей гірських порід та їх змін у процесі експлуатації кар'єрів та рудників є важливим завданням в гірничій промисловості. Один із способів вивчення цих властивостей полягає у використанні сейсмічних методів, які дозволяють отримувати інформацію про структуру та механічні властивості гірських порід шляхом аналізу сейсмічних сигналів.

У даній статті розглядається проведення досліджень з визначення фізико-механічних властивостей гірських порід на прикладі масиву Глеюватського кар'єру. В результаті досліджень