

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО ВИПУСКНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

за освітньо-професійною програмою
«Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв»

ТЕМА РОБОТИ:

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ НАПРЯМКІВ
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Виконав: магістр групи ЕМО-23м _____ Вікторія ЗАДИРАКА
Керівник випускної роботи _____ Олександр ІЛЬЧЕНКО
Завідувач кафедри _____ Станіслав ТОЛМАЧОВ

Кривий Ріг
2024 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЯК КЛЮЧОВА ПРОБЛЕМА ВІТЧИЗНЯНОЇ ЕКОНОМІКИ	9
1.1 Роль і місце асинхронних електродвигунів у світовій електроенергетиці та економіці	10
1.2 Світові тенденції та досягнення в розробці та використанні електроприводів з АД	12
1.3 Енергетична політика країн ЄС щодо розробки та впровадження енергоефективних АД	17
1.4 Приклади енергоефективних рішень світових виробників АД	20

					<i>КНУ.РМ.141.24.268с.05.3</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Задирака В.С.</i>			ЗМІСТ	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркуші</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Ільченко О.В.</i>					5	1
<i>Реценз.</i>						<i>ЕМ гр. ЕМО-23м</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Титюк В.К.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Толмачов С.Т.</i>						

РЕФЕРАТ

56 стор., 14 рис., 9 табл., 33 літ. джерел.

Об'єкт дослідження – процеси, що відбуваються в асинхронних двигунах та сприяють підвищенню їх енергоефективності.

Предмет дослідження – енергетичні характеристики асинхронних двигунів з оцінкою термінів окупності при впровадженні електродвигунів більш високих класів енергоефективності.

Мета кваліфікаційної магістерської роботи – дослідження заміни працюючих асинхронних двигунів на АД з класами енергоефективності IE2, IE3, IE4 та оцінка техніко-економічних показників при постійно зростаючій вартості електричної енергії.

Наукова новизна полягає в установленні потенційних факторів, що сприяють заміні асинхронних двигунів серії АІР, які використовуються в електроприводах підприємств України, на двигуни класів енергоефективності IE2, IE3 та IE4 з оцінкою збільшення ККД та термінів окупності такого впровадження; оцінка відповідності параметрів електродвигуна з урахування навантаження АД.

Галузь застосування – електромашинобудівна галузь України.

Отримані результати: на основі проведеного аналізу встановлені бір'єри на шляху проектування і експлуатації АД та можливості їх усунення; встановлено, що при проектуванні і експлуатації АД слід враховувати, що за статистичними даними доля вартості електроенергії в загальних витратах за життєвий цикл для найбільш поширених двигунів може становити більше 90%; оцінка термінів окупності заміни двигунів класів енергоефективності IE2, IE3 та IE4.

АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, КЛАСИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ, ТЕХНІЧНІ
ХАРАКТЕРИСТИКИ, СТАТИСТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, КОЕФІЦІЄНТИ
КОРИСНОЇ ДІЇ І НАВАНТАЖЕННЯ, ТЕРМІН ОКУПНОСТІ

					<i>КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Задирака В.С.</i>			РЕФЕРАТ	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркуші</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Ільченко О.В.</i>					4	1
<i>Реценз.</i>						<i>ЕМ гр. ЕМО-23м</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Титюк В.К.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Толмачов С.Т.</i>						

ВСТУП

Асинхронні електродвигуни (АД) широко використовуються у світовій номенклатурі та складають біля 90 % від усіх використаних двигунів. Такі показники щодо використання АД (з короткозамкненим ротором) пояснюються простою конструкцією (статор, ротор), надійністю роботи та низькою вартістю. Якщо аналізувати енергетичні показники (ККД, $\cos \varphi$) АД загальнопромислового використання, які виготовлені на українських підприємствах, а це двигуни малої та середньої потужностей, то вони не є достатньо високі. Також енергетичні характеристики можуть ще зменшуватись при недовантаженні АД, проведенні неякісних ремонтних робіт, зниженні якості електроенергії (ЕЕ) тощо. Тому питання підвищення енергоефективності асинхронних двигунів різної лінійки потужності є надзвичайно актуальною для України, її промисловості.

Враховуючи довоєнні показники, такі як річне виробництво ЕЕ в Україні складало 160 млрд кВт·год, а споживання ЕЕ парком асинхронних двигунів - близько 60 млрд кВт·год., то підвищення ККД АД всього на 1% при теперішній середній вартості 1 кВт·год для промисловості 7,0 грн, економія за рік складає 3,5 млрд грн.

Сучасний парк асинхронних короткозамкнених двигунів в Україні складається із АД загальнопромислового використання серій АІР, АД, АДТ, 4А, 5А, 6А, АМУ, ІЕС АО, ВАО, АІМ, АІУМ, ВА, ВР та ін. – всього біля 30 млн од [1]. За потужністю: АД малої потужності (1-5 кВт) – 60 %, середньої (до 20 кВт) – 20 %, потужні (20-100 кВт) – 7 %, надпотужні (більше 100 кВт) – 1 % [1]. Номінальні енергетичні показники (серія 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) %, $\cos \varphi = (0,91-0,92)$ [1].

					<i>КНУ.РМ.141.24.268с.05.В</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Задирака В.С.</i>			<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Ільченко О.В.</i>				6	3
<i>Реценз.</i>					ВСТУП <i>ЕМ гр. ЕМО-23м</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Титюк В.К.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Толмачов С.Т.</i>					

З аналізу літературних джерел зрозуміло, що асинхронні двигуни потужністю від 1 кВт до 5 кВт мають низький ККД та споживають до 40 % ЕЕ. Важливо пам'ятати, що половина усього парку АД використовують в якості приводних двигунів для вентиляторів (біля 32 %) та насосів (біля 16 %). Підвищення енергозбереження для таких установок здійснюється за рахунок впровадження регульованого електропривода, але на практиці впровадження керованого електроприводу можна оцінити на рівні 10-12%.

Експлуатацію парку АД в Україні можна охарактеризувати таким чином:

- середній термін служби не перевищує 6-7 років;
- від 10 % до 50 % потребують регулярного (щороку) ремонту;
- післяремонтні енергетичні показники у середньому зменшуються на 3-4 %;
- середнє навантаження на рівні 30-40 %, у Європі – 60 %;
- моніторинг і діагностика енергетичних характеристик та технічного стану не використовуються широко;
- післяремонтна паспортизація має обмежений перелік характеристик.

Ця інформація свідчить про актуальність вирішення проблем виробництва і експлуатації асинхронних двигунів та в цілому підвищить енергоефективність промислових підприємств в Україні.

Розгляду цих питань присвячена дана магістерська робота за темою: «Дослідження основних напрямків підвищення енергетичних параметрів асинхронних двигунів».

Об'єкт дослідження – процеси, що відбуваються в асинхронних двигунах та сприяють підвищенню їх енергоефективності.

Предмет дослідження – енергетичні характеристики асинхронних двигунів з оцінкою термінів окупності при впровадженні електродвигунів більш високих класів енергоефективності.

Мета роботи – дослідження заміни працюючих асинхронних двигунів на АД з класами енергоефективності ІЕ2, ІЕ3, ІЕ4 та оцінка техніко-економічних показників при постійно зростаючій вартості електричної енергії.

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.В	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для вирішення поставленої мети були вирішені наступні задачі: оцінити місце АД у світовій та українській електроенергетиці; проаналізувати досягнення в розробці та використанні електроприводів з АД у світі та Україні; ознайомитися з енергетичною політикою різних країн щодо впровадження енергоефективних АД; оцінити економічне обґрунтування заміни вітчизняних АД сучасними енергоефективними двигунами; проаналізувати шляхи модернізації АД загальнопромислового використання; оцінити відповідність параметрів асинхронного двигуна і його навантаження; виконати огляд сучасних методів визначення моменту на валу електричних двигунів.

Галузь використання – електромашинобудівна галузь України.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в установленні потенційних факторів, що сприяють заміні асинхронних двигунів серії АІР, які використовуються в електроприводах підприємств України, на двигуни класів енергоефективності ІЕ2, ІЕ3 та ІЕ4 з оцінкою збільшення ККД та термінів окупності такого впровадження; оцінка відповідності параметрів електродвигуна з урахування навантаження АД.

Практичне значення: на основі проведеного аналізу встановлені бір'єри на шляху проектування і експлуатації АД та можливості їх усунення; встановлено, що при проектуванні і експлуатації АД слід враховувати, що за статистичними даними доля вартості електроенергії в загальних витратах за життєвий цикл для найбільш поширених двигунів може становити більше 90%; оцінка термінів окупності заміни двигунів класів енергоефективності ІЕ2, ІЕ3 та ІЕ4.

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.В	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЯК КЛЮЧОВА ПРОБЛЕМА ВІТЧИЗНЯНОЇ ЕКОНОМІКИ

1.1 Роль і місце асинхронних електродвигунів у світовій електроенергетиці та економіці.

Системи електропривода є основними споживачами електричної енергії у світовому вимірі (за різними оцінками їх доля в загальному електроспоживанні становить від 75 до 85 % [2, 3]). Як в системах електропривода, так і при автономному використанні в різних сферах людської діяльності унікальну роль відіграють асинхронні двигуни (АД), в першу чергу короткозамкнені. Простота їх конструкції та надійність при відносно низькій вартості стали основними факторами домінування АД у світовій номенклатурі (біля 90 %), і як наслідок, забезпечили короткозамкненим АД глобальну першість за електроспоживанням біля 50 % світового виробництва електричної енергії. Асинхронні двигуни майже не потребують технічного обслуговування або вимагають його мінімуму через відсутність контактних кілець, втулок і щіток, що є одним із ключових факторів збільшення попиту на них.

Для підтвердження наведемо деякі дані з огляду ринку асинхронних двигунів. За оцінками, світовий ринок асинхронних двигунів досягне 20,83 мільярда доларів США у 2024 році та зросте до 28,04 мільярда доларів США до 2029 року, тобто середньорічний темп зростання попиту у цей період складе 6,12 % [3].

Підвищений попит на електроенергію для підтримки глобального розвитку потребує значних інвестицій у виробництво АД, що призвело до широкого їх використання в енергетичному секторі. Тенденції ринку АД на найближчі десятиліття прогнозують значне зростання промислового використання АД.

Асинхронні двигуни сьогодні широко застосовуються в багатьох промислових процесах, що мають ключове значення для підвищення продуктивності підприємств. Сучасні виробничі компанії прагнуть максимізувати ефективність своїх процесів. Завдяки економічності, надійності, мінімальній потребі в технічному обслуговуванні та здатності працювати в

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р1	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

різних умовах, ці двигуни все частіше використовуються в таких галузях, як гірничодобувна, цементна, автомобільна, нафтогазова, медична та обробна промисловість. Асинхронні двигуни застосовуються в насосах, ліфтах, підйомниках, електробритвах, кранах, дробарках, нафтовидобувному обладнанні тощо.

Позитивно вплинув на розвиток промислового сектору та зростання попиту на асинхронні двигуни процес урбанізації за останні роки. Згідно з даними Світового банку, в містах проживає 57 % населення світу. Це зростання спричинило підвищений попит на ресурси для будівництва об'єктів роздрібною торгівлі, комерційного та житлового призначення.

Ключовим фактором розвитку АД є обробна промисловість, оскільки їх використовують у намотувальних машинах, насосах печах, конвеєрах, аеродинамічних трубах та іншому промислового обладнанні. З огляду на зростання в цьому секторі прогнозується також подальше зростання попиту на АД. Так, за даними ООН з промислового розвитку (ЮНІДО), у першому кварталі 2022 року світове виробництво в обробній промисловості зросло на 4,2% порівняно з попереднім роком [3].

Слід зазначити, що постійно зростаючий попит на використання АД відбувався на фоні загострення енергетичної проблеми, зокрема постійного зростання вартості електричної енергії. Світова енергетична криза 70-х років минулого століття гостро поставила питання щодо пошуку шляхів підвищення енергоефективності в усіх сферах суспільного виробництва. І це в першу чергу відбилося на асинхронних двигунах як основних споживачах електричної енергії. Одним з перших кроків у цьому напрямку став прийнятий у США ще в 1997 році Акт енергетичної політики щодо енергоефективних електродвигунів (ЕЕД). Через 10 років аналогічну політику стали проводити країни ЄС та інших промислово розвинених країн. Основні зусилля були спрямовані на підвищення енергетичних параметрів АД (ККД і $\cos\phi$), з якими на той час був пов'язаний найбільший потенціал енергозбереження. Розвиток науки і технологій дозволив започаткувати процес модернізації та оптимізація систем електродвигунів, у

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р1	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

першу чергу АД, що відкривало значні можливості для економії енергії та зниження експлуатаційних витрат на промислових об'єктах та в житловому секторі. Так, за даними Міністерства енергетики США приблизно половина всієї електроенергії, що споживається в країні, використовується двигунами, з яких 90% є АД. Дослідження показало, що підвищення ефективності цих двигунів на 5% може заощадити обсяг енергії, порівнянний з виробництвом нової електростанції потужністю кілька сотень мегават.

Паралельно з модернізацією класичних типів АД загальнопромислового використання у відповідь на зростаючий попит на них деякі постачальники АД фокусуються на розробці нових моделей з інноваційними функціями для задоволення різних промислових потреб. Очікується, що такі тенденції сприятимуть подальшому зростанню ринку асинхронних двигунів у найближчі роки.

1.2 Світові тенденції та досягнення в розробці та використанні електроприводів з АД.

Основні зусилля розвинених країн світу в останні двадцять-тридцять років спрямовані на підвищення енергетичних параметрів електроприводів на базі короткозамкнених АД. Започатковано цей процес було у 1997 р. в Сполучених Штатах Америки прийняттям документу під назвою «Акт енергетичної політики щодо енергоефективних двигунів (ЕЕД)». Прогрес у цьому питанні в США стимулював увагу до нього в багатьох країнах світу. Основні інвестиції були спрямовані у галузь низьковольтних АД.

Проведемо аналіз обсягу та ринкової частки низьковольтних асинхронних двигунів у Північній Америці, а також розглянемо тенденції зростання і прогнози на 2024-2029 роки. Ринок поділяється за типом двигунів (однофазні та поліфазні), а також за галузями кінцевого споживання, такими як металургія і гірничодобувна промисловість, нафтогазова, хімічна та нафтохімічна промисловість, водопостачання та водовідведення, дискретні виробництва, енергетика, харчова промисловість. Географічно ринок охоплює США, Канаду

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

та Мексику. У звіті наведені обсяги ринку у вартісному вираженні в доларах США для всіх зазначених сегментів [3] (див. рис. 1.1).

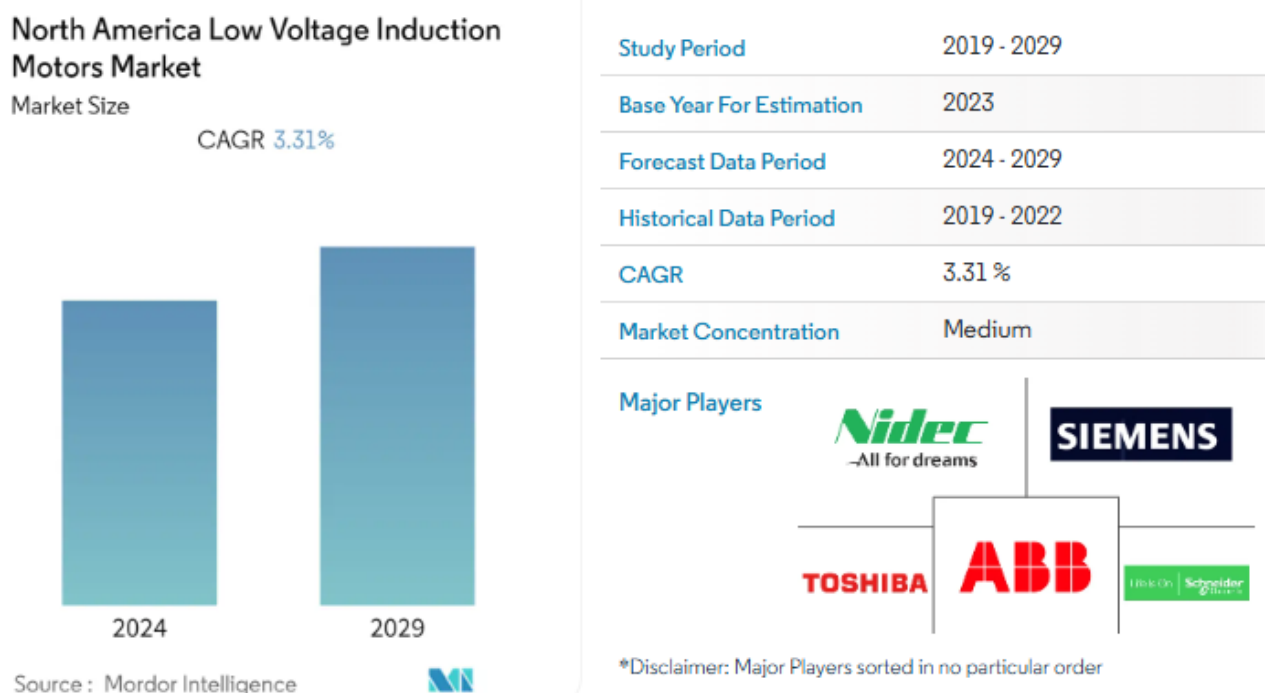


Рисунок 1.1 – Об'єм ринку низьковольтних асинхронних двигунів у Північній Америці [3]

Минулого року ринок низьковольтних асинхронних двигунів у Північній Америці був оцінений у 3,87 мільярда доларів США та очікується, що середньорічний темп зростання ринку складе 3,31%, і до кінця прогнозованого періоду досягне 4,58 мільярда доларів США [3].

Асинхронні двигуни займають ключове місце в промислових виробничих системах та в популярній *Індустрії 4.0*, яка є стимулом для розвитку АД. Підвищення ефективності промисловості Північної Америки пов'язане з впровадженням автоматизації виробничих процесів і буде в найближчі роки зростати [3]. За звітом компанії *ABB Ltd* "The Future is Energy Efficient" («Майбутнє за енергоефективністю») очікується, що споживання енергії до 2050 року збільшиться на 50 %, при цьому електродвигуни споживають близько 70 % усієї ЕЕ, яку використовує промисловість в понад 300 мільйонах промислових електроприводах [3].

У впровадженні автоматизованих електроприводів на базі АД, впровадженні більш енергоефективних електродвигунів є також екологічний аспект. Системи з використанням енергоефективних електродвигунів сприяють зниженню викидів CO₂ та мінімізують відходи і відповідні державні інвестиції стимулюють це питання, т.я. вони мають критичне значення для багатьох галузей промисловості (енергетика, нафтогазова, гірничодобувна та харчова промисловості). Це стосується і керування не тільки основними виробничими процесами, а й допоміжними системами, що включають перекачування води, стиснення повітря та вентиляцію.

Продовжується зростання цін на мідь, алюміній та мідний дріт, яке підвищить собівартість електротехнічної продукції та призведе до подорожчання статорів та роторів АД.

Збільшиться попит на асинхронні двигуни і у Мексиці: згідно з політикою уряду Мексики по скороченню викидів шляхом збільшення виробництва електроенергії з водних ресурсів збільшуться потужності гідроелектростанцій.

Збільшиться використання низьковольтних АД у нафтогазовій промисловості. Це пояснюється їх застосуванням у видобутку, переробці та транспортуванні нафти й газу, у електроприводах насосів, компресорів, турбін та отриманні кінцевих продуктів - бензину, дизельного пального, авіагасу та інших.

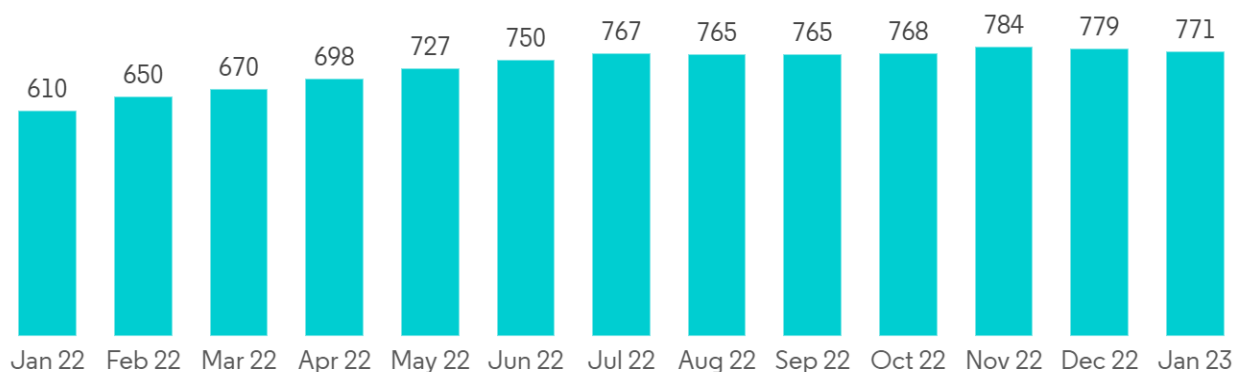
Згідно з [3] Сполучені Штати є найбільшим виробником нафти та природного газу у світі (рис. 1.2). Згідно з технологічними процесами, які здійснюються у нафтогазовій промисловості низьковольтні АД використовують у приводах:

- бурових установок та додаткового обладнання;
- насосів, які переміщують рідини через ректифікаційні колони або установки каталітичного крекінгу;
- компресорів, які підвищують тиск газів для подальшої обробки або розділення;

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р1	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- різноманітних змішувачів, де змішуються рідини (тверді речовини) для роботи реакторів й резервуарів.

Number of Oil and Gas Rigs In Operation, United States, January 2022 - January 2023



Source: Baker Hughes



Рисунок 1.2 – Виробництво нафти в США [3]

Енерговитрати становлять 96 % загальної вартості життєвого циклу двигуна, тому додаткові інвестиції в двигуни з більш вищою енергоефективністю забезпечать окупність протягом усього їх терміну служби.

Лідерами на ринку низьковольтних АД у Північній Америці є: Nidec Corporation, ABB Ltd, Siemens AG, Toshiba Industrial Corporation (Toshiba Corporation), Shanghai Electrical Machinery Group Co. Ltd (Shanghai Electric) (див. рис. 1.3). Стратегії цих компаній можна представити у вигляді даних, які зведені до табл. 1.1.

Щодо сегментації галузі низьковольтних асинхронних двигунів у Північній Америці [3]:

1) Галузь: металургійна промисловість, гірничодобувна промисловість, нафтова та газова промисловість, хімічна та нафтохімічна промисловість, водопостачання та водовідведення, дискретні галузі, виробництво електроенергії).

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р1	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

North America Low Voltage Induction Motors Market Leaders

- 1 Nidec Corporation
- 2 ABB Ltd
- 3 Siemens AG
- 4 Toshiba Industrial Corporation
(Toshiba Corporation)
- 5 Shanghai Electrical Machinery Group
Co. Ltd (Shanghai Electric)

Market Concentration

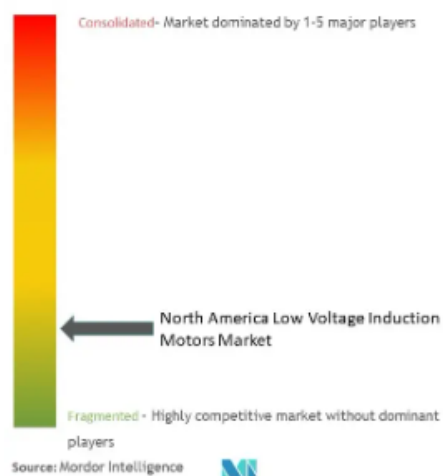


Рисунок 1.3 – Ринок низьковольтних асинхронних двигунів у
Північній Америці [3]

Таблиця 1.1 - Стратегії провідних компаній щодо ринку низьковольтних АД

Провідна компанія	Терміни	Стратегії розвитку напрямку АД
ABB	травень 2023 р.	Інвестиція \approx 170 млн доларів у виробництво, інновацію та дистрибуцію. Мета: задоволення зростаючого попиту на продукти в сфері електрифікації та автоматизації, підтримка сучасних тенденцій переходу на чисту енергію та рещорингу (повернення до країни виробництва, що раніше було перенесене в країни з дешевшою робочою силою).
Siemens	листопад 2022 р.	Намір відокремити бізнес з виробництва двигунів і приводів в окрему організацію. Нова компанія – це 5-ть існуючих підрозділів: Siemens Large Drives, Sykatec, Weiss Spindeltechnologies, підрозділи низьковольтних двигунів і мотор-редукторів від Siemens Digital Industries.

2) Низьковольтні АД - це двигуни з короткозамкненим ротором, які мають потужність $P_n = 0,06 \text{ кВт} \dots 1 \text{ 250 кВт}$.

3) Працюють при напрузі $U_n = 200 \text{ В} \dots 690 \text{ В}$.

4) Мають кілька фіксованих швидкостейи обертання та можуть бути оснащені опціональними механічними редукторами для безперервного зниження швидкості.

5) Однофазні та багатофазні.

Прогнозується, що середньорічний темп зростання ринку низьковольтних АД у Північній Америці досягне 3,31 % у період з 2024 по 2029 рік.

1.3 Енергетична політика країн ЄС щодо розробки та впровадження енергоефективних АД.

З 2008 року країни ЄС активно проводять політику підвищення енергоефективності АД і досягли в цьому питанні значних успіхів. Енергоефективним є двигун, у якому із застосуванням системного підходу при проектуванні, виготовленні та експлуатації підвищено ККД, коефіцієнт потужності та надійність. Основний акцент зроблено на підвищенні ККД АД.

Енергоефективні АД з короткозамкненим ротором відрізняються від загальнопромислових двигунів підвищеним ККД до 8 пунктів (залежно від потужності та базового рівня двигуна), що знижує енергоспоживання при аналогічній потужності. Підвищений рівень енергоефективності досягається зниженням електричних та механічних втрат у двигуні на 20 % й більше в порівнянні з втратами двигунів, наприклад серії АІР.

Енергоефективні двигуни мають переваги [2]:

- низький перегрів обмоток – $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ (загальнопромисловий АД $t = 85 \text{ }^\circ\text{C}$) та підшипників, що майже у 2 рази збільшує ресурс роботи без ремонту (з 16000 годин до 30 000 годин), надійність при роботі та зменшує кількість відмов;

- вищий ККД у режимі часткових навантажень (до 11 пунктів);

- можлива експлуатація при потужності, яка вище за номінальну при більш високому ККД.

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р1	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На сьогодні впроваджено міжнародний стандарт енергоефективності ІЕС60034-30, в якому виділено 4 класи [4, 5]:

ІЕ1 (аналог EFF2) – стандартний (Standart), ККД – 72,1-94 %;

ІЕ2 (аналог EFF1) – високий (High), ККД – 79,6-95,1 %;

ІЕ3 – підвищений (Premium), ККД – 82,5-96 %;

ІЕ4 – надвисокий (Super Premium), ККД – 85,7-96,7 %.

Результати політики в області підвищення енергоефективності АД візуально відтворені на рис. 1.4

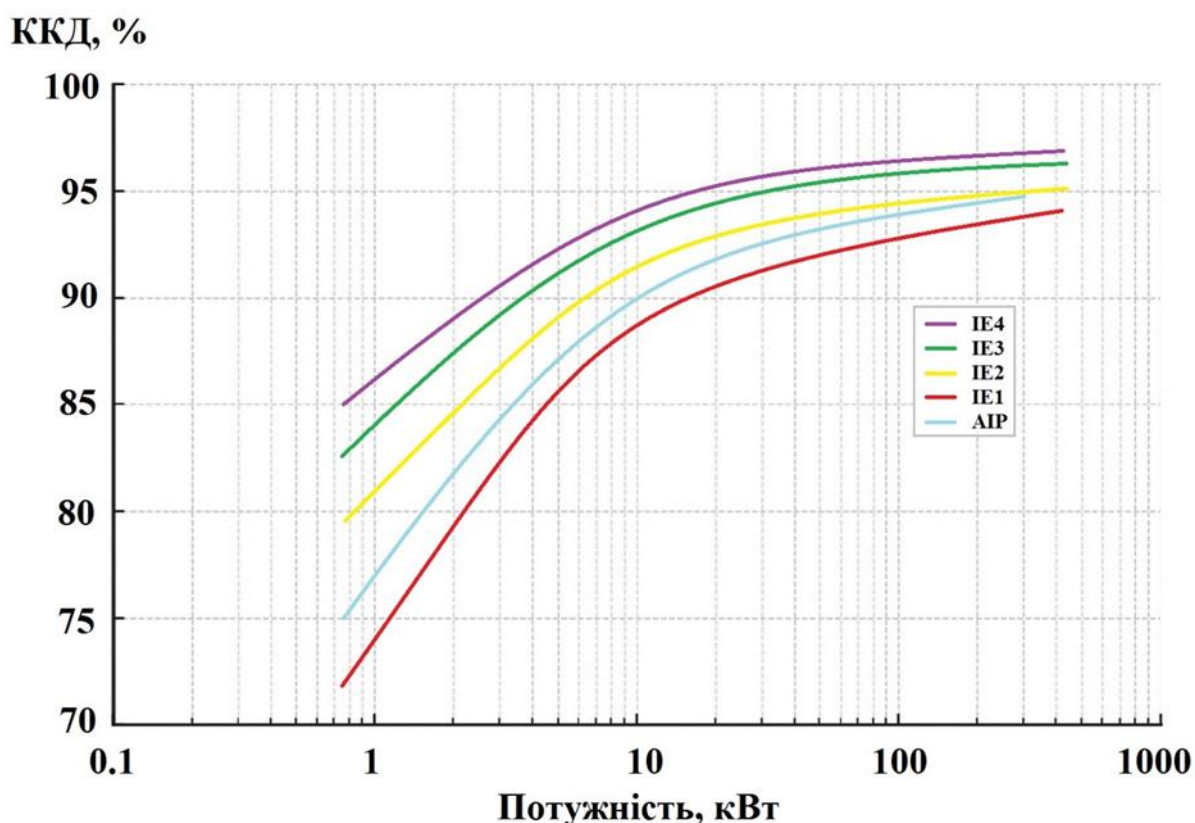


Рисунок 1.4 – Залежність ККД асинхронних двигунів від їх потужностей при різних класах енергоефективності

Комісія ЄС робить усе, щоб економіка в Європі стала кліматично нейтральною. Вдалося зекономити приблизно 57 ТВт·год електроенергії за рік при дії Регламенту 640/2009, який мав чинність до 30 червня 2021 року [4, 5].

У державах ЄС у 2019 р. прийнятий, а почав діяти з 1 липня 2021 р. Регламент (ЕУ) 2019/1781 щодо підвищення енергоефективності електродвигунів, який стосується правил екологічного проєктування

електродвигунів. Згідно з цим регламентом виробникам електродвигунів необхідно виготовляти продукцію не нижче класу (рівню) IE2 в широкому діапазоні потужностей: від 0,12 кВт до 1000 кВт [4, 5].

Активній динаміці енергозбереження при експлуатації електродвигунів сприяє енергетична політика країн ЄС щодо впровадження енергоефективних АД. Зокрема, у країнах ЄС діють жорсткі вимоги щодо енергоефективності АД. Так, з червня 2011 року заборонені до реалізації на території країн ЄС двигуни, що не відповідають вимогам класу енергоефективності IE2 по стандарту ІЕС 60034-30. Двигуни номінальною потужністю 7,5 - 375 кВт, що не відповідають класу ефективності IE3 або класу ефективності IE2 за умови їх оснащення засобами регулювання швидкості заборонені до реалізації в країнах ЄС з січня 2015 року. З 2017 року заборонені двигуни 0,75 - 375 кВт [4, 5].

На теперішню дату (листопад 2024 р.) впроваджено усі два етапи Регламенту. Особливу увагу слід приділити електродвигунам класів енергоефективності IE3 та IE4 (рис. 1.4) [4]:

- IE3: розширення номінальної потужності від $\geq 0,75$ кВт до 1000 кВт;
- режими роботи (безперервні) S1, S3 ≥ 80 %, розширення до S6 ≥ 80 %;
- кількість полюсів 2, 4, 6, розширення до 8;
- включення номінальної потужності від 0,12 кВт до $< 0,75$ кВт в IE2;
- при використанні частотних перетворювачів (ПЧ) втрати потужності не повинні перевищувати максимального значення та відповідати IE2;
- введення IE4 для двигунів номінальною потужністю від 75 до 200 кВт з числом полюсів 2, 4 і 6;
- включення вибухозахищених двигунів номінальною потужністю від 0,12 кВт до 1000 кВт до IE2;
- однофазні двигуни $\geq 0,12$ кВт з класом ефективності IE2;
- додавання таблиць мінімальної ефективності для 60 Гц у класах ефективності IE2, IE3 та IE4;
- використання QR-кодів і посилання для отримання інформації клієнтами.

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р1	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Технічні характеристики електродвигунів з різним класом енергоефективності наведені в табл. 1.2 [4].

Таблиця 1.2 - Технічні характеристики електродвигунів з різним класом енергоефективності [4]

Характеристики	IE1	IE2	IE3	IE4
	Стандартна	Висока	Підвищена	Надвисока
Потужність електродвигуна, кВт	0.75 – 375	0.75 – 375	0.75 – 375	2.2 – 230
Кількість полюсів	2, 4, 6, 8, 10, 12	2, 4, 6	2, 4, 6, 8	2, 4, 6, 8
Швидкість, об/хв	500 – 3600	1000 – 3600	750 – 3600	750 – 3600
ККД, при середній швидкості 1500 об/хв, %	72.1 – 94	79.6 – 95.1	82.5 – 96	85.7 – 96.7
Клас захисту	IP55, IP56, IP65, IP66	IP55, IP56, IP65, IP66	IP55, IP56, IP65, IP66	IP55, IP56, IP65
Режим роботи електродвигуна	S1	S1	S1, S2, S3	S1

1.4 Приклади енергоефективних рішень світових виробників АД.

Кабінет міністрів України затвердив постанову № «Технічний регламент щодо вимог до екодизайну для електродвигунів», згідно з яким «... 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» [6].

Офіційним дилером в Україні корпорації LEDERMANN Industrie Werke є ТОВ «Еквівес», яке виготовляє двигуни корпорації LEDERMANN з енергоефективністю IE3, IE4 [7].

Через війну в Україні було відкладено впровадження обов'язкового переходу з двигунів (виготовленим по ГОСТ) на енергоефективні АД класу IE3.

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р1	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Двигуни Ledermann виготовляються за міжнародним стандартом та в Європі приблизно 80% виробничих потужностей використовують такі двигуни. Підвищення енергоефективності дозволяє зменшити споживання ЕЕ та знизити викиди парникових газів, що, тим самим, сприяє боротьбі проти зміни клімату і приводить до збереження природних ресурсів планети.

Енергоефективні двигуни Ledermann класу ІЕ3 дозволяють [7]:

- заощаджувати кошти на енергозатратах для українських підприємств;
- вартість є більш високою в порівнянні з традиційними АД;
- середній термін окупності становить від 2 до 4 років;
- підвищити конкурентоспроможність українських підприємств на міжнародному ринку;
- пройти шлях до енергетичної незалежності та економічного розвитку;
- зекономити мільярди гривень.

Офіційний представник Ledermann ТОВ «ЕКVIVES» гарантує високу якість, надійність і технічну підтримку при впровадженні енергоефективних двигунів Ledermann.

Також перспективним є впровадження двигунів корпорації Lammers (ІЕ4). Її офіційним дилером в Україні є ТОВ «Елтех Україна». Енергоефективні двигуни цієї компанії є надзвичайно дорогими але також мають терміни окупності від 2 до 6 років.

Для порівняльного аналізу та загальної характеристики двигунів з різними класами енергоефективності далі розглянуті ЕЕД наступних виробників:

- ІЕ2, ІЕ3, ІЕ4 – двигуни корпорації WEG (Німеччина) із покращеними характеристиками серії W22 [8];
- ІЕ3 – двигуни корпорації LEDERMANN Industrie Werke (LIW) (Німеччина) з офіційним дилером в Україні ТОВ «Еквівес» [7, 9-11];
- ІЕ4 – двигуни корпорації Lammers (Німеччина) з офіційним дилером в Україні ТОВ «Елтех Україна» [12].

1.4.1 Двигуни серії W22. Корпорації WEG виготовляє до 70000 шт. двигунів різної потужності за добу. Двигун типу W22 показаний на рис. 1.5.

					<i>КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р1</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.5 – Енергоефективний асинхронний двигун типу W22

На рис. 1.6 наведені приклади паспортних табличок з основною інформацією про двигуни W22.

Для покращення енергетичних показників двигунів W22 корпорацією WEG виконано [13]:

- удосконалення основних частин корпусу, який виготовлений з високоякісного чавуну;
- удосконалення системи охолодження, що передбачає зміну форми кожуха;
- покращення аеродинаміки й забезпечує більший потік повітря по корпусу двигуна шляхом заміни вентилятора охолодження;
- зміна форми підшипникового щита, що поліпшує краще відведення тепла від підшипників;
- збільшення надійності і довговічності.

Відповідно у даних двигунах виконується підключення пристрою теплового захисту, тобто електродвигун постачається з пристроями контролю температури: термостатами, термісторами, автоматичними пристроями теплового захисту, резистивними датчиками температури РТ-100 тощо.

На рис. 1.7 показані схеми підключення відповідно до біметалічних пристроїв теплового захисту (термостатів) та термісторів.

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р1	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

W22 Premium

MADE IN BRAZIL

~	3 kW(HP-cv)	1 1 (15)	CARC. FRAME	1 32M/L	MOTOR INDUCAO - GAIOLA INDUCT. MOTOR-SQUIRREL CAGE
V	220/380	A	37.6/21.8		
RPM min ⁻¹	1760	Hz	60	FS SF	1.25
REND(%) NOM.EFF.	92.4	AMB.	40°C	ISOL INSL	F ΔT 80 K
CAT DES	N	IP55	REG DUTY	S1	Alt. 1000 m.a.s.l.

86 Kg

W2 U2 V2
U1 V1 W1

220 V Δ L1 L2 L3

380 V Y L1 L2 L3

MOBIL POLYREX EM

11407808

CE

RENDIMENTO E FATOR DE POTENCIA APROVADOS PELO INMETRO

PROCEL NBR - 17094-1

INMETRO

W22 Premium

MADE IN BRAZIL 11094315

~	3 kW(HP-cv)	55(75)	225S/M
MOTOR INDUCAO - GAIOLA INDUCT. MOTOR-SQUIRREL CAGE	FS SF	1.25	Hz 60
V	220/380/440	A	174/101/87.0
RPM min ⁻¹	1780	kVA	7.5
REG DUTY	S1	REND(%) NOM.EFF.	95.4
ISOL INSL	F Δt 80 K	CAT DES	N
	L.F.S. S.F.A.	218/126/109 A	
IPW55	Alt 1000	m.a.s.l.	446 kg

MOBIL POLYREX EM

6314-C3(27g) 12000 h

CE

RENDIMENTO E FATOR DE POTENCIA APROVADOS PELO INMETRO

PROCEL NBR - 17094-1

INMETRO

W2 U2 V2
U1 V1 W1

220 V Δ L1 L2 L3

380 V Y L1 L2 L3

440 V Y L1 L2 L3

Y - ONLY START / SOMENTE PARTIDA

W22 Premium

12895343

3~90L-02	IP55	INS CL.	F ΔT 80 K	S1	SF 1.00	AMB 40°C
V	Hz	kW	RPM	A	PF	IE code
220 Δ / 380 Y	50	2.2	2855	7.81 / 4.52	0.86	IE3
230 Δ / 400 Y			2870	7.70 / 4.43	0.83	
240 Δ / 415 Y			2880	7.56 / 4.37	0.81	
- / 460 Y	60		3480	- / 3.85	0.83	

NEMA Eff 86.5% 3.0HP 460 V 60Hz 3480 RPM
3.85 A PF 0.83 Des A Code K SF 1.15 CC029A

MOBIL POLYREX EM

ALT 1000 m.a.s.l.
24 kg

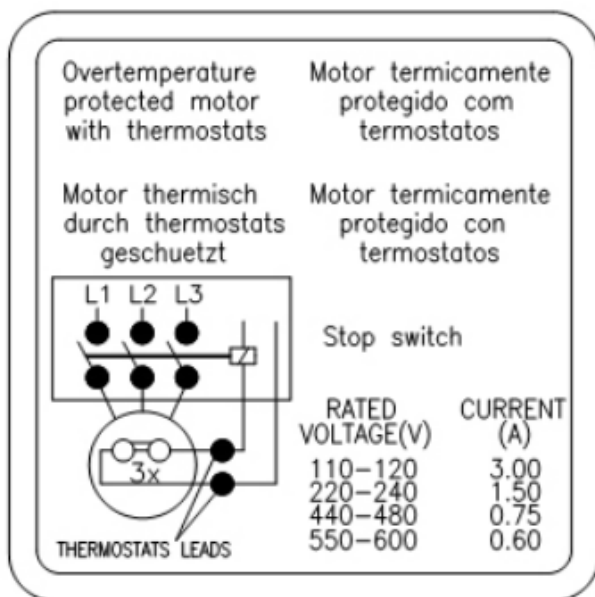
MOD.TE1BFOX0\$

CE ENEC

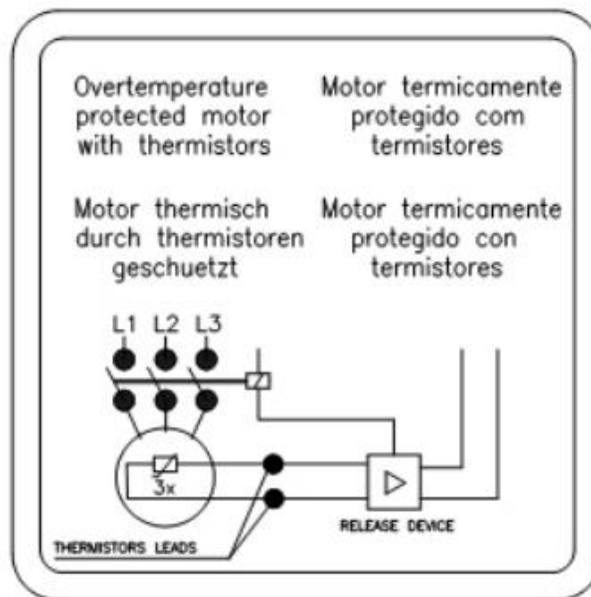
SP US Energy Partner

IEC 60034-1

Рисунок 1.6 – Приклади паспортних таблиц двигунів типу W22



a)



б)

Рисунок 1.7 – Двигуни типу W22 схеми підключення:
а) термостатів; б) термісторів

Резистивні датчики температури (PT-100) (рис. 1.8) мають високоякісні термопари, що дозволяє проводити безперервне відстеження розігріву електродвигуна на екрані контролера, забезпечуючи високий рівень точності та стабільності даних. Вони широко використовуються на промислових підприємствах як вимірювачі температури.

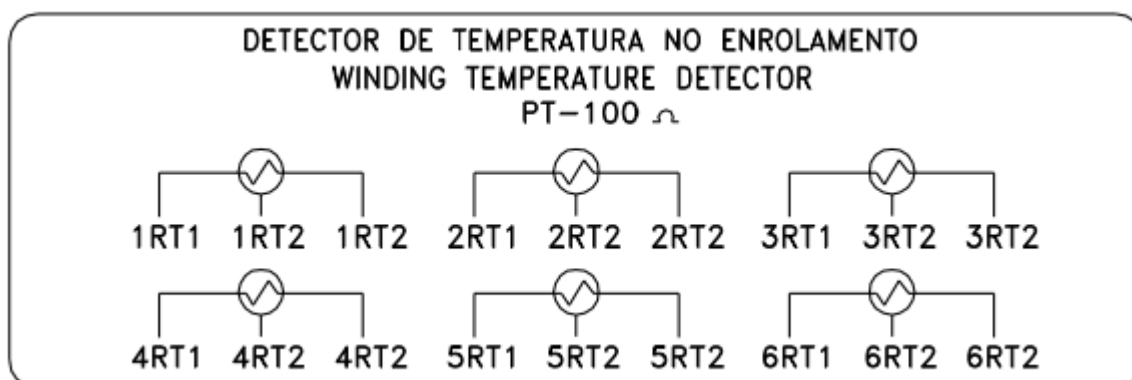


Рисунок 1.8 – Підключення обмотки резистивного датчика PT-100

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

1.4.2 Двигуни серії LEDERMANN. Двигун серії Ledermann показаний на рис. 1.9.



Рисунок 1.9 – Енергоефективний електродвигун LEDERMANN L3E A 80MB4

Наведений на рис. 1.9 двигун має технічні характеристики [10, 11], які наведені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики АД LEDERMANN L3E A 80MB4

Технічні характеристики	Од. виміру	Значення
Клас енергоефективності	IE3	
Потужність	кВт	0,75
Частота обертання	об/хв	1500
Напруга	В	400
Монтажне виконання	B3	
Коефіцієнт потужності	-	0,7
ККД	%	82,2
Клас захисту	IP55	
Кратність пускового струму	-	6
Кратність пускового моменту	-	3,2



Рисунок 1.11 – Асинхронний двигун Lammers серії 17AA/17M-2-B3 (IE 4)

Наведений на рис. 1.11 двигун має технічні характеристики, які наведені у табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Технічні характеристики АД Lammers серії 17AA/17M-2-B3

Технічні характеристики	Од. виміру	Значення
Клас енергоефективності	IE4	
Потужність	кВт	0,75
Частота обертання	об/хв	3000
Напруга	В	380/220
Серія 17AA	алюмінієвий корпус	
Монтажне виконання	B3	
Частота	Гц	50, 60
Клас захисту (закрите виконання)	IP55	

Конструкція асинхронного двигуна Lammers.

Обмотка. Обмотка статора виготовлена з високоякісних проводів та ізоляційних матеріалів класу F. Ротор (короткозамкнений) вилитий з алюмінію.

Для захисту від перегріву застосовуються:

- термисторні датчики температури РТС (за нормами ІЕС 34.11-2) з номінальною температурою використання $T_{NF}=150^{\circ}\text{C}$ (1шт. на фазу);
- резистивні реле;
- термісторний вхід перетворювачів частоти (ПЧ) та пристроїв плавного пуску (ППП).

Балансування ротора. Ротори АД балансуються динамічно зі ступенем балансування згідно міжнародній нормі ІЕС 34-14: 1982, клас N.

Підшипники використовуються кулькові високої якості фірм: SKF, FAG та NSK. У певних двигунах (розміри 56÷160) використовуються закриті підшипники з мастилом; для розмірів ≥ 180 – стандартні кулькові підшипники відкритого типу.

1.5 Характеристика парку АД в Україні та особливості їх експлуатації.

Для подальшого аналізу наведемо інформацію щодо стану парку АД в Україні в довоєнний період. Нажаль, великі руйнування і збитки, надані росією під час повномасштабної агресії, значно вплинули на енергетичну галузь України, у т.ч. на розвинену галузь електромашинобудування. Як і раніше, основу АД загальнопромислового використання складають двигуни серій АІР, АД, АДТ, 4А, 5А, 6А, АМУ, ІЕС АО, ВАО, АІМ, АІУМ, ВА, ВР та ін. – їх загальна кількість перед війною становила приблизно 30 млн од [1]. 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) %, $\cos \varphi = (0,91-0,92)$ [1].

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Як видно з наведених даних, найбільш масовими є АД потужністю до 5 кВт з найбільш низькими значеннями ККД; вони споживають до 40 % загального обсягу електроенергії (це приблизно втричі перевищує споживання електроенергії на освітлення). Важливо також зазначити, що половина АД приводить в дію вентилятори (32 %) і насоси (16 %). Незадовільним є факт, що саме даний сегмент має найбільш високий потенціал енергозбереження за рахунок впровадження регульованого електропривода, але на практиці цей потенціал реалізований лише на 10-12%.

Показники експлуатації АД в Україні також незадовільні [1]:

- низький міжремонтний термін – 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 лише 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.

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

Проаналізуємо також вторинний ринок асинхронних електродвигунів. Значна їх частина знаходиться в експлуатації 10-25 років і навіть більше. Зрозуміло, що всі двигуни багато разів були у ремонтах, що частіше за все супроводжується погіршенням паспортних даних електродвигунів. Під час виконання швидкого ремонту часто приділяється увага просто питанню його роботоспроможності, а не достовірного визначення його енергетичних показників.

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р1	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Продовжується тривала дискусія щодо якісного обґрунтування термінів експлуатації (життєвого циклу) електродвигунів і своєчасної заміни тих, що практично використали свій ресурс. Є два варіанти:

- при відмові двигуна купувати новий з більш високими енергетичними характеристиками;

- при відмові АД проводити ремонти незначним коштом, де економія супроводжується ремонтом у сумнівних організаціях, які не мають ліцензії на дані ремонтні роботи і т.і.

Після проведення ремонтних робіт важливим є діагностика основних параметрів АД та перевірка робочого стану електродвигуна.

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р1	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АД ТА РЕАЛІЗАЦІЇ ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ЇХ ВИКОРИСТАННІ

2.1 Економічне обґрунтування заміни вітчизняних АД сучасними енергоефективними двигунами.

Як було зазначено в розд.1, енергоефективні АД з к.з. ротором у порівнянні з вітчизняними АД загальнопромислового використання мають підвищений до 7-8 пунктів ККД (залежно від потужності), що є основним фактором підвищення ефективності АД у широкому спектрі використання. Але енергоефективні двигуни мають ще ряд додаткових позитивних відмінностей, які навіть при майже однакових енергетичних показниках (для двигунів потужністю більше 200 кВт) є достатньо переконливими при вирішенні питання на користь заміни звичайних АД на енергоефективні. Основними додатковими перевагами цих двигунів є:

- сприятливий температурний режим при аналогічних навантаженнях (перегрів обмоток на 40 °С проти 85 °С у звичайних АД), що позитивно впливає на стан ізоляції та нагрівання підшипників і, як наслідок, збільшує міжремонтний період у середньому з 160000 годин до 30000 годин;

- більш високий рівень ККД при недовантаженнях АД, що характерно у середньостатистичному плані для вітчизняних електродвигунів. Ця перевага забезпечується більш пологим характером залежності ККД від коефіцієнта завантаження k_z двигуна в найбільш поширеному діапазоні $0,5 < k_z < 1$;

- енергоефективні двигуни краще реагують на перевантаження, оскільки мають більш високий рівень експлуатаційної надійності.

На основі ознайомлення з великим обсягом інформації щодо енергоефективності двигунів, аналізу наукових джерел та інтернет-сайтів була побудована залежність ККД електродвигунів від потужності для різних класів енергоефективності (див. рис. 1.4). Для порівняльного аналізу в якості базового було обрано короткозамкнені АД серії АІР, які часто використовуються в електроприводах промислових підприємств України та двигуни відповідних

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р2	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потужностей класів енергоефективності IE2, IE3 та IE4 (для режиму роботи S1) [14-16].

Отримані на основі проведеного аналізу значення ККД асинхронних двигунів наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – ККД асинхронних двигунів різних класів енергоефективності

P_n , кВт	AIP/IE2/IE3/IE4		
	n , об/хв		
	3000	1500	1000
0,75	72,1/77,4/80,7/82,2	72,1/79,6/83,5/85,7	70,0/75,9/78,9/79,2
5,5	85,7/87,0/89,2/89,7	85,7/87,7/89,6/89,8	84,0/86,1/88,0/88,3
22	90,8/91,3/92,7/93,4	90,5/91,6/93,2/93,4	89,7/90,9/92,2/92,7
75	93,6/93,8/94,7/95,4	93,6/94,4/95,0/96,0	93,5/93,7/94,63/95,6
250	94,7/95,5/95,8/96,6	94,8/95,7/96,0/96,8	94,5/95,0/95,8/96,4

Для проведення подальшого дослідження проаналізовані вартості двигунів серії AIP та класів енергоефективності IE2, IE3 та IE4 (табл. 2.2) [7-16].

Таблиця 2.2 – Вартість асинхронних двигунів різних класів енергоефективності

P_n , кВт	AIP/IE2/IE3/IE4		
	Вартість АД, грн		
	3000	1500	1000
0,75	2700/ 3000 / 3 500 / 11750	3000/3400/ 6300/ 14350	3 700/ 4500 / 8 300 / 16 800
5,5	6200/ 15260 / 21450/ 41 100	7 950/ 13100 / 21400 / 46 800	11 340 / 20620 / 27800/ 60 000
22	24000/ 47800 / 62200 / 116500	27500/ 52800 / 74400/ 123 400	31 000/ 68 000 / 83200/ 135 000
75	58000/83 000/ 219500/ 314600	63 000 / 93 400 / 222000/ 324000	85800/122 700/ 280500/ 354 000
250	112000/ 266 000 / 590000/ 990000	164000/ 335 000 / 610 000 / 1014000	280 000 / 400 000 / 750000/ 1100000

Для обґрунтування доцільності і обсягів заміни вітчизняних АД загальнопромислового використання енергоефективними проведемо порівняльні розрахунки енергетичних характеристик двигунів класів енергоефективності IE2, IE3 та IE4 з оцінкою термінів їх окупності. Далі наведено приклад проведення такого аналізу.

Вихідні дані для розрахунку.

1) Асинхронний короткозамкнений двигун загальнопромислового використання серії АІР:

- ряд номінальних потужностей P_n : 0,75 кВт, 5,5 кВт, 22 кВт, 75 кВт та 250 кВт;

- синхронна швидкість n_0 : 3000 об/хв, 1500 об/хв та 1000 об/хв, тобто числа пар полюсів відповідно $P=1$, $P=2$ та $P=3$;

- коефіцієнт корисної дії ККД η_n обирається з табл. 2.1;

- вартості двигунів вибираються з табл. 2.2.

2) Енергоефективний двигун аналогічної потужності та з аналогічною синхронною швидкістю з рівнем енергоефективності IE2 (табл. 2.1).

3) Енергоефективний двигун аналогічної потужності та з аналогічною синхронною швидкістю з рівнем енергоефективності IE3 (табл. 2.1).

4) Енергоефективний двигун аналогічної потужності та з аналогічною синхронною швидкістю з рівнем енергоефективності IE4 (табл. 2.1).

5) Вартості двигунів серії АІР та двигунів класів енергоефективності IE2, IE3 та IE4 обираються з табл. 2.2.

6) Вартість електроенергії на листопад 2024 р. становить:

- для побутових споживачів - 4,32 грн/кВт·год;

- для промислових підприємств: мінімальна гранична ціна на електроенергію становить 10 грн/МВт·год; максимальні граничні тарифи розподілені наступним чином: з 00:00 до 07:00 та з 11:00 до 17:00 – 5 600 грн/МВт·год; з 07:00 до 11:00 та з 23:00 до 24:00 – 6 900 грн/МВт·год; з 17:00 до 23:00 – 9 000 грн/МВт·год; ціни на балансуєчому ринку: з 00:00 до 07:00 – 6 600

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р2	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

грн/МВт·год; з 07:00 до 17:00 та з 23:00 до 24:00 – 8 250 грн/МВт·год; з 17:00 до 23:00 – 10 000 грн/МВт·год. Тому, згідно з такою практикою, яка склалася на ринку електроенергії, її вартість для промислових підприємств змінюється в межах від 4,6 грн/кВт·год до 27,0 грн/кВт·год і в середньому складає на даний період від 7 грн/кВт·год до 10,0 грн/кВт·год.

7) Прийнято два варіанта тривалості роботи двигуна:

- номінальний режим протягом $T_1 = 8\,500$ годин за рік – 1;
- номінальний режим протягом $T_2 = 4\,000$ годин за рік – 2.

Постановка задачі дослідження.

Визначити, за який період додаткові витрати на енергоефективні двигуни класів енергоефективності ІЕ2, ІЕ3 та ІЕ4 будуть окуплені за рахунок зменшення вартості спожитої електричної енергії порівняно з двигуном серії АІР.

Результати дослідження.

Розрахунки проведені за допомогою програмного пакету MATHCAD. Фрагменти розрахунків наведені в Додатку. В пояснювальній записці повністю наведено розрахунки одного з порівнювальних варіантів, а усі проведені розрахунки наведені в Додатку.

Метод дослідження:

1) Асинхронний короткозамкнений двигун загальнопромислового використання серії АІР:

- $P_n = 0,75$ кВт;
- $n_n = 1000$ об/хв;
- $\eta_n = 0,7$;
- вартість 3700 грн.

2) Аналогічний енергоефективний двигун з рівнем енергоефективності ІЕ2:

- $P_n = 0,75$ кВт;
- $n_n = 1000$ об/хв;
- $\eta_n = 0,759$;

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р2	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- вартість 4500 грн.

3) Аналогічний енергоефективний двигун з рівнем енергоефективності ІЕ3:

- $P_H = 0,75$ кВт;

- $n_H = 1000$ об/хв;

- $\eta_H = 0,789$;

- вартість 8300 грн.

4) Аналогічний енергоефективний двигун з рівнем енергоефективності ІЕ4:

- $P_H = 0,75$ кВт;

- $n_H = 1000$ об/хв;

- $\eta_H = 0,792$;

- вартість 16800 грн.

5) Вартість електроенергії - 7,0 грн/кВт·год.

6) Умови роботи:

- $T_1 = 8\ 500$ годин за рік;

- $T_2 = 4\ 000$ годин за рік.

Рішення:

Додаткові витрати на придбання енергоефективного двигуна:

$$C = C_{IE2} - C_{AIP} = 4500 - 3700 = 800 \text{ грн.}$$

Споживані потужності двигунів серії АІР та двигунів класів енергоефективності ІЕ2, ІЕ3 та ІЕ4:

$$P_{AIP} = P_H / \eta_{AIP} = 1,071 \text{ кВт,}$$

$$P_{IE2} = P_H / \eta_{IE2} = 0,988 \text{ кВт,}$$

$$P_{IE3} = P_H / \eta_{IE3} = 0,951 \text{ кВт,}$$

$$P_{IE4} = P_H / \eta_{IE4} = 0,947 \text{ кВт.}$$

Зменшення потужності за рахунок використання двигунів класів енергоефективності ІЕ2, ІЕ3 та ІЕ4:

$$\Delta P_1 = P_{AIP} - P_{IE2} = 0,083 \text{ кВт,}$$

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р2	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta P_2 = P_{AIR} - P_{IE3} = 0,121 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_3 = P_{AIR} - P_{IE4} = 0,124 \text{ кВт}.$$

Для двигуна класу енергоефективності IE2 додатково витрачені кошти $C_{IE2} = 800$ грн. будуть повернуті з терміном окупності:

- при роботі протягом 8 500 год/рік

$$X_{1IE2} = C_{IE2} / (\Delta P_1 \cdot c_e \cdot T_1) = 800 / (0,083 \cdot 7,00 \cdot 8\,500) = 0,161 \text{ року};$$

- при роботі протягом 4 000 год/рік

$$X_{2IE2} = C_{IE2} / (\Delta P_1 \cdot c_e \cdot T_2) = 800 / (0,083 \cdot 7,32 \cdot 4\,000) = 0,343 \text{ року}.$$

Для двигуна класу енергоефективності IE3 додатково витрачені кошти $C = 4600$ грн. будуть повернуті з терміном окупності:

- при роботі протягом 8 500 год/рік

$$X_{1IE3} = C_{IE3} / (\Delta P_2 \cdot c_e \cdot T_1) = 4600 / (0,121 \cdot 7,00 \cdot 8\,500) = 0,64 \text{ року};$$

- при роботі протягом 4 000 год/рік

$$X_{2IE3} = C_{IE3} / (\Delta P_2 \cdot c_e \cdot T_2) = 4600 / (0,121 \cdot 7,00 \cdot 4\,000) = 1,359 \text{ року}.$$

Для двигуна класу енергоефективності IE4 додатково витрачені кошти $C = 13100$ грн. будуть повернуті з терміном окупності:

- при роботі протягом 8 500 год/рік

$$X_{1IE4} = C_{IE4} / (\Delta P_3 \cdot c_e \cdot T_1) = 13100 / (0,124 \cdot 7,00 \cdot 8\,500) = 1,769 \text{ року};$$

- при роботі протягом 4 000 год/рік

$$X_{2IE4} = C_{IE4} / (\Delta P_3 \cdot c_e \cdot T_2) = 13100 / (0,124 \cdot 7,00 \cdot 4\,000) = 3,759 \text{ року}.$$

Для наглядності результати виконаних розрахунків зведено у табл. 2.3.

Аналізуючи терміни окупності заміни двигунів серії AIR на двигуни класів енергоефективності IE2, IE3 та IE4 необхідно врахувати, що:

- вартість двигунів класів енергоефективності IE2, IE3 та IE4 вибрана для різних серій двигунів;

- вартість двигунів класів енергоефективності IE2, IE3 та IE4 наведена для різних виробників.

Тому ціни можуть коливатись у певних незначних межах.

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р2	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4 – Підсумкова інформація щодо термінів окупності заміни двигунів серії АІР на двигуни класів енергоефективності ІЕ2, ІЕ3 та ІЕ4 при вартості ЕЕ 7,00 грн/кВт·год

Терміни окупності	Потужності двигунів, кВт				
	0,75	5,5	22	75	250
	Кількість випадків при загальній кількості вибірки 90				
до 1 року	11	4	-	1	-
від 1 до 2 років	4	5	5	1	3
від 2 до 3 років	2	5	6	6	8
від 3 до 4 років	1	1	2	2	1
від 4 до 5 років		2	4	2	2
більше 5 років		1	1	6	4
Всього	18	18	18	18	18

2) Терміни окупності впроваджених рішень з терміном окупності до 3-х років щодо заміни двигунів на енергоефективні напряму залежить від їх потужностей:

- при потужності 0,75 кВт відбудеться у 95,0 % випадків;
- при потужності 5,5 кВт - у 78,0 % випадків;
- при потужності 22 кВт - у 61,0 % випадків;
- при потужності 75 кВт - у 45,0 % випадків;
- при потужності 250 кВт - у 61,0 % випадків.

Для двигунів малої і середньої потужності термін окупності суттєво менший, ніж аналогічний показник для двигунів відносно великої потужності.

3) При зростанні вартості електричної енергії терміни окупності зменшаться.

4) Річна вартість споживаної АД електроенергії в 15-30 разів перевищує вартість двигуна, цей показник майже не залежить від номінальної потужності двигуна.

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р2	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5) На промислових підприємствах України використовуються асинхронні двигуни широкої лінійки потужностей і заміна двигунів типу АІР на двигуни класів енергоефективності ІЕ2, ІЕ3 та ІЕ4 є сприятливою для економіки України.

2.2 Модернізація традиційних АД загальнопромислового використання

Як видно з проведеного в п. 2.1 аналізу, заміна всього парку наявних в Україні асинхронних двигунів на енергоефективні економічно вигідна, але потребує великих капіталовкладень, які на сьогодні в Україні відсутні. Цей процес може навіть при найбільш сприйнятливих умовах тривати декілька років. Тому важливо розробити оптимальну в часовому вимірі послідовність більш «м'яких» заходів вирішення проблеми. Одним з таких напрямків є якісний ремонт та модернізація задіяних у виробництві електродвигунів.

У цьому контексті позитивним є досвід США, які у 2014 р. розгорнули амбіційну програму якісного ремонту АД з одночасним гарантованим підвищенням параметрів їх енергоефективності. Такий ефект був досягнутий шляхом декількаразової перемотки обмоток статора, заміна яким підтверджували гарантований рівень підвищення енергоефективності та безаварійної роботи відремонтованого електродвигуна. Реалізація даного заходу на добровільній основі повинна дати позитивний ефект у вигляді економії біля 6000 ГВт електричної енергії. Захід впроваджується з високим рівнем мотивації на основі вибору та сертифікації спеціалізованих сервісних центрів.

В Україні також окремі фірми виконують модернізацію АД з одночасним підвищенням їх енергоефективності. При цьому пропонується гнучкий перелік заходів з різним рівнем модернізації, зокрема:

- забезпечується максимальний ККД тільки при певному фіксованому навантаженні або при часткових навантаженнях;
- реалізується узгодження параметрів АД з виконавчим механізмом;
- конструктивно, по аналогії з ЕЕД: збільшення співвідношення довжини сердечника до діаметра, числа витків обмотки і діаметра дроту;

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р2	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- замість литої алюмінієвої обмотки використовується мідна короткозамкнена обмотки ротора.

При модернізації слід правильно оцінювати реальний рівень ефективності сучасних електродвигунів, кращі з яких за інформаційними джерелами знаходиться між рівнями ІЕ1 та ІЕ2. Слід також брати до уваги, що застосування енергоефективних двигунів доцільно за таких умов:

1) Двигун працює переважно у тривалому режимі S1 з постійною потужністю.

2) Вигідно використання ЕЕД у порівнянні зі звичайними АД при недовантаженні (за відсутності альтернативи). Додатковий позитивний ефект забезпечується при роботі АД у складі частотно регульованих систем електропривода.

3) Найкращі умови для швидкої окупності має робота ЕЕД у складі вентиляторних або насосних установок.

4) Термін окупності зменшується на фоні зростання при збільшенні тривалості постійної роботи електродвигуна.

5) Використання ЕЕД ефективно для потужностей більше 0,75 кВт і кількості пар полюсів $P=4$ і більше.

Серед фахівців підприємств, на яких працюють звичайні АД, у даний час поширена думка, що для двигунів з невідпрацьованим ресурсом економічно доцільно проводити не заміну, а модернізацію при плановому ремонті двигуна з підвищенням рівня енергоефективності. Але існують і протилежні думки, що свідчить про необхідність поглибленого економічного обґрунтування у кожному окремому випадку з урахуванням особливостей експлуатації і режимів роботи електромеханічної системи.

До енергетичних параметрів електродвигунів відноситься не лише ККД, якому приділяється найбільша увага, а й коефіцієнт потужності ($\cos\phi$), який пов'язаний з режимом споживання реактивної енергії. У цьому контексті бажано віддавати перевагу АД з більш високими $\cos\phi$. При неможливості заміни встановленого АД, який працює зі значним недовантаженням, що завжди

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р2	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призводить до низького $\cos\varphi$ і підвищеного споживання реактивної енергії, акцент в модернізації треба перенести з двигуна на виконавчий механізм. Як правило, це можна реалізувати шляхом внесення змін у технологічний процес, наприклад, його активізацією.

2.3 Приведення у відповідність параметрів двигуна і навантаження

За результатами дослідження [1, 21-27] в Україні більшість приводних двигунів має завищену номінальну потужність. При цьому їх коефіцієнт навантаження k_H знаходиться межах $0,3 \div 0,5$. Але, як видно з рис. 2.1 на прикладі найбільш поширеного двигуна серії АІР потужністю 5,5 кВт, 3000 об/хв саме в цьому діапазоні ККД може становити $72 \div 81\%$, що на $4 \div 5\%$ менше, ніж для оптимального режиму ($k_H = 0,7 \div 0,8$).

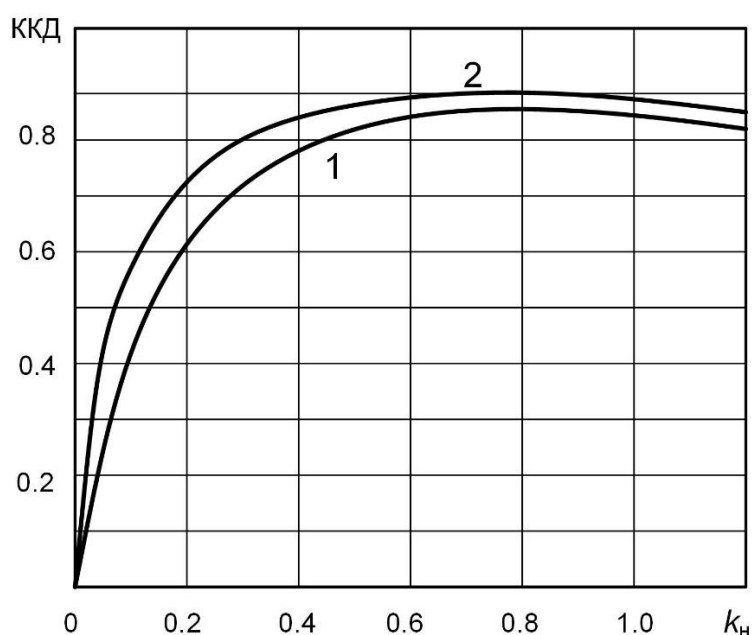


Рисунок 2.1 – Залежність ККД від коефіцієнта навантаження для АД серії АІР – крива 1 і еквівалентного двигуна з класом енергоефективності ІЕ3 – крива 2

Техніко-економічні розрахунки Міністерства палива і енергетики України рекомендують при $0 < k_H < (0,4 \div 0,5)$ заміну працюючого з таким навантаженням двигуна двигуном меншої потужності. Енергоефективні електродвигуни мають меншу залежність ККД від навантаження за рахунок більш пологої характеристики ККД(k_H) в робочому діапазоні (рис. 2.1). Так, для аналогічного за

потужністю АД класу енергоефективності ІЕЗ в діапазоні $k_n=0,3\div 0,5$ зменшення ККД становить від 9% до 2%. Тому постійне зростання вартості електроенергії в Україні все більше загострює проблему відповідності параметрів двигуна і навантаження. Тим більше це відноситься до систем електропривода, які з урахуванням особливостей технологічного процесу можуть працювати з незначним механічним навантаженням або навіть в режимі холостого ходу. Це, наприклад, підйомно-транспортні механізми, кузнечно-пресове обладнання та ін. Ці випадки заслуговують на особливу увагу і часто вимагають використання спеціальних типів електродвигунів або оптимізації технологічного процесу.

Додаткове ускладнення пов'язане з суттєвим збільшенням споживання реактивної енергії при недовантаженні. Якщо в оптимальному діапазоні навантаження ($k_n=0,7\div 0,8$) для більшості АД характерне споживання реактивної енергії в обсязі (50÷75) % від активної [17-20], то при недовантаженні цей показник може суттєво погіршитися. Не можна не враховувати також гарантоване збільшення споживання реактивної енергії при ремонтах, особливо неякісних та чисельних.

Разом з тим слід враховувати зменшення номінального ККД у менш потужного двигуна, а також витрати на демонтаж встановленого АД і монтаж двигуна, що його замінює. Певні прорахунки можуть бути також наслідком використання недосконалих техніко-економічних методик аналізу або низьку кваліфікацію проектувальників (наприклад, ототожнення АД за висотою валу, а не за потужністю тощо).

З використанням каталожних даних можна знайти умову, за якою АД з заданим коефіцієнтом навантаження k_n буде мати максимальний ККД. Для цього запишемо вираз для ККД η у наступному вигляді

$$\eta = k_n \cdot P_n / (k_n \cdot P_n + \Delta C + k_n^2 \cdot \Delta V_n), \quad (2.1)$$

де P_n – номінальна потужність АД, ΔC – постійні втрати, ΔV_n – змінні втрати при номінальному режимі. З умови $d\eta/dk_n=0$ можна визначити коефіцієнт навантаження k_n , при якому ККД двигуна буде максимальним. Враховуючи, що $P_n=\text{const}$, $\Delta C=\text{const}$, $\Delta V_n=\text{const}$ після простих спрощень отримаємо для k_n

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р2	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$k_H^2 = \Delta C / \Delta V_H. \quad (2.2)$$

Розглянемо порядок використання цих формул на прикладі короткозамкненого АД типу АІР180А4 з наступними номінальними даними: $P_H = 22$ кВт, частота обертання $n_H = 1470$ об/хв; напруга 380/220 В; струм статора $I_H = 43,2$ А; крутний момент $M_H = 143,9$ Нм; ККД $\eta_H = 90,0\%$; $\cos\varphi_H = 0,87$; активний опір обмоток статора $R_1 = 0,219$ Ом і приведений ротора $R'_2 = 0,112$ Ом. Вартість двигуна 4А180А4 за станом на листопад 2024 року становить $C = 27500$ грн; нормативний строк служби (строк амортизації) $T_p = 15$ років; строк служби до модернізації $T_{рем} = 10$ років; норма амортизації $p_a = 6,4$ % за рік.

Розглянемо приклад визначення навантаження двигуна, при якому доцільно замінити двигун потужністю 22 кВт двигуном меншої потужності. Для виконання розрахунків приймаємо наступні умови:

- для заміни обираємо АД серії АІР;
- тариф на електроенергію приймаємо середньозважений на листопад 2024 року для промислових підприємств у розмірі 7 грн/кВт·год;
- заробітна плата обслуговуючого персоналу після модернізації залишається незмінною;
- витрати на транспортування, монтаж та пусканалагоджувальні роботи C_M прийняті у розмірі 30% вартості нового двигуна $C_{нов}$, тобто $C_M = 1,3 C_{нов}$;
- ліквідаційна вартість двигуна прийнята нульовою.

Визначимо допоміжні величини: номінальне ковзання s_H і синхронну ω_0 кутову частоту обертання:

$$s_H = (n_0 - n_H) / n_0 = (1500 - 1470) / 1500 = 0,02; \quad (2.3)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_1 / p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 2 = 157 \text{ рад/с}; \quad (2.4)$$

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - s_H) = 157 \cdot (1 - 0,02) = 154 \text{ рад/с}. \quad (2.5)$$

Далі розраховуємо повні ΔP_H , змінні ΔV_H і постійні ΔC втрати в електродвигуні для номінального режиму:

$$\Delta V_H = M_H \cdot \omega_0 \cdot s_H \cdot (1 + R_1 / R'_2) = 143,9 \cdot 157 \cdot 0,02 \cdot (1 + 0,219 / 0,112) = 1335 \text{ Вт}; \quad (2.6)$$

$$\Delta P_H = P_H (1 - \eta_H) / \eta_H = 22000 \cdot (1 - 0,9) / 0,9 = 2444 \text{ Вт}; \quad (2.7)$$

										Арк.
										44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Результати розрахунків за формулою (2.12) наведені у табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Результати розрахунку термінів окупності при заміні недовантаженого електродвигуна

Показник	Коефіцієнти навантаження		
	$k_n = 0,25$	$k_n = 0,5$	$k_n = 0,75$
Потужність навантаження при заданому k_n , кВт	5,5	11	15,4
Втрати потужності в замінюваному двигуні ΔP , кВт	1,2	1,45	1,87
Двигун для заміни серії АІР	112М4	132М4	160S4
Втрати потужності в новому двигуні в номінальному режимі, кВт	0,933	1,071	1,668
Ціна нового двигуна (з урахуванням ПДВ, 2024 р.), грн.	7890	12800	19300
Зниження втрат потужності при заміні, кВт	0,589	0,228	0,037
Термін окупності при $T = 1500$ год на рік	4,8	6,9	10,3
Термін окупності при $T = 3000$ год на рік	2,8	3,9	5,6
Термін окупності при $T = 4500$ год на рік	2,0	2,8	3,8
Термін окупності при $T = 6000$ год на рік	1,6	2,1	2,9

З отриманих розрахункових даних видно, що прийнятний (реальний) термін окупності спостерігається при коефіцієнті навантаження $k_n = 0,25$ і часі роботи двигуна $T = 6000$ год та $T = 4500$ год, які відповідають рекомендаціям (до 2-х років).

Уточнення розрахунку терміну окупності може бути виконано за рахунок врахування втрат потужності в системі електропостачання та ліквідаційної вартості заміненого двигуна, що призведе до зниження терміну окупності впровадження. Наприклад, якщо замінений двигун після демонтажу буде проданий за залишковою вартістю, то термін окупності установки нового двигуна 112М4 при $k_n = 0,25$ і $T = 6000$ год складе приблизно один рік.

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р2	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Безпосереднє вимірювання потужності на валу в умовах експлуатації – один з найбільш перспективних напрямків вирішення проблеми

Перелік питань, розглянутих вище, не охоплює всіх факторів впливу, що безпосередньо пов'язані з темою даної кваліфікаційної роботи. Зокрема, не розглянуто важливий комплекс заходів щодо підвищення енергоефективності засобами електроприводу, в яких частка електромеханічних систем з АД становить майже 80%. Ці питання досить широко висвітлені в науково-технічній літературі і є об'єктом активної уваги з боку багатьох науковців (див., наприклад, [28-32]). Активно досліджується також вплив на показники енергоефективності такого важливого зовнішнього фактору, як якість електричної енергії, яку споживають електродвигуни (несинусоїдальність та несиметрія напруги, нестабільність частоти) [31, 32], можливості підвищення енергоефективності систем електропривода через технологічні параметри (температуру, тиск, навантаження, ККД та ін.). Важливу роль при вирішенні проблеми енергоефективності та експлуатаційної надійності повинні відігравати ефективні системи моніторингу та діагностики. Цей напрямок практичної електромеханіки в останні роки активно розвивається на основі сучасних досягнень і можливостей в області інформаційних технологій, обчислювальної техніки та сучасного програмного забезпечення [28-32].

У цьому контексті особливу роль відіграє контроль температури елементів АД та процесу нагріву ізоляції обмоток статора. За літературними даними саме пробій ізоляції обмоток статора АД є однією з основних причин виходу їх з ладу. Це обумовлено відомим фактом швидкого старіння ізоляції і виходу з ладу АД навіть при незначних перевищеннях температури ізоляції у порівнянні з нормативними рівнем. На практиці, як правило, проблеми з температурними параметрами пов'язані з відсутністю ефективного контролю навантаження на валу електродвигуна.

На сьогодні практика визначення навантаження на валу електродвигуна ґрунтується на найбільш точному і надійному прямому вимірюванні крутного моменту M , через який легко розраховується або безпосередньо вимірюється

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

потужність на валу $P_2 = M \cdot \omega$ і ККД електродвигуна. Для реалізації цього методу рядом провідних фірм і корпорацій розроблені високоточні та багатофункціональні датчики крутного моменту на основі використання тензорезисторів (Magtrol (Швейцарія), Datum Electronics (Великобританія), Lorenz Messtechnik GmbH, НВМ (ФРН)) та ін. [28-30]. Але суттєвим обмежувальним фактором для широкого використання цих датчиків, крім високої вартості, є необхідність встановлення їх між валом електродвигуна і виконавчим механізмом, що неможливо не лише в умовах виробництва, а і в інших випадках, коли з різних причин неможлива «врізка в вал» (рис. 2.2). Тому поширеною є думка, що промислові датчики моменту зорієнтовані лише на використання в наукових і навчальних лабораторіях, конструкторських бюро або в сучасних електроремонтних цехах, а не на широке використання на промислових підприємствах зі встановленим обладнанням.

Альтернативне вирішення даної проблеми можливо при розробці так званих датчиків крутного моменту (потужності) накладного типу. Принципово можливість виготовлення такого недорогого датчика проілюстрована в публікації [33]. Але залишилися поза межами подальшого удосконалення запропонованого зразка питання точності, автоматичної калібровки, мінітюаризації, фільтрації сигналу, сертифікації, технологій кріплення на валу тощо.

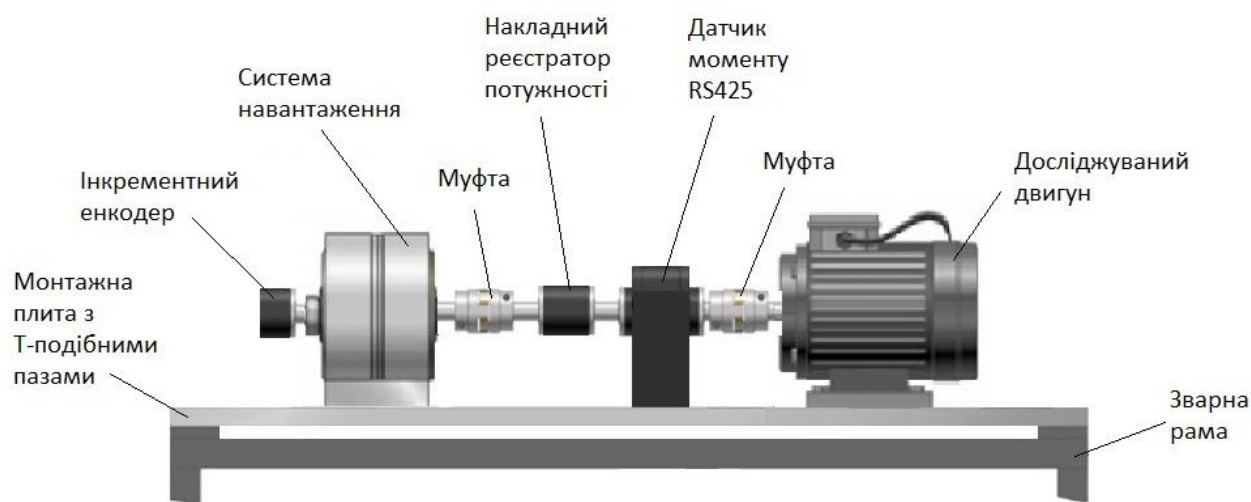


Рисунок 2.2 – Встановлення датчика крутного моменту зі врізкою у вал

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р2	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Але досить обнадійливим фактом стала розробка датчиків моменту без врізки у вал, реалізованої рядом виробників традиційних датчиків моменту на основі останніх успіхів у галузі інтегральної електроніки. Найбільших успіхів у цьому напрямку досягли німецька фірма *HBM* та англійська фірма *Datum Electronics*. У першому випадку інформація від тензорезисторів та енкодерів безконтактним способом передається на електронні пристрої обробки інформації, а самі тензорезистори наклеюються на вал, що фактично обмежує можливість їх багаторазового використання. У другому ж випадку реалізована технологія вимірювання енергетичних характеристик електродвигуна фактично «в польових умовах» за допомогою чисто накладних датчиків. За словами розробників датчика *SPMK* [33], він легко встановлюється на місці з мінімальними операціями. Для відображення та реєстрації інформації у реальному часі з точністю 0,1% безпосередньо на ПК використовується проста безкоштовна утиліта. Що особливо важливо, «Використовувані тензодатчики постачаються разом із роз'ємом, щоб усунути потребу в паянні, і мають капсульоване покриття для спрощення герметизації від навколишнього середовища». Наведені далі ілюстрації дають візуальне уявлення про особливості конструкції таких датчиків накладного типу (див. рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Датчик вимірювання крутного моменту типу SPMK корпорації Datum Electronics (Великобританія)

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

На сьогодні використання датчика *SPMK* обмежене діаметрами валів від 30 мм та максимальними частотами обертання 15000 об/хв. Це відповідає габаритам АД 100 - 112 і більше (потужностям найбільш поширеного двигуна 5,5 кВт і вище) та числу пар полюсів $P \geq 2$. Відносно такого сегменту АД, поширених в Україні, питання їх заміни на енергоефективні аналоги стоїть найбільш гостро.

У контексті проблеми, якій присвячена магістерська робота, викладена вище інформація має позитивний характер, оскільки фактично вперше з'являється реальна потенційна можливість організації широкомасштабного моніторингу енергетичних параметрів АД, безпосередньо залучених у виробництво без активного втручання в технологічний процес. Більше того, у процесі енергетичних обстежень буде отримана достовірна додаткова інформація діагностичного характеру за рахунок використання в програмному забезпеченні розглянутих датчиків елементів штучного інтелекту. Є надія на різнопланову допомогу фахівців з Великобританії у зрушенні важливої проблеми реального підвищення енергоефективності використання АД в Україні.

					<i>КНУ.РМ.141.24.268с.05.Р2</i>	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі отримані наступні результати.

1) На основі аналітичного аналізу джерел та технічної та довідкової інформації з сайтів проаналізована роль асинхронних електродвигунів у електроенергетиці та економіці закордонних країн і України та доведено, що електроприводи з використанням АД споживають від 75 до 85 % електричної енергії.

2) На базі знайомства з досвідом роботи провідних світових корпорацій, таких як Nidec Corporation, ABB Ltd, Siemens AG, Toshiba Industrial Corporation (Toshiba Corporation), Shanghai Electrical Machinery Group Co. Ltd (Shanghai Electric) встановлено, що стратегії розвитку цих компаній полягають у випуску енергоефективних асинхронних двигунів з коефіцієнтом енергоефективності IE3, IE4.

3) На основі ознайомлення з великим обсягом інформації щодо енергоефективності двигунів, аналізу наукових джерел та інтернет-сайтів побудовано залежність ККД електродвигунів від потужності для різних класів енергоефективності,

4) Встановлено, що з урахування доступності на ринку України та за технічними характеристиками найбіль перспективними для впровадження в Україні є енергоефективні двигуни серії W22 (класів енергоефективності IE2, IE3), серії LEDERMANN (класу енергоефективності IE3), серії LAMMERS (класу енергоефективності IE4).

5) На основі виконаного економічного обґрунтування шляхом порівняльного аналізу вартості двигунів серії АІР та двигунів класів енергоефективності IE2, IE3 та IE4 проілюстрована доцільність заміни вітчизняних АД сучасними енергоефективними двигунами.

					<i>КНУ.РМ.141.24.268с.05.В</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	ВИСНОВКИ	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Задирака В.С.</i>					51	2
<i>Перевір.</i>		<i>Ільченко О.В.</i>						
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>		<i>Титюк В.К.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Толмачов С.Т.</i>				<i>ЕМ гр. ЕМО-23м</i>		

6) Встановлено, що за вартості електричної енергії 7 грн/кВт·год термін окупності заміни двигунів загального використання на енергоефективні двигуни до 3-х років залежать від їх потужностей наступним чином: при потужності 0,75 кВт – у 95,0 % випадків; при потужності 5,5 кВт – у 78,0 % випадків; при потужності 22 кВт – у 61,0% випадків; при потужності 75 кВт – у 45,0 % випадків; при потужності 250 кВт – у 61,0 % випадків.

7) На конкретному прикладі асинхронного двигуна потужністю 22 кВт проілюстрована можливість його заміни при різних коефіцієнтах навантаження електродвигунами меншої потужності. Встановлено, що доцільність такої заміни залежить від комплексу допоміжних параметрів: вартості електроенергії, залишкової вартості двигуна, норми амортизації, тривалості роботи та ін. Зокрема показано, що при коефіцієнті навантаження $k_n = 0,25$ термін окупності до 2-х років установки нового двигуна 112М4 АД забезпечується при часі роботи двигуна протягом $T = 6000$ год або $T = 4500$ год, а при продажі демонтованого АД за залишковою вартістю, термін окупності при $k_n = 0,25$ і $T = 6000$ год складе приблизно один рік.

8) Ознайомлення з новітніми засобами визначення крутного моменту на валу електричних двигунів безпосередньо в умовах виробництва без демонтажу АД створює нові перспективи широкого моніторингу діючого парку АД в Україні з метою визначення оптимального графіку заміни задіяних в промисловості України АД їх енергоефективними аналогами.

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.В	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Толмачов С.Т., Ільченко О.В. Підвищення енергоефективності асинхронних двигунів в Україні: стан, можливості та перспективи. Криворізький національний університет. Вісник. Криворізький національний університет. Вип. 56. 2023. С. 133- 138. DOI: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-133-139
2. Проектування електричних машин : навч. посіб. / Д.В. Ципленков, О.Б Іванов, О.В. Бобров, В.В. Кузнецов, В.В. Артемчук, М.О. Баб'як ; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2020. 408 с.
3. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/north-america-low-voltage-induction-motors-market>
4. <https://systemax.ua/ua/direktiva-po-regulirovaniju-jenergojeffe.html#:~:text=%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%82%20IEC%2060034%2D30%2D1,IE2%20%2D%20%D0%B2%D0%B8%D1%81%D0%BE%D0%BA%D0%B0%20%D0%B5%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C>
5. <https://agrotex.info/statti/energoefektivnist-elektrodivguniv.html>
6. Проєкт плану відновлення України.
<https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/energy-security.pdf>
7. https://ledermann.com.ua/catalogs/LIW_compressed.pdf
8. <https://www.svaltera.ua/press-center/articles/4363.php>
9. <https://www.ekvives.com/ru/ledermannmotor/>
10. <https://ledermann.com.ua/ru/>
11. <https://ledermann.com.ua/ru/#history>
12. <https://eltech.kiev.ua/ua/g103070409-elektrodivgateli-075kvt-3h230v400v>

					<i>КНУ.РМ.141.24.268с.05.ПЛ</i>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Задирака В.С.			ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Ільченко О.В.					53	3
Реценз.						<i>ЕМ гр. ЕМО-23м</i>		
Н. Контр.		Титюк В.К.						
Затверд.		Толмачов С.Т.						

13. <https://systemax.ua/elektrodivigateli/trehfaznye-obshepromyshlennye-elektrodivigateli/w22-ie3/w22-63-2p-ie3-0-12.html>

14.

https://www.weg.net/catalog/weg/UA/en/c/EU_MT_LV_NEMA_3PHASE_TEFC_W22_HIGH/list?h=a4701b64

15. <https://motory.in.ua/ua/g1622806-elektrodivigateli-air>

16. <https://unitech.com.ua/trehfaznye-elektrodivigateli/>

17. 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.

18. Закладний О. О. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем: Монографія / О. О. Закладний // Київ: Видавництво «Лібра». 2013. 195 с.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.ПЛ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

23. Кучерук В. Ю. Елементи теорії побудови систем технічного діагностування електромоторів. Монографія / В. Ю. Кучерук // Вінниця: Універсум-Вінниця, 2003. 195 с.

24. Чорний О. П., Курбанова І. Г. Комп'ютеризовані комплекси для діагностики машин // ЕЛЕКТРОінформ. 2004. №1. С. 19–22.

25. Калінов 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. Калінов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Науково-виробн. журнал. 2009. №3. С. 22 – 30.

26. 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.

27. Лут М. Т. Зниження втрат енергії в асинхронних електроприводах / М. Т. Лут, О. Ю. Синявський / Енергетика і автоматика // 2013. № 3. С. 144–149.

28. Датчики крутного моменту серії ТМ. – Режим доступу: <http://www.datum-electronics.co.uk/products/torque-transducers-and-sensors/m425-rotary-torque-transducer/>

29. M425 Rotary Torque Sensor. – Режим доступу: <https://www.hbm.com/en/5626/multi-axis-sensor-mcs10/>

30. Lorenz Messtechnik GmbH. Evolution and future of torque measurement technology by Dr. Wilfried Krimmel. Режим доступу: <https://www.elexsys.co.za/wp-content/uploads/2017/08/Torque-Testing.pdf>

31. 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.

32. Закладний О.М. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник / Закладний О. М., Праховник А. В., Соловей О.І. Київ : Кондор, 2005. 408 с.

33. <https://datum-electronics.com/product/shaft-power-measurement-kits/>

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.В	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

Розрахунки енергетичних характеристик двигунів класів енергоефективності ІЕ2, ІЕ3 та ІЕ4 з оцінкою термінів їх окупності, виконані в програмному пакеті МATHCAD

$$P_n := 0.750 \quad n := 1000 \quad \eta_{AIP} := 0.70 \quad CAIP := 3700 \quad cel := 7$$

$$\eta_{IE2} := 0.759 \quad CIE2 := 4500$$

$$T1 := 8500 \quad T2 := 4000$$

$$\Delta C := CIE2 - CAIP \quad \Delta C = 800$$

Рішення

$$PAIP := \frac{P_n}{\eta_{AIP}} \quad PIE2 := \frac{P_n}{\eta_{IE2}} \quad \Delta P := PAIP - PIE2 \quad \Delta P = 0.083$$

$$X1 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot cel \cdot T1} = 0.161$$

$$X2 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot cel \cdot T2} = 0.343$$

Рисунок Д.1 – Фрагмент №1 розрахунку в МATHCAD: терміни окупності заміни двигуна серії АІР двигуном класу енергоефективності ІЕ2

					<i>КНУ.РМ.141.24.268с.05.Д</i>					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДОДАТКИ					
Розроб.		Задирака В.С.						Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Ільченко О.В.							56	2
Реценз.								<i>ЕМ гр. ЕМО-23м</i>		
Н. Контр.		Титюк В.К.								
Затверд.		Толмачов С.Т.								

$$\eta_{IE3} := 0.789 \quad C_{IE3} := 8300 \quad \Delta C := C_{IE3} - C_{AIP} \quad \Delta C = 4.6 \times 10^3$$

Рішення

$$P_{AIP} := \frac{P_n}{\eta_{AIP}} \quad P_{IE3} := \frac{P_n}{\eta_{IE3}} \quad \Delta P := P_{AIP} - P_{IE3} \quad \Delta P = 0.121$$

$$X1 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot \text{cel} \cdot T1} = 0.64$$

$$X2 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot \text{cel} \cdot T2} = 1.359$$

Рисунок Д.2 – Фрагмент №2 розрахунку в MATHCAD: терміни окупності заміни двигуна серії AIP двигуном класу енергоефективності IE3

$$\eta_{IE4} := 0.792 \quad C_{IE4} := 16800 \quad \Delta C := C_{IE4} - C_{AIP} \quad \Delta C = 1.31 \times 10^4$$

Рішення

$$P_{AIP} := \frac{P_n}{\eta_{AIP}} \quad P_{IE4} := \frac{P_n}{\eta_{IE4}} \quad \Delta P := P_{AIP} - P_{IE4} \quad \Delta P = 0.124$$

$$X1 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot \text{cel} \cdot T1} = 1.769$$

$$X2 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot \text{cel} \cdot T2} = 3.759$$

Рисунок Д.3 – Фрагмент №3 розрахунку в MATHCAD: терміни окупності заміни двигуна серії AIP двигуном класу енергоефективності IE4

					КНУ.РМ.141.24.268с.05.Д	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		