ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕНЕРГЕТИКА

DOI 10.31891/2307-5732-2020-289-5-188-195
УДК 621.317.3

О.Є. РУБАНЕНКО, А.А. ВИДМИШ
Вінницький національний аграрний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ 0,4 КВ

В статті проаналізовані особливості експлуатації електричних двигунів (ЕД) на підприємствах агропереробних підприємствах України. Звертається увага на те, що біля 95 % електричних двигунів цих підприємств складають трифазні та однофазні асинхронні двигуни з коротко замкнутим ротором на клас напруги 380/220В. ЕД експлуатуються в складних умовах підвищеної вологості, запиленості, перепадів температур, частих пусків, перевантажень і т. п. Прикладами є експлуатація ЕД на пунктах первинної обробки зерна, на тваринницьких фермах і комплексах, під час виробництва цукру та етанолу.

Це створює передумови передчасного пошкодження ЕД. В умовах широкої автоматизації технологічних процесів впроваджуються системи online моніторингу технічного стану (ТС) ЕД. Це сучасні мікропроцесорні системи. Їх програмне забезпечення реалізує складні та інформативні алгоритми визначення поточного стану ЕД на основі аналізу поточних значень діагностичних параметрів.

Однак, поточні значення не всіх діагностичних параметрів ЕД відомі на момент визначення ТС. Тому застосовуються їх прогнозні значення.

Авторами запропоновано оцінювати поточний ТС ЕД аналізуючи значення коефіцієнта його залишкового ресурсу. Значення цих коефіцієнтів змінюються від 1в.о. (двигун справний) до 0в.о. (двигун несправний). На прикладі, показано застосування програмного забезпечення, а саме, Anfis редактор додатку Fuzzy Logic Tool Box пакету прикладних програм Matlab для створення математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД. Зазначається, що похибка навчання моделі, яка ґрунтується на 582 розглянутих варіантах сполучень діагностичних параметрів та відповідних їм значеннях залишкового ресурсу ЕД, не перевищує 0,00288 в.о. (0,2%), а на тестовій виборці (4,1%).

Ключові слова: електричний двигун, технічний стан, діагностування, пошкодження, статор, ротор, нейро-нечітке моделювання, коефіцієнт залишкового ресурсу, функція належності.

O. RUBANENKO, A. VIDMISH
Vinnytsia National Agrarian University

INVESTIGATION OF DAMAGE TO 0.4 KV ASYNCHRONOUS MOTORS

The article analyzes the features of operation of electric motors (ED) at the enterprises of agro-processing enterprises of Ukraine. Attention is drawn to the fact that about 95% of electric motors of these enterprises are three-phase and single-phase asynchronous motors with a short-circuited rotor for voltage class 380 / 220V. ED are operated in difficult conditions of high humidity, dust, temperature changes, frequent starts, overloads, etc. Examples are the operation of ED at primary grain processing points, on livestock farms and complexes, during the production of sugar and ethanol.

This creates the preconditions for premature ED damage. In the conditions of wide automation of technological processes systems of online monitoring of a technical condition (TS) ED are introduced. These are modern microprocessor systems. Their software implements complex and informative algorithms for determining the current state of ED based on the analysis of current values of diagnostic parameters.

However, the current values of not all diagnostic parameters of ED are known at the time of determination of the vehicle. Therefore, their predictive values are used.

The authors propose to evaluate the current vehicle ED by analyzing the value of the coefficient of its residual resource. The values of these coefficients vary from 1v.o. (engine working) up to 0v.o. (engine defective). The example shows the application of the software, namely, Anfis editor of the Fuzzy Logic Tool Box application of the Matlab application package to create a mathematical model of the residual resource factor ED. It is noted that the learning error of the model, which is based on 582 considered variants of combinations of diagnostic parameters and the corresponding values of the residual resource of the ED, does not exceed 0.00288 USD. (0.2%), and in the test sample (4.1%).

Key words: electric motor, technical condition, diagnostics, damage, stator, rotor, neuro-fuzzy modeling, residual life factor, membership function.

Постановка проблеми

Агропромисловий комплекс (АПК) є вагомою складовою частиною економіки України. Серед інших задач цей комплекс займається виробництвом та переробкою сільськогосподарської продукції рис. 1 [1].

На рис.1 показані: а), б) – обладнання м'ясокомбінату; в), г) – елеватора, д), ж), к) – комплексу для сушіння зерна; л) – молоко заводу.

Як зазначено в [1] «на сьогодні агропромисловий комплекс (АПК) є однією із найбільш важливих та стійких за стабільністю надходжень до бюджету складових національної економіки України».

АПК є цілісною виробничо-економічною системою, об'єднуючи в собі низку сільськогосподарських підприємств спрямованих на отримання, транспортування, зберігання, переробку та реалізацію сільськогосподарської продукції [1].

а) **б)** **в)** **г)** **д)** **ж)** **к** **л**

Рис. 1. Обладнання підприємств, що обробляють сільськогосподарську продукцію

Україна є не лише виробником та повчальником сільськогосподарської сировини, а і сучасної високо технологічної продукції підприємств АПК. Рисою цих підприємств є постійне технічне переозброєння, яке полягає у заміні застарілого, малоефективного обладнання на більш якісне і надійне, що відповідає сучасним вимогам. Це дозволяє покращити надійність та якість виробництва, зменшити собівартість продукції.

З метою автоматизації виробництва на таких підприємствах, широко застосовуються електродвигуни (ЕД) різної потужності, наприклад, асинхронні ЕД напругою 380 В з коротко замкнутим ротором. Таких ЕД понад 95%.

Нажаль їх експлуатаційна надійність ще залишається недостатньою. Проте на сучасному етапі розвитку агропромислового комплексу держави суттєвою перешкодою для забезпечення належного рівня конкурентоспроможності підприємств та виробленої ними продукції на зовнішньому ринку є високий рівень витрат електричної енергії на виробництво сільськогосподарської продукції [1]. Тому все більше уваги приділяється альтернативним джерелам електроенергії: сонячним електростанціям, малим гідроелектростанціям, вітровим електростанціям [2, 3]. Також мають місце втрати сировини під час переробки сільськогосподарської продукції, викликані пошкодженням обладнання [4]. До такого обладнання можна віднести і електричні двигуни (ЕД).

Часто електродвигуни використовуються на механізованих виробничих ділянках таких, як: пункти первинної обробки зерна, на тваринницьких фермах і комплексах, під час виробництва цукру та етанолу і т.п.

Відмови електродвигунів [8] викликають порушення технологічних процесів, що завдає відчутної шкоди народному господарству через недовироблення, псування та погіршення якості продукції. Також, порушення технологічного циклу на агропереробному підприємстві викликає зменшення виготовленої продукції, нераціональне використання енергетичних ресурсів і т.п.

Рис.2. Наслідки порушення технології на птахофабриці

Крім того, на відновлення електродвигунів витрачається велика кількість матеріалів (обмотувального проводу, електротехнічної сталі, ізоляційного матеріалу), електроенергії та робочого часу.

Аналіз причин відмов електродвигунів свідчить про те, що, незважаючи на важкі умови роботи в сільському господарстві, переважну більшість з них можна було зберегти: при якісному діагностуванні; при вчасному виведенні в ремонт; за умови поблажливих умов експлуатації ЕД, що мають дефекти на ранній стадії розвитку; за рахунок впровадження on-line систем визначення поточного стану ЕД; при фіксації дефектів на ранній стадії їх розвитку. Також, сучасні методи та засоби діагностування [11] дозволяють обґрунтовано замінити, або вивести в ремонт ЕД, з врахуванням вимог та можливостей технологічного процесу на агропереробному підприємстві.

Враховуючи велику кількість взаємно впливових діагностичних параметрів ЕД, з метою спрощення оцінювання поточного технічного стану пропонуємо використовувати інтегральний діагностичний параметр – коефіцієнт залишкового ресурсу.

Водночас, складно визначати технічний стан працюючого ЕД, адже деякі діагностичні параметри можна вимірювати у відключеного або розібраного ЕД (наприклад, вимірювання опору ізоляції обмотки статора мегаомметром або вимірювання діаметра валу ротора під підшипником з метою виявлення причини вібрації) [5−7]. Тому визначений в темпі процесу, за таких умов, технічний стан працюючого ЕД є прогнозованим – нечітким. Для його визначення варто використовувати методи та засобі нейро-нечіткого моделювання.

Тому проблема підвищення якості експлуатації електродвигунів на агропромисловому виробництві шляхом покращення якості їх діагностування **актуальна** і має велике народногосподарське значення.

Мета досліджень полягає у підвищені якості визначення поточного технічного стану в умовах не завжди відомих, нечітких взаємовпливів різних технічних параметрів електричних двигунів на їх технічний стан і в якомога точнішому прогнозуванні динаміки розвитку пошкоджень ЕД.

Під час досліджень розв’язувались наступні **задачі**:

– аналіз факторів що викликають пошкодження ЕД на підприємствах АПК;

– причини виведення ЕД з експлуатації;

– формування та обробка статистичних даних про пошкодження ЕД на підприємствах агропереробної галузі;

– розробка методу визначення технічного стану ЕД в умовах неповноти початкових даних.

Аналіз досліджень та публікацій. Пошкоджуваність ЕД

Пошкоджуваність досліджуваних ЕД зумовлена такими особливостями їх експлуатації, як: помилки в виборі ЕД на стадії проектування або під час експлуатації (після заміни ЕД, після перемотування обмотки та зменшення коефіцієнта корисної дії), низький рівень обслуговування та ремонтів (викликаний недостатньою кількістю та кваліфікацією персоналу, відсутністю сучасного ремонтного обладнання), несприятливі умови оточуючого середовища (занадто висока, або низька температура, висока вологість, великі коливання температури і т.п.), тяжкі режими експлуатації (механічні перевантаження, нерівномірний графік навантаження, часті пуски), понад нормовані показники якості електроенергії (перенапруги, надструми, низькі напруги, несинусоїдність, несиметрія), низька надійність внутрішньогосподарських та розподільчих сільських електромереж [5−10].

Пил на млинах (рис. 3), на елеваторах, пунктах первинної переробки зерна, в комбікормових цехах, велика вологість і присутність агресивних газів в тваринницьких приміщеннях, різкі коливання і значне зниження температури в зимовий час на відкритій території, висока температура в котельних і зерносушилках і т.п. погіршують якість мастил у підшипниках (призводить до пошкодження підшипників (рис.4) та до зростання вібрації валу ротора, корпусу ЕД та до зростання середнього квадратичного значення віброшвидкості v_{rms}), якість лакової ізоляції обмоток, поліхлорвінілової ізоляції проводів живлення,

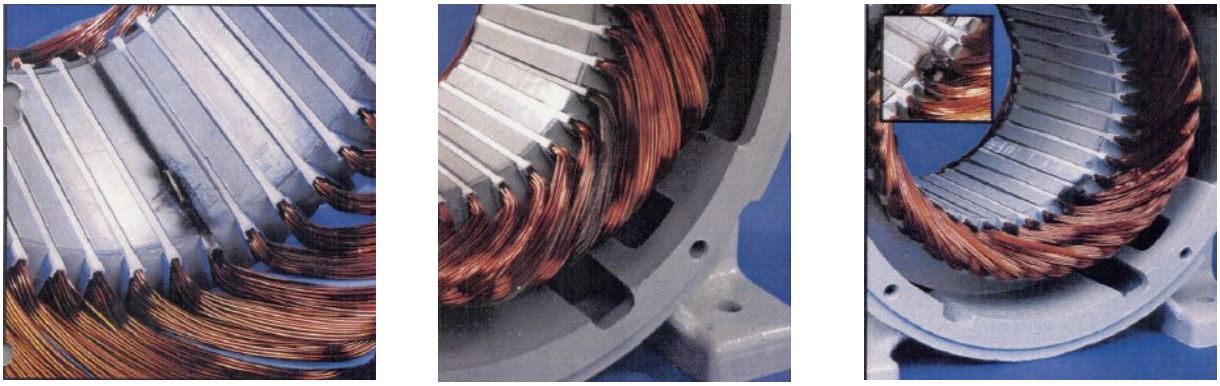
викликає окислення контактів брно (зростає перехідний опір контактів) і т.п. Брно – блок розключення початків («начал» – рос.) обмоток [6–8].

Рис. 3. Пил на електродвигуні мукомольного підприємства

а) **б)** **в)**

Рис.4. Пошкодження деталей підшипників.

На рис. 4 показані: а) – зигзагоподібні пошкодження кільця кулькопідшипника внаслідок проходження по ньому електричного струму (ймовірно така картина ушкодження виникла тому, що через підшипник проходив великий електричний струм, і одночасно підшипник піддавався осьовим коливанням); б) – пошкодження сепаратора); в) – забруднений підшипник.



а) **б)** **в)**

Рис. 5. Пошкодження ізоляції обмотки статора ЕД: а) – коротке замикання проводів однієї обмотки в пазу статора; б) – прогорання ізоляції проводів однієї обмотки; в) – коротке замикання проводів однієї обмотки з кромкою пазу статора

а) **б)** **в)**

Рис. 6. Інші пошкодження ЕД: а) – пошкодження контактів брно; б) – пошкодження ротора; в) – пошкодження крильчатки.

Причини виведення ЕД з експлуатації. Неприпустима концентрація аміаку, сірководню, вуглекислого газу в тваринницьких приміщеннях руйнують ізоляцію обмоток.

За таких умов зменшується активний опір ізоляції обмотки статора (R), зростає температура лобових поверхонь обмотки статора t_1 та температура корпусу ЕД t_2, зростає струм I, що протікає через обмотку статора ЕД. Пошкодження охолодження ЕД також призводить до зростання температури корпусу ЕД t_2. Пошкодження сталі статора викликає зростання струму статора в режимі холостого ходу ЕД – I_{xx} та зростання потужності холостого ходу ЕД – P_{xx}, до нагріву корпусу ЕД (t_2).

Під час проведення дослідного обстеження та планово-попереджувальних ремонтів електричних двигунів на семи підприємствах АПК було виявлено від 18 до 29 одиниць ЕД на кожному, що мають дефекти, які можуть привести до відмови під час роботи.

Часто це пошкодження підшипників, ізоляції обмотки статора та ротора [11, 12]. З 172 одиниць **вибірково** обстежених ЕД виявлені дефекти розподілились так, як це показано в таблиці 1 та на рис.7. Для обстеження вибирались лише ті двигуни, справний технічний стан яких, викликав сумніви у експлуатуючого персоналу за зовнішніми ознаками. До таких ознак відносяться: шум, вібрація, нагрів, тривалий час пуску, занижена швидкість обертів валу ротора і т.п.

Таблиця 1

Виявленні дефекти ЕД

Вузол ЕД	Дефект	Діагностичний параметр	Кількість пошкоджень	
			од.	%
Статор	Пошкодження фазної та міжвиткової ізоляції	опір ізоляції обмоток статора[1] [1], МОм.	52	30
	Обрив в обмотці статора	різниця струмів фазних обмоток[2], %.	3	2
	Вібрація статора та корпусу ЕД	віброзсув[3,8] в напрямках x, y, z, мкм.	9	5
	Перегрів обмотки статора та корпусу	температура[4,5] лобових частин обмоток та корпусу, °С.	15	9
	Перегрів сталі статора	температура[6] корпусу, струм холостого ходу[7] ЕД [4], °С.	5	3
Під-шипники	Забруднення	віброзсув корпусу, мкм	59	34
	Пошкодження верхнього кільця			
	Пошкодження нижнього кі льця			
	Пошкодження сепаратора			
	Пошкодження захисного кільця			
Ротор	Вібрація ротора	віброзсув[3], мкм.	5	3
	Обрив стержнів або поганий контакт з коротко замкнутими кільцями білячої клітки. Нагрів ротора. Зменшення обертів вала ротора на понад 10% від номінальної.	Зменшення кількості обертів вала ЕД, %.	2	1
	Зношування шийки валу під підшипниками	зменшення діаметра шийки валу під підшипниками ЕД, мкм.	3	2
Вентилятор	Заклинювання турбіни вентилятора, пошкодження лопатей турбіни, прокручування ротора ЕД відносно турбіни, перегрів ЕД, забруднення лопатей та захисної решітки	Температура корпусу ЕД, °С.	5	3
	Вібрація	Віброзсув, мкм.	5	3
		Понад нормований шум під час роботи, дБ.		
Брно	Нагрів корпусу, оплавлення та окислення шпильок, зростання опору контактів в брно	Опір контактів ≤0,05 Ом.	9	5
Разом			172	100

Верхні індекси, приведені в таблиці 1 мають наступне пояснення:

1 – Допустимий опір ізоляції обмотки статора напругою до 1 кВ електродвигунів змінного струму має бути не меншим 0,5 МОм при температурі 10-30 °С.

2 – Відповідно до норм МЕК перекіс за струмом фаз ЕД не перевищує 5%.

[3] – Допустимий вібро зсув для ЕД типу AIP 100 S2, потужністю 4 кВт, частотою обертів 3000 об. / хв. та після капремонту – 80 мкм.

[4] – Гранична температура обмоток статора електродвигунів що обдуваються серії А в захищеному закритому виконанні 3-5-го габаритів, що мають ізоляцію класу А – 95°С.

[5] – Температура на поверхні двигунів в сталому режимі на 15-20°С нижче температури обмоток. Підвищення температури двигунів викликано збільшенням струму в обмотках статора в порівнянні з номінальною. Тому для контролю за роботою двигунів потужністю 40 кВт і вище встановлюються амперметри.

[6] – Місцевий нагрів активної сталі статора відбувається через вигоряння і оплавлення сталі при коротких замиканнях в обмотці статора, а також при замиканні листів стали внаслідок торкання ротора за статор під час роботи двигуна або внаслідок руйнування ізоляції між окремими листами стали. Ознаками зачіпання ротора за статор є дим, іскри і запах гару; активна сталь в місцях торкання набуває вигляду полірованої поверхні; з'являється гудіння, що супроводжується вібрацією двигуна. Причиною чіпляння є: порушення нормального зазору між ротором і статором в результаті зношування підшипників, неправильної їх установки, внаслідок великого вигинання валу ротора, деформації сталі статора або ротора, одностороннього притягання ротора до статора через виткові замикання в обмотці статора, внаслідок сильної вібрації ротора, який визначають щупом.

[7] – Електродвигун переходить в режим холостого ходу, коли з його валу знімають робоче навантаження. В цьому випадку можна визначити такі важливі параметри функціонування ЕД, як струм намагнічування, потужність і коефіцієнт втрат в елементах приводу. Але головне – в режимі холостого ходу [3] можна визначити справність ЕД. Для трифазних асинхронних ЕД потужністю від 1,5 до 5,5 кВт при частоті 3000 обертів за хвилину допустиме значення струму холостого ходу не повинне перевищувати 45% від номінального струму ЕД.

[8] – Ослаблення пресування активної сталі осердя, що призводить до зростання вібрації корпусу статора. Вібрація листів сталі осердя призводить до розвитку контактної корозії металу. Контактна корозія руйнує ізоляцію листів сталі, що призводить до замикання та до додаткового нагріву осердя.

[9] – Викривлення осі валу (відхилення від співвісності шийок під підшипник не повинно бути більше 0,015 мм[4]).

Опис діагностичних параметрів, які характеризують дефекти приведені в таблиці 1, показаний в таблиці 2 [14].

Таблиця 2

Опис діагностичних параметрів.

Діагностичний параметр	Одиниця вимірювань	Нормативне значення	Позначення	Спрощене умовне позначення
Опір ізоляції обмотки статора	МОм	≥ 0,5	R	x_1
Віброзсув корпусу	мкм	<80	$s_к$	x_2
Перекіс фазних струмів статора	%	<5	ΔI	x_3
Температура обмоток статора	°С	<95	$t_{ст}$	x_4
Температура корпусу	°С	<75	$t_к$	x_5
Віброзсув ротора	мкм	<80	$s_р$	x_6
Віброзсув підшипників	мкм	<80	$s_п$	x_7
Віброзсув турбіни охолодження	мкм	<80	$s_т$	x_8
Температура брно	°С	<75	$t_б$	x_{10}
Струм обмотки статора	А	залежить від ЕД	$I_{ст}$	x_{11}

Для кращого розуміння алгоритму діагностування введемо інтегральні діагностичні параметри (ДП), зменшуючи попередню кількість ДП з десяти до шести.

Отже пропонуємо метод визначення технічного стану ЕД в умовах неповноти початкових даних, який шляхом використання нейро нечіткого моделювання дозволяє отримати поточне значення коефіцієнту залишкового ресурсу ЕД і в залежності від результату зробити висновок про один зі станів ЕД: справний, з незначними відхиленнями параметрів, передаварійний, аварійний та зменшити похибку прогнозування стану.

Таблиця 4

Спрощена таблиця пошкоджень ЕД

Вузол	Діагностичний параметр – коефіцієнт залишкового ресурсу	Кількість виведених з експлуатації ЕД	
		одиниць	%
Обмотка статора	Коефіцієнт залишкового ресурсу обмотки статора, $к_1$	57	31
Сталь статора	Коефіцієнт залишкового ресурсу сталі статора, $к_2$	7	4
Підшипники	Коефіцієнт залишкового ресурсу підшипників, $к_3$	49	27
Ротор	Коефіцієнт залишкового ресурсу ротора, $к_4$	21	12
Охолодження	Коефіцієнт залишкового ресурсу системи охолодження, $к_5$	19	11
Брно	Коефіцієнт залишкового ресурсу брно, $к_6$	29	15
Разом		172	100

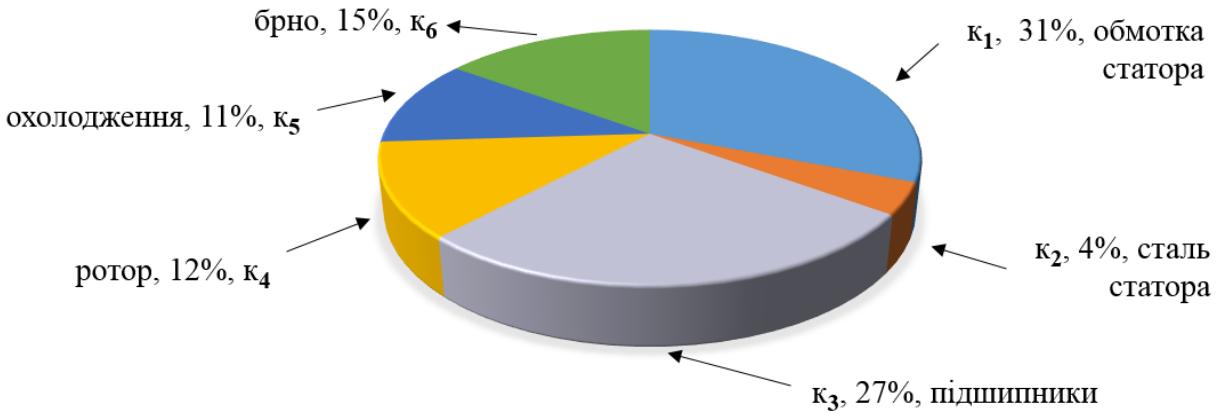


Рис. 6. Діаграма пошкоджень ЕД

Висновки

Результати аналізу факторів що викликають пошкодження ЕД на підприємствах АПК є підвищена вологість, перепади температур, вібрація, перенапруги, перевантаження.

Найчастішими причинами виведення ЕД з експлуатації є пошкодження підшипників та ізоляції обмотки статора.

Статистичні дані про пошкодження ЕД сформовані на основі досліджень ЕД підприємств агропереробної галузі України.

Література

1. Калетнік Г. М. Перспективи підвищення енергетичної автономії підприємств АПК в рамках виконання енергетичної стратегії України / Г. М. Калетнік // Вісник аграрної науки Причорномор'я. – 2019. – Вип. 4. – С. 90-98.

2. Petro Lezhniuk, Vyacheslav Komar, Serhii Kravchuk, Volodymyr Netrebskiy, Vladyslav Lesko. Optimal Integration of Photoelectric Stations in Electric Networks. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 209 p.

3. Гунько І. О. Аналіз програмних засобів для моделювання режимів роботи електричних систем / І. О. Гунько // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 3. – С. 138-141.

4. Buslavets O. A. Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities / O. A. Buslavets, P. D. Lezhniuk, O. Y. Rubanenko. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. −2015. − No. №2/8(74). – P. 35–41.

5. Ткаченко А. А. Разработка устройства диагностирования обрывов и межвитковых замыканий в статорных обмотках асинхронных двигателей / А. А. Ткаченко, В. А. Коновалов, С. В. Лагуненков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2012. – № 4. – С. 76-81.

6. Рубаненко О. Є. Вплив вібрації контактів на подальшу роботу високовольтних вимикачів / О. Є. Рубаненко, С. В. Мисенко, О. О. Рубаненко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2013. – № 1. – С. 72-76.

7. Rubanenko Olexander. Determination of optimal transformation ratios of power system transformers in conditions of incomplete information regarding the values of diagnostic parameters / Olexander Rubanenko, Oleg Kazmiruk, Valentyna Bandura, Victor Matvijchuk, Olena Rubanenko //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – № 4/3(88). – P. 66-79.

8. Alexey. Причины основных неисправностей двигателя: електронний ресурс. / Alexey // InfoElectrik. – 26.06.2016. – С. 76-81. Режим доступу: http://infoelectrik.ru/elektrodvigateli/osnovnye-neispravnosti-dvigatelya.html.

9. Круглова Т.Н. Причины основных неисправностей двигателя: електронний ресурс. / Т. Н. Круглова, И. В. Ярошенко, Н. Н. Работалов, М. А. Мельников // Высоковольтные измерительные комплексы и системы. Режим доступу: http://www.viks.su/blog/kompleksnaya-diagnostika-moshchnyh-elektrodvigateley

10. Subhasis Nandi. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors − a review / Subhasis Nandi, Hamid A. Toliyat, Xiaodong Li // IEEE transactions on energy conversion. −2005. –December. − Vol. 20. − No. 4. − P. 719-729.

11. Rubanenko O. Y. A Planning of the experiment for the defining of the technical state of the transformer by using amplitude-frequency characteristi / O. Y. Rubanenko, O. O. Rubanenko, M.O. Hryshchuk // Przeglad elektrotechniczny. −2020. − No. 3. − P. 119-124.

12. Костин В. Н. Монтаж и эксплуатация оборудования систем электроснабжения: Учеб. пособие. − СПб.: СЗТУ, 2004 − 184 с.

References

1. Kaletnik G. M. Perspekty`vy` pidvy`shhennya energety`chnoyi avtonomiyi pidpry`yemstv APK v ramkax vy`konannya energety`chnoyi strategiyi Ukrayiny` / G. M. Kaletnik // Visny`k agrarnoyi nauky` Pry`chornomor'ya. – 2019. – Vy`p. 4. – S. 90-98.

2. Petro Lezhniuk, Vyacheslav Komar, Serhii Kravchuk, Volodymyr Netrebskiy, Vladyslav Lesko. Optimal Integration of Photoelectric Stations in Electric Networks. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 209 p.

3. Gun`ko I. O. Analiz programny`x zasobiv dlya modelyuvannya rezhy`miv roboty` elektry`chny`x sy`stem / I. O. Gun`ko // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2020. – 3. – S. 138-141.

4. Buslavets O. A. Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities / O. A. Buslavets, P. D. Lezhniuk, O. Y. Rubanenko. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. −2015. − No. #2/8(74). – P. 35–41.

5. Tkachenko A. A. Razrabotka ustrojstva dy`agnosty`rovany`ya obryvov y` mezhvy`tkovyx zamykany`j v statornyx obmotkax asy`nxronnyx dvy`gatelej / A. A. Tkachenko, V. A. Konovalov, S. V. Lagunenkov // Visny`k Donbas`koyi derzhavnoyi mashy`nobudivnoyi akademiyi. – 2012. – # 4. – S. 76-81.

6. Rubanenko O. Ye. Vply`v vibraciyi kontaktiv na podal`shu robotu vy`sokovol`tny`x vy`my`kachiv / O. Ye. Rubanenko, S. V. My`senko, O. O. Rubanenko // Vibraciyi v texnici ta texnologiyax. – 2013. – # 1. – S. 72-76.

7. Rubanenko Olexander. Determination of optimal transformation ratios of power system transformers in conditions of incomplete information regarding the values of diagnostic parameters / Olexander Rubanenko, Oleg Kazmiruk, Valentyna Bandura, Victor Matvijchuk, Olena Rubanenko //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – # 4/3(88). – P. 66-79.

8. Alexey. Pry`chy`ny osnovnyx ney`spravnostej dvy`gatelya: elektronny`j resurs. / Alexey // InfoElectrik. – 26.06.2016. – S. 76-81. Rezhy`m dostupu: http://infoelectrik.ru/elektrodvigateli/osnovnye-neispravnosti-dvigatelya.html.

9. Kruglova T.N. Pry`chy`ny osnovnyx ney`spravnostej dvy`gatelya: elektronny`j resurs. / T. N. Kruglova, Y`. V. Yaroshenko, N. N. Rabotalov, M. A. Mel`ny`kov // Vysokovol`tnye y`zmery`tel`nye kompleksy y` sy`stemy. Rezhy`m dostupu: http://www.viks.su/blog/kompleksnaya-diagnostika-moshchnyh-elektrodvigateley

10. Subhasis Nandi. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors − a review / Subhasis Nandi, Hamid A. Toliyat, Xiaodong Li // IEEE transactions on energy conversion. −2005. –December. − Vol. 20. − No. 4. − P. 719-729.

11. Rubanenko O. Y. A Planning of the experiment for the defining of the technical state of the transformer by using amplitude-frequency characteristi / O. Y. Rubanenko, O. O. Rubanenko, M.O. Hryshchuk // Przeglad elektrotechniczny. −2020. − No. 3. − P. 119-124.

12. Kosty`n V. N. Montazh y` ekspluatacy`ya oborudovany`ya sy`stem elektrosnabzheny`ya: Ucheb. posoby`e. − SPb.: SZTU, 2004 − 184 s.

Надійшла / Paper received : 05.11.2020Надрукована/Printed :27.11.2020