

І.І. ПЕРЕСУНЬКО, асистент, Е.С. БЕДНОВ, аспірант,  
В.М. КІЯНЧУК, Ю.В. КУРОЧКІН, студенти, Криворізький національний університет

## ДІАГНОСТИКА СТАНУ ПАРАМЕТРІВ СИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ШАХТНИХ НАСОСНИХ УСТАНОВОК

**Мета.** Є підвищення рівня якості функціонування синхронного електроприводу насосних установок шляхом застосування засобів діагностування та оцінювання їх енергетичного і технічного стану.

**Методи дослідження.** При проведенні розглянутого в статті дослідження вирішуються шляхом застосування теорії електропривода, теорії електричних кіл та методів: математичного аналізу, аналізу гармонічного складу кривих струмів і напруг, математичного і комп'ютерного моделювання та теорії вимірювань, для створення системи діагностування.

**Наукова новизна.** Розвинуто метод діагностування електроприводу насосних установок з синхронними двигунами, який враховує показники якості електричної енергії, режим навантаження і поєднує метод складових втрат і спектрального аналізу струмів та напруг, що дозволяє визначити енергетичний і технічний стан досліджуваної електромеханічної системи.

**Практична значимість.** Визначено діагностичні ознаки електричних та механічних аварійних режимів роботи насосних установок з синхронними двигунами, які дозволяють встановити тип ушкоджень і виконати їх своєчасний ремонт без зриву технологічного процесу

**Результати.** Основними причинами низької якості функціонування синхронних електроприводів (СЕП) насосних установок (НУ) та виникнення аварій є порушення умов експлуатації, неврахування впливу якості напруги живлення та режиму навантаження, недостатній обсяг інформації про технічний стан, несвоєчасне виявлення і усунення дефектів устаткування, неякісний ремонт тощо. Синхронні електроприводи насосних установок, від надійної і безпечної роботи яких залежать технологічні та економічні показники підприємства не діагностуються постійно під час експлуатації. Особливо гостро ці вимоги пред'являються до електромеханічних систем, які є ланкою безперервного технологічного процесу. Дієвими заходами можуть стати: розроблення засобів діагностування енергетичного і технічного стану та технологічних заходів з економії електроенергії СЕП.

**Ключові слова:** аварій, електромеханічних систем, діагностування, синхронний електропривод, насосні установки, гармонічні складові кривих струмів та напруг.

doi: 10.31721/2306-5435-2018-1-103-94-98

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** На сьогодні близько 70% насосних установок на підприємствах України працюють з перевищенням установленого строку служби, що призводить до низької якості їх функціонування, високої аварійності та виходу з ладу електромеханічного обладнання. Експлуатація електроприводів насосних установок з синхронними двигунами, які знаходяться в незадовільному технічному стані, призводить до збільшення фінансових витрат, зумовлених зростанням електроспоживання. Вартість електроенергії, яку споживає електропривод НУ протягом строку експлуатації, значно перевищує вартість устаткування та витрати на обслуговування і більше ніж в 5 разів перевищує його власну [1].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Чільне місце в дослідженнях з метою підвищення якості функціонування та ресурсу устаткування займає діагностування СЕП. В основу наукових досліджень з діагностування і дослідження характеристик електропривода – М.Г. Баширова, О.С. Бешти, О.Д. Гольдберга, А.П. Калінова, В.Б. Клепікова, М.Ф. Котеленця, В.Ю. Кучерука, А.В. Лугового, В.В. Овчарова, С.М. Пересади, М.Г. Поповича, І.В. Прахова, О.В. Садового, В.Ф. Сивокобиленка, І.А. Сиромятнікова, Д.Й. Родькіна, В.М. Чермалиха, О.П. Чорного, Congrad U. Brunner, F. Carlsson, E. O. Schweitzer.

**Постановка задачі.** На сьогодні виникла необхідність застосування новітніх технічних рішень і наукових підходів до вирішення проблеми підвищення рівня якості функціонування синхронних електроприводів насосних установок.

**Викладення матеріалу та результати.** Основними причинами низької якості функціонування синхронних електроприводів (СЕП) насосних установок (НУ) та виникнення аварій є порушення умов експлуатації, неврахування впливу якості напруги живлення та режиму навантаження, недостатній обсяг інформації про технічний стан, несвоєчасне виявлення і усунення дефектів устаткування, неякісний ремонт тощо. Відповідно до цього, дієвими заходами можуть стати: розроблення засобів діагностування енергетичного і технічного стану та технологічних заходів з економії електроенергії СЕП. Визначення ознак аварійних режимів синхронних двигунів [12].

Для того щоб ідентифікувати енергетичний аварійний стан роботи двигунів потрібно сформулювати попередні ознаки струмових пошкоджень в двигуні. В результаті аналізу наступних літературних джерел [7, 8, 9, 10, 11] було визначено ознаки аварійних режимів, які можна представити кортежем

$$C = \langle C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7 \rangle,$$

де  $C1$ – трифазні симетричні КЗ;  $C2$ – двофазні (міжфазні) КЗ в одній точці;  $C3$ – двофазні КЗ із неоднаковим числом замкнутих витків окремих фаз;  $C4$ – двофазні КЗ на землю;  $C5$ – однофазні КЗ на землю;  $C6$ – однофазні виткові замикання;  $C7$ – обрив фази живильної мережі.

Трифазні симетричні КЗ. Найпростішим випадком трифазного КЗ є одночасне замикання трьох фаз в одній точці. За умови рівності перехідних опорів замикання буде симетричним, за нерівності - несиметричним. Векторні діаграми струмів і напруг є симетричними й урівноваженими, у них відсутні складові зворотних і нульових послідовностей. Зі зниженням напруги також різко спадає обертальний момент двигуна ( $M \equiv U_2$ ) фазні обмотки статора перегріваються й згорають. За цими ознаками можливо визначити наявність внутрішнього симетричного трифазного КЗ. Ударні струми являють велику небезпеку – викликають значні зусилля між струмопроводними частинами устаткування, руйнуючи його й викликаючи нагрівання, що у багато разів перевищує термічну стійкість ізоляції [12].

Двофазні (міжфазні) КЗ в одній точці. Міжфазні КЗ в обмотках статора є основним видом ушкоджень у СД. Вони супроводжуються значними струмами, які значно перевищують номінальний струм двигуна. Аварійні струми викликають руйнування обмоток і сталі двигуна [7]. Найпростішим випадком двофазного КЗ є металічне замикання двох фаз в одній точці, а більш складним - замикання двох фаз через перехідні опори в одній або різних точках мережі [12].

Двофазні КЗ із неоднаковим числом замкнутих витків окремих фаз. Є одним з найбільш імовірних видів міжфазних КЗ. Струми при такому ушкодженні визначаються методом симетричних складових. Різниця кутів між струмами фаз перевищує  $60^\circ$ . Аварійні струми викликають руйнування обмоток і сталі двигуна [12].

Двофазні КЗ на землю КЗ на землю в мережі з ізольованою нейтраллю відрізняються від звичайного двофазного тим, що ушкоджені фази, наприклад В і С, у місці металічного КЗ вимушено набувають потенціалу землі. З'являється напруга нульової послідовності. Сильне зниження міжфазних і фазних напруг ушкоджених фаз (у місці КЗ до нуля) і поява складових нульової послідовності не лише у фазних напругах, але й струмах. Напруга між ушкодженими фазами дорівнює нулю. Напруга неушкодженої фази залишається нормальною. Міжфазні напруги між ушкодженими фазами й неушкодженою знижуються до фазної напруги. Аварійні струми викликають руйнування обмоток і сталі двигуна. Через різке зниження напруги в місці КЗ, цей вид ушкоджень після трифазного КЗ є найважчим з точки зору збереження стійкості енергосистеми й споживачів [12].

Однофазні КЗ на землю. Ушкодження ізоляції обмотки статора призводить до замикання фази на заземлений корпус СД. Існує декілька причин, що викликають замикання на землю. Перша пов'язана з поступовим погіршенням ізоляції до пробою під дією напруги. Друга - пробій у результаті комутаційних перенапруг. Замикання фази на землю в мережі 380В становить небезпеку для двигуна й характеризуються протіканням великих струмів сумірних зі струмами міжфазних КЗ [12].

Однофазні виткові замикання. Коротке замикання 3-5% витків однієї фази обмотки статора СД призводить до неприпустимого перегрівання, що викликає руйнування ізоляції. Основною причиною виникнення виткових замикань є зниження електричної міцності ізоляції обмоток у результаті підвищення температури, старіння, потрапляння вологи й мастила на ізоляцію тощо. У витках, що замкнули, під впливом наведених у них струмів, які значно перевищують номінальний, відбувається різке підвищення температури, що супроводжується нагріванням сталі сердечника й неушкодженої частини обмотки. Це ще більше руйнує її ізоляцію і, якщо вчасно не відключити СД, виткові замикання можуть призвести до більш важких видів аварій [12].

Обрив фази живильної мережі. Дві сполучені послідовно обмотки двигуна виявляються включеними на лінійну напругу. При загальмованому роторі напруга на неушкоджених фазах дорівнює половині лінійної напруги, а напруга на ушкодженій фазі – нулю. Якщо втрата фази відбулася до включення двигуна в мережу, то він не може запуститися навіть за відсутності навантаження на валу. При переході двигуна із трифазного режиму роботи в однофазний на

ходу утвориться обертаючий момент. Якщо швидкість двигуна близька до номінальної, обертаючий момент достатній для продовження роботи з невеликим зниженням [12].

Визначення технічного стану електроприводу насосних установок з синхронними двигунами. Аварійні режими СД умовно поділяються на механічні та електричні. В свою чергу електричні поділяються на три типи: струмові аварії; мережеві аварії; та аварії, пов'язані зі зниженням опору ізоляції [12].

Радіальна вібрація через механічні перевантаження на валу СД, виробничий брак елементів, асиметрія напруги живлення є причинами значної частини механічних аварій. Через прихований характер більшості аварій вони виявляються лише після розбирання СД та НУ або відповідних випробувань [12].

Постійний контроль напруги мережі та струму, що споживається, дозволяє за допомогою засобів діагностування звести цю ймовірність до мінімуму.

Від умов експлуатації залежить енергетичний і технічний стан СД. До них належать вібрації, вологість, температура довкілля, тиск, удари тощо. Наслідком цього у двигунах можуть відбуватись руйнування окремих елементів і спаїв, замикання проводів з ушкодженою ізоляцією, порушення контактів, механічний резонанс, який часто призводить до руйнування конструкції тощо [12].

На теперішній час значне поширення отримали методи діагностування стану ЕМС, які використовують моніторинг споживаного струму та виконують спектрально-струмового аналіз отриманого сигналу [5]. Цей метод дозволяє з достатнім рівнем достовірності встановити технічний стан елементів НУ. Будь-які збурення в роботі механічної і електричної частин двигуна та пов'язаної з ним насосної установки змінюють магнітний потік в зазорі електричної машини, тобто слабкої модуляції струму, що споживається. Свідченням про наявність пошкоджень електричної або механічної частин насосної установки є поява у спектрі струму СД характерних частот певної величини [6]. На відміну від вібродіагностики, моніторинг струму насосної установки може виконуватись в електрощиті живлення або на клемній коробці СД без втручання в його роботу [2, 3]. Спектри струмів СЕП за допомогою програми MATLAB наведено на рис. 1.

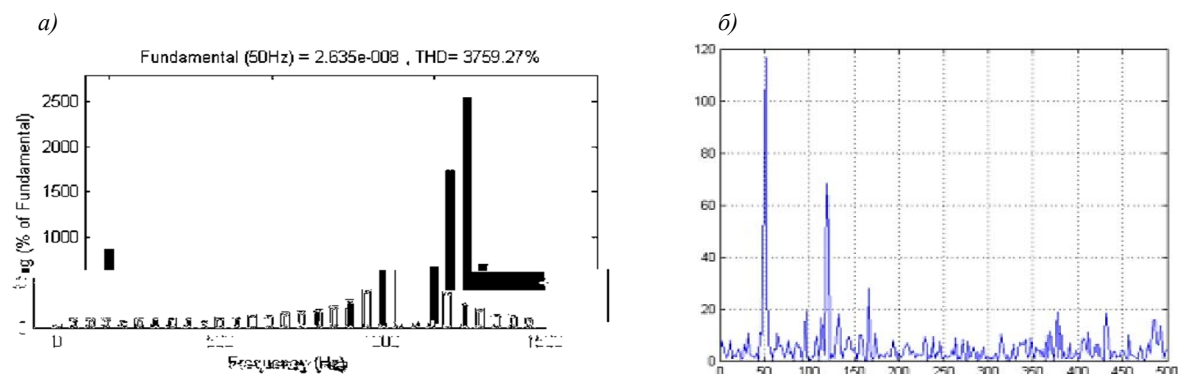


Рис. 1. Спектральна характеристика струму синхронного електроприводу отримана за допомогою блоку "Powergui" (а) та розкладу через "FFT analysis" (б)

Спотворення форми напруги живлення СД призводить до появи гармонік в отриманих спектрах струму і напруги. Несправності двигуна і пов'язаного з ним насоса викликають гармоніки лише в спектрі струму. Наведемо приклади таких пошкоджень:

неспівосність валів двигуна і пов'язаної з ним насосної установки, а також пошкодження підшипників визначається за частотами кратними частоті обертання ротора СД;

наявність міжвиткових замикань в обмотках статора СД визначається за частотою живильної мережі на підприємстві;

ослаблення кріплення до фундаменту, за чіплення ротора за статор двигуна визначається на частоті кратній  $\frac{1}{2}$  частоти обертання ротора;

дефекти ремінної передачі визначається на частотах кратних частоті биття ремня, яка залежить від його довжини і діаметрів шківів;

ексцентриситет ротора визначається на численних бічних смугах на частоті непарних гармонік живильної мережі;

пошкодження пов'язані з СД механізмів: насос, вентилятор, компресор визначається на лопатевій частоті.

Виявити гармонічні складові струму характерні для непрацюючого обладнання можливо порівнянням гармонік напруги й струму. Skorиставшись базою даних вимірювань, та аналізуючи їх в процесі експлуатації насосної установки можна спостерігати розвиток пошкоджень двигуна та пов'язаного з ним механізму в динаміці, а отже прогнозувати розвиток несправностей. Показником критичності дефекту може слугувати різниця між амплітудами основної частоти і характерної для конкретної несправності. Спектральні характеристики струму та напруги, пошкодження на НУ та характерні частоти, за якими вони визначаються, отримані за допомогою комп'ютерного моделювання представлені на рис. 1. Вплив дефектів насосної установки на спектри струмів та напруг приводного двигуна представлені у табл. 1.

На сьогодні визначення технічного стану насосної установки з СД, придатного для кількісної оцінки не існує. Технічний стан установки можна визначити за допомогою аналізу складових втрат, за якими діагностується ушкодження у відповідному вузлі, з використанням показника відносної зношеності ізоляції [4].

Поширеним явищем є підвищена зношуваність ізоляції, яка зумовлена порушенням режиму експлуатації СД. Основні чинники, які впливають на зношуваність, – це дія хімічно активних середовищ, теплові дефекти ізоляції, вологість та пил.

Відносна зношеність ізоляції нижча від номінального значення, якщо насосна установка з СД працює зі зниженим навантаженням. Відносна зношеність перевищує одиницю якщо робоча температура вища припустимої.

Тому головною умовою справного технічного стану є відносна зношеність ізоляції за певний цикл часу, яка не повинна перевищувати одиницю.

Таблиця 1

Вплив дефектів насосної установки на спектр струмів та напруг двигуна

Дефект	Зміна параметра																		
	1 гармоніка струму	3 гармоніка струму	5 гармоніка струму	7 гармоніка струму	9 гармоніка струму	13 гармоніка струму	15 гармоніка струму	17 гармоніка струму	19 гармоніка струму	1 гармоніка напруга	3 гармоніка напруга	5 гармоніка напруга	7 гармоніка напруга	9 гармоніка напруга	13 гармоніка напруга	15 гармоніка напруга	17 гармоніка напруга	19 гармоніка напруга	
Знос робочого колеса	+				+			+		+		+							
Знос ущільнення		+		+						+			+		+				
Зміна форми робочого колеса	+			+	+				+	+			+	+		+			
Пошкодження підшипників ковзання	+		+					+		+			+		+				+
Дефекти системи охолодження		+							+									+	
Дефекти клапанів	+					+	+				+				+		+		
Відхилення від горизонтального рівня під час монтажу			+			+		+			+	+						+	+
Дисбаланс		+		+				+				+		+					+
Неспіввісність валів		+				+				+							+	+	

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Дана робота покликана показати методи діагностування електромеханічних систем і на їх основі вирішити питання підвищення якості

функціонування насосних установок з синхронними двигунами шляхом застосування засобів діагностування їх енергетичного і технічного стану.

#### Список літератури

1. **Праховник А.В.** Практичний посібник з енергозбереження для об'єктів промисловості, будівництва та житлово-комунального господарства України. / [А.В. Праховник, В.В. Прокопенко, В.І. Дешко та ін.]. – Луганськ: вид-во "Місячне сяйво", 2009. - 696 с.
2. **Гольдин А.С.** Вибрация роторных машин / А.С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 1999.- 344 с.
3. **Костюков В.Н.** Система контроля технического состояния машин возвратно-поступательного действия / В.Н. Костюков, А.П. Науменко // Контроль. Диагностика. – 2007. - №3.- С. 50-59 с.
4. **Бурковский А.Н.** Нагрев и охлаждение электродвигателей взрывонепроницаемого исполнения / А.Н. Бурковский, Е.Б. Ковалев, В.К. Коробов. – М.: Энергия, 1970. – 184 с.
5. **Петухов В.** Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения [Электронный ресурс] / В. Петухов // Новости электротехники. - 2008. - №1(49). – Режим доступа до журн. : <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/49/10.php>.
6. **Петухов В.** Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока [Электронный ресурс] / В. Петухов, В. Соколов // Новости электротехники. - 2005. - №1(31). - Режим доступа до журн. : <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php>.
7. **Чернобровов Н.В.** Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособие для техникумов / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
8. **Бендат Дж.** Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол.– М.: Мир, 1989. – 540 с.
9. **Филиппов И.Ф.** Теплообмен в электрических машинах / И.Ф. Филиппов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
10. **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-виробничий журнал. – 2009. - №3. - С. 22 – 30.
11. **Романов Р.А.** Современные средства и методики диагностики оборудования горнодобывающей и горноперерабатывающей отрасли согласно концепции "Надежное оборудование" / Р.А. Романов, В.В. Севастьянов, А.П. Печеневский // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2008. - №2.
12. **Оборонов Т.Ю.** Моделі і засоби діагностування енергетичного і технічного стану синхронного електроприводу насосних установок /Текст дисертації/ Київ – 2017. – 160 с.

Рукопис подано до редакції 12.04.2018

УДК 536.212.2:519.632.4:517.962.8

Н. Х. САЙГАРЕСВ, канд. техн. наук, доц., Н. Н. ШАПОВАЛОВА, ст. викладач  
Криворізький національний університет

### ЧИСЛОВЕ РОЗВ'ЯЗАННЯ КРАЙОВОЇ ЗАДАЧІ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ БІБЛІОТЕКИ НАУКОВИХ РОЗРАХУНКІВ SCIPY

**Мета.** Інформатизація суспільства країни – це один з факторів, який кардинально впливає на розвиток економіки, і неможливий без висококваліфікованих кадрів. Випускнику вищого навчального закладу необхідно володіти сформованими базовими професійними компетенціями, що дозволить майбутньому фахівцю стати успішним в умовах конкурентної боротьби на ринку праці. Інформатична компетентність майбутніх інженерів є невід'ємною складовою базових компетенцій. Тому метою роботи є розробка комплексу професійно-спрямованих завдань і бібліотеки їх програмної реалізації для формування компетентностей в широкій предметній області та професійної мобільності майбутніх інженерів-теплоенергетиків.

**Методи.** Моделювання та розрахунок розподілу температури в технологічних пристроях розглядається на прикладі рішення крайової задачі теплопровідності, яка описується в загальному вигляді диференціальним рівнянням Фур'є. Завдання для нелінійних рівнянь або навіть лінійні задачі, але в областях складної форми, дуже рідко вдається вирішити аналітично. Для вирішення рівняння Фур'є викладено чисельний метод кінцевих різниць, застосування якого дозволяє звести крайову задачу до вирішення систем алгебраїчних рівнянь.

**Наукова новизна.** Розробка комплексу професійно-спрямованих прикладних задач і бібліотеки програм, що реалізують чисельні методи їх вирішення.

**Практична значимість.** Робота має міждисциплінарний характер. Її практичне значення полягає в підвищенні якості підготовки майбутніх фахівців. При розрахунках різних типів енергетичних і технологічних систем на стадії пошукового конструювання потрібна всебічна оцінка теплообмінних процесів, знання температурних полів в агрегатах, визначення всіх необхідних енергетичних характеристик з урахуванням експлуатаційних навантажень. Студенти, що опанували рішення диференціальних рівнянь розподілу температури в багатьох процесах тепломасопереноса за допомогою чисельних методів, зможуть використовувати не тільки традиційно застосовані в інженерній практиці залежності та розрахункові співвідношення, а й методи математичного моделювання, що підвищить якість технічних рішень.

© Сайгаресв Н. Х., Шаповалова Н. Н., 2018