

## **РЕФЕРАТ**

наукової роботи:

**«Електромеханічні системи підвищеної енергоефективності для об'єктів  
промисловості та транспорту»**

(автори Шихненко М.О., Рижков О.М., Ноженко В.Ю., Сьомка О.О.)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасними тенденціями розвитку електромеханічних систем є підвищення їх ефективності та надійності. Наукова робота направлена на вдосконалення принципів побудови, ефективності та надійності роботи електромеханічних складових технологічних комплексів, пов'язаних із важливими галузями промисловості – транспортом, виробництвом та будівництвом.

Одним із факторів, який привертає увагу до необхідності вдосконалення електричних систем транспортних засобів, є все зростаючі об'єми споживання електроенергії внаслідок все більшої електрифікації виконавчих вузлів різних систем транспортних засобів. Вирішення цього завдання вимагає збільшення потужності генератора, при цьому необхідність зниження маси пускових і генеруючих пристроїв та підвищення ефективності перетворення енергії залишається.

Відповіддю на поставлені задачі може бути використання стартер-генераторів на основі вентильно-індукторної машини, ефективність перетворення енергії якої вища ніж у традиційних електричних машин, а маса, за рахунок усунення окремого пускового пристрою, функції якого виконуватиме машина, нижча. Разом з тим, для забезпечення необхідних статичних і динамічних показників вентильно-індукторних стартер-генераторів треба визначити характер протікання процесів перетворення енергії в стартерному і генераторному режимах та встановити вплив параметрів електромеханічної системи і способів керування на показники енергоефективності в режимах стартера і генератора.

В енергетичній галузі, зокрема на атомних електростанціях, першочерговими характеристиками, які вимагаються від обладнання, являються надійність та безвідмовність роботи. Так на атомних електростанціях використовуються крани-маніпулятори, зокрема у складі установок дезактивації металевих відходів, які, на відміну від загальнопромислових, повинні забезпечувати підвищену точність та швидкість позиціонування, що продиктовано умовами безпеки.

Для забезпечення необхідних характеристик такої електромеханічної системи в умовах невизначеності масо-інерційних параметрів вантажу доцільним є створення автоматизованої системи позиційного керування приводами крана-маніпулятора при відпрацюванні технологічного процесу у складі установки дезактивації радіоактивних металів. При застосуванні ефективних стратегій керування така система дозволить підвищити енергоефективність роботи, швидкодію та точність позиціонування вантажу крана навіть за умов динамічної зміни характеристик навантаження та зовнішніх збурень.

Для пріоритетних галузей промисловості розвинутих країн металургійній, будівельній, гірничій, машинобудівній та ін., енергетична ефективність та стабільність роботи виробничого обладнання має визначальне значення. Динамічний технологічний розвиток обладнання провідних підприємств цих галузей дозволяє знизити собівартість вихідної продукції. Одними із широко розповсюджених пристроїв таких виробництв, які потребують модернізації, являються вібраційні машини, які і до нашого часу використовують некеровані асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Найбільш стабільними у роботі вібраційними машинами є зарезонансні дебалансні віброзбуджувачі, які, разом з тим, мають суттєвий недолік – значні динамічні навантаження та «застрягання» роторів приводних двигунів при наближенні до резонансної частоти роботи внаслідок різкого збільшення амплітуди коливань.

Застосування частотно-регульованого асинхронного електроприводу та розробка законів керування, що забезпечують підвищення динамічного електромагнітного моменту, покликано вирішити зазначену проблему, а також підвищити ефективність використання електричної енергії та надійність роботи обладнання.

В умовах промислових підприємств України експлуатується велика кількість електричних машин фактичне напрацювання яких перевищує межовий термін експлуатації, зокрема асинхронних двигунів обладнання нафтохімічної та гірничодобувної промисловості. З позицій надійності це означає, що зазначені машини працюють на останньому етапі кривої життєвого циклу, що визначається високою ймовірністю виникнення раптових відмов.

При неможливості здійснити планову заміну, модернізацію такого обладнання, або у випадку обмежених видатків на технічне переоснащення виробництва доцільним є застосування комплексів для прогнозування і діагностики їх поточного стану. При цьому, важливою задачею є вдосконалення методів визначення та прогнозування показників надійності асинхронних двигунів з урахуванням процесів зміни стану основних конструктивних вузлів для оцінки їх залишкового ресурсу.

**Мета, об'єкт та предмет дослідження.** *Мета роботи* – розвиток теорії електричних машин та теорії електроприводу за рахунок розробки математичних моделей, методів і принципів керування, побудови, контролю і діагностики для підвищення енергоефективності і надійності електромеханічних систем на основі електричних машин вентильно-індукторного та асинхронного типу при застосуванні в промисловості та транспорті.

*Об'єктом дослідження* є електромеханічні системи на основі асинхронних та вентильно-індукторних машин.

*Предмет дослідження* – квазіусталені та перехідні процеси, методи керування, контролю та діагностики електромеханічних систем.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Розроблено математичну модель вентильно-індукторного стартер-генератора, яка містить рівняння індукторної машини, вентильного перетворювача, елементів кола постійного струму, системи керування та умов переходу з генераторного режиму в стартерний і навпаки, враховує втрати електричної машини та дозволяє дослідити особливості квазіусталених і перехідних процесів як в стартерному, так і в генераторному режимах.

2. Запропоновано підхід до врахування магнітних втрат вентильно-індукторної машини у вигляді еквівалентного струму, напрямок якого відповідає фазній напрузі та визначається відповідно запропонованим логічним виразам.

3. Вперше науково обґрунтовано вплив параметрів вентильно-індукторного стартер-генератора, акумуляторної батареї і алгоритмів керування на енергетичні показники стартерного режиму. Встановлено, що вибір акумуляторної батареї з внутрішнім опором  $(1/2 \dots 1/8)R_{AB(ном)}$ , коефіцієнта широтно-імпульсного регулювання фазної напруги в межах  $0,7 \dots 0,9$ , або рівня обмеження фазного струму  $(1,2 \dots 5)i_{ф(max)(ном)}$  дає змогу знизити споживання енергії акумуляторної батареї відповідно на  $1 \dots 5 \%$ ,  $3 \dots 11 \%$  та  $5 \dots 21 \%$  відносно номінальних значень.

4. Вперше науково обґрунтовано вплив параметрів вентильно-індукторного стартер-генератора, акумуляторної батареї і обмеження рівня фазного струму на квазіусталені та перехідні процеси генераторного режиму. Встановлено, що збільшення рівня обмеження фазного струму від значення, що відповідає холостому ходу генератора, на один порядок дозволяє знизити тривалість збудження на два

порядки, а зменшення ємності конденсатора в колі постійного струму від  $2C_{min}$  до  $0,05C_{min}$ , вибір акумуляторної батареї з електрорушійною силою  $(1/2 \dots 1/4)E_{AB(ном)}$  або з внутрішнім опором  $(2 \dots 8)R_{AB(ном)}$  забезпечує зниження витрат енергії акумуляторної батареї при збудженні відповідно в 2,2...57,9, 4,3...19,2 та 1,1...1,6 рази відносно номінальних значень. Обґрунтовано мінімальну величину ємності конденсатора  $C_{min}$  в колі постійного струму, яка забезпечує відповідність стандартам показників якості вихідної напруги генератора.

5. Вперше розроблено віртуальну модель електромеханічної приводної системи крана-маніпулятора при переміщенні вантажу шляхом реалізації в моделі залежності моменту навантаження, величина якого змінюється в процесі переміщення, що дає змогу врахувати динамічну зміну навантаження.

6. Розроблено нову математичну модель електромеханічної частини системи електроприводу вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора установки дезактивації радіоактивних металів, в якій враховано зміну моменту статичного навантаження, зумовлену дією виштовхувальної сили при зануренні вантажу у технологічну ванну обмеженого об'єму з рідиною, та зміну моменту інерції приводу після досягнення вантажем дна ванни.

7. Доведено ефективність використання закону скалярного керування електроприводом зарезонансної вібраційної машини за ступінчатого збільшення напруги живлення при підході до резонансної зони у процесі пуску, що забезпечує перевищення моменту двигуна над вібраційним моментом та дозволяє уникнути «застрягання» приводного двигуна.

8. Отримав подальший розвиток метод розрахунку надійності підшипникових вузлів, який відрізняється використанням інформативних параметрів, що характеризують вібраційні процеси та зміну температури обмотки статора, та дозволяють визначати остаточний ресурс підшипникових вузлів з урахуванням впливу поточного стану інших конструктивних вузлів асинхронного двигуна.

9. Отримав подальший розвиток метод розрахунку та прогнозування надійності асинхронних двигунів, побудований на основі використання узагальнених багатофакторних моделей надійності основних конструктивних вузлів, який відрізняється врахуванням зміни їх стану через визначені відносні інформативні параметри, що дозволяє враховувати поточний стан асинхронних двигунів при визначенні їх напрацювання на відмову.

10. Удосконалено у застосуванні до асинхронних двигунів методи експериментального визначення експлуатаційної надійності, що відрізняються врахуванням умов експлуатації та зміни стану основних конструктивних вузлів, та дозволяють будувати їх моделі надійності, об'єднані надалі у загальну модель надійності двигуна.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблено імітаційні моделі вентильно-індукторного стартер-генератора, які враховують нелінійність магнітної системи, дискретність роботи вентильного перетворювача, механічні втрати, втрати в сталі і обмотках, особливість навантаження первинного двигуна та параметри акумуляторної батареї.

2. Розроблено рекомендації щодо принципів керування вентильно-індукторним стартер-генератором в стартерному режимі, що дозволило зменшити тривалість пускових процесів, витрати енергії акумуляторної батареї та знизити різкі стрибки фазних струмів та струмів акумуляторної батареї.

3. Розроблено рекомендації щодо керування вентиляно-індукторним стартер-генератором в генераторному режимі при збудженні і зміні навантаження, які забезпечили відхилення рівня вихідної напруги не більше 1...2 % від номінального її значення для всього діапазону навантажень та дозволили досягти зменшення тривалості перехідних процесів.

4. Розроблено дослідний експериментальний зразок вентиляно-індукторного стартер-генератора та проведено його експериментальні дослідження в стартерному та генераторному режимах. Отримані робочі характеристики вентиляно-індукторного стартер-генератора в генераторному режимі підтверджують ефективність запропонованих принципів регулювання його вихідної напруги зміною максимального значення фазного струму.

5. Розроблена віртуальна модель електромеханічної системи крана-маніпулятора може бути використана для дослідження процесів переміщення вантажу при одночасній роботі моста, візка і вантажопідйомного пристрою любого іншого крана-маніпулятора.

6. Розроблені методи та системи керування можуть бути використані для розробки нових методів частотного керування будь-якими іншими електроприводами спеціалізованих кранів-маніпуляторів.

7. Отримано залежність для визначення часу розгортки частоти від повної приведеної маси коливних частин вібромашини для частотного пуску з максимальним прискоренням електропривода зарезонансної вібраційної машини, використання якої дозволяє суттєво зменшити встановлену потужність приводного двигуна порівняно з некерованою системою.

8. Розроблено структуру комп'ютеризованого діагностичного комплексу для проведення випробувань асинхронних двигунів на надійність, що дозволяє отримати кількісні значення показників надійності шляхом вимірюванням температури доступних конструктивних вузлів, таких як підшипниковий вузол та обмотка статора, а також струмового навантаження і вібрації.

9. Розроблено пристрій, який дозволяє контролювати та змінювати фактори форсування режимів зношування основних конструктивних вузлів асинхронних двигунів, не порушуючи фізику процесів старіння матеріалів та конструкції двигуна при урахуванні його дійсного стану.

10. Розроблено нові підходи та практичні методики визначення надійності асинхронних двигунів на основі врахування стану конструктивних вузлів та експериментального визначення їх теплових і вібраційних параметрів.

### **Ступінь впровадження.**

Розроблені рекомендації щодо особливостей застосування контрольно-вимірювального обладнання для поточного моніторингу температурного та вібраційного стану трифазних асинхронних двигунів та їх конструктивних вузлів, теоретичні положення, математичні моделі, принципи керування та результати досліджень вентиляно-індукторних стартерів були впроваджені на ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (м. Кременчук).

Результати роботи у частині проведення діагностики електричних машин у вигляді алгоритмів та розрахункових модулів для визначення та прогнозування показників надійності асинхронних двигунів з урахуванням стану їх основних конструктивних вузлів, доцільності та особливостей застосування частотно-регульованого електроприводу до зарезонансних вібраційних машин з дебалансними віброзбуджувачами для уникнення «застрягання» роторів приводних двигунів під час

подолання зарезонансної зони у процесі пуску та зменшення зусиль у кінематичних вузлах вібромашини впроваджено у ТОВ «Науково-виробниче підприємство «Енерго-плюс» (м. Кременчук).

Розроблені імітаційна модель механічної системи крана-маніпулятора, математична модель механічної частини системи електроприводу вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора установки дезактивації радіоактивних металів та алгоритми автоматичного керування електроприводами крану-маніпулятора були використанні ТОВ «Науково-технічною фірмою "ТЕМС"» (м. Київ) при створенні системи позиційного керування електроприводами мостового крана-маніпулятора у складі установки дезактивації радіоактивних металів на ДП «Національна атомна енергогенеруюча компанія "Енергоатом"» ВП «Рівненська атомна електростанція».

Результати наукової роботи в напрямку вентильно-індукторних стартер-генераторів у подальшому можуть бути використані електромашинобудівними підприємствами, науково-дослідними і проектними установами при розробці нових та вдосконаленні існуючих систем запуску поршневих двигунів внутрішнього згоряння та газотурбінних двигунів автономних електроенергоустановок, допоміжних силових установок транспортних засобів, зокрема літаків та техніки спеціального призначення, підвищеної енергоефективності.

Подальше використання результатів роботи в напрямку систем керування електроприводів точного позиціонування може бути рекомендовано підприємствам металургійної та машинобудівної галузей для електроприводів мостових кранів і конвеєрів, приводів подачі електричних ножів, ножиць та інших станків з асинхронними машинами, які повинні забезпечувати підвищену точність і задану швидкість переміщення, що дозволить підвищити їх експлуатаційні та енергетичні характеристики.

Отримані результати можуть бути використані на підприємствах при впровадженні частотно-регульованого електроприводу до зарезонансних вібраційних машин, що дозволить використовувати приводні асинхронні двигуни меншої потужності, порівняно з нерегульованим електроприводом, а також при проведенні планово-попереджувальних робіт щодо асинхронних двигунів для корегування способів їх відновлення та оцінки терміну післяремонтної експлуатації з урахуванням стану відновлених конструктивних вузлів.

Результати наведених у роботі теоретичних досліджень, розрахунків й експериментальних досліджень окремими питаннями та у цілому можуть бути корисними при застосуванні у навчальному процесі для підготовки фахівців за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**Кількість публікацій.** За темою роботи опубліковано 39 наукових праць (25 у наукових фахових виданнях України, 11 у збірниках наукових конференцій та 3 патенти України на корисну модель) в тому числі 10 публікацій у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних WoS або Scopus.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Перший розділ** присвячено розробці математичного апарату для опису процесів, що виникають в електромеханічних системах технологічних комплексів, та подальшого їх дослідження.

У *першій частині розділу* наведено розроблену математичну модель вентильно-індукторного стартер-генератора (ВІСтГ) із врахуванням параметрів акумуляторної батареї та навантаження.

Математична модель базується на диференційних і алгебраїчних рівняннях контурів статора, електромагнітного моменту, руху, залежностях індуктивності від кута повороту ротора та струму фази, рівняннях вентильного перетворювача, що зв'язують індукторну машину з елементами кола постійного струму, виразах булевої алгебри для визначення стану напівпровідникових елементів вентильного перетворювача, яка враховує вплив електричних, магнітних і механічних втрат та дозволяє розраховувати режими стартера і генератора.

При цьому отримав подальший розвиток науковий підхід до врахування магнітних втрат електричних машин з використанням активного опору, струм якого визначається величиною потужності втрат та напругою вентильно-індукторної машини відповідно запропонованим логічним виразам.

Представлено алгоритми розрахунку процесів ВІСтГ в генераторному та стартерному режимах для повної та спрощеної математичних моделей.

*Друга частина розділу* присвячена розробці моделей мостового крана-маніпулятора з урахуванням динамічного навантаження.

Розроблено віртуальну модель мостового крана, яка може бути використана для моделювання електроприводів крана-маніпулятора.

Розроблено імітаційну модель вантажопідйомного пристрою крана-маніпулятора у складі комплексу переробки небезпечних відходів для моделювання зміни моменту статичного опору та моменту інерції приводу при зануренні кошика з вантажем у розчин.

Розглянуто стратегії керування, які можуть бути використані для підвищення точності позиціонування механізмів крану.

*Третя частина розділу* присвячена моделюванню зарезонансної вібраційної машини для ущільнення бетонної суміші.

Розроблено математичну модель зарезонансної вібраційної машини, а саме вібраційної площадки з двовальними дебалансними віброзбуджувачами, яка використовується для ущільнення бетонних сумішей у формі при виготовленні залізобетонних виробів. Математична модель складається з системи диференціальних рівнянь, що описують механічну частину вібраційної площадки та моделі асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором у трьохфазній системі координат.

Запропонована математична модель дозволяє досліджувати процеси формування коливань робочого органу вібромашини у пускових та усталених режимах роботи, вплив вібраційного моменту, який є додатковим динамічним навантаженням, на приводні асинхронні двигуни під час подолання резонансної зони у процесі пуску.

**Другий розділ** присвячено розробці методів і принципів керування, побудови, контролю і діагностики електромеханічних систем об'єктів промисловості та транспорту, спрямованих на підвищення їх енергоефективності і надійності.

*У першій частині розділу* проведено дослідження стартерного і генераторного режимів вентильно-індукторного стартер-генератора.

За результатами досліджень стартерного режиму ВІСтГ встановлено вплив параметрів електромеханічної системи на величину струмів, тривалість та енергоефективність пуску стартера. Показано, що для зниження витрат енергії акумуляторної батареї під час прямого пуску доцільно застосовувати акумуляторну батарею зі зменшеним внутрішнім опором, хоча це і веде до збільшення струмів стартера. В тих випадках, коли неможливо встановити акумуляторну батарею великої ємності варто застосовувати керовані пуски з широтно-імпульсним регулюванням

фазної напруги за оптимального значенням коефіцієнту заповнення або пуски з обмеженням рівня фазного струму.

Розглянуто підходи до стабілізації вихідної напруги ВІСтГ в режимі генератора шляхом зміни кутів комутації і регулювання максимального значення фазного струму. Розроблено відповідні структурні схеми та алгоритми систем керування.

Встановлено вплив параметрів вентиляно-індукторного стартер-генератора на енергоефективність та характер протікання електромеханічних процесів при збудженні і зміні навантаження в генераторному режимі.

Аналіз результатів досліджень перехідних процесів ВІСтГ в генераторному режимі дозволив встановити, що при збудженні зниження витрат енергії акумуляторної батареї можна досягти зменшенням її електрорушійної сили, збільшенням її опору або зменшенням ємності конденсатора. Встановлено, що за рахунок збільшення рівня обмеження фазного струму від значення, що відповідає холостому ходу генератора, на один порядок можна знизити тривалість збудження на два порядки, при цьому фазні струми стартера не перевищують номінальні.

В результаті досліджень перехідних процесів зміни навантаження та гармонічного складу вихідної напруги встановлено, що якість генерованої напруги ВІСтГ залежить від ємності конденсатора: при її збільшенні зменшується перехідне відхилення напруги та коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги. Обґрунтовано мінімальну величину ємності конденсатора в колі постійного струму, яка забезпечує відповідність стандартам показників якості вихідної напруги генератора.

Розроблено дослідний експериментальний зразок ВІСтГ потужністю 3 кВт і номінальною напругою 28 В та проведено його експериментальні дослідження в стартерному та генераторному режимах. Підтверджена на практиці ефективність застосування розроблених принципів керування, відповідність стандартам показників якості генерованої енергії та адекватність математичного моделювання ВІСтГ.

У другій частині розділу проведено дослідження показників якості керування електроприводами крана-маніпулятора.

Проведено опробування та порівняння результатів моделювання віртуальної моделі мостового крана з результатами аналізу лінеаризованого математичного опису. Отримані результати дають змогу проводити моделювання мостових кранів для комплексів систем керування положенням.

Встановлено, що модель вантажопідйомного пристрою адекватно відображає такі особливості технологічного процесу, як зміна моменту статичного опору та моменту інерції приводу при зануренні кошика з вантажем у розчин, миттєве зменшення швидкості кошика до нуля та відділення маси кошика від маси колони при досягненні кошиком дна ванни.

Показано, що хоча при використанні системи скалярного керування тривалість перехідних процесів затягується, але в той же час точність позиціонування візка достатньо висока і лежить в межах допустимої похибки. При застосуванні системи скалярного керування, замкненої за положенням, має місце різниця швидкостей двигунів при розгоні візка, що може призвести до короткочасного пробуксовування однієї з пар коліс та призвести до похибок переміщення.

Показано, що кращі результати для скалярної системи керування показали стратегії «Master-Slave» та «Mean control», які мають високу швидкодію систем і, в результаті, велику точність позиціонування візка. Різниця швидкостей при таких стратегіях є невеликою і присутня лише при розгоні та гальмуванні, тобто пробуксовування коліс є маловірогідним.



Встановлено, що використання системи векторного керування та двох перетворювачів частоти дозволяє забезпечити найвищу серед розглянутих стратегій керування точність позиціонування і, з огляду на різницю швидкості двигунів, відсутність пробуксовування коліс.

Розроблена система з використанням спроектованих алгоритмів роботи цеху та крану забезпечує автоматичну роботу цеху дезактивації з мінімальною участю людини в процесі. Розроблені програмні засоби для практичної реалізації можуть бути використані при створенні автоматичних та автоматизованих кранів та використовуватись в промисловості.

В *третьій частині розділу* проводилися дослідження перехідних процесів зарезонансної вібраційної машини.

За результатами досліджень прямого пуску зарезонансної вібраційної машини встановлено, що під час подолання резонансної зони спостерігається різке зростання вібраційного моменту, яке знижує надійність редукторів, з'єднувальних муфт та ін., та може призвести до «застрягання» роторів приводних двигунів у разі перевищення його над моментом двигуна.

Дослідження пуску зарезонансної вібраційної машини при застосуванні основних законів частотного керування показали, що вони не забезпечують зменшення амплітуди коливань робочого органа вібромашини та віброменту під час проходження резонансної зони у процесі пуску. Встановлено, що закон  $U/f=const$ , порівняно з іншими законами, забезпечує прийнятні струмові й механічні навантаження. Це обумовило його застосування у випадку, якщо час частотного пуску електроприводу буде меншим за час прямого.

Для частотного пуску отримано залежності для визначення часу розгортки частоти приводних двигунів від повної приведенної маси коливних частин вібромашини у випадку застосування двигунів потужністю у три рази меншою, порівняно з прямим пуском. Це дозволяє зменшити амплітуду коливань робочого органу вібромашини у резонансній зоні і, відповідно, негативний вплив вібраційного моменту на приводні двигуни.

Для перевищення динамічного моменту асинхронного двигуна над вібраційним та гарантованого подолання резонансної зони у процесі пуску без «застрягання» запропоновано стрибкоподібне збільшення напруги живлення, коли напруга живлення має ступінчатий вигляд або вигляд імпульсу.

Проведений порівняний аналіз отриманих результатів досліджень частотного пуску електроприводу вібромашини для двох варіантів стрибкоподібного збільшення напруги показав, що збільшення напруги живлення у ступінчатому вигляді є доцільнішим, оскільки значення сумарних втрат у приводних двигунах менше, порівняно з другим варіантом.

В *четвертій частині розділу* проводилися дослідження показників надійності асинхронних двигунів.

Підтверджено можливість та необхідність урахування процесів старіння основних конструктивних вузлів та елементів асинхронних двигунів, особливо з високим рівнем напруження на відмову, шляхом введення додаткових поправок на реальні теплові та вібраційні характеристики у розрахункові співвідношення для визначення показників надійності, отримані за методом планування експерименту.

Обумовлено розвиток для випадку асинхронних двигунів із тривалим напруженням на відмову методу розрахунку та прогнозування надійності, котрий полягає у визначенні виду та коефіцієнтів узагальнених моделей, побудованих на

основі теорії планування експерименту, що дозволяє враховувати поточний стан шихтованих осердь – через відносні значення для магнітної індукції  $B'_m$  насичення та кутів нахилу  $\beta_1$  кривої намагнічування та  $\beta_2$  залежності для питомих втрат, обмотки статора – через відносні значення для температури  $\theta_1$  і фактичне числа  $nv$  кількості короткозамкнених витків та підшипникових вузлів – через відносні значення для температури  $\theta_{1bea}$  та максимального радіального зусилля  $F_{1bea}$ , обумовленого збільшенням механічної складової вібрації.

На основі підшипникового вузла було доведено ефективність застосування моделей надійності, що побудовані шляхом комбінування класичної експертної системи з нечіткою логікою. Для реалізації чого сформовані нечіткі умови для інформативних параметрів, котрі характеризують вібраційні процеси: повної  $v$  віброшвидкості та чотирьох її гармонік від радіальної та осьової складових на частоті напруги живлення, що визначають стан встановленого підшипника, та електромагнітної складової віброшвидкості  $v_{em}$  й температури обмотки статора  $\theta_1$ , що враховують вплив інших конструктивних вузлів асинхронного двигуна та дозволяють визначати остаточний ресурс підшипникових вузлів через перерахунок часу  $T$  прогнозованого напрацювання на відмову при перевищенні параметрами трьох встановлених рівнів впливу (низький, середній, високий).

Експериментальні вібраційні та тепловізійні дослідження асинхронних двигунів довели можливість визначення за їх результатами стану основних внутрішніх вузлів і асинхронних двигунів у цілому. У процесі досліджень експериментальним шляхом було визначено вплив розвитку короткозамкнених витків обмотки статора, що супроводжувався збільшенням вібрації на 7,2% та температури корпусу на 10,4%, при цьому значення часу напрацювання на відмову становитиме 0,559 від номінального. Також експериментально виявлено, що пошкодження підшипникового вузла призводить до збільшення вібрації на 65,28% та температури корпусу на 0,9% і відповідає зменшенню часу напрацювання на відмову – 0,64 від номінального.

Науковий співробітник відділу  
електромеханічних систем Інституту  
електродинаміки НАН України, к.т.н.

Шихненко М.О.

Науковий співробітник відділу  
перетворення та стабілізації  
електромагнітних процесів Інституту  
електродинаміки НАН України, д.ф.

Рижков О.М.

Старший викладач кафедри  
електротехніки Кременчуцького  
національного університету  
імені Михайла Остроградського  
МОН України, к.т.н.

Ноженко В.Ю.

Старший викладач кафедри  
електротехніки Кременчуцького  
національного університету  
імені Михайла Остроградського  
МОН України, к.т.н.

Сьомка О.О.

1. Shykhnenko M.O., Mazurenko L.I., Dzhura O.V., Bilyk O.A. Mathematical Model, Research and Improvement of the Switched Reluctance Generator Voltage Stabilization Methods. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (Kharkiv). 2018. P. 338–342.
2. Bibik O.V., Mazurenko L.I., Shykhnenko M.O. Formation of characteristics of operating modes of switched reluctance motors with periodic load. *Electrical engineering & electromechanics*. 2019. No. 4. P. 12–16.
3. Mazurenko L.I., Dzhura O.V., Bilyk A.A., Shykhnenko M.O. Switched reluctance generator control system. *XXIV International Conference on Automated Control*. National university of life and environmental sciences of Ukraine, Kiev, September 13–15, 2017 p. K., 2017. P. 38–39.
4. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Білик О.А., Шихненко М.О. Моделювання режимів та регулювання частоти обертання вентильно-індукторного двигуна з перетворювачем із С–скиданням і коливальним поверненням енергії при зміні кутів комутації. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Зб. наук. пр. Серія: Електричні машини і електромеханічне перетворення енергії*. Х.: НТУ «ХПІ», 2016. № 2 (1194). С. 64–69.
5. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Клименко В.Г., Шихненко М.О. Оцінка можливості використання вентильно-реактивного двигуна у складі верстат-гойдалки. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Зб. наук. пр. Серія: Електричні машини і електромеханічне перетворення енергії*. Х.: НТУ «ХПІ», 2017. № 1 (1223). С. 97–100.
6. Mazurenko L.I., Shykhnenko M.O. Switched Reluctance Machines. *International scientific-practical conference of young scientists «BUILD-MASTER-CLASS-2017»*. Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv). 2017. P. 249–250.
7. Мазуренко Л.І., Шихненко М.О., Джура О.В., Білик О.А. Дослідження стартерного режиму вентильно-індукторного стартер-генератора. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Зб. наук. пр. Серія: Електричні машини і електромеханічне перетворення енергії*. Х.: НТУ «ХПІ», 2020. № 3 (1357). С. 97–100.
8. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Білик О.А., Шихненко М.О., Клименко В.Г. Спосіб стабілізації частоти обертання вала вентильно-індукторного двигуна: пат на корисну модель UA 107247 України: МПК H02P 6/08, H02P 8/12, H02K19/06. № u 2015 12131; заявл. 07.12.2015; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.
9. Мазуренко Л.І., Гребеніков В.В., Джура О.В., Бібік О.В., Гамалія Р.В., Шихненко М.О. Електромеханічні перетворювачі енергії для систем електрогенерації та електропривода. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 54. С. 64–74.
10. Мазуренко Л.І., Шихненко М.О., Джура О.В., Білик О.А. Процеси збудження від акумуляторної батареї та вплив параметрів на робочі характеристики вентильно-індукторного генератора. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Зб. наук. пр. Серія: Електричні машини і електромеханічне перетворення енергії*. Х. : НТУ «ХПІ», 2019. № 1 (1225). С. 116–120.
11. Шихненко М.О., Мазуренко Л.І., Джура О.В., Білик О.А. Перехідні процеси та якість електроенергії автономного вентильно-індукторного генератора. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал*. Кременчук: КрНУ, 2019. Вип. 1/2019 (45). С. 57–63.
12. Мазуренко Л.І., Джура О.В., Шихненко М.О., Білик О.А. Технічна реалізація та дослідження експериментального зразка вентильно-індукторного стартер-генератора. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2020. Вип. 55. С 72–77.
13. Стяжкін В.П., Подейко П.П., Зайченко О.А., Гаврилюк С.И., Рыжков А.М. Автоматизированная система управления электроприводами мостового крана-манипулятора для установки дезактивации металлов. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2015. № 19 (95). С. 71-74.
14. Рижков О.М., Кондратенко І.П., Толочко О.І., Стяжкін В.П. Шляхи побудови системи автоматичного керування краном-маніпулятором. *XXIV міжнародна конференція з автоматичного керування: Автоматика-2017*, м. Київ, Україна, 13-15 вересня, 2017. С. 104-105.
15. Толочко О.І., Стяжкін В.П., Рижков О.П. Дослідження процесів руху механізмів мостового крана при їх одночасній роботі методом математичного моделювання з використанням віртуальних механічних блоків бібліотеки Simmechanics пакету Matlab. *Вісник НТУ «ХПІ». Проблеми*

автоматизованого електропривода. *Силова електроніка та енергоефективність*. 2017, вип. 27 (1249). С.48-52.

16. Толочко О.І., Рижков О.М. Синтез та аналіз системи модального керування крановим механізмом поступального руху з врахуванням роботи підйимального механізму. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 4. С. 131-134.

17. Толочко О.І., Стяжкін В.П., Рижков О.М. Керування вантажопідйомним пристроєм крана-маніпулятора під час опускання вантажу у ванну з агресивною рідиною. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 3. С.46-51.

18. Стяжкін В.П., Зайченко О.А., Рижков О.М., Подейко П.П., Толочко О.І. Система керування краном-маніпулятором установки дезактивації радіоактивних металів: пат. на кор. модель UA 145193 Україна: МПК В60W 20/00 (2016.01), В66С 17/00 (2006.01). № u2020 03975; заявл. 24.06.2020; опубл. 25.11.2020, Бюл. №22.

19. Ноженко В. Ю., Родькин Д. И., Ченчевой В. В. Процессы в электромеханической системе виброуплотнения бетонной смеси с дебалансным вибровозбудителем. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2014. Вип. 2 (26). С. 24–30.

20. Ноженко В. Ю., Родькин Д. И., Ченчевой В. В. Особенности пуска зарезонансных дебалансных машин с дебалансными вибровозбудителями. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут*. 2015. Вип. 12 (1121). С. 218–223.

21. Nozhenko V., Bialobrzheskyi O., Rodkin D., Druzhynina V., Yakymets S. The System of Forming the Control Mode of the Electric Drive During the Start-Up of the Vibration Machine. *World Science*. 2021. 7(68). P. 35–43. doi: 10.31435/rsglobal\_ws/30072021/7639

22. Ноженко В. Ю., Родькин Д. И., Чорний О. П. Пускові режими асинхронного електропривода зарезонансної вібраційної машини. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. № 4 (133). С. 58–64.

23. Ноженко В. Ю., Родькин Д. И., Гаврилец Г. О. Характеристики вибрационного момента на валу приводного двигателя дебалансной вибромашины. *Електромеханічні і енергозберігаючі систем*. 2015. Вип. 3 (31). С. 39–45.

24. Ноженко В. Ю., Чорний О. П., Родькин Д. И., Ченчевой В. В. Керування пуском зарезонансної вібраційної машини з дебалансними вібровозбудувачами. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут*. 2017. Вип. 27 (1249). С. 384–387.

25. Rodkin D., Nozhenko V., Bohatyrov K., Chenchevoi V. Electric drive operation modes of above resonance vibration machine. *Proceedings 2017 International conference on Modern electrical and energy systems (MEES 2017)*. (Kremenchuk, 15–17 November, 2017). 2017. IEEE Catalog Number CFP17K83-POD. ISBN 978-1-5386-1751-9. P. 140–143.

26. Nozhenko V., Rodkin D., Bohatyrov K. Control of passing the resonance zone during start-up of above resonance vibration machines. *Proceedings of the International conference on Modern electrical and energy systems (MEES 2019)*. IEEE Catalog Number CFP19K83-ART. 2019. P. 146–149.

27. Nozhenko V., Rodkin D., Tytiuk V., Bohatyrov K., Burdilna E., Ilchenko O. Features of the Control Actions Formation During the Start-up of Vibration Machines at Passing of the Resonance Zone. *Proceedings of the 25th IEEE International conference on Problems of automated electric drive. Theory and practice (PAEP)*. 2020. P. 18–21. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240835

28. Черный А. П., Ноженко В. Ю., Тытюк В. К., Данилейко О. К. Исследование пуска частотно-регулируемого электропривода зарезонансной вибрационной машины. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. № 4 (1358). С. 19–25. doi: 10.20998/2079-8024.2020.4.02

29. Сьомка О. О., В.В. Прус, С.С. Дзеніс Обґрунтування впливу процесу старіння на електричні та магнітні властивості шихтованих осердь електричних машин Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії – X. : НТУ „ХПІ”. - 2016. - № 11 (1183) 2016 – С. 115-122.

30. M. Zagirnyak, V. Prus, Siomka O. Electric machine reliability prediction models taking into account the state of major structural components Proceedings of the abstracts the 15th International Conference on “Computational Problems of Electrical Engineering” CPEE–2014, – Terchova – Vratna dolina, Slovak Republic, 2014. – P. 57.

31. Somka O. Models of Reliability Prediction of Electric Machine Taking into Account the State of Major Structural Units / M. Zagirnyak, V. Prus, O. Somka, I. Dolezel // *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2015, Vol. 13 № 5. P. 447-452.
32. O. Somka, V. Prus, A. Nikitina Somka O. The determination of the condition of the windings of electric machines with long mean-time-between failures 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES) – Kremenchuk, 2017. – P. 164-167.
33. Сьомка О. О., В. В. Прус Комп'ютеризований діагностичний комплекс для випробувань електричних машин на надійність *Науково-практичний журнал «Електротехніка і електромеханіка»* – Харків: Національний технічний університет «ХПІ», 2015. – Вип. 3/2015 – Ст. 27–30.
34. Пат. 88527 U Україна. МПК G01R 31/34 (2006.1). Спосіб визначення та прогнозування показників надійності електричних машин / О.О. Сьомка, В.В. Прус, – №05385631; Заявлено 12.08.2013; Опубл. 25.03.2014. Бюл. №6. – 4 с.
35. Сьомка О. О., В. В. Прус Урахування зміни теплових та вібраційних параметрів електричних машин із тривалим напрацюванням на відмову *Науково-практичний журнал «Електротехніка і електромеханіка»* – Харків: Національний технічний університет «ХПІ», 2014. – Вип. 2/2014 – С. 52–55.
36. Сьомка О. О. Розробка методу визначення та прогнозування показників надійності електричних машин із різним ступенем напрацювання на відмову *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал.* – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 2/2013 (22). Частина 2 – С. 46-51.
37. В. В. Прус, Сьомка О. О. Зміна властивостей електротехнічної сталі під впливом теплових та механічних факторів / *Збірник наукових праць XIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 8-9 квітня 2015 р.* – Кременчук, КрНУ, 2015. – С. 229-230.
38. Somka O. The use of the thermal image control in the current monitoring of electric machines / M. Zagirnyak, V. Prus, O. Somka // *Book of digests the 7th Symposium on Applied Electromagnetics SAEM'2018.* – Podčetrtek, Slovenia, 2018. – P. 9–10.
39. Somka O. The ways for the improvement of the information value of the thermal image control of electric machines with long mean time between failures / M. Zagirnyak, V. Prus, O. Somka // *Przegląd Elektrotechniczny*, 2019, R. 95 № 5 P. 63–66.