

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

БАРТЕЦЬКИЙ АНДРІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.314: 62-83(043.03)

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ГАЛЬМІВНИХ КІЛ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНИХ АСИНХРОННИХ
ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ**

спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Гرابко Володимир Віталійович,
Вінницький національний технічний університет,
ректор.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сінчук Олег Миколайович,
ДВНЗ «Криворізький національний університет»
завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних
систем в промисловості та транспорті

доктор технічних наук, професор
Чорний Олексій Петрович,
Кременчуцький національний університет імені Михайла
Остроградського, директор Інституту електромеханіки,
енергозбереження і систем управління.

Захист відбудеться “7” грудня 2017 р. о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий “3” листопада 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

О. Б. Бурикін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Відомо, що частотно-керований асинхронний електропривод має досить широке застосування в промисловості. Такий електропривод дає змогу заощаджувати електроенергію, забезпечує широкий діапазон регулювання швидкості, є високонадійною ланкою в лінії виготовлення продукції та підвищення її якості.

До типових виробничих механізмів, в яких цикли розгону чергуються з циклами гальмування або сповільнення, відносять тягові електроприводи, електроприводи підйомників, ліфтів, центрифуг тощо. В таких електроприводах перетворювачі частоти оснащені колом скиду енергії на гальмівний резистор. Вихід з ладу гальмівного кола може призвести не тільки до погіршення роботи технологічного механізму, а й до нещасних випадків.

Враховуючи вищенаведене, прогнозування аварійних режимів та визначення поточного стану гальмівних кіл зазначених електроприводів є надзвичайно важливим. Розв'язання такої задачі можливе шляхом розробки відповідних математичних моделей з подальшою їх технічною реалізацією.

Частотно-керований асинхронний електропривод, обладнаний гальмівним колом з віддачею енергії на резистор, використовується на промислових підприємствах для приведення в дію робочих органів виробничих механізмів, а гальмівне коло призначене для досягнення необхідного гальмівного моменту електропривода, а також для розсіювання накопиченої робочим органом виробничого механізму кінетичної енергії на резисторі. Компоненти гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода, а саме гальмівний резистор та IGBT-модуль можна вважати невідновлюваними об'єктами, тому що ремонт в силу конструктивних особливостей є неможливим. Вони, як правило, експлуатуються до повного виходу з ладу.

Питанням діагностування силового електричного обладнання присвячена велика кількість робіт вітчизняних та зарубіжних вчених. Вагомий внесок в розвиток питання надійності та діагностування електричного обладнання зробили вчені: Б. І. Мокін, В. М. Кутін, О. М. Сінчук, О. П. Чорний, О. В. Садовой, О. Ю. Лозинський та інші.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились протягом 2013–2017 років відповідно до наукового напрямку кафедри «Електромеханічні системи автоматизації в промисловості і на транспорті».

Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є підвищення надійності роботи частотно-керованих асинхронних електроприводів шляхом вдосконалення методів і засобів діагнос-

тування їх гальмівних кіл.

Відповідно до вказаної мети необхідно розв'язати такі основні задачі:

- провести огляд існуючих методів і засобів для діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів. Визначити причини виходу з ладу гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів;

- впорядкувати класифікацію існуючих методів і засобів діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів з точки зору технічної діагностики;

- розробити математичні моделі діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів;

- за математичними моделями розробити структурні схеми пристроїв для діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, що далі реалізуються на базі промислових компонентів, які виробляються серійно, або інтегрувати їх в існуючі системи діагностування перетворювачів частоти;

- шляхом комп'ютерного моделювання дослідити адекватність запропонованих математичних моделей та реалізованих пристроїв.

Об'єктом дослідження в дисертаційній роботі є процес визначення поточного стану гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода та процес визначення ступеня його наближення до аварійного стану.

Предметом дослідження є гальмівне коло перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода та його складові.

Методи дослідження

Для вирішення поставлених задач і аналізу прийнятих схемотехнічних та алгоритмічних рішень використані такі **методи дослідження**: методи теорії електропривода для дослідження процесів в системі частотно-керованого асинхронного електропривода, методи теорії вейвлет-обробки сигналів для обґрунтування способу вейвлет-діагностування гальмівних кіл частотно-керованих асинхронних електроприводів, методи теорії логіко-часових функцій для синтезу моделей діагностування гальмівних кіл пристроїв частотно-керованих асинхронних електроприводів, методи теорії кінцевих автоматів для синтезу структури пристрою діагностування та створення програми керування мікропроцесорним контролером, а також чисельні методи розв'язання задач і комп'ютерна математика для створення комп'ютерних моделей розроблених пристроїв діагностування.

Наукова новизна одержаних результатів

В дисертаційній роботі отримані такі наукові результати:

1. Розроблено математичну модель вейвлет-діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, застосу-

вання якої, на відміну від існуючих, дозволяє визначати ступінь наближення стану гальмівного кола до аварійного в процесі роботи електропривода;

2. Вперше, з використанням математичного апарату логіко-часових функцій, запропоновано метод та математичну модель для діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, застосування яких, на відміну від існуючих, дозволяє суттєво спростити алгоритм визначення ступеня наближення поточного стану гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів до аварійного. Запропонована математична модель із застосуванням логіко-часових функцій може бути узагальнена для діагностування складних об'єктів;

3. Удосконалено математичну модель для діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, застосування якої дозволяє, на відміну від існуючих, в процесі роботи електропривода визначати стан гальмівного кола, враховуючи напругу на конденсаторі фільтра ланки постійного струму перетворювача частоти;

4. Розроблено математичну модель системи діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти, яка, на відміну від існуючих, враховує динаміку зміни експлуатаційного коефіцієнта в часі та знак його похідної, що дозволяє, на відміну від відомих моделей, уникнути прийняття системою хибних рішень, вчасно попереджати обслуговувальний персонал про критичний стан робочого конденсатора, необхідність виведення перетворювача частоти в ремонт та запобігати пошкодженням конденсатора.

Практичне значення одержаних результатів

1. На основі математичної моделі діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів із застосуванням логіко-часових функцій розроблена структурна схема пристрою, застосування якої, на відміну від відомих, дозволяє здійснювати діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів в процесі роботи електропривода.

2. На основі математичних моделей діагностування гальмівних кіл частотно-керованих асинхронних електроприводів із застосуванням логіко-часових функцій та математичної моделі вейвлет-діагностування гальмівних кіл частотно-керованих асинхронних електроприводів розроблено алгоритми та функціональні схеми мікропроцесорних засобів, які мають розширені функціональні можливості та застосування яких дозволяє з високою достовірністю визначати технічний стан гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, а також легко інтегруватися в загальну систему діагностування перетворювача частоти.

3. На основі математичної моделі діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювача частоти розроблено алгоритм та функціональну схему мікропроцесорного засобу, який має розширені функціональні можливості, а його застосування дозволяє здійснювати діагностування конденсатора ланки постійного струму перетворювача частоти та, з високою достовірністю,

визначати технічний стан електрообладнання.

4. На основі математичної моделі діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів із застосуванням логіко-часових функцій запропоновано реалізацію пристрою діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів із використанням ПЛІС на базі мікросхеми Altera MaxII EPM240T100C5. Програму було розроблено в середовищі Quartus II 9.0. Така реалізація дозволяє суттєво підвищити швидкодію пристрою, зменшити його енергоспоживання та розміри.

5. Розроблено комп'ютерні моделі частотно-керованого асинхронного електропривода та пристроїв для діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, які адекватно відображають запропоновані математичні моделі та їх технічні реалізації.

6. З урахуванням помилок першого і другого роду за методом мінімального ризику здійснено визначення вірогідності діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів синтезованими пристроями.

Використання одержаних результатів дало можливість розробити і впровадити підхід та математичну модель діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів із застосуванням математичного апарату логіко-часових функцій та математичну модель вейвлет-діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, що дозволяє визначати поточний стан гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода та ступінь його наближення до аварійного стану, що, в свою чергу, підвищує надійність роботи електропривода та безпеку при його експлуатації. Впровадження здійснено у ВМКП «Вінницяміськіфт» (акт впровадження від 20.12.2016) та в навчальний процес Вінницького національного технічного університету (акт впровадження від 21.02.2017).

Особистий внесок здобувача

Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати з формулюванням відповідних висновків отримані автором самостійно. Окремі результати отримані у співавторстві, у цих випадках особистий внесок автора у патентах на винахід, статтях та тезах наведено у супровідних документах та нижче.

У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: [1] – метод діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів із застосуванням математичного апарату логіко-часових функцій; [2] – математична модель діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів на основі вейвлет-перетворення; [3] – розробка блока для визначення відрізка існування логіко-часових функцій; [4] – обґрунтування значення перенапруги на конденсаторі фільтра ланки постійного струму перетворювача частоти в процесі роботи га-

льмівних кіл; [5] – визначення залежності ресурсу конденсаторів ланки постійного струму перетворювача частоти від температури; [6] – алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою діагностування ланки постійного струму; [7] – структурна схема та алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів; [8] – структурна схема та алгоритм роботи мікропроцесорного засобу для вейвлет-діагностування гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода; [9] – розробка блока для визначення відрізка існування логіко-часових функцій; [10] – аналіз електромеханічних процесів частотно-керованого асинхронного електропривода під час гальмування та застосування значення перенапруги в колі постійного струму перетворювача частоти при формуванні діагнозу; [11] – застосування значення температури гальмівного резистора при визначенні технічного стану частотно-керованого асинхронного електропривода.

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [1–11], були отримані у Вінницькому національному технічному університеті.

Апробація результатів дисертації

Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких науково-технічних конференціях та семінарах: II Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками, м. Вінниця, 24.10.2013 р.»; II Міжнародній науково-технічній конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах, м. Вінниця, 30.10.2013 р.»; Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теория и практика. Силовая электроника и энергоэффективность, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут" м. Харків, 18.09.2015р.»; щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області на базі ВНТУ в 2013-2017 роках.

Публікації

За результатами виконаних досліджень опубліковано 11 праць [1]–[11], 8 статей, з яких 6 входять до переліку наукових фахових видань України [1]–[6], 5 статей, що входять до НМБ РІНЦ [1]–[5], та 4 статті, що входять до НМБ Scopus [1]–[3] та [5], також опубліковано 2 тези за результатами доповідей на міжнародних конференціях [9], [10]. За результатами дисертаційної роботи отримано 1 патент України на корисну модель [11].

Структура й обсяг роботи

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (137 найменувань) і 9 додатків. Основний зміст викладений на 142 сторінках друкованого тексту, містить 52 рисунки, 3 таблиці. Загальний обсяг роботи – 185 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі; наведено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, а також подано відомості щодо апробації роботи, особистого внеску здобувача та публікацій.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану питань діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, серед яких було розглянуто методи діагностування перетворювачів частоти в цілому, а також складових елементів, зокрема, силових напівпровідникових ключів. Уточнено задачі наукового дослідження.

Для прийняття ефективних рішень з оперативного управління виробничими процесами технічної експлуатації об'єкта виникає необхідність у використанні достовірної інформації про технічний стан кожного елемента електропривода. Основними джерелами цієї інформації є технічний контроль та інструментальне діагностування як метод отримання інформації про рівень працездатності електропривода в цілому.

Основною причиною виходу з ладу частотно-керованого асинхронного електропривода перетворювача є відмова перетворювача частоти, а особливо його складових. Аналіз існуючих методів та засобів діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів показав, що вони не враховують особливостей виходу з ладу гальмівного резистора, силового напівпровідникового ключа, який працює для комутації гальмівного кола. Крім цього існуючі методи та засоби діагностування складових компонентів гальмівного кола базуються на комплексному діагностуванні складових інвертора та призначені для визначення дефектних силових ключів, не враховуючи процесів виходу з ладу напівпровідників в процесі їх експлуатації.

У **другому розділі** розроблено математичну модель системи діагностування гальмівних кіл перетворювачів частоти, якою враховується похідна напруги на конденсаторі фільтра і, на відміну від існуючих, дозволяє проводити діагностування гальмівного кола під час роботи електропривода в коротких та тривалих циклах гальмування.

При розгляді електромеханічних процесів, які протікають при гальмуванні частотно-керованого асинхронного електропривода, було встановлено, що перенапруга на конденсаторі фільтра ланки постійного струму перетворювача частоти є параметром, який свідчить про ефективність поглинання енергії гальмування елементами електропривода (формула 1). В той же час, в електроприводі, який не має ланки скиду цієї перенапруги (гальмівного кола), напруга мо-

же сягати небезпечних значень, що приводитимуть до пошкоджень силових транзисторних модулів та самого конденсатора.

$$\Delta U_c = \sqrt{\frac{L_e}{C}} \cdot \sqrt{\left(\frac{M \cdot \Delta \omega}{R_p} \cdot \frac{2 \cdot t_r}{T_p} - \frac{M^2}{k_m^2} \left(1 + \frac{2 \cdot t_r}{T_p} \right) \right)}. \quad (1)$$

З урахуванням вказаного, математична модель для визначення стану гальмівного кола частотно-керованого асинхронного електропривода матиме вигляд:

$$f_b = \frac{\left[\int_{t_1}^{t_2} (\Delta u_c(t) + k_u \cdot u_{vs}(t) - k_i \cdot i_b(t)) dt \right]}{U_{DCн} \cdot t_r},$$

$$\begin{cases} \text{якщо } f_b > 0,5, \frac{du_c(t)}{dt} \geq 0 \rightarrow \text{несправність,} \\ \text{якщо } f_b \leq 0,5, \frac{du_c(t)}{dt} < 0 \rightarrow \text{нормальна робота.} \end{cases} \quad (2)$$

Додатково в моделі прийняття рішення системи діагностування, згідно з обчисленим значенням діагностичної змінної, пропонується використати такий критерій, як знак похідної напруги на конденсаторі фільтра. Такий критерій необхідно використовувати у випадках експлуатації перетворювача частоти (ПЧ) з тривалим циклом гальмування. Якщо перенапруга на конденсаторі фільтра незначна, але при відкритому гальмівному ключі протягом часу гальмування вона не зменшується ($du_c(t)/dt \geq 0$), то це також є ознакою несправності гальмівного кола.

З використанням математичного апарату вейвлет-перетворення запропоновано математичну модель вейвлет-діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, яка дозволяє визначати ступінь наближення стану гальмівних кіл перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода до аварійного.

Для отримання зображення вейвлет-коефіцієнтів станів гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного двигуна було використано пряме вейвлет-перетворення Добеші db4 (або DB4).

Для розрахунків і моделювання сигналів було використано пакет прикладних програм (ППП) Mathcad.

Відповідно до таблиці станів гальмівних кіл перетворювачів частотно-

керованих асинхронних електроприводів (таблиця 1), в якій число «1» відповідає потраплянню параметра в зону допуску; «0» – виходу за межі зони допуску відповідної діагностичної ознаки, отримано зображення таблиці станів гальмівного кола.

В таблиці 1 наведені такі позначення: Q_0 – справний стан; Q_1 – справний стан з перегрівом силового модуля; Q_2 – несправний гальмівний резистор; Q_3 – критичний стан; Q_4 – несправний стан.

Таблиця 1 – Стани гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів

Стани	Діагностичні ознаки гальмівного кола				
	ΔU_C	U_{vs0}	I_g	T_r°	T_{vs0}°
Q_0	1	1	1	1	1
Q_1	1	0	1	1	0
Q_2	0	1	0	1	1
Q_3	0	0	1	1	0
Q_4	0	0	0	1	1

В результаті було реалізовано вейвлет-діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів на основі *прямого дискретного вейвлет-перетворення*, що зводиться до обчислення вейвлет-коефіцієнтів $C(a, b)$ за формулою:

$$C(a, b) = \int_R s(t) a^{-j/2} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (3)$$

З підстановкою дискретних значень a та b , які задаються на деякій множині $Z = \{\dots -1, 0, 1, \dots\}$ дискретні значення будуть дорівнювати $a = 2^j$, $b = k \cdot 2^j$, де j та k – цілі числа.

$$C(j, k) = \int_0^\infty a_0^{-j/2} \cdot \psi(a_0^{-j} t - k) \cdot s(t) dt. \quad (4)$$

Обчислення вейвлет-коефіцієнтів здійснюємо в ППП Mathcad за допомогою функції вектора прямого вейвлет-перетворення Добеші $db4$ $wave(x)$.

Діагностичний висновок отримується як стан з максимальним коефіцієнтом кореляції, де коефіцієнт кореляції r обчислюється за формулою:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \left[\left(W_{X_i} - \frac{W_{X_i}}{N} \right) \cdot \left(W_{Y_i} - \frac{W_{Y_i}}{N} \right) \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N-1} \left[\left(W_{X_i} - \frac{W_{X_i}}{N} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \left(W_{Y_i} - \frac{W_{Y_i}}{N} \right)^2 \right]}}, \quad (5)$$

де W_{X_i} , W_{Y_i} – числові значення величин, між якими встановлюється кореляційний зв'язок.

Вихідні дані та результати вейвлет-діагностування подано в таблиці 2.

Таблиця 2 – Стани гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів

Параметр	Приклад
Стан діагностованого ПЧ	0;1;0;1;0
Діагнози	$Q_1, r = 0,0125$ $Q_2, r = 0,786$ $Q_3, r = 0,297$ $Q_4, r = 0,583$

З використанням математичного апарату логіко-часових функцій (ЛЧФ) синтезовано математичну модель для діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, яка дозволяє суттєво спростити алгоритм визначення ступеня наближення поточного стану гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів до аварійного.

На основі математичного апарату ЛЧФ пропонується нижченаведена послідовність проведення діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів.

1. Для зручної обробки подамо таблицю станів гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів (табл. 1) у вигляді фільтрованих ЛЧФ з довільним Δ_i -інтервалом зі збереженням однакової послідовності станів кожного сигналу. Підкреслимо, що, відповідно до зазначених тверджень в таблиці станів гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, число «1» відповідає потраплянню параметра в зону допуску; «0» – виходу за межі зони допуску відповідної діагностичної ознаки. Графічна інтерпретація станів гальмівного кола наведена на рис.1.

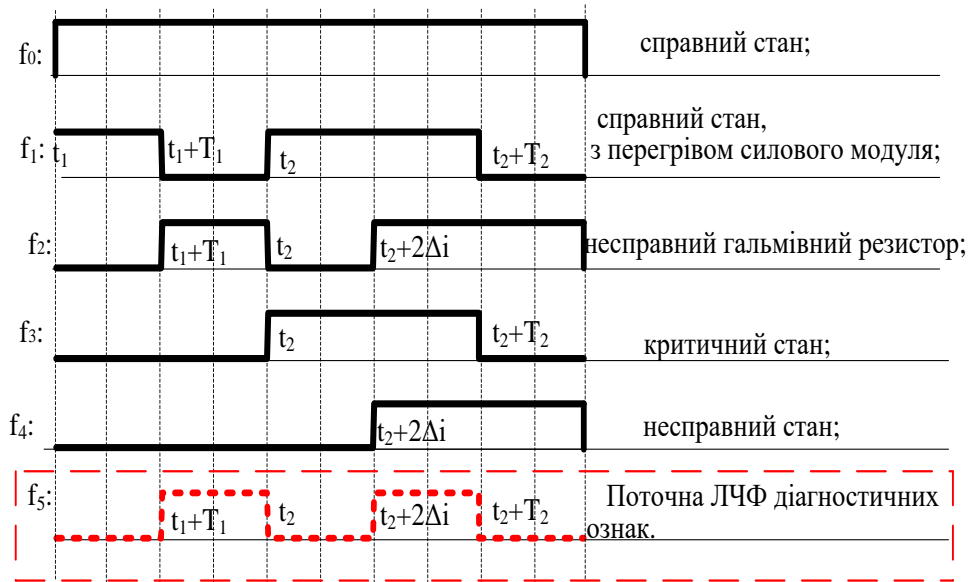


Рисунок 1 – Графічна інтерпретація станів гальмівного кола

2. Проведемо випробування гальмівного кола, що діагностується, та сформуємо його множину станів у вигляді ЛЧФ з такою ж послідовністю станів, як і в таблиці 1. Як приклад, сформована ЛЧФ f_5 (рис. 1) відображає результат випробування.

3. Знаходимо ЛЧФ між функцією гальмівного кола, що діагностується, та ЛЧФ табличних станів шляхом їх додавання за модулем два.

4. Отримуємо результати діагностування гальмівного кола як стану з найменшим відрізком існування.

Поточний стан гальмівного кола діагностованого перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода відображає така ЛЧФ:

$$f_5(t, t_1, t_2, \Delta_i, T_1, T_2) = \begin{cases} t - (t_1 + T_1), & \text{якщо } (t_1 + T_1) < t \leq t_2; \\ t - (t_2 + 2 \cdot \Delta_i), & \text{якщо } (t_2 + 2 \cdot \Delta_i) < t \leq (t_2 + T_2); \\ 0, & \text{якщо } (t < (t_1 + T_1)) \wedge (t > (t_2 + T_2)) \wedge (t_2 < t < (t_2 + 2 \cdot \Delta_i)). \end{cases} \quad (6)$$

ЛЧФ несправного гальмівного резистора запишеться у вигляді:

$$f_2(t, t_1, t_2, \Delta_i, T_1, T_2) = \begin{cases} t - (t_1 + T_1), & \text{якщо } (t_1 + T_1) < t \leq t_2; \\ t - (t_2 + 2 \cdot \Delta_i), & \text{якщо } t > (t_2 + 2 \cdot \Delta_i); \\ 0, & \text{якщо } (t < (t_1 + T_1)) \wedge (t_2 < t < (t_2 + 2 \cdot \Delta_i)). \end{cases} \quad (7)$$

Результат додавання за модулем два двох ЛЧФ $f_5(t, t_1, t_2, \Delta_i, T_1, T_2)$, що відповідає поточному стану гальмівного кола, і ЛЧФ $f_2(t, t_1, t_2, \Delta_i, T_1, T_2)$ математично описано виразом:

$$f_5(t, t_1, t_2, \Delta_i, T_1, T_2) \oplus f_2(t, t_1, t_2, \Delta_i, T_1, T_2) = \begin{cases} t - (t_2 + T_2), & \text{якщо } (t_2 + T_2) < t \leq (t_2 + (T_2 + 2 \cdot \Delta_i)); \\ 0, & \text{якщо } t < (t_2 + T_2). \end{cases} \quad (8)$$

В результаті проведених операцій найменший відрізок існування має ЛЧФ, отримана в результаті додавання за модулем два $f_5 \oplus f_2$. Тобто, поточний стан гальмівного кола найбільше наближений до стану виходу з ладу гальмівного резистора.

Запропонована математична модель із застосуванням логіко-часових функцій може бути узагальнена для діагностування складних об'єктів.

Електролітичні конденсатори, наявні складі автономних інверторів напруги перетворювачів частоти регульованих електроприводів, мають відповідний термін напрацювання на відмову в роботі, що є визначальним при розробці системи діагностування, оскільки є функціоналом багатьох критеріїв експлуатації перетворювачів частоти. В результаті дослідження впливу параметрів роботи конденсаторів перетворювачів частоти на їх термін напрацювання на відмову дозволило сформулювати математичну модель системи діагностування конденсаторів (формула 9).

$$k(t) = 2^{\frac{T_o - T_a(t)}{10}} \cdot m^{\left(1 - \frac{I_a(t)}{I_o}\right)^{\frac{T_o - T_a(t)}{10}}} \cdot \left(\frac{U_a(t)}{U_o}\right)^n,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k(t) < k_{нз} \wedge k(t - \tau) < k_{нз} \wedge \frac{dk(t)}{dt} \leq 0 \rightarrow \text{несправність}; \\ k(t) \in [k_{нз}; k_{вз}] \wedge \frac{dk(t)}{dt} \leq 0 \rightarrow \text{на межі несправності}; \\ k(t) > k_{вз} \vee \left(k(t) \in [k_{нз}; k_{вз}] \wedge \frac{dk(t)}{dt} > 0 \right) \rightarrow \text{справний стан.} \end{array} \right. \quad (9)$$

Розроблена математична модель системи діагностування конденсаторів перетворювачів частоти враховується динаміка зміни експлуатаційного коефіцієнта в часі, знак його похідної, що дозволяє уникнути прийняття системою хибних рішень першого роду, вчасно попереджати обслуговувальний персонал про критичний стан робочого конденсатора, необхідність виведення перетворювача частоти в ремонт та запобігати пошкодженням конденсатора.

У **третьому розділі**, з використанням математичної моделі вейвлет-діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, запропоновано мікропроцесорний пристрій для реалізації системи вейвлет-діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів.

Здійснено синтез апаратного та програмного забезпечення, необхідного

для реалізації мікропроцесорною засобу діагностування.

Алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою вейвлет-діагностування гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода наведено на рис. 2.

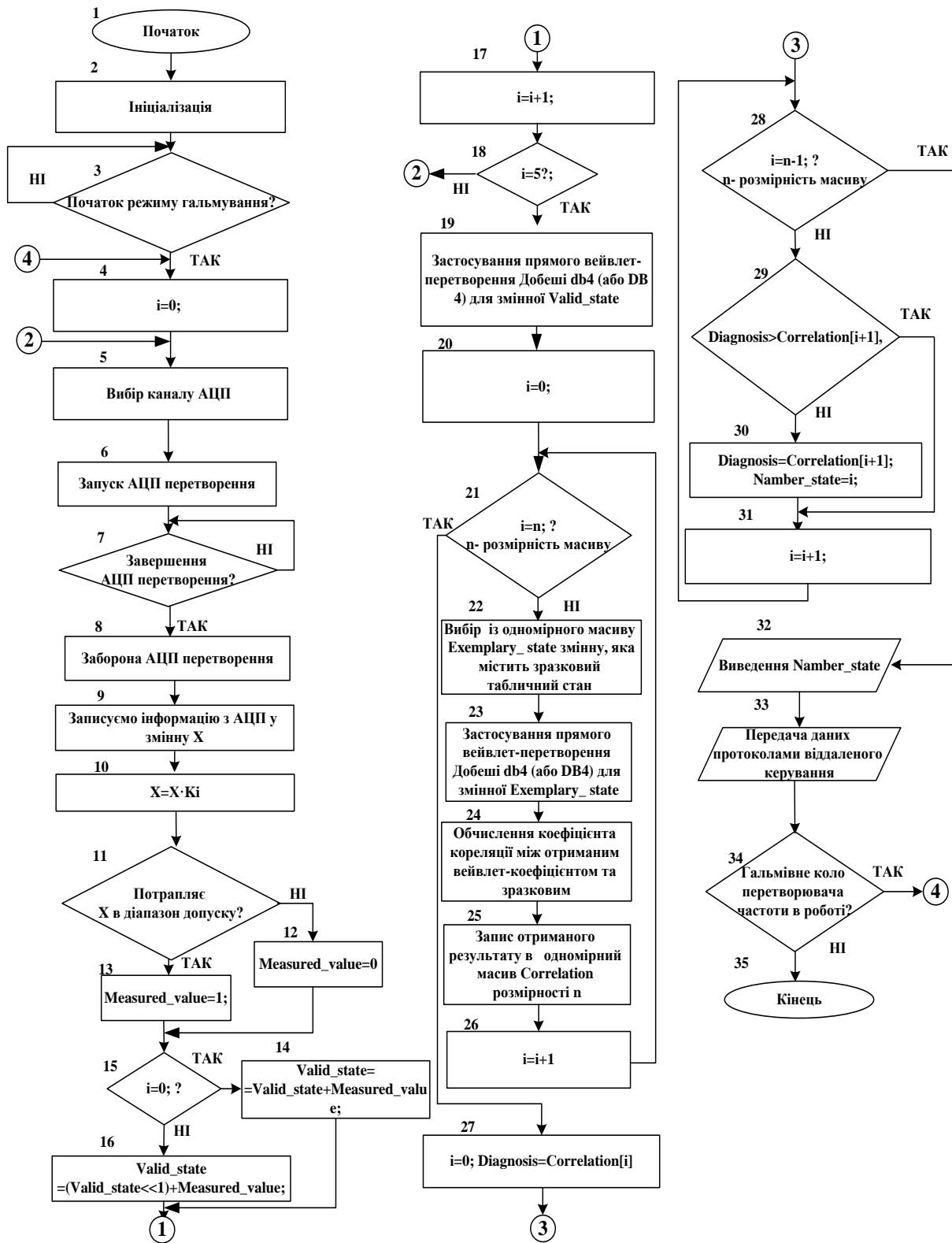


Рисунок 2 – Алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою вейвлет-діагностування гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода

З використанням математичної моделі діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів із застосуванням ЛЧФ запропоновано пристрій для реалізації системи діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів (рис. 3). Здійснено синтез апаратного забезпечення, необхідного для побудови системи діагностування. Запропонований пристрій легко реалізується на програмованих логічних інтегральних схемах будь-яких виробників, що суттєво розширює межі використання пристрою та дозволяє легко інтегрувати у загальну систему діагностування перетворювача частоти.

З використанням математичного апарату ЛЧФ запропоновано мікропроцесорний пристрій для реалізації системи діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів. Здійснено синтез апаратного та програмного забезпечення, необхідного для побудови системи діагностування. Запропонований алгоритм легко реалізується на мікропроцесорах будь-яких виробників, а мікропроцесорний пристрій діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів легко інтегрується у загальну систему діагностування перетворювача частоти.

Запропоновано мікропроцесорний пристрій діагностування фільтрувальних електролітичних конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти, який враховує динаміку зміни експлуатаційного коефіцієнта в часі, знак його похідної, що дозволяє уникнути прийняття системою хибних рішень, вчасно попереджати обслуговувальний персонал про критичний стан робочого конденсатора, необхідність виведення перетворювача частоти в ремонт та запобігати пошкодження конденсатора.

Здійснено синтез апаратного та програмного забезпечення, необхідного для побудови системи діагностування фільтрувальних конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти. Запропонований алгоритм та програмна реалізація мікропроцесорного пристрою легко інтегруються в загальну систему діагностування елементів перетворювачів частоти.

Запропоновано реалізацію пристрою діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів із використанням ПЛІС на базі мікросхеми Altera MaxII EPM240T100C5. Дана реалізація дозволяє суттєво підвищити швидкодію, надійність пристрою, оскільки використовується лише одна мікросхема, а також дозволяє зменшити енергоспоживання та розміри порівняно з реалізацією на інтегральних мікросхемах, що, відповідно, суттєво зменшує його вартість.

У **четвертому розділі** розроблено комп'ютерну модель в ППП Matlab Simulink частотно-керованого асинхронного електропривода з гальмівним колом та отримано графіки перехідних процесів при роботі гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода зі справним гальмівним колом та в аварійних режимах типу «раптовий обрив», збільшення опору резистора та збільшення внутрішнього опору силового IGBT-модуля.

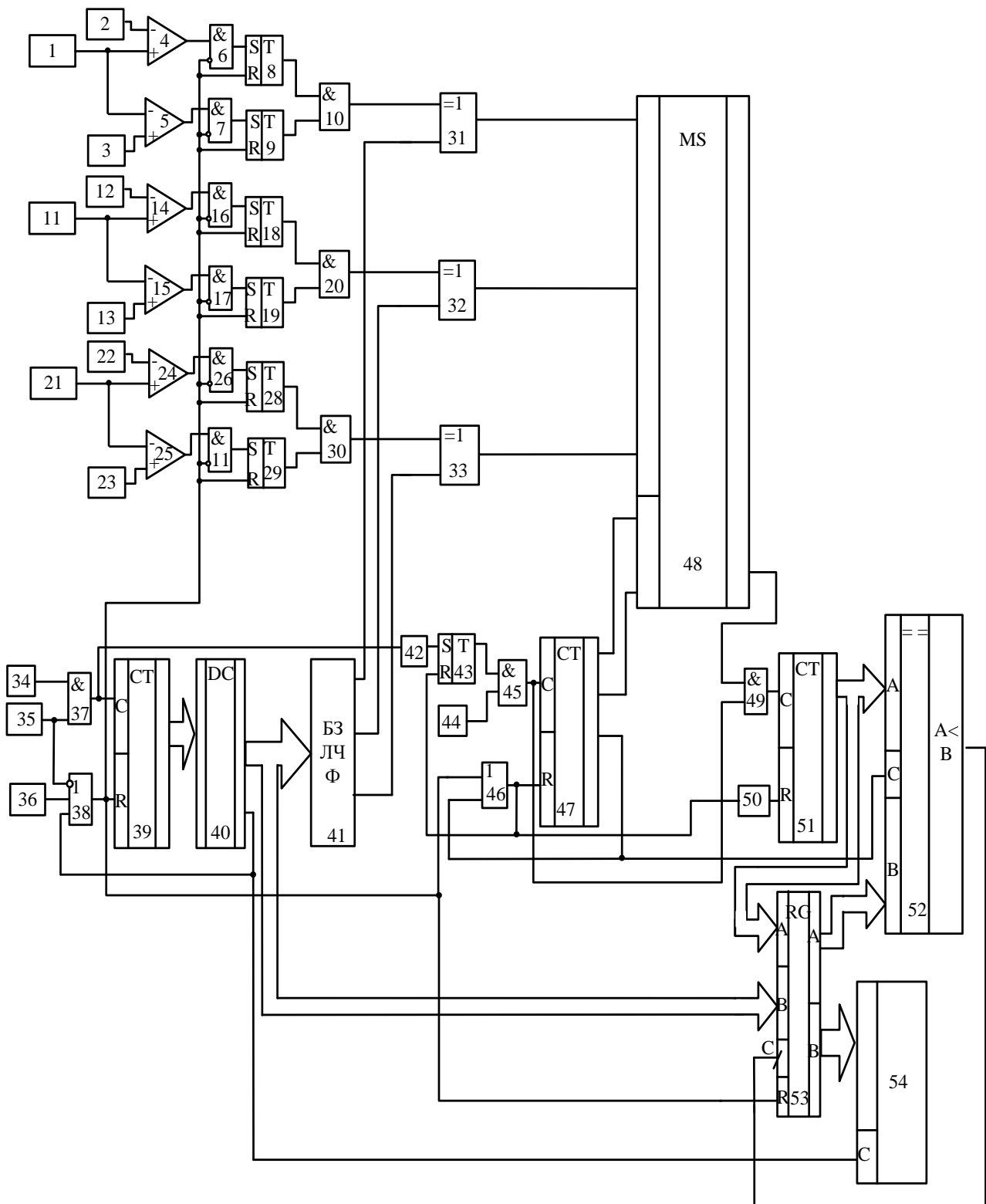


Рисунок 3 – Схема пристрою діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів

Створено в ППП Matlab Simulink комп'ютерну модель діагностування гальмівних кіл частотно-керованих асинхронних електроприводів із застосуванням логіко-часових функцій. Результати моделювання блока діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів наведено на рис. 4.

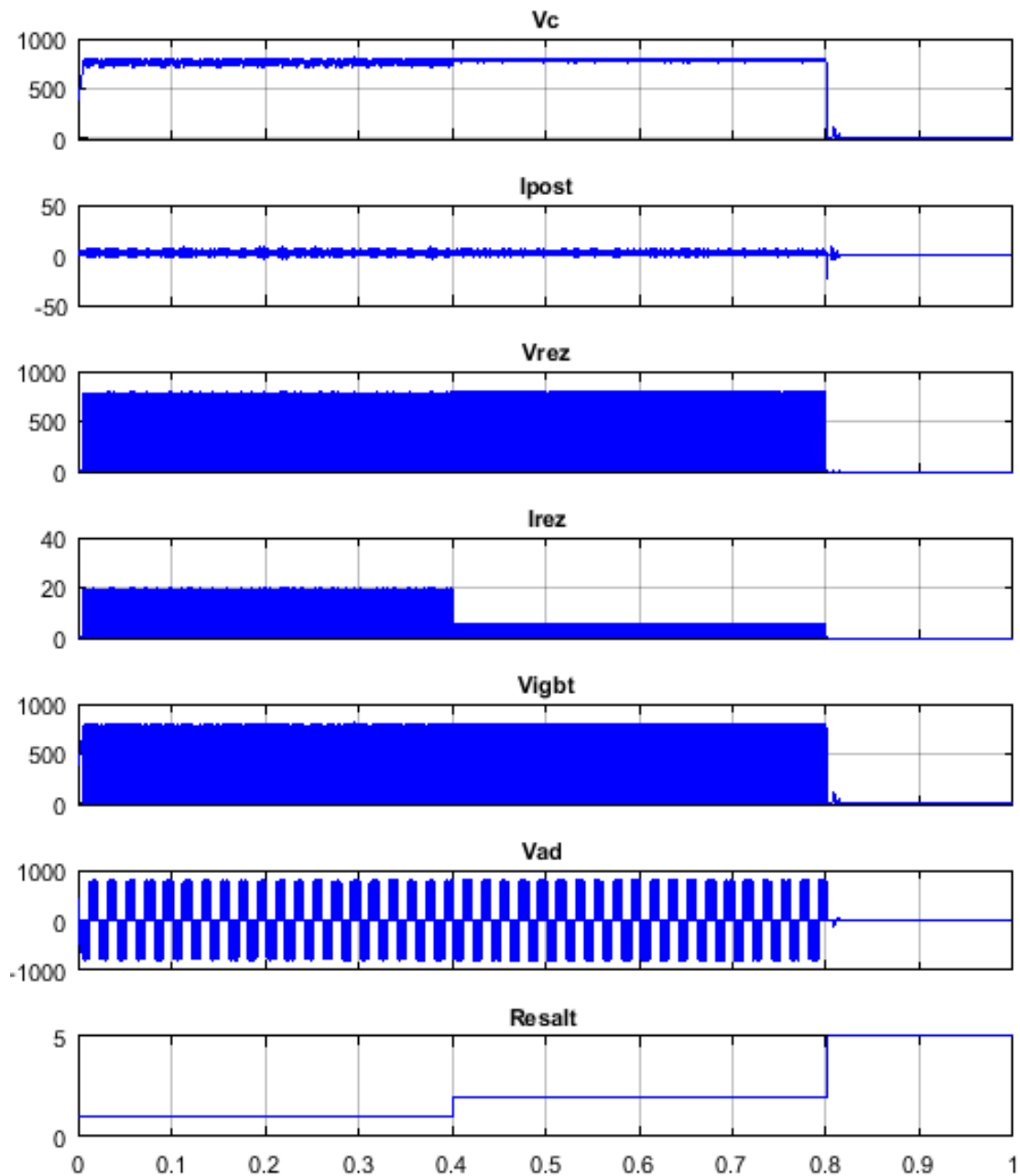


Рисунок 4 – Результати моделювання блока діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів

Створено в ППП Matlab Simulink комп'ютерну модель вейвлет-діагностування гальмівних кіл частотно-керованих асинхронних електроприводів. Результати моделювання роботи блока вейвлет-діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів наведені на рис. 5.

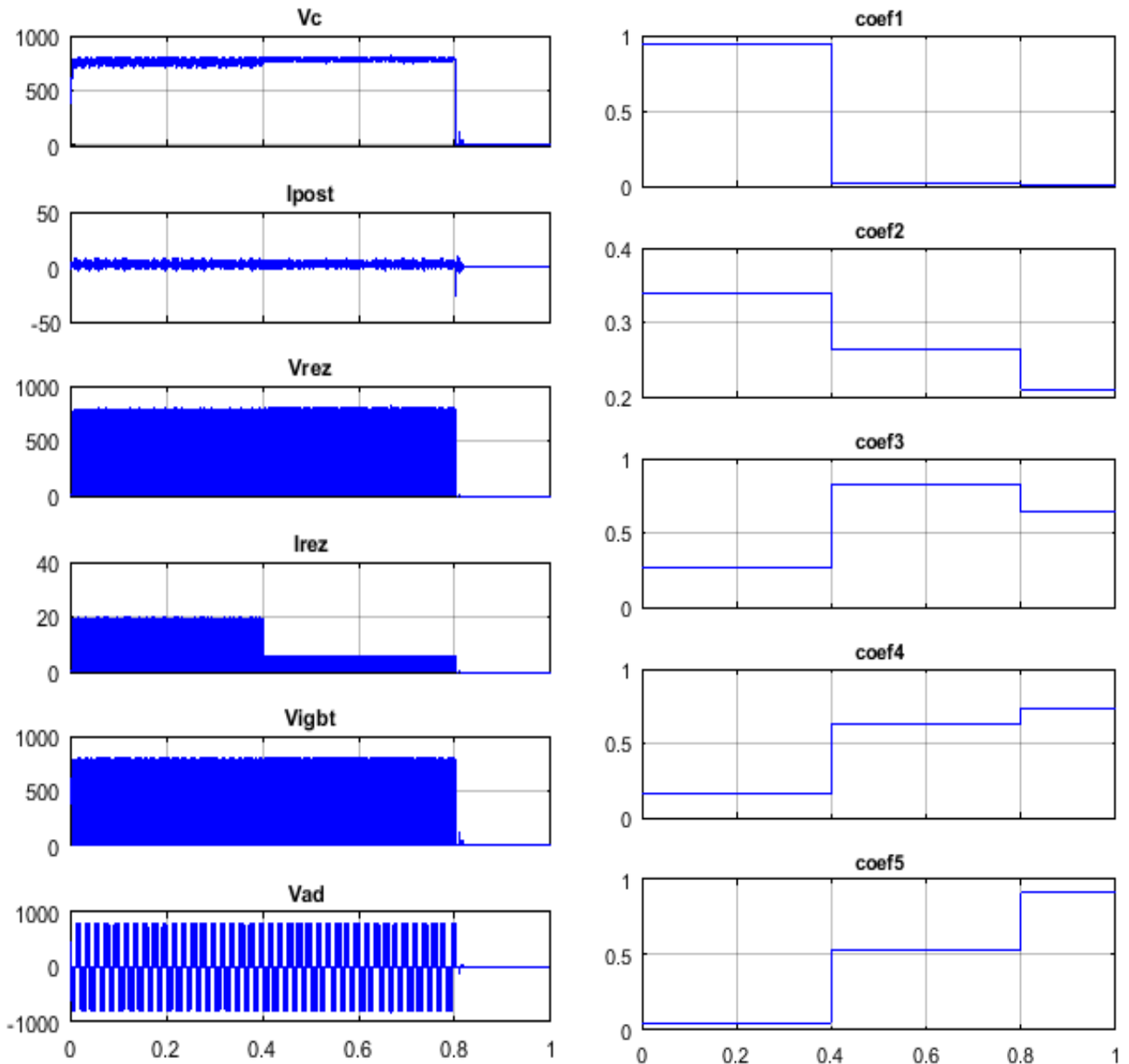


Рисунок 5 – Результати моделювання роботи блока вейвлет-діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів

Для перевірки адекватності синтезованих математичних моделей та правильності математичного моделювання було проведено натурний експеримент роботи частотно-керованого асинхронного електропривода, обладнаного гальмівним колом.

Експеримент проводився при роботі частотно-керованого асинхронного електропривода зі справним гальмівним колом та у аварійних режимах типу «раптовий обрив», збільшення опору резистора та збільшення внутрішнього опору силового IGBT-модуля.

Отримані результати вимірювань перехідних процесів збігаються з результатами комп'ютерного моделювання, чим підтверджується адекватність запро-

понованих математичних моделей діагностування гальмівних кіл частотно-керованих асинхронних електроприводів.

З урахуванням помилок першого і другого роду за методами мінімального ризику здійснено визначення вірогідності здійснення синтезованими пристроями діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів контрольних функцій.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення наукової задачі діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів та її технічні реалізації, що дозволяє підвищити надійність роботи частотно-керованого асинхронного електропривода.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи є такими:

У галузі теоретичних досліджень

1. Розроблено математичні моделі гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, які, на відміну від відомих, дозволяють визначати поточний стан гальмівних перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів та ступінь наближення гальмівного кола до аварійного стану.

2. Розроблено математичну модель для діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, що дозволяє в процесі роботи електропривода визначати стан гальмівного кола, враховуючи напругу на конденсаторі фільтра ланки постійного струму перетворювача частоти.

3. Розроблено математичну модель вейвлет-діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, яка дозволяє визначати ступінь наближення гальмівного кола до аварійного в процесі роботи електропривода.

4. Вперше застосовано математичний апарат вейвлет-перетворення сигналів та логіко-часових функцій в задачі діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, що дозволяє визначати поточний стан гальмівного кола в процесі роботи електропривода.

5. Розроблено математичну модель системи діагностування конденсаторів перетворювачів частоти, яка враховує динаміку зміни експлуатаційного коефіцієнта в часі, знак його похідної, що дозволяє уникнути прийняття системою хибних рішень першого роду.

У галузі практичного використання

1. На основі математичного апарату ЛЧФ розроблена структурна схема пристрою, яка, на відміну від відомих, дозволяє здійснювати діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів в процесі роботи електропривода.

2. На основі математичних апаратів ЛЧФ та вейвлет-перетворення розроблено алгоритми та функціональні схеми мікропроцесорних засобів, які мають

розширені функціональні можливості та дозволяють здійснювати діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, що, в свою чергу, дозволяє з високою достовірністю визначати технічний стан а також легко інтегруватися в загальну систему діагностування перетворювача частоти.

3. Розроблено алгоритм та функціональну схему мікропроцесорного засобу, який має розширені функціональні можливості та дозволяє здійснювати діагностування конденсатора ланки постійного струму перетворювача частоти, також з високою достовірністю, визначати технічний стан електрообладнання.

4. На основі математичного апарату ЛЧФ запропоновано реалізацію пристрою діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів із використанням ПЛІС на базі мікросхеми Altera Max II EPM240T100C5. Програму було розроблено в середовищі Quartus II 9.0. Така реалізація дозволяє суттєво підвищити швидкодію пристрою, зменшити його енергоспоживання та розміри.

5. З урахуванням помилок першого і другого роду за методами мінімального ризику проведено визначення вірогідності здійснення синтезованими пристроями діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів контрольних функцій.

6. Розроблено комп'ютерні моделі частотно-керованого асинхронного електропривода та пристроїв для діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, які адекватно відображають запропоновані математичні моделі та їх технічні реалізації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Грабко В.В. Застосування логіко-часових функцій у задачі діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів / В. В. Грабко, С. М. Левицький, А. А. Бартецький // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2016. – №1. – С. 25–31. – ISSN 2072-2052.

2. Грабко В.В. Вейвлет-діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів / В. В. Грабко, С. М. Левицький, А. А. Бартецький // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – 2015. – №1. – С. 9–13. – ISSN 1995-0519.

3. Грабко В.В. Пристрій для діагностування гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода / В. В. Грабко, Вал. В. Грабко, А. А. Бартецький // Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – №6. – С. 253–256. – ISSN 2307-5732.

4. Левицький С.М. Математична модель системи діагностування гальмівних кіл частотних електроприводів / С. М. Левицький, А. А. Бартецький // Вісник ВПІ. – 2013. – №6. – С. 79–83. – ISSN 1997-9266.

5. Левицький С.М. Система діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти / С. М. Левицький, Д. П. Проценко, А. А. Бартецький // Вісник Харківського НТУ «ХПІ». – 2015. – №12. – С. 320–323. – ISSN 2079-3944.

6. Левицький С.М. Мікропроцесорний пристрій діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти / С. М. Левицький, Д. П. Проценко, А. А. Бартецький // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». – 2015. – №1. – С. 25–29. – ISSN 2074-2630.

7. Бартецький А.А. Мікропроцесорний пристрій діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів / А.А Бартецький // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Хмельницький : ХНУ, 2016. – №2. – С. 172–176. – ISSN 2219-9356.

8. Бартецький А.А. Мікропроцесорна реалізація засобу для вейвлет-діагностування гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода / А.А Бартецький // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Хмельницький: ХНУ, 2016. – №3. – С. 65–69. – ISSN 2219-9356.

9. Левицький С.М. Спосіб діагностування гальмівних кіл частотних електроприводів / С. М. Левицький, А. А. Бартецький // Тези доп. II Міжнародної науково-технічної конференції «Оптимальне керування електроустановками» 22–24 жовтня 2013 року. – Вінниця: Вінницький національний технічний університет, 2013. – 63 с.

10. Левицький С.М Математична модель системи діагностування силових модулів перетворювача частоти / С. М. Левицький, А. А. Бартецький // Тези доп. II Міжнародної науково-технічної конференції « Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» 29–30 жовтня 2013 року. – Вінниця: Вінницький національний технічний університет, 2013. – 239 с.

11. Патент України на корисну модель №116477, МПК G05B 23/02 (2006.1) Пристрій для діагностування гальмівних кіл частотно-керованих асинхронних електроприводів / В.В. Грабко, Вал. В. Грабко, А.А. Бартецький; заявник і власник Вінницький національний технічний університет. – №u201114321; заявл.21.11.2016; опубл. 25.05.2017, Бюл. №10.

АНОТАЦІЯ

Бартецький А. А. Методи та засоби діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2017.

Дисертаційну роботу присвячено підвищенню надійності роботи частотно-керованих асинхронних електроприводів шляхом діагностування їх гальмівних кіл.

З цією метою в роботі виконано аналіз методів та засобів діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, розроблено математичні моделі діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів із застосуванням ма-

тематичних апаратів вейвлет-перетворення та логіко-часових функцій. Синтезовано математичну модель діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювача частоти. Розроблено необхідні структури пристроїв на основі запропонованих математичних моделей, а також алгоритми їх роботи. Розроблено комп'ютерну модель в ППП Matlab Simulink частотно-керованого асинхронного електропривода з гальмівним колом та синтезованих пристроїв діагностування. В результаті моделювання отримано графіки перехідних процесів при роботі гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода зі справним гальмівним колом та в аварійних режимах. Для перевірки адекватності синтезованих математичних моделей та правильності математичного моделювання було проведено натурний експеримент роботи частотно-керованого асинхронного електропривода, обладнаного гальмівним колом. Експеримент проводився при роботі частотно-керованого асинхронного електропривода зі справним гальмівним колом та у аварійних режимах типу «раптовий обрив», збільшення опору резистора та збільшення внутрішнього опору силового IGBT-модуля. Отримані результати вимірюваних перехідних процесів збігаються з результатами комп'ютерного моделювання, чим підтверджується адекватність запропонованих математичних моделей діагностування гальмівних кіл частотно-керованих асинхронних електроприводів.

З урахуванням помилок першого і другого роду за методами мінімального ризику проведено визначення вірогідності здійснення синтезованими пристроями діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів контрольних функцій.

Ключові слова: гальмівне коло, частотно-керований асинхронний електропривод, перетворювач частоти, IGBT-модуль, діагностування, логіко-часові функції, вейвлет-перетворення, конденсатор кола постійного струму, мікропроцесор.

Bartetskyy A. A. Methods and means of braking circuits diagnosis of frequency-controlled asynchronous electric drives converters – A manuscript.

Dissertation for the Candidate of Science (Engineering) Degree on specialty 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems. – Vinnytsia National Technical University. – Vinnytsia, 2017.

Method of braking circuits diagnosis of frequency-controlled asynchronous electric drives converters, applying mathematical tools of logic-time functions and wavelet-transforms is suggested in the dissertation. Method of direct current link capacitors diagnosis was further developed. This enabled to improve the reliability of frequency-controlled asynchronous electric drivers operation and operation safety.

The research presents the developed mathematical model of diagnostics system of brake circuits of frequency converters, the given model takes into consideration voltage derivative on capacitor filter and, unlike the existing models, enables to perform diagnosis of brake circuit in the process of electric drive operation in short and long break cycles. Using mathematical tools of wavelet-transform, mathematical model of wavelet-diagnostics of brake circuits of frequency-controlled asynchronous electric drivers converters is suggested, the given model enables to determine the de-

gree of brake circuits states of frequency-controlled asynchronous electric drive converters approach to emergency state. Applying mathematical tools of logic-time functions mathematical model for the diagnosis of brake circuits of frequency-controlled asynchronous electric drives converters is synthesized, the model enables to simplify the algorithm of determination of current state degree of frequency- controlled asynchronous electric drive converters brake circuits approach to breakdown state.

Mathematical model of diagnostic system of frequency converter capacitors is developed, the given model takes into account the dynamics of operation coefficient change in time, sign of its derivative that enables to avoid taking faulty decisions of the first kind by the system, promptly warn the operation staff about critical state of operating capacitor, necessity to remove frequency converter out of service and prevent the damage of the capacitor.

On the basis of mathematical tools of logic-time functions structural diagram of the device is developed, its application, unlike the already known, enables to perform diagnostics of brake circuits of frequency-controlled asynchronous electric drive converters in the process of electric drive operation.

Using mathematical tools of logic-time functions and wavelet-transform, algorithms and functional circuits of microprocessor facilities are developed, they possess enhanced functional possibilities and are able to perform diagnostics of brake circuits of frequency-controlled asynchronous electric drives converters, that in its turn, allow to determine reliably technical state and be easily integrated in general diagnostic system of frequency converter.

Algorithm and functional circuit of microprocessor device, having enhanced functional possibilities and allows to perform diagnostics of d.c. link capacitor of frequency converter and reliably determine technical state of electric equipment are developed.

Such realization enables to improve considerably operation speed of device, decrease its energy consumption and dimensions.

Computer model of frequency-controlled asynchronous electric drive with brake circuit was developed in software package Matlab Simulink, graphs of transient processes in the course of brake circuit operation of frequency-controlled asynchronous electric drive converter with fault-free circuit and in emergency modes of sudden cut off type, increase of resistor resistance and growth of internal resistance of power IGBT module are obtained.

Computer model of wavelet-diagnostics of brake circuit of frequency- controlled asynchronous electric drives and computer model of brake circuits diagnostics of frequency-controlled asynchronous electric drives, applying logic-time functions are crated in software package Matlab Simulink. The obtained corresponding results of modeling prove the adequacy of the synthesized models.

For verification of the adequacy of the synthesized mathematical modules and correctness of mathematical modeling full-scale experiment of frequency-controlled asynchronous electric drive, equipped with brake circuit was carried out. The experiment was performed in the process of frequency-controlled asynchronous electric drive operation with fault-free brake circuit and in emergency modes of “sudden cut

off” type, increase of resistor resistance and increase of the internal resistance of power IGBT module.

The obtained results of measured transient processes coincide with the results of computer modeling, confirming the adequacy of the suggested mathematical diagnostic models of brake circuit of frequency-controlled asynchronous electric drives. Assessment of the accuracy of synthesized device, developed for diagnostics of brake circuits of frequency-controlled asynchronous electric drives converters with the account of the errors of the first and second kind by the methods of minimal risk was carried in the research.

Key words: brake circuit, frequency-controlled asynchronous electric drive, frequency converter, IGBT module, diagnostics, logic-time function, wavelet-transform, d.c. circuit capacitor, microprocessor.

Бартецкий А. А. Методы и средства диагностирования тормозных цепей преобразователей частотно-управляемых асинхронных электроприводов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Винницкий национальный технический университет. – Винница, 2017.

В диссертаций предложен метод диагностирования тормозных цепей частотно-управляемых асинхронных электроприводов с применением математического аппарата логико-временных функций и вейвлет-преобразования. Получил дальнейшее развитие метод диагностирования конденсаторов звена постоянного тока. Это позволило повысить надежность работы частотно-управляемых асинхронных электроприводов и безопасность при их эксплуатации.

Выполнен анализ методов и средств диагностирования тормозных цепей преобразователей частотно-управляемых асинхронных электроприводов.

В диссертации разработана математическая модель системы диагностирования тормозных цепей преобразователей частоты, которой учитывается производная напряжения на конденсаторе фильтра и которая, в отличие от существующих, позволяет проводить диагностирование тормозной цепи во время работы электропривода в коротких и длительных циклах торможения. С использованием математического аппарата вейвлет-преобразования предложена математическая модель вейвлет-диагностики тормозных цепей преобразователей частотно-управляемых асинхронных электроприводов, которая позволяет определять степень приближения состояния тормозных цепей преобразователя частотно-управляемого асинхронного электропривода к аварийному. С использованием математического аппарата логико-временных функций синтезировано математическую модель для диагностирования тормозных цепей преобразователей частотно-управляемых асинхронных электроприводов, что позволяет существенно упростить алгоритм определения степени приближения текущего состояния тормозных цепей преобразователей частотно-управляемых асинхронных электроприводов к аварийному. Предложенная математическая модель с применением логико-временных функций может быть обобщена для ди-

агностирования сложных объектов.

В результате, исследование влияния параметров работы конденсаторов преобразователей частоты на их срок наработки на отказ позволило сформировать математическую модель системы диагностирования конденсаторов и ее структурную схему. Разработана математическая модель системы диагностирования конденсаторов преобразователей частоты, которая учитывает динамику изменения эксплуатационного коэффициента во времени, знак его производной, что позволяет избежать принятия системой ложных решений первого рода, вовремя предупредить обслуживающий персонал о критическом состоянии рабочего конденсатора, необходимость вывода преобразователя частоты в ремонт и предотвратить повреждения конденсатора.

На основе математической модели диагностирования тормозных цепей частотно-регулируемых асинхронных электроприводов с использованием логико-временных функций разработана структурная схема устройства, применение которой, в отличие от известных, позволяет осуществлять диагностирование тормозных цепей преобразователей частотно-управляемых асинхронных электроприводов в процессе работы электропривода. С использованием математических моделей диагностирования тормозных цепей частотно-регулируемых асинхронных электроприводов с использованием логико-временных функций и вейвлет-диагностики тормозных цепей частотно-регулируемых асинхронных электроприводов разработаны алгоритмы и функциональные схемы микропроцессорных средств, которые имеют расширенные функциональные возможности и позволяют осуществлять диагностирование тормозных цепей преобразователей частотно-управляемых асинхронных электроприводов, что в свою очередь, позволяет с высокой достоверностью определять техническое состояние, а также легко интегрироваться в общую систему диагностирования преобразователя частоты. Разработан алгоритм и функциональная схема микропроцессорного средства, имеет расширенные функциональные возможности и позволяет осуществлять диагностирование конденсатора звена постоянного тока преобразователя частоты, и с высокой достоверностью определять техническое состояние электрооборудования. С использованием модели диагностирования тормозных цепей частотно-регулируемых асинхронных электроприводов с применением логико-временных функций предложено реализацию устройства диагностирования тормозных цепей преобразователей частотно-управляемых асинхронных электроприводов по использованию ПЛИС на базе микросхемы Altera Max II EPM240T100C5. Такая реализация позволяет существенно повысить быстродействие устройства, уменьшить его энергопотребление и размеры.

Разработана компьютерная модель в ППП Matlab Simulink частотно-управляемого асинхронного электропривода с тормозной цепью. Создано в ППП Matlab Simulink компьютерную модель вейвлет-диагностики тормозных цепей частотно-управляемых асинхронных электроприводов и компьютерную модель диагностирования тормозных цепей частотно-управляемых асинхронных электроприводов с применением логико-временных функций. Получены соответствующие результаты моделирования свидетельствуют об адекватности синтезированных моделей.

Для проверки адекватности синтезированных математических моделей и правильности математического моделирования был проведён натурный эксперимент работы частотно-управляемого асинхронного электропривода, оборудованного тормозной цепью. Полученные результаты измеренных переходных процессов совпадают с результатами компьютерного моделирования, чем подтверждается адекватность предложенных математических моделей диагностирования тормозных цепей преобразователей частотно-управляемых асинхронных электроприводов.

С учетом ошибок первого и второго рода по методам минимального риска осуществлено определение вероятности осуществления синтезированными устройствами диагностирования тормозных цепей преобразователей частотно-управляемых асинхронных электроприводов контрольных функций.

Ключевые слова: тормозные цепи, частотно-управляемый асинхронный электропривод, преобразователь частоты, IGBT-модуль, диагностирование, логико-временные функции, вейвлет-преобразования, конденсатор цепи постоянного тока, микропроцессор.

Підписано до друку 02.11.2017р. Формат 29.7 × 42 ¼
Наклад 100 прим. Зам. № 2017-389
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-87-38
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р