**Грабко В.В.**

д.т.н., професор

Проценко Д.П.

к.т.н., доцент

**Вінницький національний
технічний університет****Бартецький А.А.**

к.т.н., ст.викладач

Чмих К.В.

аспірантка

**Вінницький національний
аграрний університет****Hrabko V.**Doctor of technical sciences,
professor**Protsenko D.**

Ph.D., Associate Professor

**Vinnysia National
Technical University****Bartetsky A.**

Ph.D., Senior Lecturer

Chmykh K.

postgraduate

**Vinnysia National Agrarian
University****УДК 621.314****DOI: 10.37128/2306-8744-2023-4-7****СИСТЕМА ДІАГНОСТУВАННЯ
ГАЛЬМІВНИХ КІЛ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТНО-
КЕРОВАНИХ АСИНХРОННИХ
ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ІЗ
ЗАСТОСУВАННЯМ FPGA**

У даній статті представлена інноваційна система діагностики гальмівних коліс у перетворювачах частотно-керованих асинхронних електроприводів (ЧКАЕ) з використанням програмованої логічної матриці (FPGA), що відкриває перед сучасною промисловістю нові можливості у виявленні та аналізі можливих несправностей гальмівних коліс у реальному часі.

Основною перевагою цієї інноваційної системи є використання FPGA, яка забезпечує винятково високу швидкість обробки сигналів і миттєву реакцію на будь-які виявлені несправності. Це дозволяє не лише ефективно виявляти серйозні проблеми з гальмівними колесами, але і реагувати на навіть найдрібніші аномалії у їх роботі, що в свою чергу допомагає попереджувати можливі аварійні ситуації.

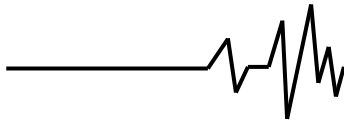
Додатково, використання цієї реалізації дозволяє суттєво підвищити швидкість та надійність пристрою завдяки використанню лише однієї мікросхеми, а також зменшити енергоспоживання та розміри порівняно з реалізацією на інтегральних мікросхемах, що відповідно суттєво зменшує вартість системи.

У висновку, дана розробка є важливим кроком у підвищенні ефективності та стабільності промислових систем. Вона сприяє покращенню безпеки та надійності електроприводів у виробничих процесах і має великий потенціал для впровадження в промислові умови, сприяючи підвищенню загального рівня безпеки та ефективності виробничих процесів. Така технологічна передовість є важливою складовою сучасної промисловості, спрямованою на досягнення високих стандартів якості та продуктивності, що, в свою чергу, сприяє загальному підвищенню конкурентоспроможності та інноваційного розвитку галузей промисловості.

Ключові слова: система діагностики, гальмівні колеса, частотно-керовані перетворювачі, інтегральні схеми, асинхронні електроприводи, технологія FPGA, система захисту.

Вступ. Підвищення екологічності, енергоефективності та якості виробництва є актуальним завданням сучасної промисловості і передбачає застосування енергоефективних технологій [1]. Одним із таких технологічних рішень є частотно-керований асинхронний

електропривід, завдяки своїм високим енергетичним характеристикам, який здобув надзвичайно широке застосування в промисловості. Однак використання частотно-керованих асинхронних електроприводів інерційних механізмів, які часто потребують



гальмування, створює необхідність в додатковому обладнанні для скидання надлишкової енергії на гальмівний резистор. Це особливо актуально для таких галузей як підйомно-транспортні механізми, міський електротранспорт, а також електроприводи у сфері металургії та металообробки [2].

У зв'язку з вищезазначеним, виникає потреба у створенні засобів діагностики гальмівних систем частотно-керованих асинхронних електроприводів [3]. Це необхідно для того, щоб вчасно виявляти можливі несправності або відмови в гальмівних колах цих приводів. Відомо, що передчасний або несподіваний вихід з ладу гальмівного обладнання може призвести до зупинки виробництва, погіршення якості продукції, пошкодження технологічного обладнання і, що найважливіше, створює потенційну загрозу життю та здоров'ю працівників.

Розробка та впровадження систем діагностики гальмівних коліс в частотно-керованих асинхронних електроприводах стає важливим завданням для забезпечення безпеки та надійності виробничих процесів. Такі системи дозволяють виявляти навіть мінімальні несправності та аномалії у роботі гальмів, запобігаючи можливим аварійним ситуаціям. Застосування сучасних технологій, таких як програмовані логічні матриці (FPGA), сприяє підвищенню швидкодії та надійності системи діагностики. Крім того, це може сприяти зменшенню споживаної енергії та розмірів системи порівняно з іншими рішеннями, що, в свою чергу, робить такі системи більш доступними з економічної точки зору.

Отже, розробка і впровадження ефективних систем діагностики гальмівних коліс у частотно-керованих асинхронних електроприводах має великий потенціал для поліпшення безпеки та надійності виробничих процесів, а також для забезпечення високої якості продукції.

Мета дослідження. Мета дослідження полягає у покращенні надійності функціонування частотно-керованого асинхронного електропривода. Для цього планується створити систему діагностики гальмівного кола цього приводу, використовуючи математичну модель для обробки сигналів і логіко-часові функції.

Аналіз попередніх досліджень.

У дослідженні [4] пропонується використання пристрою FPGA, який базується на нейрогенетичній реалізації з нейронною мережею зворотного розповсюдження. Цей пристрій призначений для більш ефективної та майже миттєвої діагностики несправностей. Хоча автори зазначають, що FPGA дозволяє досягти більш енергоефективної та миттєвої

діагностики порівняно з іншими методами, це дослідження не розглядає конкретно діагностику гальмівних коліс перетворювачів частоти.

У статті [5] представлена апаратна реалізація пристрою для діагностики несправностей на основі FPGA, яка дозволяє в реальному часі виявляти несправності шляхом аналізу інформаційної ентропії та штучних нейронних мереж. Проте цей пристрій не придатний для визначення поточного стану системи під час її роботи, тому не може бути використаний для діагностики гальмівних коліс перетворювачів частоти.

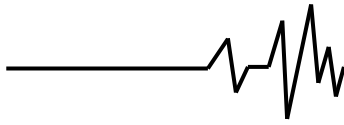
У дослідженні [6] запропоновано пристрій для діагностики перетворювача частоти на основі FPGA, який базується на аналізі відхилення лінійної напруги від зразкового значення. Автори акцентують увагу на можливості FPGA підвищити швидкість обробки сигналу на 50%. Проте це дослідження також не охоплює аспекти діагностики гальмівних коліс.

Отже, хоча існують деякі дослідження, пов'язані з діагностикою електроприводів на базі FPGA, наразі не існує конкретних досліджень, які б детально розглядали аспекти діагностики гальмівних коліс перетворювачів частоти.

Результати дослідження.

Програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС), або FPGA (field programmable gate arrays) є цифровими інтегральними мікросхемами (IC), що складаються з програмованих логічних блоків і програмованих з'єднань між цими блоками. Можливості конфігурувати ці пристрої дозволяє інженерам-розробникам розв'язувати безліч різних задач. Залежно від способу виготовлення ПЛІС можуть програмуватися або один раз, або багатократно. Пристрої, які можуть програмуватися тільки один раз, називаються одноразово програмованими [7].

В сфері цифрових мікросхем існує багато різних видів пристроїв, включаючи такі, як "розсіпна логіка", що представляє собою компактні компоненти з кількома простими фіксованими логічними функціями, а також пристрої пам'яті та мікропроцесори. У цьому контексті особливий інтерес викликають програмовані логічні пристрої (ПЛП), спеціалізовані інтегральні мікросхеми ASIC (англ. application specific integrated circuit), спеціалізовані стандартні інтегральні схеми ASSP (англ. application specific standard parts) та ПЛІС. Важливо зазначити, що термін "ПЛП" охоплює два основних типи пристроїв: прості програмовані логічні пристрої (прості ПЛП) і складні програмовані логічні пристрої (складні ПЛП).



У дослідженні, яке описане в роботі [9], запропонована математична модель для системи діагностики гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода, що базується на використанні логіко-часових функцій (ЛЧФ). Також надано пояснення принципу формування таблиці зразкових станів гальмівного кола цього типу електропривода (таблиця 1). В даній таблиці, значення "1" вказує на відповідність параметра зоні допуску, тоді як "0" вказує на виходження за межі зони допуску для відповідної діагностичної ознаки.

Таблиця 1. Стани гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода

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

У таблиці 1:

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. ΔU_c – перенапруга на конденсаторі фільтра; U_{vs0} – напруга на IGBT модулі; I_g – струм через гальмівний резистор; T°_r – температура гальмівного резистора; T°_{vs0} – температура IGBT модуля.

Згідно з таблицею 1 створюються вихідні логіко-часові функції (ЛЧФ), а потім, шляхом послідовного обчислення модуля суми двох сформованих та вимірних сигналів, які виступають у ролі діагностичних ознак поточного стану гальмівного кола, отримуємо результуючі логіко-часові функції (ЛЧФ). При прийнятті діагностичного висновку обирається та ЛЧФ, яка має найкоротший час існування серед отриманих ЛЧФ.

В загальному випадку операція додавання за модулем два двох ЛЧФ $f_1(t, t_1, T_1)$ та $f_2(t, t_2, T_2)$ описується виразом (1) [9], $f_1(t, t_1, T_1) \oplus f_2(t, t_2, T_2) =$

$$\begin{cases} t - t_m, & \text{якщо } t_m < t \leq t_j, \\ t - (t_m + T_m), & \text{якщо } (t_m + T_m) < t \leq (t_j + T_j), \\ 0, & \text{якщо } (t \leq t_m) \wedge (t_j < t \leq (t_m + T_m)) \wedge (t > (t_j + T_j)), \end{cases} \quad (1)$$

де $t_m = \min\{t_1, t_2\}$,

T_m – відповідна часовій координаті t_m тривалість відрізка існування, $t_j = \max\{t_1, t_2\}$,

T_j – відповідна часовій координаті t_j тривалість відрізка існування.

Для прикладу, графічна ілюстрація додавання за модулем два двох ЛЧФ $f_1(t, t_1, t_2, \Delta_i, T_1, T_2)$ та $f_2(t, t_1, t_2, \Delta_i, T_1, T_2)$, представлена на рис. 1, а аналітичний розв'язок описується виразом (2).

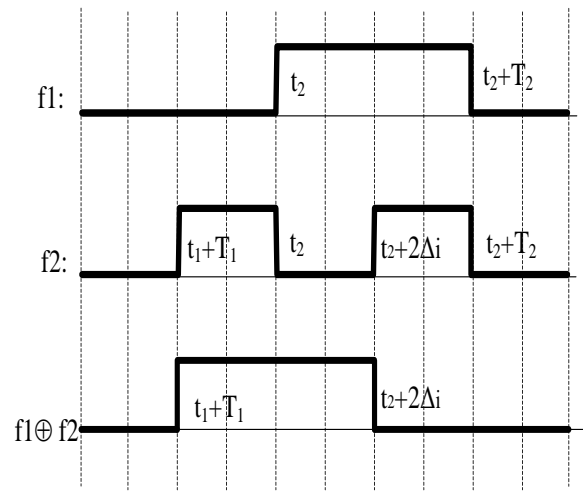


Рис. 1. Графічна ілюстрація операції виключної диз'юнкції двох ЛЧФ

$$\begin{aligned} f_1(t, t_1, t_2, \Delta_i, T_1, T_2) \oplus f_2(t, t_1, t_2, \Delta_i, T_1, T_2) = \\ = \begin{cases} t - (t_1 + T_1), & \text{якщо } (t_1 + T_1) < t \leq (t_2 + 2\Delta_i), \\ 0, & \text{якщо } (t < (t_1 + T_1)) \wedge (t > (t_2 + 2\Delta_i)). \end{cases} \quad (2) \end{aligned}$$

У дослідженні, викладеному в роботі [10], був розроблений пристрій для діагностики гальмівних коліс перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів. Цей пристрій був реалізований за допомогою цифрових апаратних засобів, використовуючи стандартні блоки дискретних пристроїв. Враховуючи вимоги сучасного приладобудування, а саме - високої енергоефективності, точності та швидкодії, дане пристрій було розроблено з використанням програмованої логіки. В якості базового елементу було взято ПЛІС Altera Max II EMP240T100C5, програмування якої було виконано в середовищі Quartus II 9.0.

Структурна схема пристрою для діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів із застосуванням ПЛІС зображена на рис.2.

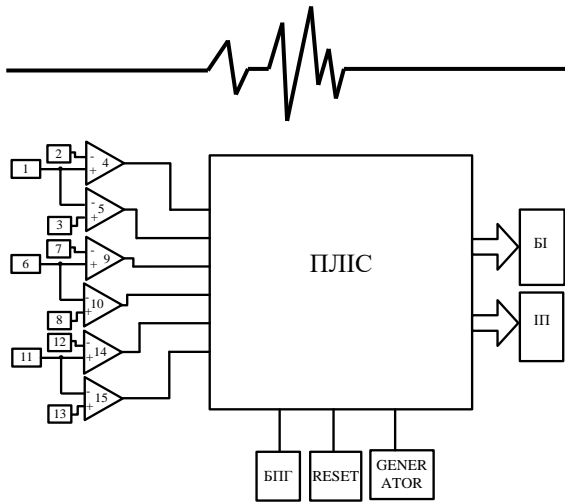


Рис. 2. Структурна схема пристрою для діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів із застосуванням ПЛІС

На рис. 2 можна побачити різні блоки від 1 до 15, які призначені для двох основних завдань. По-перше, вони відповідають за визначення того, чи належать вимірні сигнали гальмівного кола до діапазону припустимих значень і за перетворення вхідних аналогових сигналів у цифрову інформацію. Додатково, в роботі зустрічаються такі блоки, як ПЛІС (програмована інтегральна логічна схема), БПГ (блок початку гальмування), RESET (блок скидання схеми), GENERATOR (генератор опорної частоти), БІ (блок індикації) та ІП (інтерфейсний перетворювач).

В результаті розробки програмного забезпечення було отримано структурну схему пристрою діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів в середовищі Quartus II, зображену на рис. 3.

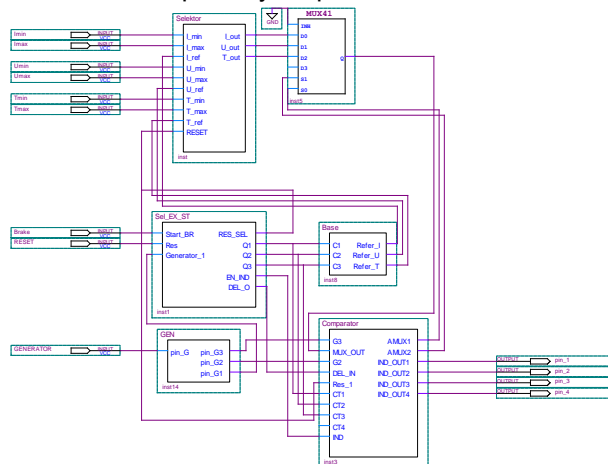


Рис. 3. Структурна схема пристрою діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів в середовищі Quartus II

Основна програма, що наведена на структурі (див. рис. 3.), складається з шести блоків, які являють собою основні функціональні частини схеми відповідно запропонованої у другому розділі математичної моделі діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів із застосування ЛЧФ.

Блок «Selektor» призначений для формування ЛЧФ поточного стану та порівняння її з ЛЧФ зразкових станів. Реалізація блока наведена на рис. 4.

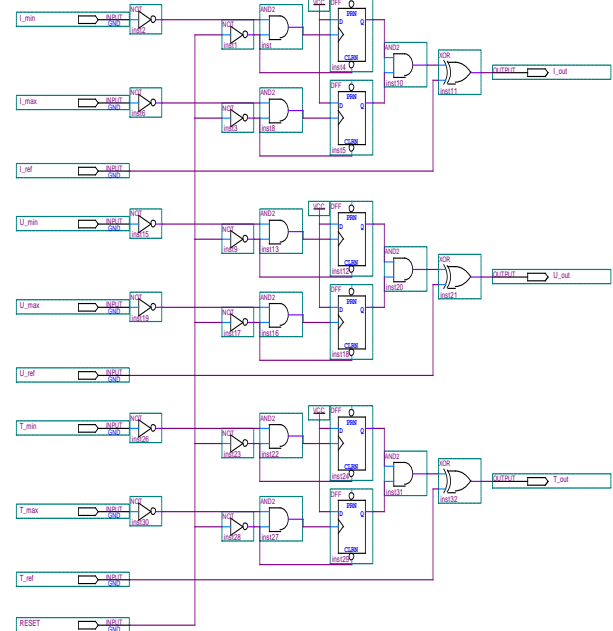


Рис. 4. Структурна схема блока «Selektor»

Блок «Sel_EX_ST» (рис. 5.) призначений для формування сигналів вибірки ЛЧФ зразкових станів із блока «Base» (рис. 6).

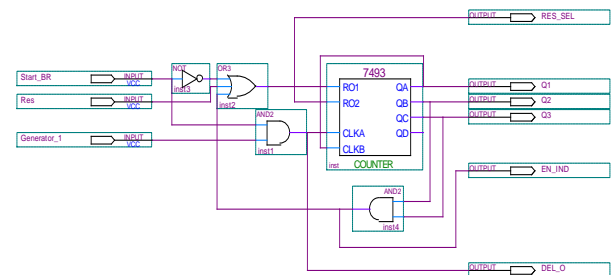


Рис. 5. Структурна схема блока «Sel_EX_ST»

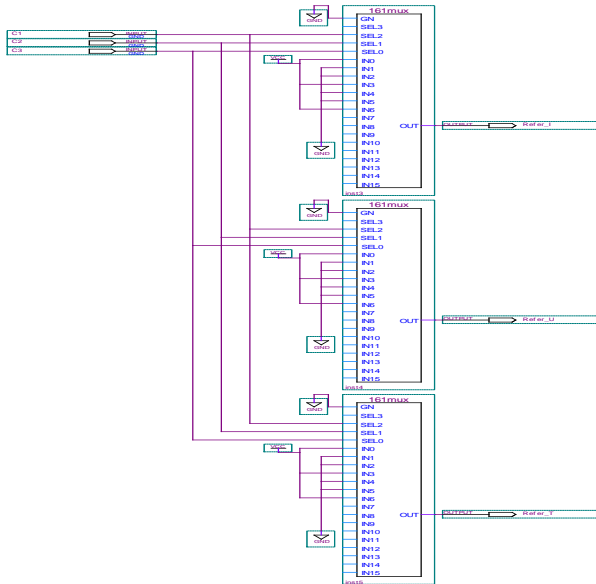
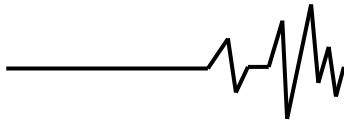


Рис. 6. Структурна схема блока «Base»

Блок «Comparator» (рис.8) призначений для визначення відрізка існування отриманих ЛЧФ в результаті порівняння за модулем два та визначення ЛЧФ з найменшим відрізком існування. Блок «GEN» (рис.7) призначений для формування опорних частот, що забезпечують коректну роботу пристрою.

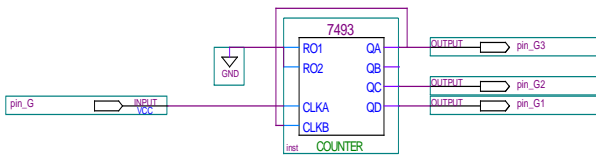


Рис. 7. Структурна схема блока «GEN»

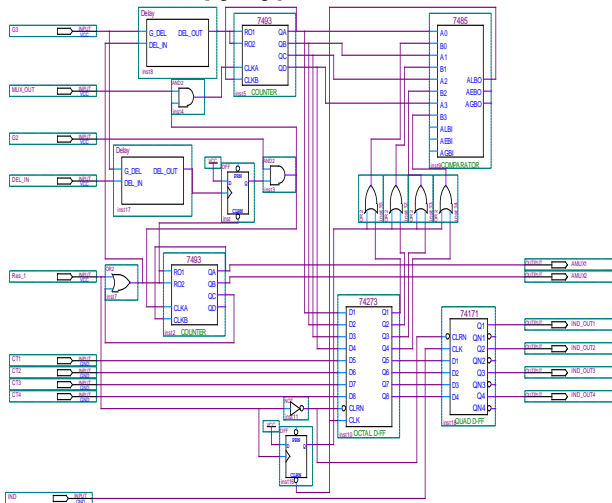


Рис. 8. Структурна схема блока «Comparator»

Решта елементів та блоків, що використовувалися для побудови схеми, є стандартними елементами бібліотеки середовища Quartus II, тому їх детальний огляд, є неактуальним.

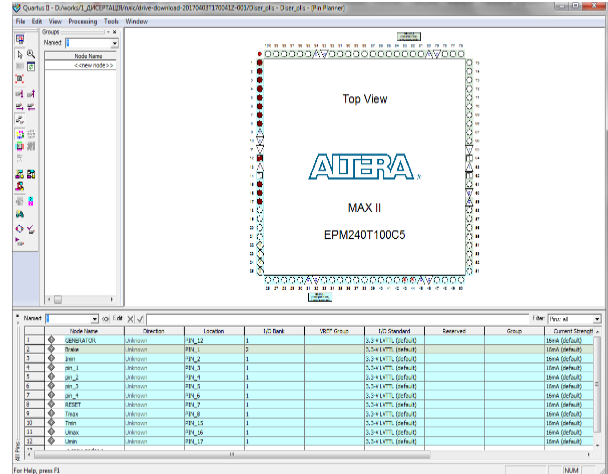


Рис. 9. Вікно конфігурації входів та виходів мікросхеми

Функціональність пристрою засвідчена результатами його тестування, при цьому в реальних умовах експлуатації перетворювача частоти, який перемикається в гальмівний режим. При цьому було введено додаткові тестові збурення для дослідження реакції системи.

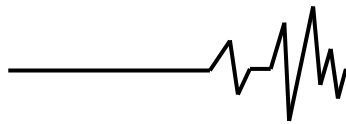
Висновки.

Дана реалізація є важливим кроком у підвищенні ефективності та стабільності промислових систем, сприяючи покращенню безпеки та надійності електроприводів у виробничих процесах. Вона дозволяє суттєво підвищити швидкість пристрою завдяки використанню лише однієї мікросхеми, що спрощує конструкцію та знижує енергоспоживання. Крім того, зменшення розмірів порівняно з реалізацією на інтегральних мікросхемах робить дану систему більш компактною і економічно вигідною.

Застосування цієї інноваційної системи діагностики гальмівних коліс у перетворювачах частотно-керованих асинхронних електроприводів (ЧКАЕ) має потенціал значно підвищити продуктивність та знизити витрати виробників та експлуатантів. В результаті це сприяє загальному підвищенню ефективності виробничих процесів і забезпечує більш стійкий та економічно вигідний промисловий сектор.

Список використаних джерел

1. Краснянський М.Ю. Енергозбереження. Навч. пос. Видавничий дім Кондор. 2018. 136 с.
2. Загірняк М. В., Коренькова Т. В., Калінов А. П., Гладир А. І., В. Г. Ковальчук. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода. Навч. пос. Харків. Видавництво Точка. 2017. 206 с.
3. Бартецький А. А. Мікропроцесорний пристрій діагностування



гальмівних кіл частотно-керованих асинхронних електроприводів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2016. №2 (55). С. 172-176.

4. Sridharan K., Suresh Kumar T. V., Karthick R., Jeevitha S. Development of an Online Fault Diagnosis System for Three-Phase Inverter using FPGA. *International Journal of Recent Technology and Engineering*.

5. Cabal-Yepez E., Valtierra-Rodriguez M., Romero-Troncoso R.J., Garcia-Perez A., Osornio-Rios R.A., Miranda-Vidales H., Alvarez-Salas R. FPGA-based entropy neural processor for online detection of multiple combined faults on induction motors (IJRTE). *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2012. Vol. 30. P. 123-130.

6. Z. Nouman., Knobloch Jan., Klima B. FPGA usage for power inverters diagnostics. (2013). P. 785-789.

7. Raj A.A.B. FPGA-Based Embedded System Developer's Guide (1st ed.) (2017).

8. Ünsalan Cem., Bora Tar. Digital System Design with FPGA: Implementation Using Verilog and VHDL. 1st ed. *New York:McGraw-Hill Education*. 2017.

9. Грабко В. В. Застосування логіко-часових функцій у задачі діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. №1(2016). С.25 – 31.

10. Грабко В.В., Грабко В. В., Бартецький А.А. Пристрій для діагностування гальмівних кіл частотно-керованих асинхронних електроприводів. МПК G05B 23/02(2006.1). №116477. 25.05.2017.

References

1. Krasnyansky M. Yu. (2018). Energy Conservation. Kondor Publishing House. [Ukraine]

2. Zahirnjak M. V., Korenkova T. V., Kalinov A. P., Gladir A. I., & Kovalchuk V. G. (2017). Suchasni peretvoryuvachi chastoti v sistemah elektroprivoda. Vidavniststvo Tochka. [Ukraine]

3. Bartetsky A. A. (2016). Mikroprotsesorny prystryi diagnostuvannya galmivnykh kil chastotno-kerovanih asinhronnykh elektroprivodiv. *Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnykh protsesakh*, (2). P.172-176. [Ukraine]

4. Sridharan K., Suresh Kumar T. V., Karthick R., Jeevitha S. Development of an Online Fault Diagnosis System for Three-Phase Inverter using FPGA. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. [Poland]

5. Cabal-Yepez E., Valtierra-Rodriguez M., Romero-Troncoso R. J., Garcia-Perez A., Osornio-Rios R. A., Miranda-Vidales H., Alvarez-Salas R. (2012). FPGA-based entropy neural processor for online detection of multiple combined faults on induction motors (IJRTE). *Mechanical Systems and Signal Processing*, 30. P. 123-130. [Italy]

6. Nouman Z., Knobloch, Jan., Klima B. (2013). FPGA usage for power inverters diagnostics. P. 785-789. [Poland]

7. Raj A. A. B. (2017). FPGA-Based Embedded System Developer's Guide (1st ed.). [USA]

8. Ünsalan Cem., Bora Tar. (2017). Digital System Design with FPGA: Implementation Using Verilog and VHDL (1st ed.). McGraw-Hill Education.

9. Hrabko V. V. (2016). Zastosuvannya lohiko-chasovykh funktsii u zadachi diahnostuvannya halminykh kil peretvoriuvachiv chastotno-kerovanykh asynkhronnykh elektroprivodiv. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy*, 1. P. 25-31. [Ukraine]

10. Hrabko V. V., Hrabko V. V., Bartetsky A. A. (2017). Prystryi dlia diahnostuvannya halminykh kil chastotno-kerovanykh asynkhronnykh elektroprivodiv. МПК G05B 23/02 (2006.1), 116477. [Ukraine]

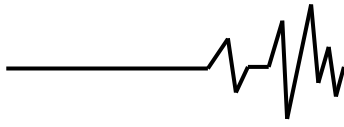
DIAGNOSTIC SYSTEM FOR BRAKE WHEELS OF FREQUENCY-CONTROLLED ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES USING FPGA

This article presents an innovative system for diagnosing brake wheels in frequency-controlled asynchronous electric drives (FCED) using a programmable logic matrix (FPGA), which opens up new possibilities for the modern industry in detecting and analyzing potential brake wheel faults in real-time.

The primary advantage of this innovative system is the utilization of FPGA, which ensures exceptionally high signal processing speed and an instant response to any identified faults. This not only effectively detects severe issues with brake wheels but also responds to even the slightest anomalies in their operation, thereby helping prevent possible emergency situations.

Furthermore, implementing this solution significantly enhances device speed and reliability by using just one microchip, reducing power consumption and size compared to implementations using integrated circuits, consequently reducing the system's overall cost.

In conclusion, this development represents a crucial step in improving the efficiency and stability of industrial systems. It contributes to enhancing the safety and reliability of electric



drives in manufacturing processes and holds great potential for implementation in industrial settings, fostering increased overall safety and productivity. Such technological advancement is a vital component of modern industry focused on achieving high-quality standards and productivity,

ultimately promoting increased competitiveness and innovative development in industrial sectors.

Key words: *diagnostic system, brake wheels, frequency-controlled converters, integrated circuits, asynchronous electric drives, FPGA technology, protection system.*

Відомості про авторів

Грабо Володимир Віталійович – д.т.н., професор Вінницького національного технічного університету (вул. Хмельницьке шосе 95, м. Вінниця, 21000, Україна).

Проценко Дмитро Петрович – к.т.н., доцент Вінницького національного технічного університету (вул. Хмельницьке шосе 95, м. Вінниця, 21000, Україна).

Бартецький Андрій Анатолійович – к.т.н., старший викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна).

Чмих Катерина В'ячеславівна – аспірантка другого року навчання Вінницький національний аграрний університет (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: catherina099@gmail.com).

Volodymyr Hrabko – Doctor of Technical Sciences professor of the Vinnytsia National Technical University (95 Khmelnytske Shosse St., Vinnytsia, 21000, Ukraine)

Dmytro Protsenko – Ph.D., Associate Professor at Vinnytsia National Technical University (95 Khmelnytske Shose Street, Vinnytsia, 21000, Ukraine).

Andrii Bartetskyi – Ph.D., senior lecturer of the Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine).

Kateryna Chmykh – postgraduate student at the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: catherina099@gmail.com)

...