

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАРТЕЦЬКИЙ АНДРІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.314: 62-83(043.03)

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

спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи
технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

А. А. Бартецький

Науковий керівник

Грабко Володимир Віталійович
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....**Error! Bookmark not defined.**

ВСТУП..... 6

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАНЬ ДІАГНОСТУВАННЯ
ГАЛЬМІВНИХ КІЛ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНИХ
АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ**Error! Bookmark not defined.**

1.1 Аналіз методів діагностування перетворювачів частоти**Error! Bookmark not defined.**

1.2 Аналіз методів та засобів діагностування силових ключів гальмівних
кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів**Error! Book**

1.2.1 Аналіз методів та засобів діагностування IGBT-модулів
гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних
електроприводів**Error! Bookmark not defined.**

1.2.2 Аналіз методів та засобів діагностування тиристорів гальмівних
кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів**Error! B**

1.3 Узагальнення результатів аналізу і постановка задачі дослідження**Error! Book**

РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ
ГАЛЬМІВНИХ КІЛ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНИХ
АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ**Error! Bookmark not defined.**

2.1 Синтез математичної моделі діагностування гальмівних кіл
перетворювача частоти**Error! Bookmark not defined.**

2.2 Математична модель вейвлет-діагностування гальмівних кіл
перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів**Error! Bookm**

2.3 Математична модель на основі застосування математичного апарату
логіко-часових функцій в задачі діагностування гальмівних кіл
перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів**Error! Bookm**

2.4 Математична модель діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти**Error! Bookmark not defined.**

2.5 Висновки до розділу 2**Error! Bookmark not defined.**

РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ ПРИСТРОЇВ ДІАГНОСТУВАННЯ ГАЛЬМІВНИХ КІЛ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ**Error! Bookmark not defined.**

3.1 Мікропроцесорна реалізація засобу для вейвлет-діагностування гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода.....**Error! Bookmark not defined.**

3.2 Пристрій діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів на основі математичної моделі із застосуванням логіко-часових функцій.....**Error! Bookmark not defined.**

3.3 Мікропроцесорний пристрій діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів на основі математичної моделі із застосуванням логіко-часових функцій**Error! Book**

3.4 Мікропроцесорний пристрій діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти .**Error! Bookmark not defined.**

3.5 Реалізація пристрою діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів із застосуванням програмованих логічних інтегральних схем.**Error! Bookmark not defined.**

3.6 Інтеграція реалізованих систем**Error! Bookmark not defined.**

3.7 Висновки до розділу 3**Error! Bookmark not defined.**

РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ГАЛЬМІВНИХ КІЛ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ**Error! Bookmark not defined.**

4.1 Комп'ютерна модель силового кола перетворювача частоти з гальмівним колом**Error! Bookmark not defined.**

4.2 Комп'ютерна модель системи діагностування гальмівних кіл частотно-керованих асинхронних електроприводів на основі ЛЧФ	Error! Bookmark not defined.
4.3 Комп'ютерна модель вейвлет-діагностування гальмівних кіл частотно-керованих асинхронних електроприводів.....	Error! Bookmark not defined.
4.4 Обробка експериментальних даних	Error! Bookmark not defined.
4.5 Оцінювання вірогідності здійснення контрольних функцій синтезованих пристроїв за помилками першого і другого роду та визначення мінімального ризику.....	Error! Bookmark not defined.
4.6 Висновки до розділу 4.....	Error! Bookmark not defined.
ВИСНОВКИ	Error! Bookmark not defined.
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	15
Д О Д А Т К И	Error! Bookmark not defined.
Додаток А Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво	Error! Bookmark not defined.
Додаток Б Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес	Error! Bookmark not defined.
Додаток В Модель вейвлет-діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів в ППП Mathcad	Error! Bookmark not defined.
Додаток Д Розширені схеми блоків ПЛІС-реалізації пристрою діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів	Error! Bookmark not defined.
Додаток Е Складові елементи схеми комп'ютерної моделі частотно-керованого асинхронного електропривода.....	Error! Bookmark not defined.
Додаток Ж Складові елементи схеми комп'ютерної моделі блока діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих	

асинхронних електроприводів на основі математичної моделі із
застосуванням логіко-часових функцій**Error! Bookmark not defined.**

Додаток К Складові елементи схеми комп'ютерної моделі блока вейвлет-
діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих
асинхронних електроприводів.....**Error! Bookmark not defined.**

Додаток Л Розв'язання задачі методом мінімального ризику**Error! Bookmark not def**

Додаток М Список опублікованих праць за результатами дисертаційної
роботи та відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи**Error! Bookmar**

ВСТУП

Підвищення якості продукції та енергетичної ефективності виробництва в цілому супроводжується впровадженням у виробництво енергоефективних технологій. Такі технології передбачають використання інтелектуальних систем та комплектацію приводів механізмів частотно-керованими асинхронними двигунами, які є більш надійними та ефективнішими порівняно з електроприводами постійного струму.

Залежно від вимог технологічного процесу частотні електроприводи комплектуються гальмівними колами, які призначені для розсіювання енергії гальмування, що накопичилась внаслідок роботи електродвигуна з механізмом з великим моментом інерції. Несправність гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів може призвести до порушення технології виробництва і браку продукції, а в гіршому випадку – до нещасних випадків на виробництві при роботі людини з механізмами, які не змогли здійснити гальмування через несправності гальмівних кіл.

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 діагностування 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, застосування 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 «Вінницяміськліфт» (акт впровадження від 20.12.2016) та в навчальний процес Вінницького національного технічного університету (акт впровадження від 21.02.2017).

Підтвердженням впровадження результатів дисертаційної роботи є наявність відповідних актів (додаток А та додаток Б).

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 гальмівних 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 «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Силовая электроника и энергоэффективность, Национальный технический университет "Харківський політехнічний інститут" м. Харків, 18.09.2015 р.»; щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету за участі 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].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] В. В. Грабко, С. М. Левицький, та А. А. Бартецький, «Застосування логіко-часових функцій у задачі діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, №1, с. 25-31, ISSN 2072-2052, 2016.
- [2] В. В. Грабко, С. М. Левицький, та А. А. Бартецький, «Вейвлет-діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів», *Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського*, №1, с. 9-13, ISSN 1995-0519, 2015.
- [3] В. В. Грабко, Вал. В. Грабко, та А. А. Бартецький, «Пристрій для діагностування гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода», *Вісник Хмельницького національного університету*, №6, с. 253-256, ISSN 2307-5732, 2016.
- [4] С. М. Левицький, та А. А. Бартецький, «Математична модель системи діагностування гальмівних кіл частотних електроприводів», *Вісник ВПІ*, №4, с.79-83, ISSN 1997-9266, 2013.
- [5] С. М. Левицький, Д. П. Проценко, та А. А. Бартецький, «Система діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти», *Вісник Харківського НТУ "ХПИ"*, №12, с.320-323, ISSN 2079-3944, 2015.
- [6] С. М. Левицький, Д. П. Проценко, та А. А. Бартецький, «Мікропроцесорний пристрій діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти», *Наукові праці ДонНТУ*, Серія: «Електротехніка і енергетика», №1, с. 25-29, ISSN 2074-2630, 2015.

- [7] А.А. Бартецький, «Мікропроцесорний пристрій діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, ХНУ, Хмельницький, № 2, с. 172–176, ISSN 2219-9356, 2016.
- [8] А. А. Бартецький, «Мікропроцесорна реалізація засобу для вейвлет-діагностування гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного електропривода», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, Хмельницький : ХНУ, № 3, с. 65–69, ISSN 2219-9356, 2016.
- [9] С. М. Левицький, та А. А. Бартецький, «Спосіб діагностування гальмівних кіл частотних електроприводів», *Тези доповідей II Міжнародної науково-технічної конференції «Оптимальне керування електроустановками»*, ВНТУ, Вінниця, 2013, с. 63.
- [10] С. М. Левицький, та А. А. Бартецький, «Математична модель системи діагностування силових модулів перетворювача частоти», *Тези доповідей II Міжнародної наукової-технічної конференції « Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах»* ВНТУ м. Вінниця, 2013р, с 239.
- [11] В.В. Грабко, Вал. В. Грабко, та А.А. Бартецький, “Пристрій для діагностування гальмівних кіл частотно-керованих асинхронних електроприводів ” *МПК G05B 23/02(2006.1), №116477*, 25.05.2017.
- [12] О. В. Крюков, и В. В. Марков «Алгоритмы технической диагностики регулируемых асинхронных электроприводов», *Электротехника* НГТУ, Россия 2002. №4, С. 37–46
- [13] ДСТУ 2389 – 94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення, К.: Держстандарт України, 1994.
- [14] В. Я. Кучер, *Основы технической диагностики и теории надежности*. Санкт-Петербург, Россия: СЗТУ, 2004.

- [15] В.М. Казак, *Основи контролю та технічної діагностики*. Київ, Україна: НАУ, 2013.
- [16] А.М. Сафарбаков, А.В. Лукьянов, и С.В. Пахомов, *Основы технической диагностики*. Иркутск, Россия: ИГУ, 2006.
- [17] В.В. Сапожников и Вл. В. Сапожников, *Основы технической диагностики*. Москва, Россия: 2004.
- [18] М. Я. Кельберт, и Ю. М. Сухов, *Теория информации и кодирования*. Москва, Россия: МЦНМО, 2013.
- [19] Е. П. Петров и Н. Л. Харина, *Статистическая радиотехника*. Киров, Россия: ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2014.
- [20] М.М. Сумик, І. Н.Прудіус та Р.М. Сумик, *Теорія сигналів*. Львів, Україна: “Бескид Біт”, 2008.
- [21] Б. І. Мокін, та В. Б. Мокін, *Математичні методи ідентифікації електромеханічних процесів*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999.
- [22] В.В. Глухов, *Техническое диагностирование динамических систем*. Москва, Россия: 2000.
- [23] Б. Дитмар, *Поиск неисправностей в электрических системах*. Пер. с нем. Петербург, Россия: БХВ 2010.
- [24] С.Н. Флоренцев, «Современное состояние и прогноз развития приборов силовой электроники», *Аппаратные средства*, №2, с. 20-29, 2004.
- [25] Programming manual. Variable speed drives for asynchronous motors, 2006. [Online]. Available: <http://prom-electric.ru/media/atv71.pdf>.
- [26] Inverter FR-D700. Instruction manual (Applied), 2008. [Online]. Available: <http://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/inv/ib0600366eng/ib0600366engg.pdf>.

- [27] Преобразователь частоты. *Руководство по программированию. Mitsubishi Electric*, 2008. [Online]. Available: http://www.esspb.ru/Documents/FR-D700_manual.pdf
- [28] MICROMASTER 440. *Руководство по эксплуатации издание А1*, 2011. [Online]. Available: http://www.ste.ru/siemens/pdf /rus/MM440_Operating_Instructions_A1_ru.pdf
- [29] Takafumi c/o Hitachi Ltd. Intellectual Property Group Suzuki, “Electric brake and electric brake control apparatus”, *EP 1752351 A1 EU*, № 20070035178, Feb. 14, 2007.
- [30] Л. Г. Лимонов, А. Н. Нетеса, и Л. В. Некрасова, “Особенности тормозных режимов электроприводов по системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель”, *Вестник ХПИ*. Харьков, №3, с. 25-27, 2004.
- [31] C. Kral, and K. Kafka, “Power Electronics Monitoring for a Controlled Voltage Source Inverter Drive with Induction Machine”, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, vol 1.1, Piscataway, NJ, USA. pp. 213-217, 2000.
- [32] S. A. Abramik, W. Sleszynski, J. Nieznanski, and H. Piquet, “Diagnostic Method for Online Fault Detection and Localization in VSI-Fed AC Drive”, *10th European Conference on Power Electronics and Applications*, Toulouse, France, 2003, pp. 1-8.
- [33] Р. Д. Шимук, и Д. С. Шимук, “Определение диагностических признаков отказов снабберных цепей”, *Світлотехніка та електроенергетика*. № 2, с. 61-66, 2011.
- [34] Г.И. Однокопылов, и И. Г. Однокопылов, “Повышение живучести частотно регулируемого асинхронного электропривода”, *Известия Томского политехнического университета*, Томск, 2005, с. 143-147.

- [35] А.О. Смирнов, С.В. Ланграф, В.С. Казано, и Р. Ф. Бекишев, “Исследование статических режимов работы частотно-регулируемого асинхронного электропривода в условиях низких температур”, *Известия Томского политехнического университета*, Томск, №4, с. 61-63, 2009.
- [36] S. Yang, D. Xiang, P. Bryant, L. Ran, and Tavner P., “Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: a review”, *IEEE Trans. on Power Electronics*, no. 25, с. 2734-2752, 2010.
- [37] T. Orłowska-Kowalska, and P. Sobanski, “Simple Sensorless Diagnosis Method for Open-Switch Faults in SVM-VSI-fed Induction Motor Drive”, *IEEE 39th Ann. Conf. of the Ind. Electron. Soc.*, 2013, pp. 8210–8215.
- [38] M. Alavi, D. Wang, and Luo M., “Short-Circuit Fault Diagnosis for Three-Phase Inverters Based on Voltage-Space Patterns”, *IEEE Trans. on Ind. Electron*, no. 61, pp. 5558–5569, 2014.
- [39] L. Kwang-Woon, Myungchul K., Jangho Y, and Ji-Yoon Y., “Condition Monitoring of DC-Link electrolytic Capacitors in Adjustable-Speed Drives”, *IEEE Trans. on Ind. App*, no. 44., pp 1606-1613, 2008.
- [40] Smet V., Forest F., Huselstein J.-J., Richardeau F., Khatir Z., Lefebvre S., and Berkani M., “Ageing and Failure Modes of IGBT Modules in High-Temperature Power Cycling”, *IEEE Trans. On Ind. Electron*, no. 58, с. 4931–4941, 2011.
- [41] M.A. Rodríguez-Blanco, A. Claudio-Sánchez, D. Theilliol, L. G. Vela-Valdés, P. Sibaja-Terán, L. Hernández-González, and J. Aguayo-Alquicira, “A Failure-Detection Strategy for IGBT Based on Gate-Voltage Behavior Applied to a Motor Drive System”, *IEEE Trans. on Ind. Electron*, no. 58, с. 1625-1633, 2011.

- [42] J.O. Estima, and A.J.M. Cardoso, “Fast fault detection, isolation and reconfiguration in fault-tolerant permanent magnet synchronous motor drives”, *Energy Convers. Congr. and Expos.*, pp. 3617–3624, 2012.
- [43] W. Zhang, D. Xu, P. N. Enjeti, H. Li, J.T. Hawke, and H.S. Krishnamoorthy, “Survey on Fault-Tolerant Techniques for Power Electronic Converters”, *IEEE Trans. on Pow., Electron*, no. 29, pp. 6319-6331, 2014.
- [44] U. Choi, K. Lee, F. Blaabjerg, and K. Lee, “Reliability Improvement of a T-Type Three-Level Inverter With Fault-Tolerant Control Strategy”, *IEEE Trans. on Pow. Electron.*, pp. 2660–2673, 2015.
- [45] P. Garg, S. Essakiappan, H.S. Krishnamoorthy, and Enjeti P.N., “A Fault-Tolerant Three-Phase Adjustable Speed Drive Topology With Active Common-Mode Voltage Suppression”, *IEEE Trans. Pow. Electron*, no. 30, pp. 2828–2839, 2015.
- [46] T. Orłowska-Kowalska, and P. Sobanski, “Survey on two-level voltage inverters robust to IGBT faults (in Polish)”, *Scientific Papers of the Institute of Electrical Machines, Drives and Measurements of the Wrocław University of Technology. Studies and Research*, no. 33, pp. 54-69, 2013.
- [47] M. Trabelsi, M. Boussak, P. Mestre, and M. Gossa, “An improved diagnosis technique for IGBTs open-circuit fault in PWM-VSI fed induction motor drive”, *IEEE Int. Symp. Ind. Electron*, pp. 2111-2117, 2011.
- [48] Jung Shin-Myung, Park Jin-Sik, Kim Hyoung-Suk, Kim Hag- Wone, and Youn Myung-Joong, “Simple switch open fault detection method of voltage source inverter”, *IEEE Energy Conv. Congress and Exp.*, pp. 3175-3181, 2009.
- [49] Qun-Tao, Sun Li-Zhi, Zhao Ke, and Sun Li, “Switching Function Model-Based Fast-Diagnostic Method of Open-Switch Faults in

- Inverters Without Sensors”, *IEEE Trans. Pow. Electron*, no. 26, pp. 119-126, 2011.
- [50] M. Alavi, M. Luo, D. Wang, and H. Bai “IGBT fault detection for three phase motor drives using neural networks”, *17th Conf. on Emerging Technol. and Factory Autom*, 2012, pp. 1-8.
- [51] C. Lee, and Choi W., “Design and evaluation of voltage measurement based sectoral diagnosis method for inverter open switch faults of permanent magnet synchronous motor drives”, *IET–Electric Power Applications*, no. 6, pp. 526-532, 2012.
- [52] J.O. Estima, N.M.A Freire., and A.J.M. Cardoso, “Recent advances in fault diagnosis by Park's vector approach”, *IEEE Workshop on Electr. Mach. Des. Control and Diagn.*, pp. 279-288, 2013.
- [53] W. Sleszynski, J. Nieznanski, and A. Cichowski, “Open-Transistor Fault Diagnostics in Voltage-Source Inverters by Analyzing the Load Currents”, *IEEE Trans. on Industry Appl.*, no. 56, pp. 4681–4688, 2009.
- [54] Q. An, L. Sun, and Sun L., “Current Residual Vector-Based Open-Switch Fault Diagnosis of Inverters in PMSM Drive Systems”, *IEEE Trans. on Pow. Electron*, pp. 2814-2827, 2015.
- [55] J.O. Estima, and A.J. Marques Cardoso, “A New Algorithm for Real-Time Multiple Open-Circuit Fault Diagnosis in Voltage-Fed PWM Motor Drives by the Reference Current Errors”, *IEEE Trans. on Ind. Electron*, pp. 3496-3505, 2013.
- [56] Jlassi, J.O. Estima, S.K. El Khil, N.M. Bellaaj, and A.J. Marques Cardoso, “Multiple Open-Circuit Faults Diagnosis in Backto-Back Converters of PMSG Drives for Wind Turbine Systems”, *IEEE Trans. on Pow. Electron*, no.30, pp. 2689– 2702, 2015.
- [57] N.M.A. Freire, J.O. Estima, and A.J.M. Cardoso, “A voltage-based approach for open-circuit fault diagnosis in voltage-fed SVM motor

- drives without extra hardware”, *Int. Conf. on Electr.*, 2012, pp. 2378-2383.
- [58] R. Peugot, S. Courtine, and J.P. Rognon, “Fault detection and isolation on a PWM inverter by knowledge-based model”, *IEEE Trans. Ind. Appl*, no.34, pp. 1318-1326, 1998.
- [59] W. Sleszynski, J. Nieznanski, and A. Cichowski, “Real-time fault detection and localization vector-controlled induction motor drives”, *11th Europ. Conf. Pow. Electr. and Appl.*, 2005, pp. 2-8.
- [60] M. Trabelsi, M. Boussak, and M. Gossa, “Multiple IGBTs open circuit faults diagnosis in voltage source inverter fed induction motor using modified slope method”, *19th Int. Conf. Electr. Mach.*, 2010, pp. 1-6.
- [61] D. Rivelino Espinoza-Trejo, D.U. Campos-Delgado, G. Bossio, E. Bárcenas, J.E. Hernández-Díez, and L.F. Lugo-Cordero, “Fault diagnosis scheme for open-circuit faults in field-oriented control induction motor drives”, *IET Pow. Electron*, no.5, pp. 869-877, 2013.
- [62] D.U. Campos-Delgado, J.A. Pecina-Sánchez, D. Rivelino Espinoza-Trejo, and E. Román Arce-Santana, “Diagnosis of open-switch faults in variable speed drives by stator current analysis and pattern recognition”, *IET Electric Pow. Appl.*, no. 8, pp. 509-522, 2013.
- [63] T. Orłowska-Kowalska, and P. Sobanski, “Simple diagnostic technique of a single IGBT open-circuit faults for a SVM-VSI vector controlled induction motor drive”, *Bull. of the Pol. Acad. Of Sci. Tech. Sci.*, no. 63, pp. 281–288, 2015.
- [64] Luis Gerardo Vela-Valdés, Pedro Sibaja-Terán, and Leobardo Hernández-González, “Detection Strategy for IGBT Based on Gate-Voltage Behavior Applied to a Motor Drive System Marco Antonio Rodríguez-Blanco”, *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 58, no. 5, May 2011.

- [65] W. Orłowska-Kowalska, and P. Sobanski, “Simple diagnostic technique of a single IGBT open-circuit faults”, *Department of Electrical Machines, Drives and Measurements, Wrocław University of Technology, Wybrzeże Wyspiańskiego*, Wrocław, Poland, 2011, pp. 50-370.
- [66] Won-Sang Im., Jang-Sik Kim, Jang-Mok Kim, Dong-Choon Lee, and Kyo-Beum Lee, “Diagnosis Methods for IGBT Open Switch Fault Applied to 3-Phase AC/DC PWM Converter”, *Journal of Power Electronics*, vol.12, pp. 120-127, 2012.
- [67] C. Kral, and K. Kafka, “Power electronics monitoring for a controlled voltage source inverter drive with induction machines”, *IEEE Power Electronics Specialists Conf.*, vol 1, pp. 213-217, 2000.
- [68] Surin Khomfoi, Warachart Sae-Kok, and Issarachai Ngamroo, “An Open Circuit Fault Diagnostic Technique in IGBTs for AC to DC Converters Applied in Microgrid Applications”, *Journal of Power Electronics*, vol. 11, no 6, pp. 801-810, 2011.
- [69] H. Ben Attia Sethom, and M. Ajabi Ghedamsi, “Intermittent Misfiring Default Detection and Localisation on a PWM Inverter Using Wavelet Decomposition”, *Journal of Electrical Systems*, no. 4, pp. 222-234, 2008.
- [70] M.S. Khanniche, and M.R. Mamat-Ibrahim, “Wavelet-fuzzy-based algorithm for condition monitoring of voltage source inverter”, *Electronics Letters*, vol. 40, pp. 267-268, 2004.
- [71] D. Diallo, M.E.H. Benbouzid, D. Hamad, and X. Pierre “Fault Detection and Diagnosis in an Induction Machine Drive: a Pattern Recognition Approach Based on Concordia Stator Mean Current Vector”, *Electric Machines and Drives Conference*, 2003, pp. 327 .
- [72] R. L. de Araujo Ribeiro, C. B. Jacobina, E.R.C. da Silva, and A. M. N. Lima, “Fault Detection of Open-Switch Damage in Voltage-Fed PWM

- Motor Drive Systems”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, pp. 587-593, 2003.
- [73] M. Rozailan Mamat, M. Rizon, and M.S. Khanniche, “Fault Detection of 3-Phase VSI using Wavelet-Fuzzy Algorithm”, *American Journal of Applied Sciences*, no.3(1), pp. 1642-1648.
- [74] Young-Jong Ko, and Kyo-Beum Lee, “Diagnosis of a Voltage-Fed PWM Inverter for a Three-parallel Power Conversion System in a Wind Turbine”, *Journal of power electronics*, no. 6, pp. 686-693, 2010.
- [75] M. S. Khanniche, and M. R. Mamat-Ibrahim, “Fault Detection and Diagnosis of 3-Phase Inverter System”, *Journal Power Engineering*, pp. 69-75, 2001.
- [76] M. S. Mendes, and A. J. Marques Cardoso, “Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed ac drives, by the average current Park’s vector approach”, *Electric Machines and Drives Conf.*, 1999, pp. 704-706.
- [77] K. Rothenhagen, and F. W. Fuchs, “Performance of diagnosis methods for IGBT open circuit faults in three phase voltage source inverters for ac variable speed drives”, *Eur. Conf. on Power Electron*, 2005, pp. 1-10.
- [78] R. Peugeot, S. Courtine, and J. P. Rognon, “Fault detection and isolation on a PWM inverter by knowledge-based model”, *IEEE Trans. on Indus. Applicat.*, vol. 34, no. 6, pp. 1318-1326, 1998.
- [79] F. W. Fuchs, “Some diagnosis methods for voltage source inverters in variable speed drives with induction machines - A Survey”, *Industrial Electronics Society*, no.3. pp.1378-1385, 2003.
- [80] L. Zhang, I. B. Aris and L. N. Hulley, “A Knowledge-Based System for On-line Fault Diagnosis of Power Inverter Circuits for AC machines”, *Eur. Power Electron. Conf.*, 1995, pp. 334-339.

- [81] R. Szczesny, H. Piquet, and P. Kurzynski, "Fault Detection and Diagnosis in the Electric Drives", *Eur. Conf. on Power Electron*, vol. 2, 1997, pp. 995-1000.
- [82] B. Raison, G. Rostaing and J. P. Rognon, "Towards a Global Monitoring Scheme for Induction Motor Drives", *Int. Power Electron. Conf.*, Tokio, 2000, pp. 1183-1188.
- [83] S. Musumeci, R. Pagano, A. Raciti, G. Belverde, C. Guastella and M. Melito, "A novel protection technique devoted to the improvement of the short circuit ruggedness of IGBTs", *IEEE Conf. of Ind. Electron.Society*, vol. 2, Nov. 2003, pp. 1733-1738.
- [84] R. S. Chokhawala, and S. Sobhani "Switching voltage transientprotection schemes for high-current IGBT modules", *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 33, no. 6, pp. 1601-1610, 1997.
- [85] Bhalla, S. Shekhawat, J. Gladish, J. Yedinak, and G. Dolny, "IGBT behavior during desat detection and short circuit fault protection", *Proc. of the Int. Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*, pp.245-248, 1998.
- [86] F. Richardeau, P. Baudesson, and T. A. Meynard, "Failures-tolerance and remedial strategies of a PWM multicell inverter", *IEEE Trans. on Power Electron*, vol. 17, no.6, pp. 905-912, Nov. 2002.
- [87] M. Trivedi, and K. Shenai, "Internal dynamics of IGBT during short circuit switching", *Proc. of the Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting*, 1996, pp. 77-80.
- [88] E. Lorfevre, E. Dachs, C. Detcheverry, C. Sudre, F. Roubaud, J. M. Palau, J. Gasiot, M. C. Calvet, and R. Ecoffets, "Failure mode of different irradiated power IGBT structures", *Eur. Conf. on Radiationand Its Effects on Components and Systems*,1997, pp. 516-519.

- [89] R. L. Cassel, and M. N. Nguyen, “A new type short circuit failures of high power IGBTs”, *Digest Technical Paper of Pulsed Power Plasma Science*, vol. 1, 2001, pp. 322-324.
- [90] R. Pagano, Y. Chen, K. Smedley, S. Musumeci, and A. Raciti, “Short circuit analysis and protection of power module IGBTs”, *IEEE Applied Power Electron. Conf. and Exposition*, vol 2, 2005 pp. 777-783.
- [91] R. Pagano, and A. Raciti, “Evolution in IGBTs protection against short circuit behaviors by gate-side circuitry”, *IEEE Int. Symposium on Ind. Electron*, vol 3, 2002, pp. 913-918.
- [92] M. A. Rodriguez, A. Claudio, D. Theilliol, and L. G. Vela, “A new fault detection technique for IGBT based on gate voltage monitoring”, *IEEE Power Electron. Specialists Conf.*, 2007, pp. 1001-1005.
- [93] F. Huang, and F. Flett, “IGBT fault protection based on di/dt feedback control”, *Siemens VDO Electric Drives Inc.*, 2007, pp. 1478-1484.
- [94] Dara O’Sullivan, “IGBT overcurrent and short-circuit protection in industrial motor drives”, *Technical article, Analog Devices, Inc.* 2015, pp. 1-5.
- [95] K. S. Smith, L. Ran, and J. Penman, “Real-time detection of intermittent misfiring in a voltage-fed PWM inverter induction-motor drive”, *IEEE Trans. on Ind. Electron*, vol. 44, no. 4, 1997, pp. 468-476.
- [96] Г. Б.Лазарев, «Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных систем», *Новости электротехники*, №2, с. 30-36, 2005. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/32/10.php>.
- [97] А.Г. Народницкий, «Частотно регулируемые приводы и энергораспределительные системы», *Цемент и его применение*, №4, с. 38-41, 2008.

- [98] Д.Г. Шкердин, «Преобразователи частоты в энергосберегающем приводе насосов», *Водоснабжение и санитарная техника*, №7, 2004, с. 29-32.
- [99] А. Р. Мухамадеев, «Преобразователи частоты и устройства плавного пуска для электроприводов переменного тока», *Энергетика Татарстана*, №17, 2010, с. 44-53.
- [100] Б.И. Гринштейн, Колоколкин А.М., и Тарасов А.Н., «Опыт разработки и внедрения тиристорных преобразователей частоты для пуска и регулирования частоты вращения мощных синхронных машин», *Электрические станции*, №8, 2005, с. 45-53.
- [101] А. А. Топчий, «Устройство диагностирования тиристорного преобразователя», *G01R31/26, G01R31/28, № 2133042, бюл. №25, 10.07.1999.*
- [102] Топчий А.А, «Способ диагностирования тиристорного преобразователя» *МПК G01R 31/27, № 2133043, 10.07.1999.*
- [103] Бырин В.Н, Целемечкий В.А., и Чясаков Г.С, «Способ контроля неисправности полупроводниковых приборов», *G01R31/27, № 1035537, 15.08.1983.*
- [104] А.Мальцев, и И Мальцев, «Тепловое сопротивление как показатель надежности мощных выпрямительных мостов», *Силовая Электроника*, № 5, с. 54-55, 2010.
- [105] Э. Кушекова, и И. Аитов, «Повышение надежности тиристорных преобразователей частоты для электротехнических установок», *Силовая Электроника*, № 1, с. 56-62, 2009.
- [106] ГОСТ 19656.15-84. *Диоды полупроводниковые СВЧ. Методы измерения теплового сопротивления переход-корпус и импульсного теплового сопротивления.* Москва, Россия: 21 с.

- [107] И. Аитов, «Повышение надежности тиристорных преобразователей частоты для электротехнических установок», *Силовая Электроника*, Вып. 1, с. 56-62, 2009.
- [108] В.Ф. Оробей, та Максимов В.Г, «Загальні принципи діагностування електронних систем», *Наука і техніка*, Київ, Україна, 2012.
- [109] Рожков В.И., Попов Е.А., и Верещагин Г.А, «Способ диагностирования поврежденных частотно-регулируемого асинхронного двигателя», *МПК G01R 31/34, №2373548*, 20.11.2009.
- [110] Топчий А.А., «Способ диагностирования тиристорного преобразователя», *МПК G01R 31/27, № 2133043*, 10.07.1999.
- [111] В. Н. Бырин, и Г. С. Чясанов «Способ контроля неисправности полупроводниковых приборов», *SU, G01R31/27, № 1035537*, 15.08.1983.
- [112] И. А. Мальцев, и А. А. Мальцев, «Устройство для измерения теплового сопротивления переход корпус полупроводникового прибора», *RU G01R31/26 (2006.01), №2392631*, 09.06.2009.
- [113] Миронов Л.М., и В. И. Ключев, «Устройство для диагностики и защиты реверсивного тиристорного преобразователя», *RU H02H7/12, № 2183896*, 20.06.2002.
- [114] Н. Б. Мещеряков, «Способ контроля и коммутации управляемых вентилях и устройство для его осуществления», *SU H02H7/125, №2115989*, 20.07.1998.
- [115] Д. М Шпрехер, В. М. Степанов, и Г. И. Бабокин, «Устройство диагностирования технического состояния электромеханических систем», *RU, МПК G01R31/34, №2014114354/28*, 20.08.2014.

- [116] С. Герман-Галкин, «Моделирование устройств силовой электроники», *М.: Силовая электроника*, №4, с. 23-28, 2008.
- [117] Boldea, and S. A. Nasar, *Electric Drives*. CRC Press Boca Raton, London, 1999.
- [118] L. Still, “Determining a temperature of a brake resistors”, *EP 1 610 454 B1 EU, G01R 27/14, № : 05090156.0*; application 23.06.2004 ; publ. 28.12.2005, Bulletin 2005/52.
- [119] А. Колпаков, «Методы оценки надёжности силовых модулей IGBT SEMIKRON в предельных режимах», *Силовая Электроника*, №1, с. 40-45, 2004.
- [120] Л. В. Новиков, *Основы вейвлет-анализа сигналов*. Санкт-Петербург, 1999.
- [121] А.Н. Яковлев, *Введение в вейвлет-преобразования*. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2003.
- [122] В.П. Кожем’яко, Л.И. Тимченко, Г.Л. Лысенко, и Ю.Ф. Кутаев, *Функциональные элементы и устройства оптоэлектроники*. К.: УМК ВО, 1990.
- [123] Н.В. Сачанюк-Кавецька, та В. П. Кожем’яко, *Елементи оптоелектронної обробки зображень у логіко-часовому середовищі*. ВНТУ, Вінниця, 2004.
- [124] Albertsen, “Electrolytic Capacitor Lifetime Estimation”, *Jianghai Europe Electronic Components GmbH.*, p. 13, 2012.
- [125] А. М. Половко, и С. В. Гуров, *Основы теории надёжности*. СПб: БХВ-Петербург, 2008.
- [126] О. Радюшкин, «Методы оценки срока эксплуатации электролитических конденсаторов», *Силовая электроника*, № 5, с. 19-22, 2010.

- [127] R. Khandebharad, R. B. Dhumale, and S. S. Lokhande, “Electrolytic capacitor online failure detection and life prediction methodology”, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 78-83, ISSN 2321-7308, 2015.
- [128] PIC32MZ Embedded Connectivity, Technical Reference Manual, 2013.
[Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/60001191F.pdf>, 2013.
- [129] Microprocessor Report, 2017. [Online]. Available: <http://www.linleygroup.com/mpr/>, 2017.
- [130] Atmega16 Technical Reference Manual. 2010. [Online]. Available: <http://www.atmel.com/Images/doc2466.pdf>, 2010.
- [131] Сравнительный анализ применения ПЛИС и микропроцессоров при разработке информационно- управляющих систем, важных для безопасности АЭС, Научно-технический отчет. НАУ им. Н.Е. Жуковского ХАИ, НТСКБ Полисвит, ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины, ИПММС НАН Украины, 2005.
- [132] А.В. Попович, «ПЛИС Actel – платформа для «систем на кристалле» бортовой аппаратуры», *Электроника, Наука, Технология, Бизнес*, № 4, с. 34-37, 2004.
- [133] А. Гультияев, *MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: практическое пособие*. Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 1999.
- [134] В.Г. Потемкин, и П. И. Рудаков, *Система MATLAB 5 для студентов*. [2-е изд.], Москва: Диалог-мифи, 1999.
- [135] В.П. Дьяконов, *Simulink 4. Специальный справочник*. Санкт-Петербург: Питер, 2002.

- [136] А.Н. Ширяев, И.Г. Эрлих, и П.А. Яськов, *Вероятность в теоремах и задачах (с доказательствами и решениями)*. Москва, Россия: МЦНМО, 2014.
- [137] Б.І. Мокін, В.Б. Мокін, О.Б. Мокін, *Математичні методи ідентифікації електромеханічних процесів*. Вінниця, Україна: «УНІВЕРСУМ-Вінниця» 2005.