

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

(рівень вищої освіти)

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: «Пошук варіантів вдосконалення процесу оцінки стану та діагностики несправностей інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами»

КНУ.МР.141.24.776-10

Виконав студент II курсу, групи ЕПА-23м /Євгеній ПАВЛИШ/
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник:

д.е.н., професор

_____ /Тетяна БЕРІДЗЕ/

Нормоконтролер:

д.е.н., професор

_____ /Тетяна БЕРІДЗЕ/

Завідувач кафедри,

д.т.н., професор

_____ /Олег СІНЧУК/

Гарант ОПП:

к.т.н., доцент

_____ /Юрій ОСАДЧУК/

Кривий Ріг
2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ПАВЛИШ Євгеній Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Пошук варіантів вдосконалення процесу оцінки стану та діагностики
несправностей інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами

1. Термін подання студентом роботи: 09 грудня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є пошук варіантів
вдосконалення процесу оцінки стану та діагностики несправностей
інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Структура електроприводу з синхронними двигунами та інверторами
напруги; II. Система діагностики інверторів напруги у структурі електричних
приводів з синхронними двигунами; III. Дослідження роботи системи
діагностики несправностей інвертора напруги у електричних приводах з
синхронними двигунами.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) I. Структура електроприводу з інвертором напруги; II. Інвертори
напруги; III. Дослідження роботи системи діагностики; IV. Результати
моделювання пошуку несправностей інвертора напруги у електричних
приводах з синхронними двигунами.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Берідзе Т.М.		
II	Берідзе Т.М.		
III	Берідзе Т.М.		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Структура електроприводу з синхронними двигунами	10.09.24
2	Аналіз несправностей інверторів напруги	17.09.24
3	Процес оцінки стану інвертора напруги	19.10.24
4	Вдосконалення процесу оцінки стану інвертора	26.10.24
5	Системи діагностики інверторів напруги	18.11.24
6	Методика діагностики несправностей інвертора	30.11.24
7	Розробка системи діагностики несправностей інвертора	04.12.24
8	Моделювання режимів роботи системи діагностики несправностей інвертора	07.12.24

Дата видання завдання 02.09.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

_____ Павлиш Є.О.
(ПІБ)

Керівник роботи _____
(підпис)

Берідзе Т.М.
(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Пошук варіантів вдосконалення процесу оцінки стану та діагностики несправностей інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами»: 43 с., 8 рис., 21 літературних джерела.

Об'єкт дослідження – інвертор напруги у електричних приводах з синхронними двигунами.

У першому розділі проведено аналіз варіантів вдосконалення процесу оцінки стану та діагностики несправностей інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами. Розглянуто прямий та зворотний методи діагностики несправностей, а також визначено особливості функціонування інверторів напруги у структурі електричних приводів з синхронними двигунами.

У другому розділі запропоновано вдосконалення методу оцінки стану інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами, а також розглянуто процесу діагностики його несправностей у режимах роботи.

У третьому розділі досліджено аварійні режими роботи інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами. Синтезовано систему оцінки стану та діагностики несправностей у структурі електричних приводів з синхронними двигунами.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРИВОД, ІНВЕРТОР НАПРУГИ, СИНХРОННИЙ ДВИГУН, ДІАГНОСТИКА НЕСПРАВНОСТЕЙ

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. Структура електроприводу з синхронними двигунами та інверторами напруги	11
1.1. Розвиток електроприводу з синхронним двигуном та інвертором напруги	11
1.2 Аналіз несправностей інверторів напруги	13
РОЗДІЛ 2. Система діагностики інверторів напруги у структурі електричних приводів з синхронними двигунами.....	15
2.1. Варіанти несправностей інвертора напруги.....	15
2.2. Процес оцінки стану інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами.....	17
2.3. Реалізація вдосконалення процесу оцінки стану інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами.....	22
РОЗДІЛ 3. Дослідження роботи системи діагностики несправностей інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами	24
3.1. Методика діагностики несправностей інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами	24
3.2. Розробка системи діагностики несправностей інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами.....	27
3.3. Моделювання режимів роботи системи діагностики несправностей інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами.....	30
ВИСНОВКИ.....	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	37
Додаток А.....	40

	6
Додаток Б	41
Додаток В	42
Додаток Г	43

ВСТУП

Робота сучасних електромеханічних систем пов'язана з вірогідністю виникнення аварійної ситуації.

Особливо небезпечними є прояви аварійних ситуацій, що виникають у процесі роботи обладнання.

Робочі режими мають притаманні характеристичні ознаки, що супроводжуються значним споживанням електричної енергії.

Для систем регульованого електричного приводу, що містять синхронні двигуни важливим є структура та складність каналу регулювання їх параметрів.

Елементом який безпосередньо впливає на ефективність роботи електричного приводу з синхронним двигуном є перетворювач параметрів електричної енергії, що живить обмотку статора синхронної машини, та безпосередньо знаходиться у каналі керування як його ключовий регулюючий чинник.

Виходячи зі структури системи електроживлення можна виділяти такі типи перетворювачів, які містять ланку постійного струму, або є безпосередніми перетворювачами параметрів мережі живлення.

Оскільки загальним конструкційним рішенням для обох розглянутих структур є наявність інверторної групи у їх складі, то логічним є розгляд саме цього елемента у якості дослідного.

Інверторна група складається з ключових елементів, що зібрані за певним схематичним принципом та покликані здійснювати перемикання виходячи із програмного завдання.

Інвертор безпосередньо перебуває у контакті з обмотками електричної машини.

Цей факт впливає на важливість надійної роботи електромеханічного комплексу.

Переважає більшість поломок електромеханічних систем, що містять перетворювачі, проходить на лінії розмежування на ділянці інверторна група – обмотка статора машини.

Тому важливим є процес діагностики справності каналу інверторна група – електрична машина.

Для можливості вдосконалення процесу визначення стану електричного обладнання необхідно застосовувати розширення функцій діагностичного комплексу.

Це можливо зробити при розробці новітніх підходів щодо визначення параметрів електричних машин.

Такі методологічні підходи ґрунтуються на застосуванні складного математичного апарату.

Сучасні підходи щодо розвитку діагностичних комплексів зосереджуються на вирішенні питання точності оцінки залишкових складових струмів.

При цьому використовується модель спостерігача стану, який виконує оцінювання залишкових складових струму.

Такі системи розробляються на основі спостерігачів, що містять елементи машинного навчання.

Тому важливими є алгоритми, що забезпечують необхідну поведінку навчальної системи.

Розглянута можливість має забезпечувати періодичну вибірку параметрів досліджуваної структури.

При цьому набуті навички щодо визначення стану підпорядкованого обладнання можуть зберігатись та застосовуватись при подальшому корегуванні алгоритмів діагностики.

При цьому параметри дослідного обладнання мають обмежуватись на рівні граничних значень, які встановлюються у вигляді функцій визначників у просторі та часі.

При цьому моделювання процесу проводиться за допомогою порівняння залишків струму у режимі реального часу.

Завдяки машинному навчанню системи діагностики порівняльний аналіз значно спрощується.

Адже порівняльний аналіз проводиться у паралельних каналах та забезпечується стратегією вибірки.

Аварійні режими негативним чином впливатимуть також і на стан самого інвертору.

Тому важливим є створення умов щодо розподілу діагностичних функцій на рівні каналу керування інвертором.

На промислових зразках керування тяговими електричними синхронними двигунами за допомогою інверторів оснащено діагностичними комплексами, що забезпечуються спеціальними розрахунковими функціями, що змінюють настроювання алгоритму вибірки в залежності від отриманих результатів.

Подібні системи називають гібридними системами моніторингу параметрів.

Вони дозволяють зробити висновки щодо необхідності заміни ненадійного елемента, або попередити можливість настання аварійного виходу з ладу обладнання.

Для удосконалення роботи систем діагностування розробляють спеціальні алгоритми, що засновані на порівнянні процесів у реальному часі, що забезпечує швидкість навчання за половину інтервалу визначеного на процес машинного навчання.

Подібні системи приймають експертні рішення щодо стану обладнання та покликані забезпечити надійність роботи та ефективність функціонування системи у цілому.

РОЗДІЛ 1. Структура електроприводу з синхронними двигунами та інверторами напруги

1.1. Розвиток електроприводу з синхронним двигуном та інвертором напруги

У системах з синхронними електричними двигунами для підвищення показників їх використання важливим є можливість регулювання їх параметрів у процесі виконання технологічних завдань.

Синхронні електричні двигуни мають забезпечуватись системою керування яка буде здійснювати таке регулювання найбільш сприятливим та надійним способом.

Так регулювання можна здійснювати завдяки наявності у структурі електричного приводу з синхронною машиною інвертора напруги.

Такі системи зарекомендували себе як ефективні відповідно до можливості змінювати частоту обертання ротору синхронного двигуна у процесі його роботи.

Але, нажаль, таке регулювання впливає на надійність подібної системи електроприводу.

Оскільки при зміні параметрів у процесі роботи синхронного двигуна спостерігаються значні відхилення його показників при здійсненні регулювання.

Цей прояв суттєво впливає на роботу інвертора напруги у структурі електричного приводу.

Тому переважна більшість виходу з ладу подібних структур пов'язана зі змінами у структурі інвертора напруги.

Отже, важливим є контролювати параметри інверторів напруги у структурі електричного приводу з синхронними двигуном, а також

здійснювати періодичну діагностику складових подібних систем з метою виявлення ненормальних та аварійних режимів під час їх роботи.

1.2 Аналіз несправностей інверторів напруги

До найбільш частих проявів несправностей у структурі інвертора напруги слід віднести несправності силової частини, коли має місце факт фізичної зміни у структурі силової частини.

Такі прояви є найбільш негативними та не підлягають швидкому усуненню.

Також можна розглянути процеси при наявності ушкоджень та збої програми роботи системи керування інвертором напруги.

Такі прояви можна виявити на початковій стадії та унеможливити розвиток аварійних процесів у силових блоках структури інверторів напруги.

Особливо небезпечними є прояви аварійних ситуацій, що виникають у процесі роботи обладнання.

Робочі режими мають притаманні характеристичні ознаки, що супроводжуються значним споживанням електричної енергії.

Для систем регульованого електричного приводу, що містять синхронні двигуни важливим є структура та складність каналу регулювання їх параметрів.

Елементом який безпосередньо впливає на ефективність роботи електричного приводу з синхронним двигуном є перетворювач параметрів електричної енергії, що живить обмотку статора синхронної машини, та безпосередньо знаходиться у каналі керування як його ключовий регулюючий чинник.

Виходячи зі структури системи електроживлення можна виділяти такі типи перетворювачів, які містять ланку постійного струму, або є безпосередніми перетворювачами параметрів мережі живлення.

Оскільки загальним конструкційним рішенням для обох розглянутих структур є наявність інверторної групи у їх складі, то логічним є розгляд саме цього елемента у якості дослідного.

РОЗДІЛ 2. Система діагностики інверторів напруги у структурі електричних приводів з синхронними двигунами

2.1. Варіанти несправностей інвертора напруги

У структурі інверторів напруги дуже зручно для виявлення ненормальних проявів при роботі системи керування користуватись періодичним діагностуванням правильності роботи та відтворення послідовностей дій у структурах силових блоків у відповідності до завдань у структурах блоків керування.

Така діагностика виконується у залежності від створених значень, що розраховуються та порівняння їх з отриманими з відповідних датчиків.

Цікавим є підхід формування навчальної бази параметрів електричної машини, що фіксуються у процесі роботи.

Але для ефективної реалізації подібних алгоритмів діагностування слід мати достатній об'єм пам'яті у структурі а також застосовувати програми пришвидшення розрахунків.

Доволі ефективним поліпшенням подібного підходу є використання не усїєї бази параметрів режимів роботи електричної машини, а частки, що відповідає за зазначений процес.

Так при виявленні параметрів у механічній частині електроприводу слід звернути увагу на розбіжності значень моменту синхронної машини, що зручно виконувати за відхиленнями значень струму інвертора напруги у такій структурі.

Інверторна група складається з ключових елементів, що зібрані за певним схематичним принципом та покликані здійснювати перемикання виходячи із програмного завдання.

Інвертор безпосередньо перебуває у контакті з обмотками електричної машини.

Цей факт впливає на важливість надійної роботи електромеханічного комплексу.

2.2. Процес оцінки стану інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами

При відсутності несправностей у структурі інвертора напруги характерними є прояви симетрії його параметрів.

Відсутність одного з сигналів у керованому плечі структури інверторів призводить до зміщення та зростання сигналів у іншому плечі.

Такий прояв буде відчуватись у зміні різниці сигналів що надходить до системи керування.

Для контролю такого прояву та унеможливлення помилкового спрацьовування програми захисту силових блоків інвертора напруги використовують зворотний потік у контурі намагніченої.

При цьому складові вектору напруги зручно розташовувати за секторами.

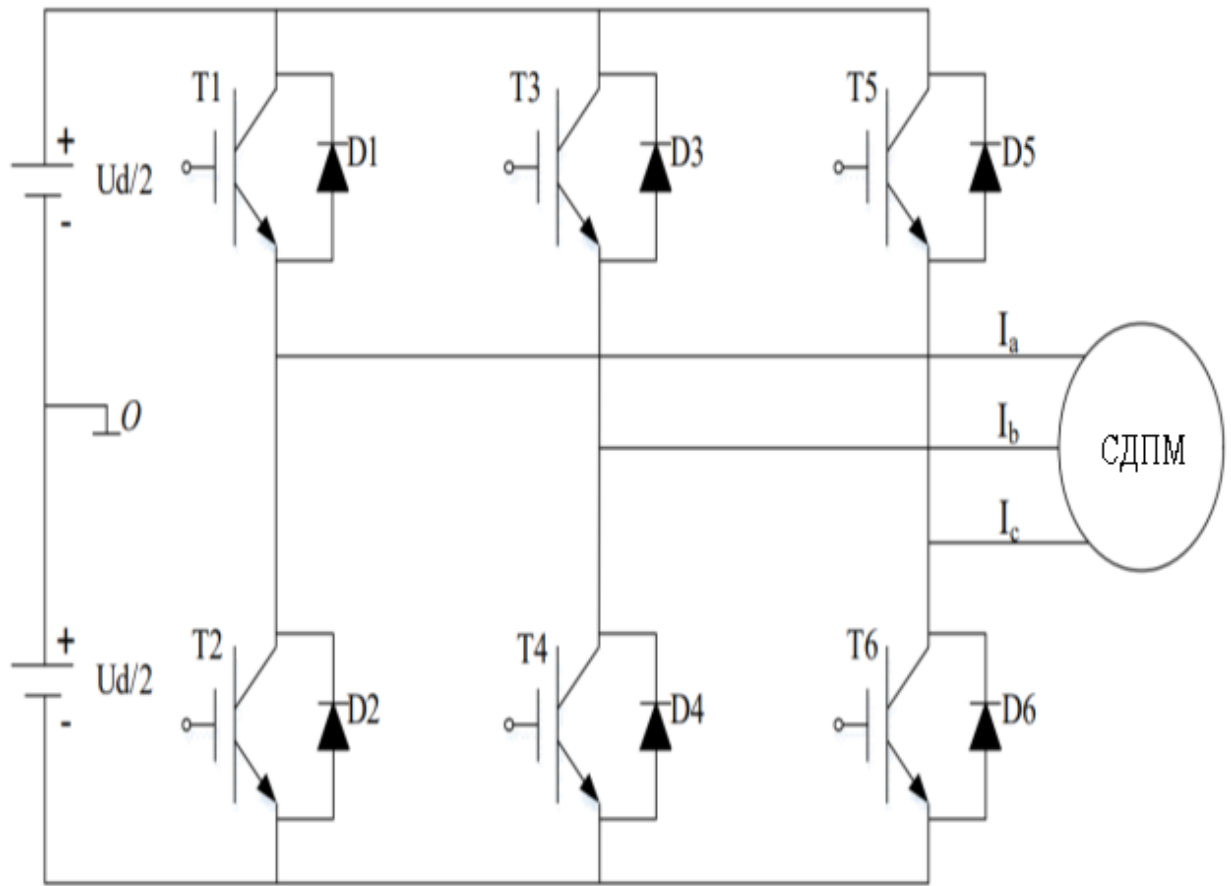


Рисунок 1 – Інвертор напруги у електричних приводах з синхронними двигунами

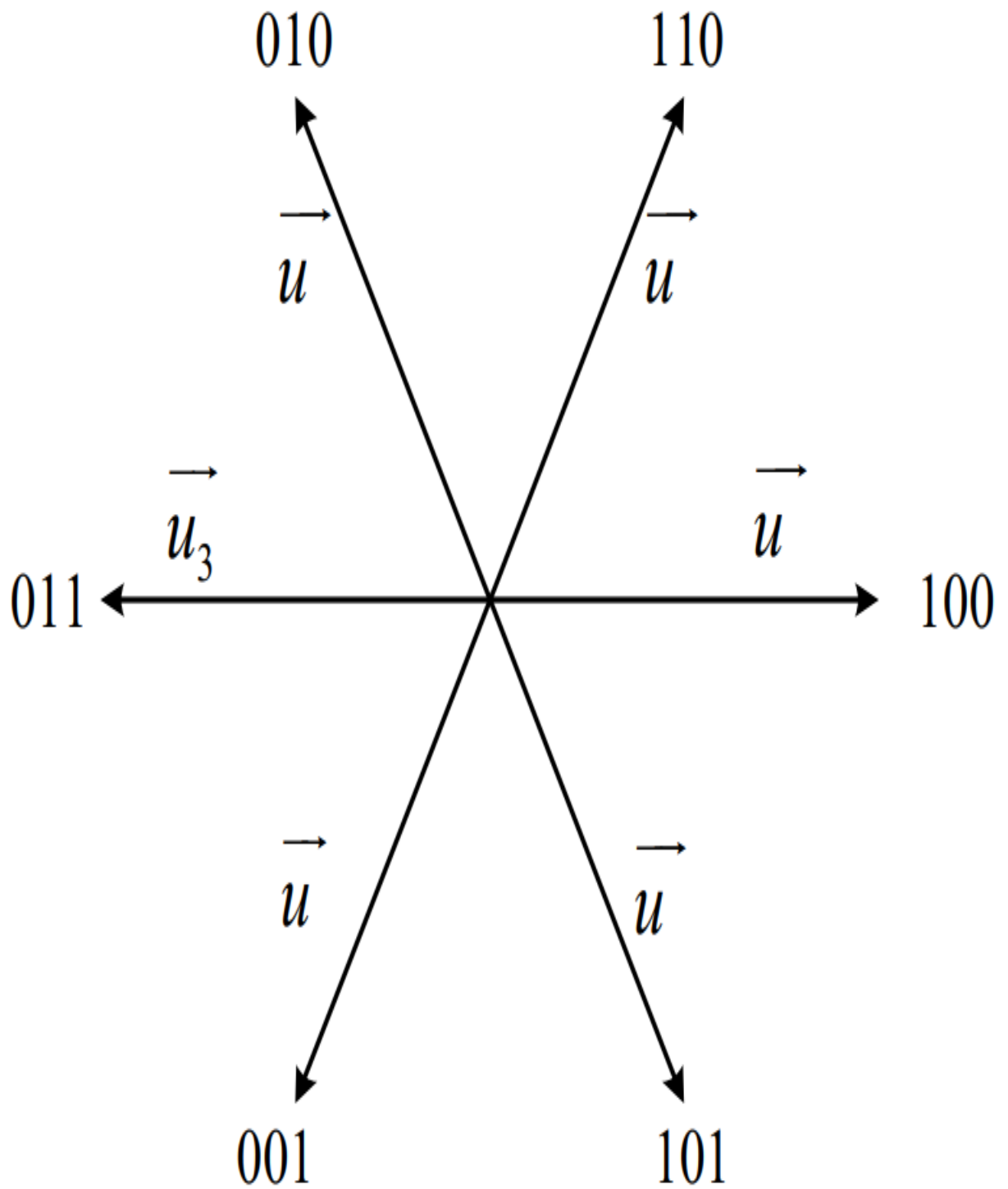


Рисунок 2 – Просторові вектори напруги

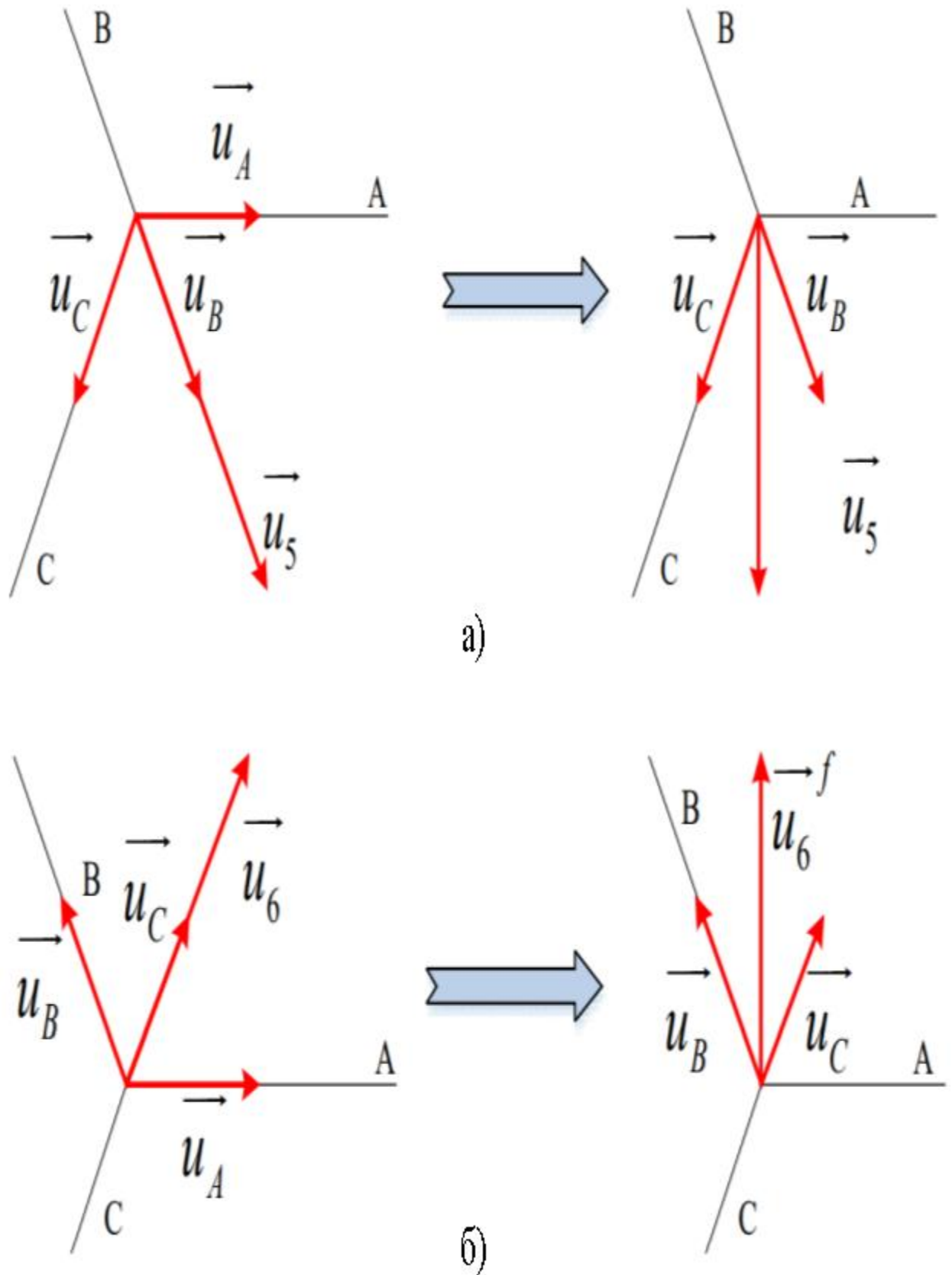


Рисунок 3 – Оцінка стану векторів напруги у структурі інвертору

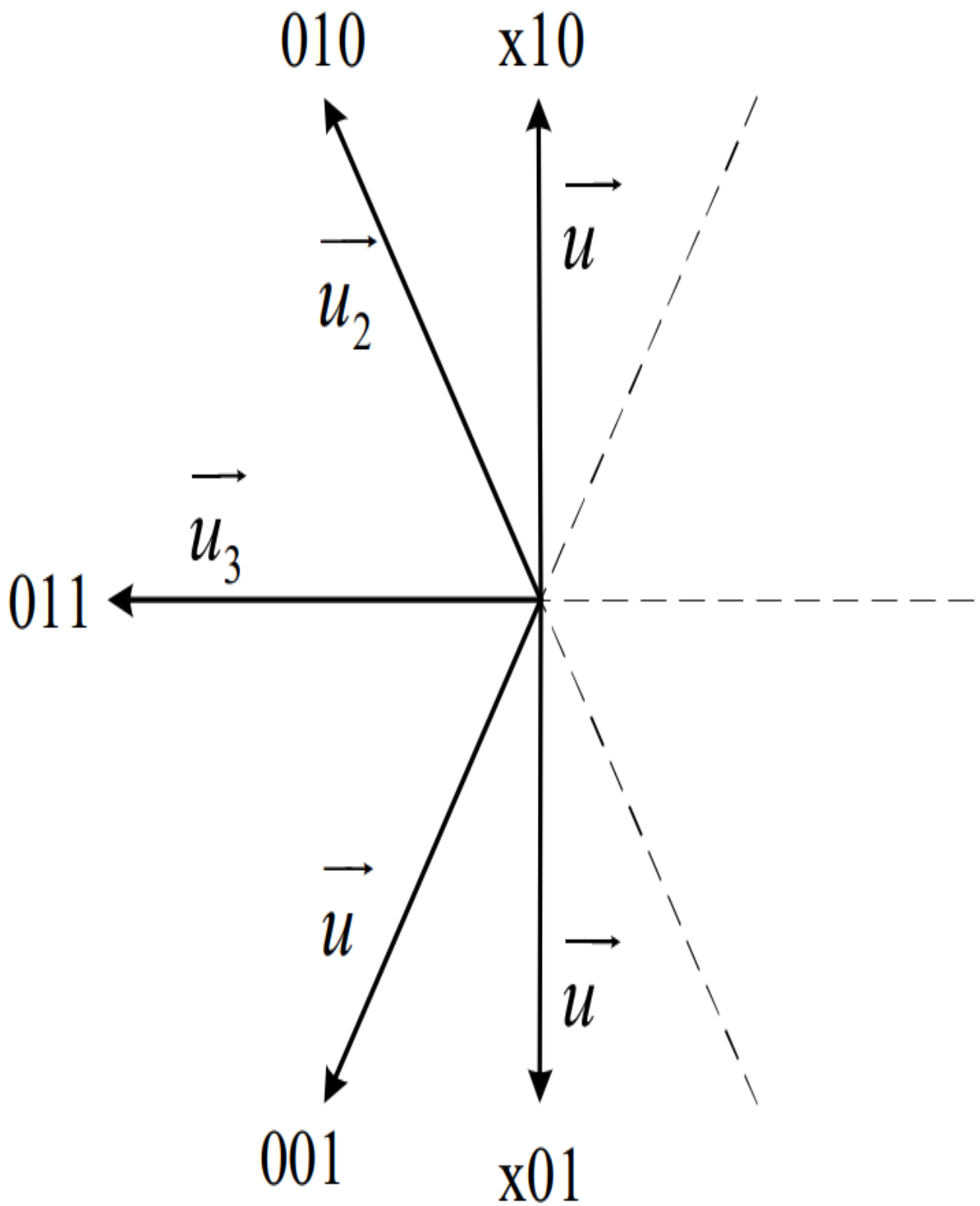


Рисунок 4 – Візуалізація пошуку несправностей у структурі інвертору напруги при розриві у колі транзистору T1

2.3. Реалізація вдосконалення процесу оцінки стану інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами

Орієнтація системи керування відповідно до зміни параметрів магнітного потоку електричної машини дозволяє ефективно виконувати регулювання параметрів електричної машини та поєднувати цей процес з контролем та діагностуванням цих параметрів.

При відтворенні подібних процесів у просторі слід розглядати векторну форму цих параметрів як основну для визначення складових показників.

Таким чином формується просторова модель поведінки електромеханічної системи із зазначенням усіх можливих просторових форм векторів.

Кожна з комбінацій взаємодії векторів у просторі створює відповідні значення, що необхідно зберігати та використовувати при аналізі подібних ситуацій у наступних режимах роботи.

РОЗДІЛ 3. Дослідження роботи системи діагностики несправностей інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами

3.1. Методика діагностики несправностей інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами

Для діагностики зручно використовувати прості сигнали, такі як струм та напруга.

Але зміна цих параметрів участі призводить до необхідності формування систем неперервного контролю параметрів та складових цих параметрів.

Такий підхід дозволяє застосовувати ефективні методи керування інвертором напруги з контролем його параметрів у процесі роботи.

Зміну параметрів у часі зручно представляти у дискретній формі сигналів.

При використанні такого підходу методика розрахунку складових векторів керування може використовувати аналітичні залежності відповідно до базисних значень, що зберігаються у пам'яті системи керування.

Такий метод керування дозволяє виконувати орієнтацію векторів у просторі виходячи з матриці просторової моделі поведінки системи.

Всі отримані сигнали накладаються на заздалегідь заповнену матрицю, при цьому відхилення, що виявлені такого накладання фіксуються та зберігаються у формі таблиць відповідності приналежності до аварійного режиму.

Система керування отримує інформацію щодо характеру, типу й локалізації пошкодження відповідно до класифікації таблиці.

Переважає більшість поламок електромеханічних систем, що містять перетворювачі, проходить на лінії розмежування на ділянці інверторна група – обмотка статора машини.

Тому важливим є процес діагностики справності каналу інверторна група – електрична машина.

Для можливості вдосконалення процесу визначення стану електричного обладнання необхідно застосовувати розширення функцій діагностичного комплексу.

Це можливо зробити при розробці новітніх підходів щодо визначення параметрів електричних машин.

Такі методологічні підходи ґрунтуються на застосуванні складного математичного апарату.

Сучасні підходи щодо розвитку діагностичних комплексів зосереджуються на вирішенні питання точності оцінки залишкових складових струмів.

При цьому використовується модель спостерігача стану, який виконує оцінювання залишкових складових струму.

Такі системи розробляються на основі спостерігачів, що містять елементи машинного навчання.

Тому важливими є алгоритми, що забезпечують необхідну поведінку навчальної системи.

Розглянута можливість має забезпечувати періодичну вибірку параметрів досліджуваної структури.

При цьому набуті навички щодо визначення стану підпорядкованого обладнання можуть зберігатись та застосовуватись при подальшому корегуванні алгоритмів діагностики.

При цьому параметри дослідного обладнання мають обмежуватись на рівні граничних значень, які встановлюються у вигляді функцій визначників у просторі та часі.

При цьому моделювання процесу проводиться за допомогою порівняння залишків струму у режимі реального часу.

Завдяки машинному навчанню системи діагностики порівняльний аналіз значно спрощується.

Адже порівняльний аналіз проводиться у паралельних каналах та забезпечується стратегією вибірки.

Аварійні режими негативним чином впливатимуть також і на стан самого інвертору.

Тому важливим є створення умов щодо розподілу діагностичних функцій на рівні каналу керування інвертором.

3.2. Розробка системи діагностики несправностей інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами

Розробка нового підходу до визначення несправностей у процесі роботи інвертора напруги має бути забезпечена відповідно розрахованими та застосованими програмними змінами у роботу системи керування.

Особливе місце у такій структурі надається можливості обробки великої кількості сигналів.

При цьому необхідно також виконувати спостереження за зміною великої кількості вхідних функцій.

Такий підхід програмно реалізується завдяки присутності спостерігача стану об'єкту.

Зміни при спостереженні фіксуються у пам'яті системи керування з фіксацією маркерів режимів роботи.

При цьому виконується навчання системи керування за допомогою спостерігача стану об'єкту виконувати визначення аварійного режиму з подальшою класифікацією його проявів та місцем локалізації проявів несправностей.

Отримання діагностичних змінних за допомогою
спостерігача стану

Обробка діагностичних змінних за
допомогою методів машинного
навчання

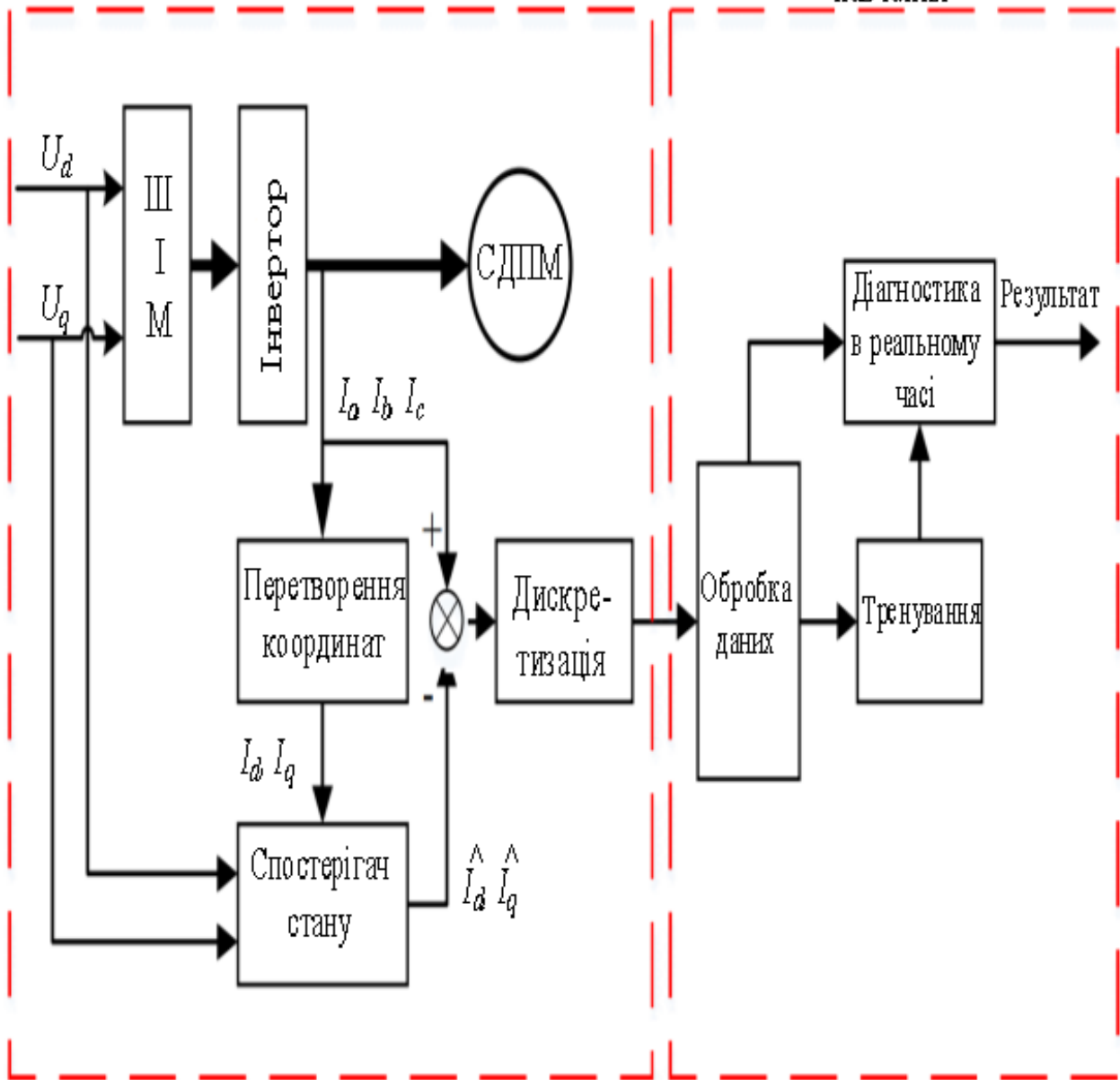


Рисунок 6 – Структура системи діагностики несправностей інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами

На промислових зразках керування тяговими електричними синхронними двигунами за допомогою інверторів оснащено діагностичними комплексами, що

забезпечуються спеціальними розрахунковими функціями, що змінюють настроювання алгоритму вибірки в залежності від отриманих результатів.

Подібні системи називають гібридними системами моніторингу параметрів.

Вони дозволяють зробити висновки щодо необхідності заміни ненадійного елемента, або попередити можливість настання аварійного виходу з ладу обладнання.

3.3. Моделювання режимів роботи системи діагностики несправностей інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами

Розглянемо роботу спостерігача стану об'єкту на прикладі роботи системи електроприводу з синхронною машиною.

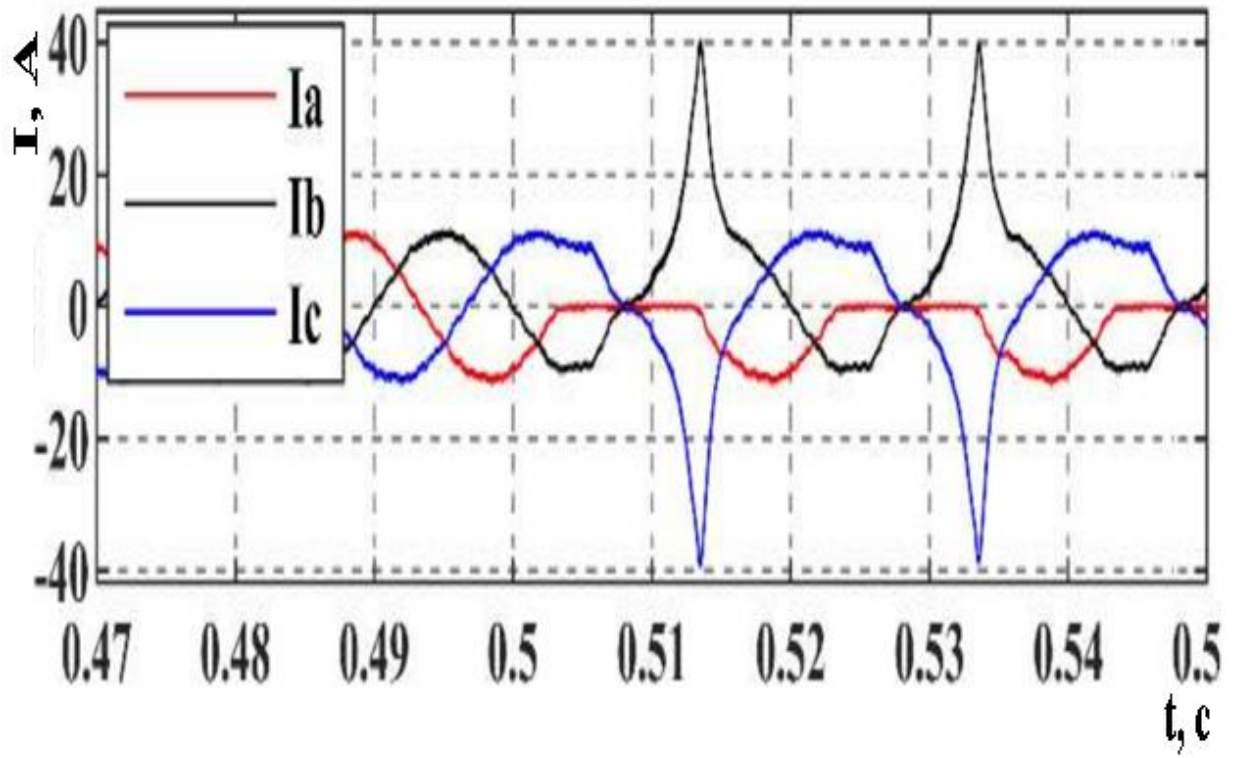
Для трифазних систем живлення робота інверторів напруги у таких структурах є дуже складною.

При аналізі подібних структур достовірність інформації щодо справності спостерігача досягається відповідністю стану об'єкту з фактичним його уявленням у структурі системи керування.

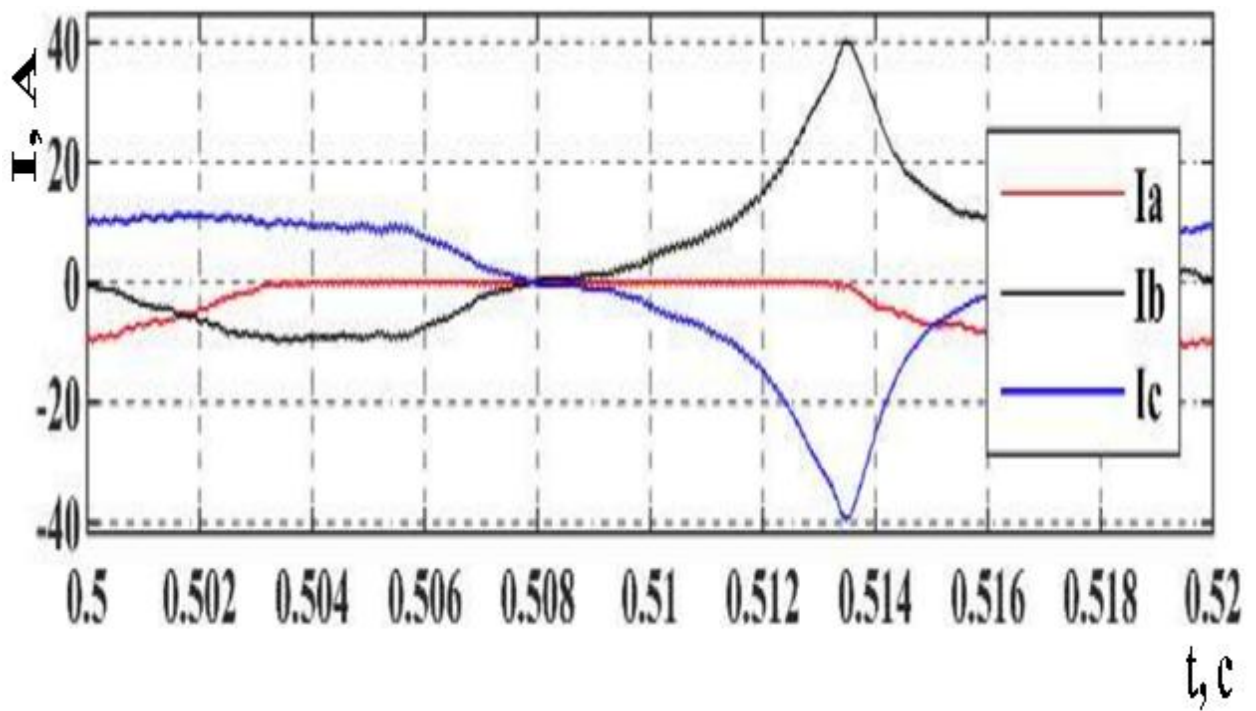
Цей процес при дослідженні має проводитись з певною періодичністю.

Тому важливим є забезпечення відповідної дискретності розглянутої системи.

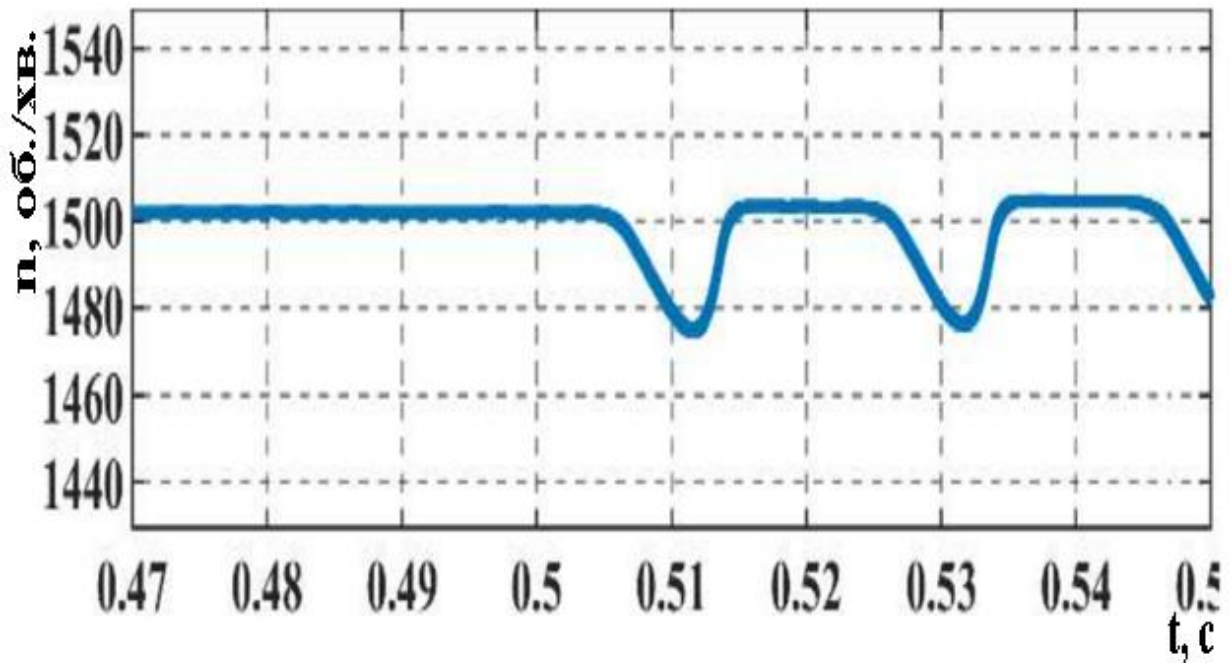
Попередні причини несправностей при цьому виступають у ролі навчальних функцій.



a)

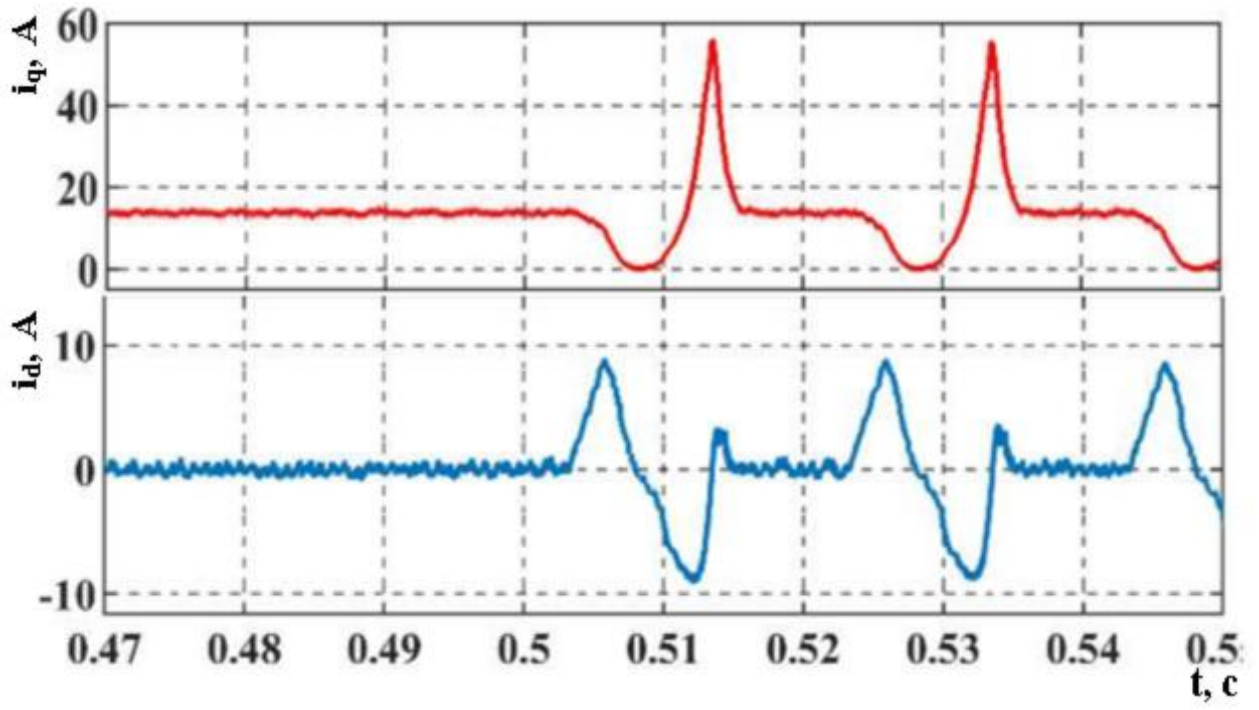


b)

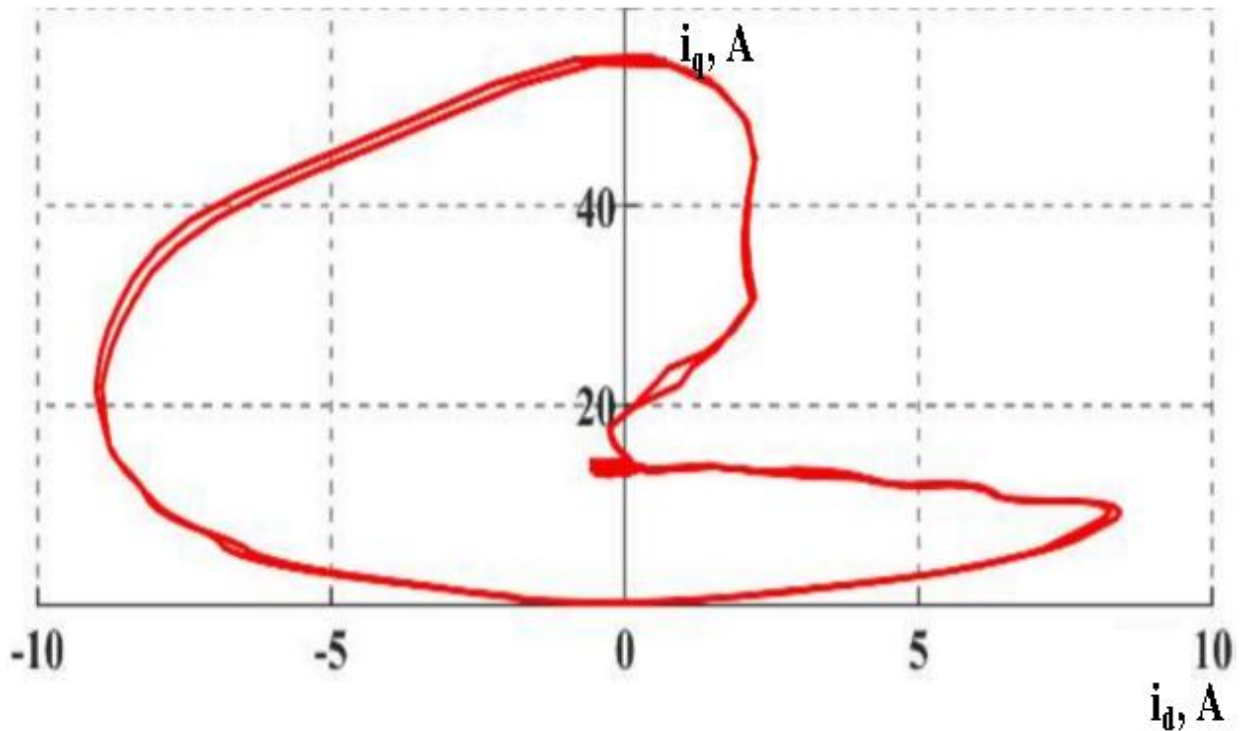


в)

Рисунок 7 – Результати моделювання режимів роботи системи діагностики несправностей інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами при розриві у колі транзистора Т1: а – зміна струму; б – зміна аварійного струму; в – зміна швидкості



a)



б)

Рисунок 8 – Результати моделювання режимів роботи системи діагностики несправностей інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами при розриві у колі транзистора T1: а – зміна проекції струму; б – зміна траєкторії струму

Для удосконалення роботи систем діагностування розробляють спеціальні алгоритми, що засновані на порівнянні процесів у реальному часі, що забезпечує швидкість навчання за половину інтервалу визначеного на процес машинного навчання.

Подібні системи приймають експертні рішення щодо стану обладнання та покликані забезпечити надійність роботи та ефективність функціонування системи у цілому.

Отже, на прикладі розробленої структури системи діагностування інверторної групи перетворювача можна стверджувати про ефективність подібної структури за отриманими характеристиками.

ВИСНОВКИ

У роботі досліджено інвертор напруги у електричних приводах з синхронними двигунами.

У першому розділі проведено аналіз варіантів вдосконалення процесу оцінки стану та діагностики несправностей інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами.

Розглянуто прямий та зворотний методи діагностики несправностей, а також визначено особливості функціонування інверторів напруги у структурі електричних приводів з синхронними двигунами.

У другому розділі запропоновано вдосконалення методу оцінки стану інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами.

Розглянуто процесу діагностики несправностей інвертора напруги у режимах його роботи.

У третьому розділі досліджено аварійні режими роботи інвертора напруги у електричних приводах з синхронними двигунами.

Синтезовано систему оцінки стану та діагностики несправностей інверторів напруги у структурі електричних приводів з синхронними двигунами.

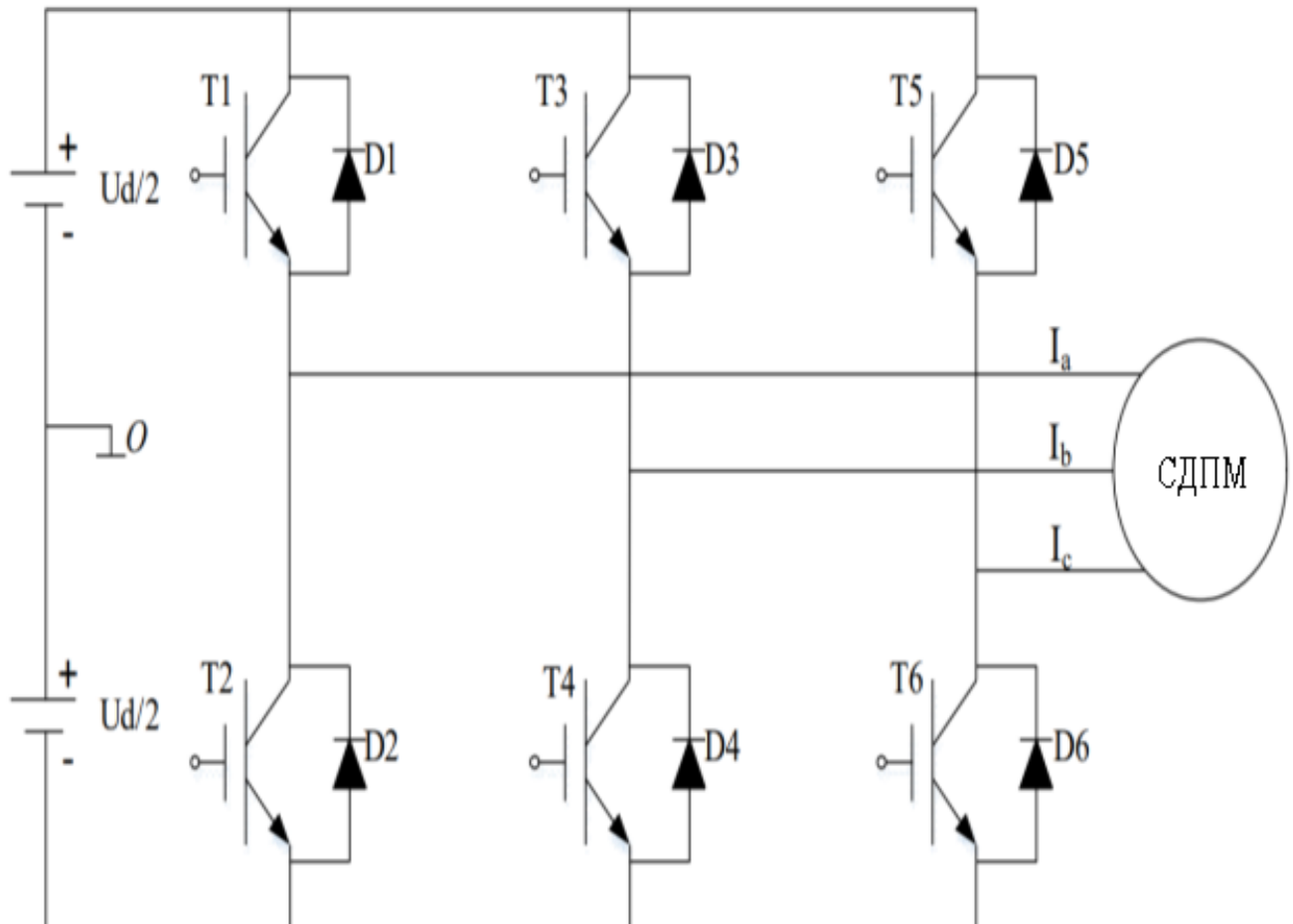
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. B. Lu and S. K. Sharma, "A Literature Review of IGBT Fault Diagnostic and Protection Methods for Power Inverters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 5, pp. 1770-1777, Sept.-oct. 2009.
2. Chen Yong, Liu Zhilong, Chen Zhangyong. "Fast Diagnosis and Location Method for Open-Circuit Fault in Inverter Based on Current Vector Character Analysis," *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018,33(04):883-891.
3. C. Bae, D. Lee and T. H. Nguyen, "Detection and identification of multiple IGBT open-circuit faults in PWM inverters for AC machine drives," *IET Power Electronics*, vol. 12, no. 4, pp. 923-931, 10 4 2019.
4. R. Peugeot, S. Courtine and J. -. "Rognon. Fault detection and isolation on a PWM inverter by knowledge-based model, " *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 6, pp. 1318-1326, Nov.-Dec. 1998.
5. A. 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, " *IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC'99. Proceedings* (, Seattle, WA, USA, 1999, pp. 704-706.
6. A. J. Marques Cardoso and A. M. S. Mendes. "Semi-converter fault diagnosis in DC motor drives, by Park's vector approach, " *1996 Sixth International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives*, Nottingham, UK, 1996, pp. 93-98.
7. X. Wu et al., "A Fast and Robust Diagnostic Method for Multiple Open-Circuit Faults of Voltage-Source Inverters Through Line Voltage Magnitudes Analysis," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 5, pp. 5205-5220, May 2020.

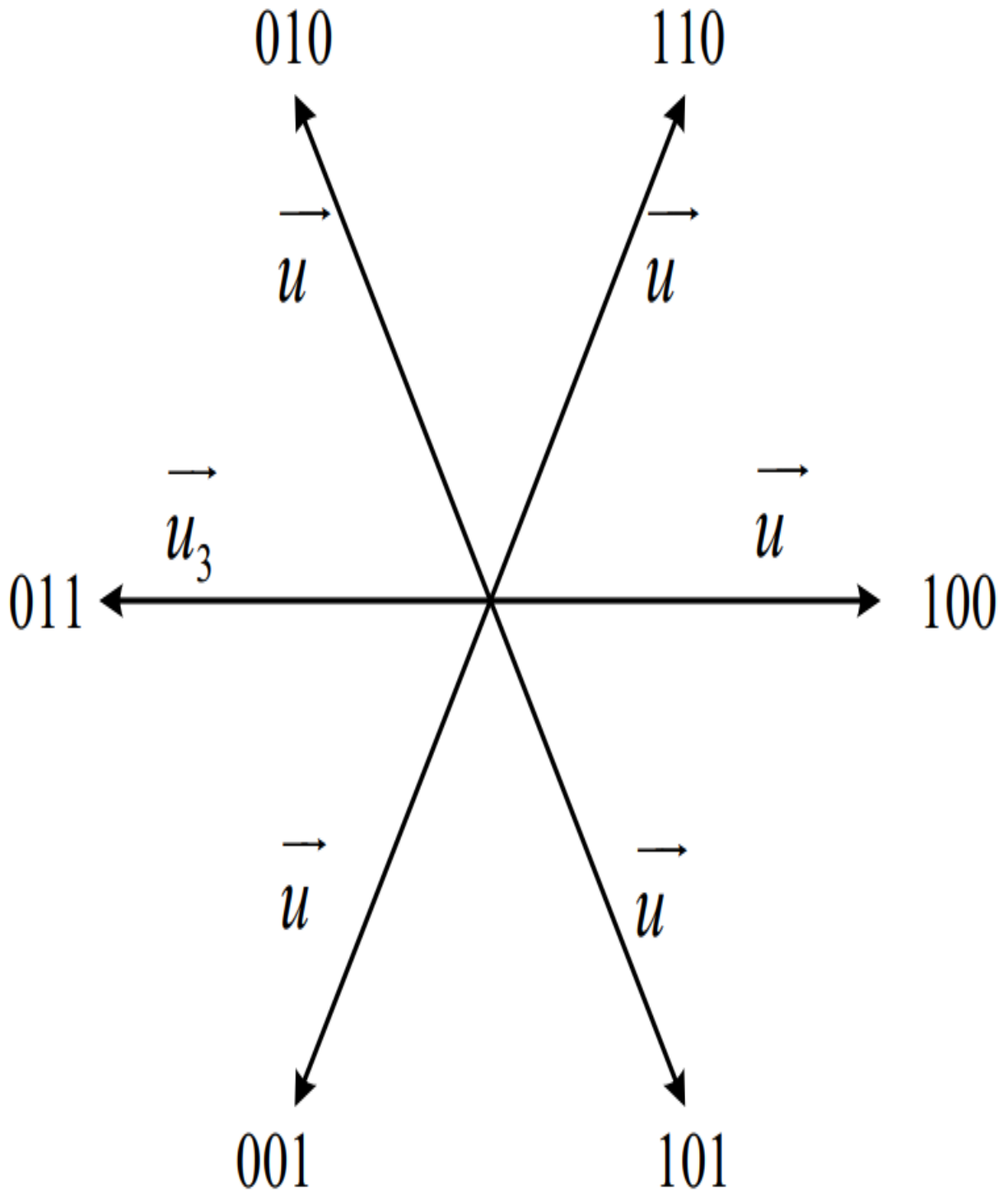
8. Z. Li et al., "A Fast Diagnosis Method for Both IGBT Faults and Current Sensor Faults in Grid-Tied Three-Phase Inverters With Two Current Sensors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 5, pp. 5267-5278, May 2020.
9. Bae C J , Lee S M , Lee D C . "Diagnosis of multiple IGBT open-circuit faults for three-phase PWM inverters," *Power Electronics & Motion Control Conference*. IEEE, 2016.
10. Estima J O , Freire N M A , Cardoso A J M . Recent advances in fault diagnosis by Park's vector approach[C]. *Electrical Machines Design Control & Diagnosis*. IEEE, 2013.
11. Gao Z , Cecati C , Ding S X . "A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques—Part I: Fault Diagnosis With Model-Based and Signal-Based Approaches," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(6):3757-3767.
12. Jlassi I , Estima J O , Khil S K E , et al. "A Robust Observer-Based Method for IGBTs and Current Sensors Fault Diagnosis in Voltage-Source Inverters of PMSM Drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 53(3):1-1.
13. Jlassi I , Estima J O , Sejr K E K , et al. "Multiple Open-Circuit Faults Diagnosis in Back-to-Back Converters of PMSG Drives for Wind Turbine Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(5):2689-2702.
14. An Q T , Sun L , Sun L Z . "Current Residual Vector-Based Open-Switch Fault Diagnosis of Inverters in PMSM Drive Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(5):2814-2827.
15. C. Yang et al., "Voltage Difference Residual-Based Open-Circuit Fault Diagnosis Approach for Three-Level Converters in Electric Traction Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 3, pp. 3012-3028, March 2020.
16. Jung S M , Park J S , Kim H W , et al. "An MRAS-Based Diagnosis of Open-Circuit Fault in PWM Voltage-Source Inverters for PM Synchronous Motor Drive Systems, " *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(5):2514-2526.

17. Maamouri R , Trabelsi M , Boussak M , et al. "A Sliding Mode Observer for Inverter Open-Switch Fault Diagnostic in Sensorless Induction Motor Drive," 42nd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2016.
18. H. Yan, Y. Xu, F. Cai, H. Zhang, W. Zhao and C. Gerada. "PWM-VSI Fault Diagnosis for a PMSM Drive Based on the Fuzzy Logic Approach, " IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 1, pp. 759-768, Jan. 2019.
19. M. A. Masrur, Z. Chen and Y. Murphey. "Intelligent diagnosis of open and short circuit faults in electric drive inverters for real-time applications, " IET Power Electronics, vol. 3, no. 2, pp. 279-291, March 2010.
20. Dong-Eok Kim and Dong-Choon Lee. "Fault diagnosis of three-phase PWM inverters using wavelet and SVM," 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, 2008, pp. 329-334.
21. Cai B , Zhao Y , Liu H , et al. "A Data-Driven Fault Diagnosis Methodology in Three-Phase Inverters for PMSM Drive Systems, " IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, PP(99):1-1.

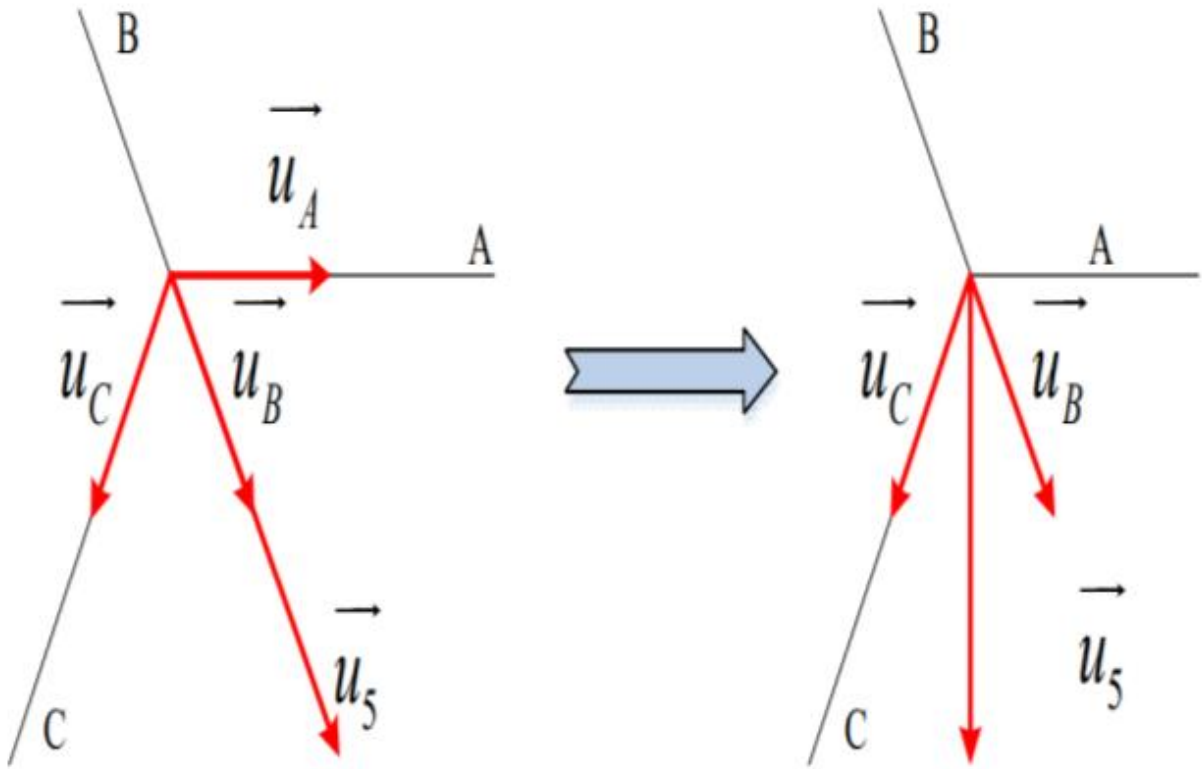
Інвертор напруги у електричних приводах з синхронними двигунами



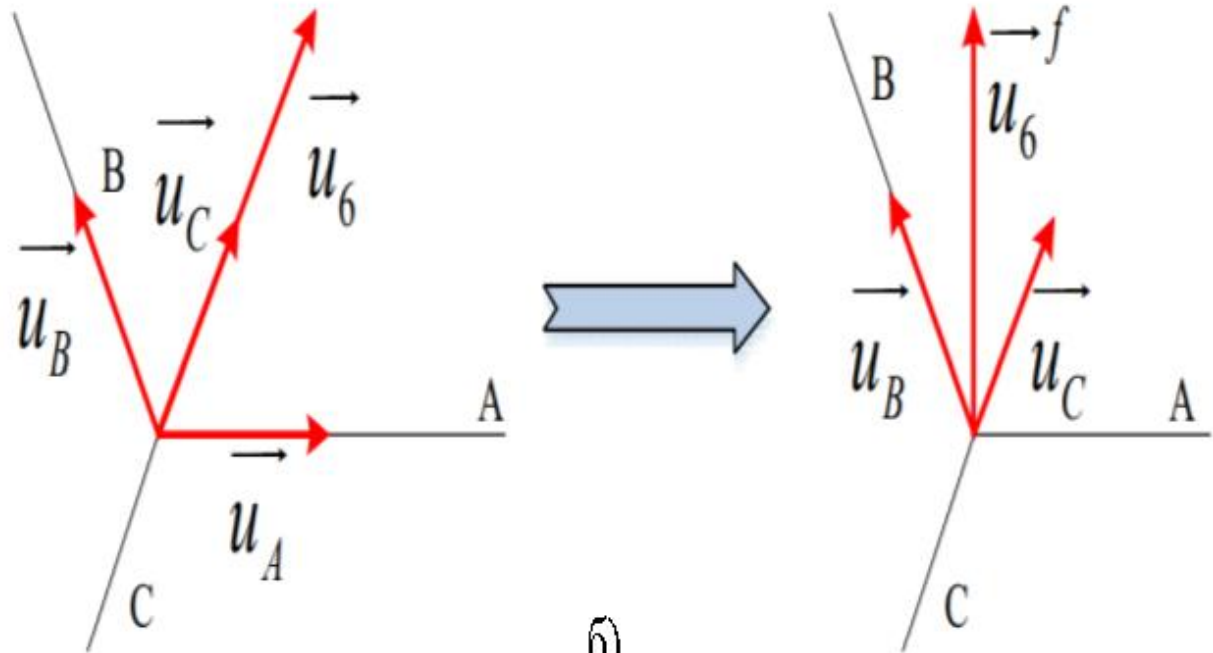
Просторові вектори напруги



Оцінка стану векторів напруги у структурі інвертору



a)



б)

Візуалізація пошуку несправностей у структурі інвертору напруги при розриві у колі транзистору T1

