

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ВАЩЕНКО ЯРОСЛАВ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 629.4.014

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ
ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ
РУХОМОГО СКЛАДУ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі автоматизованих систем електричного транспорту Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Яцько Сергій Іванович,
Український державний університет
залізничного транспорту,
кафедра автоматизованих
систем електричного транспорту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Носков Валентин Іванович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри обчислювальної техніки та
програмування

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Рябов Євген Сергійович,
ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ»,
завідуючий сектором електромагнітних,
теплових та вентиляційних розрахунків
електричних машин

Захист відбудеться "___" _____ 2016 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.15 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий "___" _____ 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Якунін Д.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Перспективність впровадження та ефективна експлуатація рухомого складу, виконаного на базі тягового асинхронного електроприводу (ТАЕП), ставить перед розробниками ряд складних науково-технічних проблем, серед яких однією з основних є удосконалення технологій запобігання виникненню аварійних режимів. Це обумовлено специфікою ТАЕП, а саме наявністю не лише ускладненої системи перетворення енергії та системи управління приводом, а і посиленням взаємозв'язком і взаємовпливом усіх його функціональних частин. Виникнення нештатних ситуацій може викликати значні динамічні навантаження в електричній та механічній підсистемах приводу, і, в кінцевому результаті, призводити до руйнування його елементів. Беручи до уваги підвищену схемотехнічну складність ТАЕП, вартість комплектуючих, що входять до його складу, та необхідний для ремонту персонал – відновлювальний ремонт по причині виникнення аварійних режимів на практиці виявляється трудомістким та відносно дорогим.

Серед перспективних напрямів досліджень відмічаються технології діагностування стану ТАЕП, побудовані на аналізі електромагнітних процесів, що відбуваються в електроприводі, контролю із екстраполяцією та оцінюванням параметрів, методах та алгоритмах інтелектуальної діагностики та експертних системах.

Таким чином, удосконалення технології діагностування стану ТАЕП шляхом застосування спеціальних методів виявлення та локалізації аварійних режимів є актуальною науково-практичною задачею, що і визначила напрям дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі автоматизованих систем електричного транспорту Українського державного університету залізничного транспорту згідно з держбюджетною НДР МОН України «Дослідження системи захисту тягового асинхронного електроприводу рухомого складу» (ДР №0115U003909), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання дослідження. *Метою дослідження є удосконалення технології діагностування стану тягового асинхронного електроприводу рухомого складу шляхом визначення характерних ознак аварійних режимів, ідентифікації цих режимів та розробки методів упередження виникнення потенційних відмов.*

Для досягнення мети поставлені задачі:

- виконати аналіз існуючих технологій, способів та методів захисту ТАЕП рухомого складу в аварійних режимах та визначити поточні тенденції та найбільш перспективні технології в технічній діагностиці;
- розробити імітаційні моделі складових підсистем та вцілому ТАЕП рухомого складу для здійснення досліджень в аварійних режимах роботи з оцінкою допущень та, при необхідності, врахувати їх;
- виконати оцінку параметрів на реальному об'єкті з ТАЕП для перевірки узгодженості експериментальних даних та результатів моделювання;

- виконати імітаційне моделювання обраних аварійних режимів та провести аналіз змодельованих електромагнітних процесів для визначення діагностичних параметрів, які можуть бути використані в процесі раннього виявлення відмов;

- розробити технології виявлення аварійних режимів, розпізнавання та прийняття рішення про технічний стан ТАЕП.

Об'єкт дослідження – аварійні режими роботи та процес діагностування технічного стану тягового асинхронного електроприводу рухомого складу.

Предмет дослідження – технології діагностування стану тягового асинхронного електроприводу рухомого складу для раннього виявлення та запобігання розвитку аварійних режимів.

Методи дослідження. Загальні методи теоретичної електротехніки при розробці імітаційних моделей підсистем ТАЕП; теорія електричних машин при удосконаленні врахування допущень та розробці технологій діагностування на основі моделі системи; теорія автоматичного керування при розробці моделей тягового асинхронного електроприводу; методи вимірювань й обробки даних в процесі підтвердження адекватності імітаційних моделей; методи імітаційного моделювання при дослідженні електромагнітних процесів в аварійних режимах; методи спектрального аналізу, методи на основі моделей об'єкту та методи розпізнавання і прийняття рішення для розробки технологій діагностування.

Наукова новизна одержаних результатів:

- одержала подальший розвиток математична модель роботи асинхронного двигуна для дослідження аварійних режимів, яка відрізняється від відомих апроксимацією кривої намагнічування за допомогою нечіткої логіки;

- одержав подальший розвиток аналіз перехідних електромагнітних процесів ТАЕП, що дозволяє визначати діагностичні параметри та ознаки, притаманні різним видам аварійних режимів;

- уперше розроблена методика ідентифікації неповнофазних режимів інвертора, а також інших несправностей, на основі спектрального аналізу вхідного струму інвертора та смугової фільтрації, яка відрізняється від відомих адаптацією до умов змінної швидкості ТАЕП, зменшенням необхідної кількості контрольованих параметрів та підвищеною швидкодією;

- уперше розроблена методика діагностування параметрів ТАЕП шляхом використання алгоритму розширеного фільтра Калмана, яка відрізняється від відомих можливістю оцінки ефективності його роботи за статистичними критеріями;

- одержала подальший розвиток методика діагностування стану ТАЕП на основі штучних нейромереж, що дозволяє розпізнавати та приймати рішення про аварійні режими в ТАЕП.

Практичне значення одержаних результатів для електричного транспорту полягає в розширенні можливостей штатних функцій захисту ТАЕП шляхом використання технологій діагностування на основі алгори-

тмів, розроблених в пакеті прикладних програм Matlab/Simulink.

Надані рекомендації щодо практичного використання запропонованих технологій при проектуванні та налаштуванні систем захисту ТАЕП рухомого складу.

Практична цінність підтверджена актами про впровадження результатів дисертаційної роботи на ДП «Науково-дослідний інститут «ХЕМЗ» (м. Харків), в навчальний процес Українського державного університету залізничного транспорту та Навчально-науковому інституті перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів (м. Харків).

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: проведений аналіз технологій діагностування стану ТАЕП рухомого складу та напрямків їх удосконалення; розроблені імітаційні моделі систем ТАЕП; удосконалена математична модель роботи асинхронного двигуна врахуванням нелінійності кривої намагнічування на основі нечіткої логіки; виконане узгодження реальних параметрів ТАЕП з імітаційною моделлю; проведений аналіз перехідних електромагнітних процесів в аварійних режимах ТАЕП та визначено діагностичні параметри; розроблена технологія діагностування на основі спектрального аналізу вхідного струму інвертора та смугових фільтрів; розроблена технологія діагностування на основі моделі системи - розширеного фільтра Калмана та запропоновано статистичні критерії його оцінки; розроблена технологія діагностування на основі штучних нейромереж.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на науково-технічних і науково-практичних конференціях: «Впровадження перспективних мікропроцесорних систем залізничної автоматики та засобів телекомунікації на базі цифровізації» (м. Алушта, 2011, 2013 рр.), «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (м. Харків, 2015р.), «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 2013, 2015 рр.), «Проблеми перетворення електроенергії в системах електричного транспорту» (м. Харків, 2013, 2015, 2016 рр.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 14 наукових публікаціях, серед них: 8 – у наукових фахових виданнях України, 1 – у періодичному іноземному фаховому виданні, 5 – у матеріалах конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації складає 158 сторінок; з них 71 рисунок по тексту; 3 рисунки на 2 сторінках; 8 таблиць по тексту; 160 найменувань джерел на 15 сторінках; 3 додатки на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтована актуальність роботи та відображений її зв'язок із науковими програмами; сформульована мета й основні задачі дослідження; наведені наукові результати, які виносяться на захист.

У першому розділі проведено аналіз причин аварійності тягового асинхронного електроприводу і встановлено, що виникнення аварій у своїй більшості є наслідком несвоєчасного визначення та усунення дефектів обладнання, ремонту, монтажу або експлуатації. Показано, що існуючі засоби діагностування та захисту ТАЕП, побудовані на реєстрації відхилень від контрольного рівня параметрів, в цілому дозволяють виконувати своєчасне обмеження їх критичних значень. Однак, недоліком засобів є те, що вони спрацьовують, коли відмова вже знаходиться в глибокій стадії розвитку або обладнання, як правило, вже вийшло з ладу. Тому, незважаючи на різноманіття таких видів захисту, доцільною є розробка систем діагностування ТАЕП які сприяли б виявленню порушень в роботі приводу на ранніх стадіях для запобігання як виникненню аварійних режимів, так і мінімізації їх наслідків.

Серед всіх можливих, перспективи розвитку систем діагностування пов'язані з програмними, математичними, розрахунковими алгоритмами та методами рішення, тим паче інтелектуальними та експертними, оскільки це дозволяє швидко змінювати необхідні налаштування, реалізовувати цифрові алгоритми спостереження і оцінки стану. В свою чергу, їхнє впровадження потребує адаптації до специфічних умов - змінної швидкості та навантаження, обмеженої кількості датчиків, тощо, притаманних асинхронному приводу рухомого складу.

На підставі проведеного аналізу сформульовані задачі досліджень і напрямки їх розв'язання.

У другому розділі розроблено математичні імітаційні моделі роботи підсистем ТАЕП (тягового асинхронного двигуна, статичних перетворювачів, систем управління), пристосованих для проведення досліджень та аналізу аварійних режимів.

При розробці математичного опису ТАЕП прийняті вихідні допущення: загальноприйняте ідеалізоване подання короткозамкнутого асинхронного двигуна (доповнене врахуванням нелінійності його кривої намагнічування методом апроксимації на основі математичного апарату нечіткої логіки); для статичних перетворювачів, виконаних на IGBT-ключах, прийнято: малий опір у відкритому стані $R_e=10^{-2}$ Ом та великий опір у закритому стані $R_e=10^6$ Ом; враховано насичення IGBT, яке обмежує ефект аварійного струму; система управління безінерційна з можливістю моделювання комутаційних несправностей.

Врахування нелінійності кривої намагнічування асинхронного двигуна дозволяє наблизити результати моделювання аварійних режимів до реальних (рис.1).

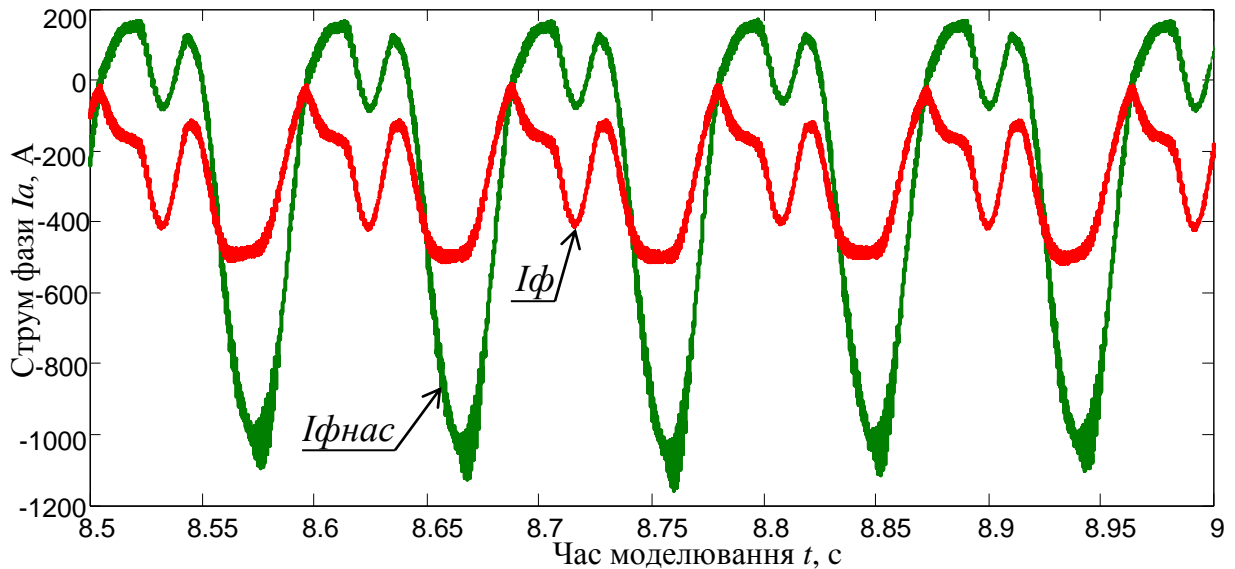


Рисунок 1 – Фазний струм I_ϕ тягового асинхронного двигуна без урахування та струм $I_{\phi_{нас}}$ з урахуванням нелінійності кривої намагнічування при пропуску імпульсів управління ключа автономного інвертора напруги

Встановлено, що стійкість ТАЕП до появи різних видів пошкоджень залежить від параметрів елементів приводу, конфігурації кола на момент аварії та системи управління приводом. У зв'язку з цим розроблено моделі ТАЕП в декількох варіаціях систем управління: зі скалярною системою (з синусоїдальною широтно-імпульсною та одноімпульсною модуляцією напруги), векторною системою та системою з прямим управлінням моментом, чотириквadrантним вхідним перетворювачем. Загальний вигляд схеми однієї з розроблених імітаційних моделей ТАЕП реалізованої в середовищі Matlab/Simulink представлений на рис.2.

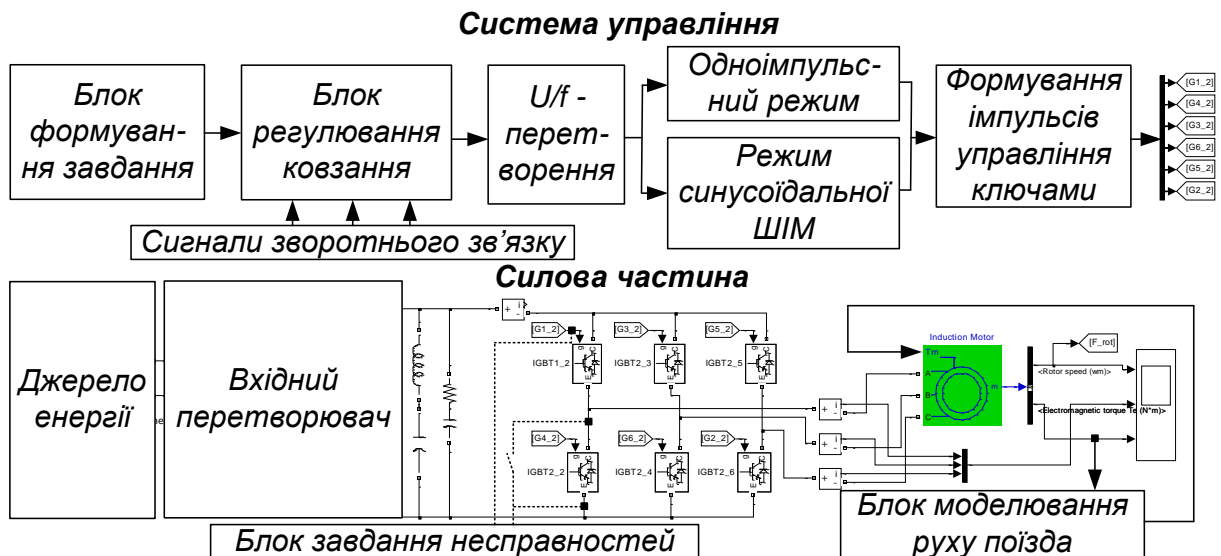


Рисунок 2 – Імітаційна модель ТАЕП в середовищі Matlab/Simulink зі скалярною системою управління

Правильність основних прийнятих рішень при розробці моделей підтверджено шляхом виконання експериментальних досліджень на натурному стенді в науково-дослідній випробувальній лабораторії ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ» (м. Харків). Об'єктом випробувань являвся електропривод, що включав в себе: тяговий асинхронний двигун АД917, що застосовується на залізничному рухомому складі (локомотиви ТЕМ21, 2ТЕ25А); частотний перетворювач РЕН 2-75 (випрямляч та автономний інвертор напруги) для живлення тягового асинхронного двигуна регульованою трифазною змінною напругою.

Аналіз результатів експериментальних досліджень електромагнітних процесів та моделювання показав їх якісне та кількісне співпадіння (рис.3), достатнє для аналізу аварійних режимів. Так, відмінність кривих фазних струмів за критеріями Стьюдента та Фішера в контрольних точках не перевищує 10%.

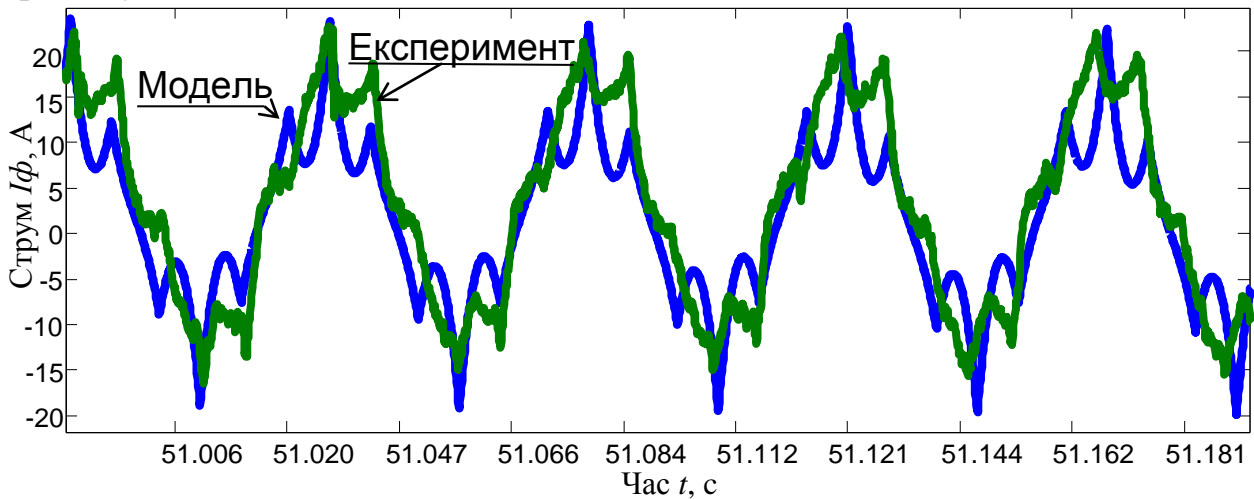


Рисунок 3 – Експериментальний та модельний сигнали струму фази тягового асинхронного двигуна АД917 в режимі холостого ходу

У третьому розділі шляхом імітаційного моделювання проведено дослідження електромагнітних перехідних процесів в аварійних режимах для визначення найбільш інформативних діагностичних параметрів.

Визначено, що зміни електромагнітних величин в аварійних режимах пов'язані з: системою управління приводом та формою модуляції, режимом роботи, параметрами тягового асинхронного двигуна, значенням напруги шини постійного струму U_d , параметрами ланки постійного струму L_d , R_d та конкретним видом несправності. Досліджено перехідні процеси, які виникають в аварійних режимах під час внутрішніх і зовнішніх коротких замикань для статичних перетворювачів, несанкціонованих змінах напруги живлення в проміжній ланці, неповнофазних режимах в роботі автономного інвертора напруги (АІН).

В процесі перетворення енергії АІН працює із заданою частотою перемикань в двох станах напівпровідникових ключів (відкритому і закритому) з кінцевим числом топологій - зв'язків, кожна конфігурація з яких визначається поєднанням станів ключів, з яких 8 – можна віднести для нор-

мального функціонування, а інші 248 – до порушень в роботі (аварійних режимів).

Серед аварійних режимів вибрані найбільш типові, для яких побудовані математичні моделі перехідних електромагнітних процесів залежно від конфігурації кола на момент виникнення аварії.

Для аварійних режимів внутрішніх (наскрізного пробоя ключа та «хибного» імпульсу) і зовнішніх (дво- та трифазного випадків) коротких замикань (КЗ) в АІН (рис.4, 5) приділено увагу математичному описанню

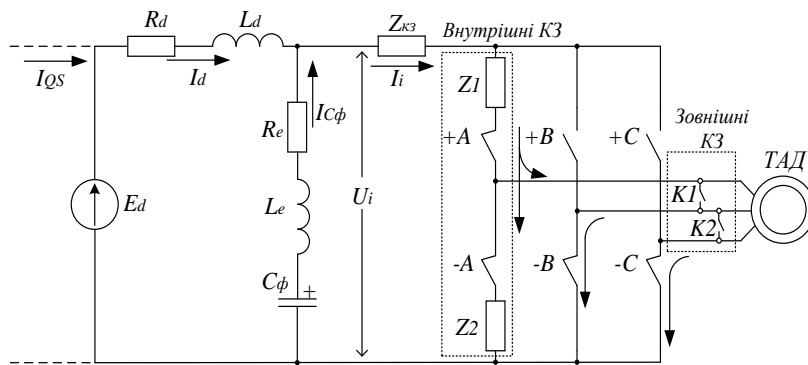


Рисунок 4 – Еквівалентна електрична схема для режимів КЗ в інверторі

фазного струму та від'ємного ударного електромангнітного моменту, які являються найбільш критичними параметрами для елементів тягового приводу та можуть в $I_{\phi}=3\div 6$ раз в $M_e=5\div 10$ раз перевищувати номінальні значення.

Визначено, що незважаючи на характерні особливості протікання кожного з аварійних режимів КЗ, струм на вході інвертора зростає зі швидкістю близько $t = 0,003-0,004$ с до величин понад 1200 А, а отже поки що не може бути виявлений нічим іншим, як швидкодіючим автоматичним пристроєм захисту та способом примусового швидкого закриття ключів не пізніше цього часу.

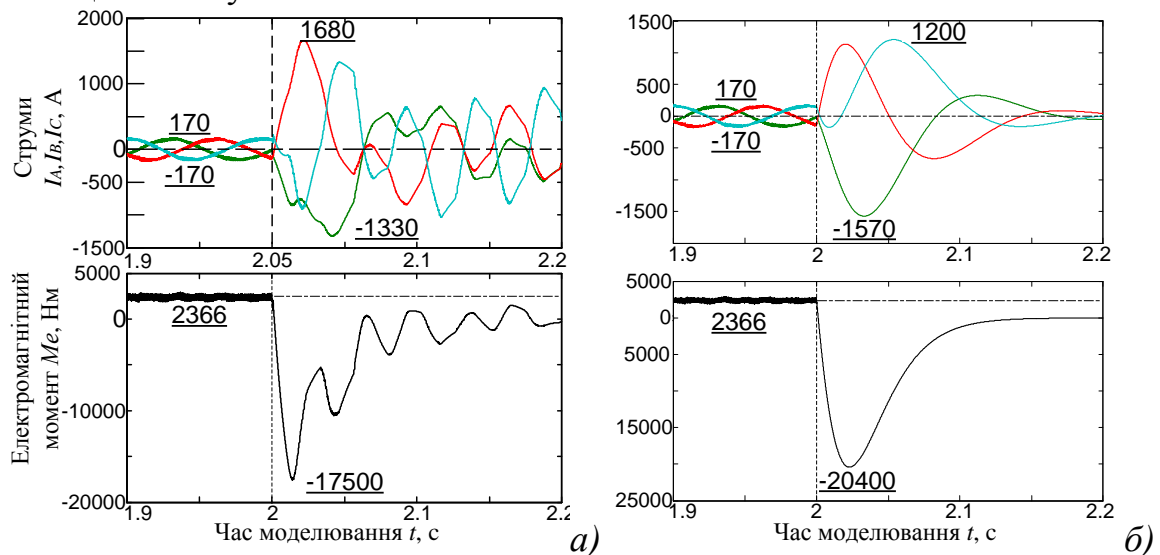


Рисунок 5 – Електромагнітні процеси відповідні 2-фазному (а) та 3-фазному (б) зовнішніх КЗ

Запропонований критерій, за яким аварійні режими по характеру відмов розподілено на умовно-зворотні та незворотні - опрокидування (рис.6). До умовно-зворотних відносяться стани, не пов'язані безпосередньо з ви-

никненням КЗ, а такі що характеризуються порушеннями в його роботі та приводять через визначений час до виникнення аварійного режиму.

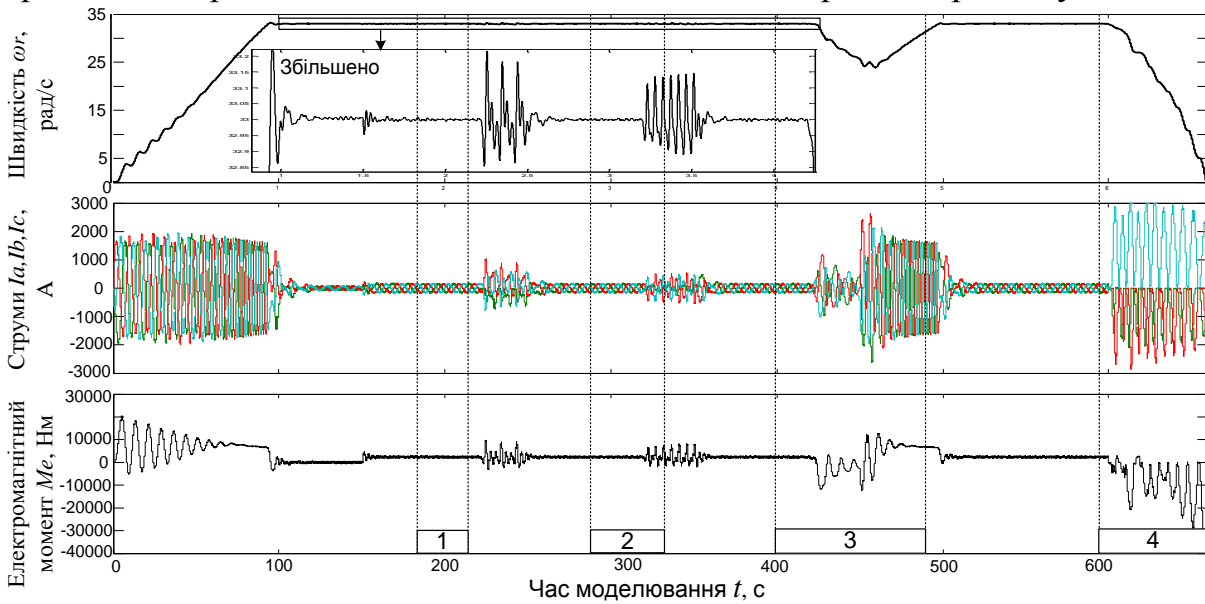


Рисунок 6 – Аварійні режими в ТАЕП:

умовно-зворотні відмови (1 - пропуск імпульсу управління ключа, 2 - асиметрія вихідної напруги інвертора, 3 - несанкціонована зміна напруги на вході інвертора) та незворотні (4 - пробій ключа інвертора)

Для неповнофазних режимів АІН, що включають обриви вихідних фаз інвертора або зникнення керуючих імпульсів управління на силових ключах проаналізовано їх варіацію при 6 можливих варіантах. На рис.7 приведено один з таких випадків, що відповідає зникненню імпульсу управління ключа АІН.

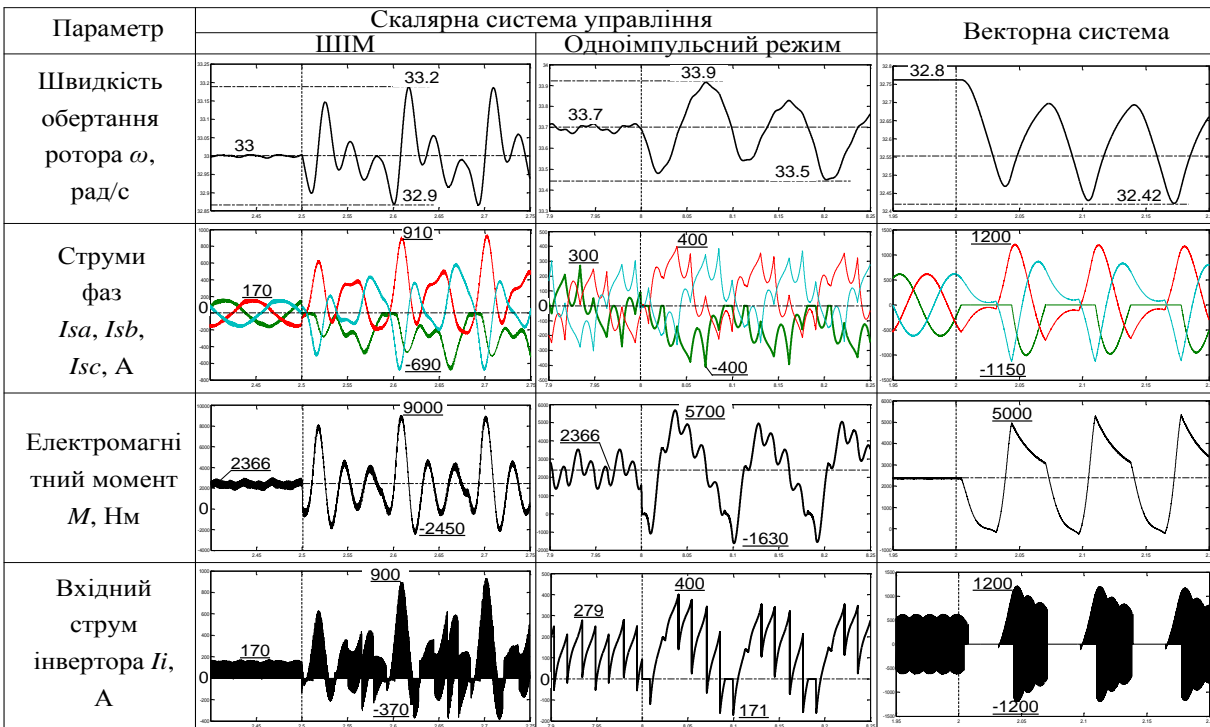


Рисунок 7 – Електромагнітні процеси, відповідні зникненню імпульсу управління на ключі VTIAIN

Досліджено асиметричні режими АІН, які виникають внаслідок різних параметрів комутаційних властивостей напівпровідникових елементів в одному або різних плечах його фаз. За рахунок цього реальний процес комутації у несправному стані буде відрізнятися від ідеального випадку, призводячи до різного виду асиметрій в інверторі: фазової, верхньої/нижньої та асиметрії положення (рис.8).

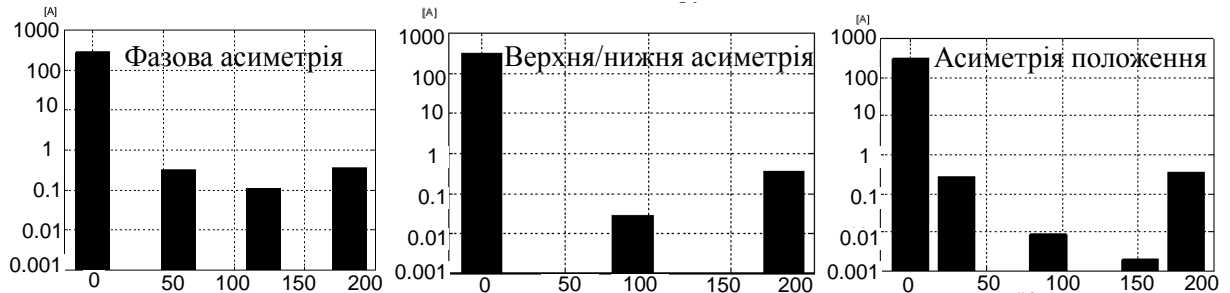


Рисунок 8 – Гармонічний склад вхідного струму інвертора при виникненні асиметричних режимів АІН

Проведені імітаційні дослідження показали, що в реальному процесі комутації в АІН можливе виникнення асиметричних режимів в його роботі, що супроводжуються зміною гармонічного складу вхідного струму та, при деяких умовах, стають подібними до несправностей пропуску імпульсів управління АІН.

Встановлені подібні характерні риси та відмінності електромагнітних процесів у розглянутих випадках дозволяють використовувати вказані особливості (інформативні ознаки) при розробці способів технологій ідентифікації та розпізнавання несправностей.

У четвертому розділі дисертації обґрунтовано використання методологій ідентифікації аварійних режимів за принципом запобігання шляхом застосування алгоритмів на основі аналізу частотних характеристик та використання моделей системи.

Запропоновано спосіб ідентифікації та розпізнавання виду несправності за допомогою спектрального аналізу діагностичного параметра вхідного струму інвертора I_i , який з урахуванням поточних проводящих станів силових ключів, визначається через функції стану пліч та струми фаз

$$I_i = \sum_{j=1}^3 F_{\Pi 2j-1} i_{2j-1}, \quad (1)$$

де $F_{\Pi j} = F_{Mj} + F_{Rj}$, $j=\overline{1,6}$ – логічна функція стану плеча АІН; F_{Mj} та F_{Rj} – логічні функції стану плеча транзисторів та зворотніх діодів (приймають значення логічної одиниці при відкритому стані відповідного силового напівпровідникового пристрою); $F_j = F_{\Pi 2j-1} + F_{\Pi 2j+2}$, $j=\overline{1,3}$ – логічна функція включеного стану фази; i_{2j-1} , i_{2j+2} – струм напівфаз для кожної фази з номером j , які пов'язані з фазними струмами статора i_{sj} відношенням $i_{2j-1} = -i_{2j+2} = i_{sj}$.

Струм на вході інвертора в справному стані приводу має форму, близьку до пилоподібної, та містить окрім постійної складової спектр парних вищих гармонічних складових, кратних шести. В несправному стані

з'являються інші частотні складові, за допомогою яких визначається настання такого режиму.

Для неповнофазних режимів спектральний аналіз вхідного струму інвертора підтвердив ефективність виявлення появи несправності (рис.9).

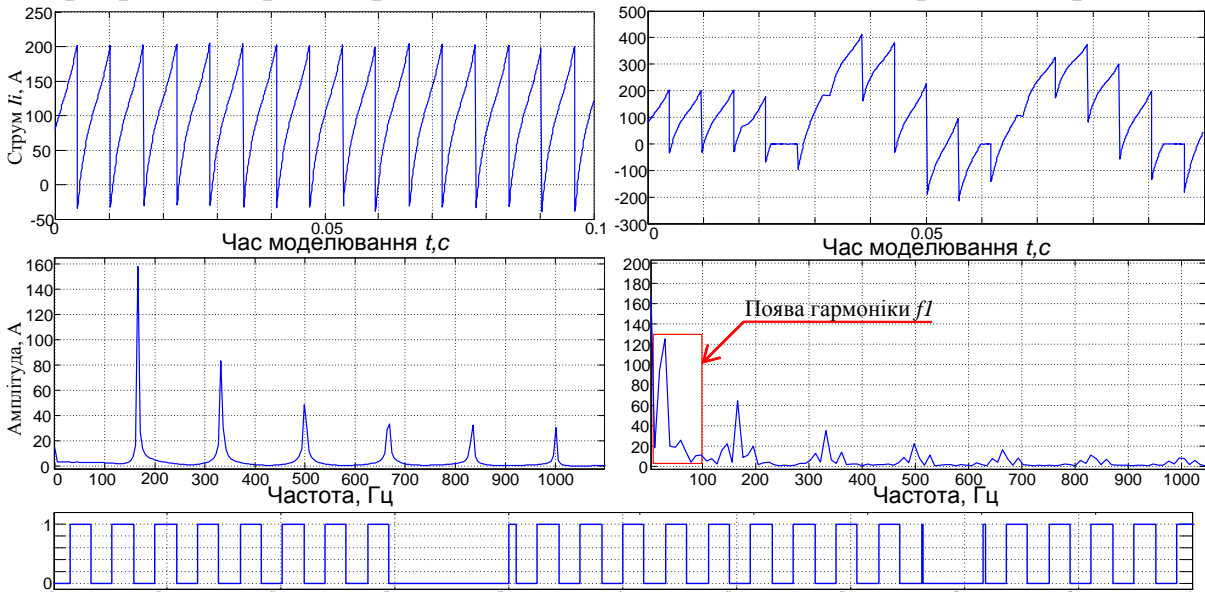


Рисунок 9 – Спектральний аналіз вхідного струму I_i при несправності пропуску імпульсів управління силовим ключем V_{TI}

Для здійснення процесу діагностування в умовах змінної швидкості запропоновано удосконалити систему за допомогою використання смугових фільтрів. Система побудована на базі діагностичних моделей для випадку нормального функціонування об'єкта і моделей, що описують конкретну нештатну ситуацію (рис.10).

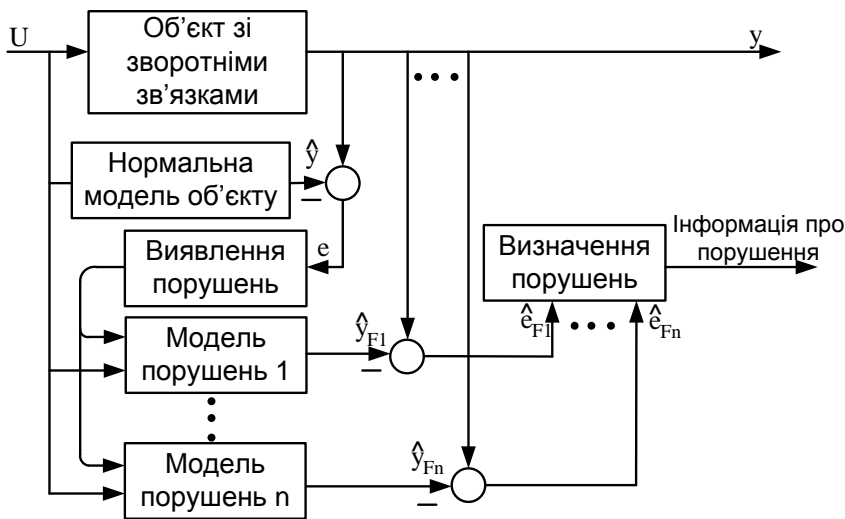


Рисунок 10 – Функціональна схема виявлення несправностей на основі спектрального аналізу та смугових фільтрів

нормального функціонування об'єкта і моделей, що описують конкретну нештатну ситуацію (рис.10).

Алгоритм виявлення несправностей полягає в тому, що при відомій частоті живлення асинхронного двигуна та його навантаженні в

квастаціонарному режимі спектр частот реальної системи електропривода порівнюється зі спектрами частот відповідних діагностичних моделей несправностей, вибраних з бази моделей для заданих вхідних параметрів. Параметри смугового фільтру змінюються в функції основної частоти, що залежить від швидкості руху локомотива.

Передавальна функція в операторній формі активного смугового фільтра другого порядку має вигляд

$$W(p) = \frac{K_0 \cdot p}{\frac{1}{\omega_0^2} \cdot p^2 + \frac{1}{Q \cdot \omega_0} \cdot p + 1}, \quad (2)$$

де p – оператор Лапласа, K_0 – коефіцієнт підсилення фільтра на нульовій частоті, Q – добротність фільтра, яка визначається як відношення резонансної частоти до полоси пропускання частот, ω_0 – кругова частота зрізу фільтра.

При збігу спектрів формується інформаційний сигнал щодо наявності виявленої несправності (рис.11).

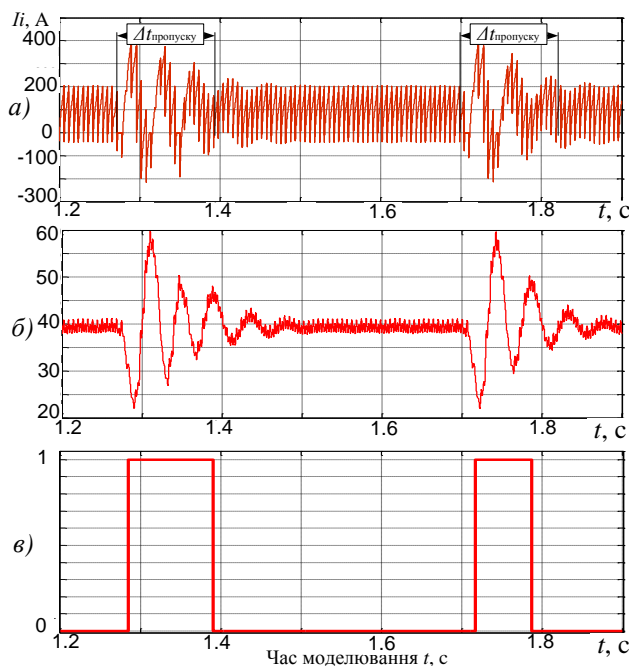


Рисунок 11 – Виявлення несправності пропуску імпульсу управління ключа: а) вхідний струм інвертора; б) сигнал на виході смугового фільтра; в) імпульси системи розпізнавання несправності.

Запропонована оцінка значень параметрів ТАЕП за допомогою розширеного фільтра Калмана (РФК), що дозволяє не тільки здійснювати оцінку параметрів в реальному часі, але і проводити визначення тих змінних стану об'єкта, що не можуть бути виміряні безпосередньо. Виконаний в роботі РФК призначений для неперервної оцінки та діагностування значень струмів, поточкозчеплень, розрахунку швидкості обертання ротора, активних опорів статора та ротора.

Алгоритм розрахунку РФК включає в себе математичну динамічну модель роботи одного з основних об'єктів приводу – тягового асинхронного двигуна на основі диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + G(t)w(t) \\ y = Cx + v(t) \end{cases}, \quad (3)$$

де A , B – вхідні та C – вихідна матриці системи, G – вагова матриця шуму, x – стан системи, u – функція управління, $w(t)$ – матриця шуму стану системи, $v(t)$ – матриця шуму виходу моделі.

Відповідно, з урахуванням кроку ітераційного обчислення n , вектори стану системи x_n , вимірювань y_n та управління u_n :

$$x_n = [i_{ds}^{(n)} \ i_{qs}^{(n)} \ \psi_{dr}^{(n)} \ \psi_{qr}^{(n)} \ \omega_o^{(n)}]^T, \quad y_n = \begin{bmatrix} i_{ds}^{(n)} \\ i_{qs}^{(n)} \end{bmatrix}, \quad u_n = \begin{bmatrix} U_{ds}^{(n)} \\ U_{qs}^{(n)} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

та матриці динамічної моделі роботи асинхронного двигуна (3) на основі T -подібної схеми заміщення мають вигляд:

$$A_n = \begin{bmatrix} 1 - \frac{K_r}{K_l} T & 0 & \frac{L_M R_r}{L_r^2 K_l} T & \frac{P L_M \omega_o^{(n)}}{2 L_r K_l} T & 0 \\ 0 & 1 - \frac{K_r}{K_l} T & \frac{P L_M \omega_o^{(n)}}{2 L_r K_l} T & \frac{L_M R_r}{L_r^2 K_l} T & 0 \\ \frac{L_M}{\tau_r} T & 0 & 1 - \frac{1}{\tau_r} T & -\frac{P}{2} \omega_o^{(n)} T & 0 \\ 0 & \frac{L_M}{\tau_r} T & \frac{P}{2} \omega_o^{(n)} T & 1 - \frac{1}{\tau_r} T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B_n = \begin{bmatrix} \frac{T}{K_l} & 0 \\ 0 & \frac{T}{K_l} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$ - постійна часу ротора, $K_r = R_s + \frac{L_M^2 R_r}{L_r^2}$ - розсіювання ротора,

$K_l = \left(1 - \frac{L_M^2}{L_r L_s}\right) L_s$ - перехідна індуктивність статора, T - інтервал вибірки.

Для виконання розрахунків РФК знайдені похідні діагностичних параметрів з системи рівнянь математичної моделі роботи асинхронного двигуна. Так, похідна по активному опору ротора

$$F(k) = \begin{bmatrix} 1 - T(\gamma_1 + \gamma_2 x_5) & 0 & T \frac{K_1}{L_r} x_5 & T p K_1 \omega_p & T \left(\frac{K_1}{L_r} x_3 - \gamma_2 x_1 \right) \\ 0 & 1 - T(\gamma_1 + \gamma_2 x_5) & -T p K_1 \omega_p & T \frac{K_1}{L_r} x_5 & T \left(\frac{K_1}{L_r} x_4 - \gamma_2 x_2 \right) \\ T \frac{L_m}{L_r} x_5 & 0 & 1 - \frac{T}{L_r} x_5 & T p \omega_p & T \left(\frac{L_m}{L_r} x_1 - \frac{1}{L_r} x_3 \right) \\ 0 & T \frac{L_m}{L_r} x_5 & T p \omega_p & 1 - \frac{T}{L_r} x_5 & T \left(\frac{L_m}{L_r} x_2 - \frac{1}{L_r} x_4 \right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

де $\gamma_1 = \frac{R_s}{\sigma L_s}$, $\gamma_2 = \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r^2}$ - коефіцієнти, $x_1..x_5$ - змінні стану.

Як показано на рис.12, за допомогою РФК вдається знайти якісне наближення оцінюваних сигналів до реальних значень. Кількісна величина збільшення або зменшення оцінюваних показників свідчить про число (процент) пошкоджених стрижнів ротора або міжвиткових коротких замикань.

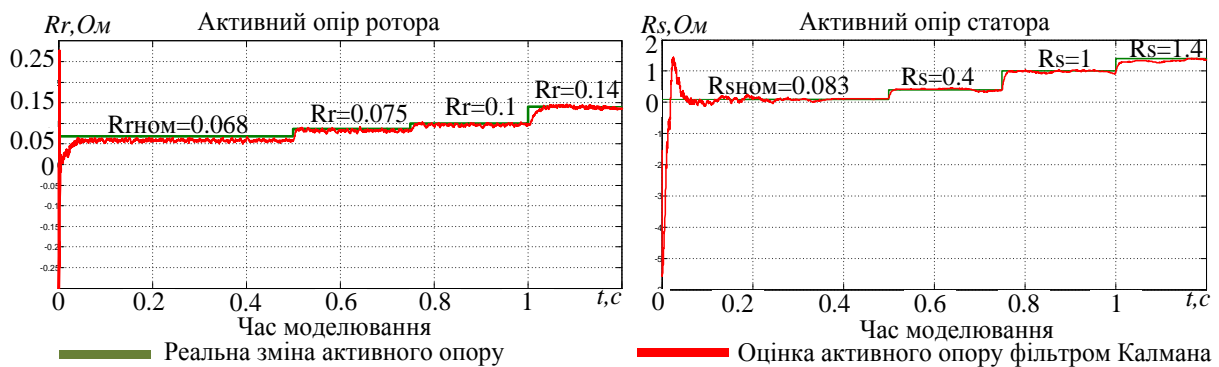


Рисунок 12 – Оцінка активних опорів ротора R_r та статора R_s за допомогою РФК

При розбіжності результатів експериментальних сигналів та характеристик обчислених РФК, налаштуванню підлягали коефіцієнти кореляційних матриць Q та R , які визначають Гаусові розподіли ймовірностей виникнення помилок за рахунок неточностей при описанні об'єкту ТАЕП та похибок при вимірюваннях. При описанні таких розподілів використовувалися реальні статистичні дані вимірювань активних опорів за період виготовлення та випробувань асинхронних двигунів АД917 (рис.13).

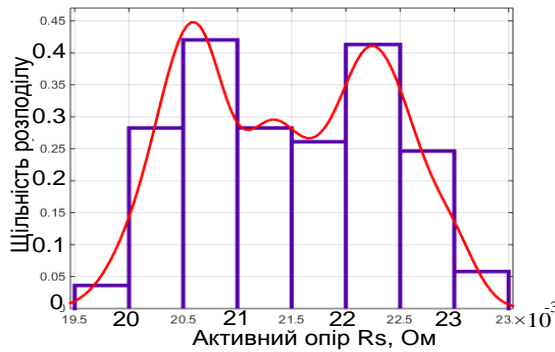


Рисунок 13 – Статистичні дані відхилення опору R_s для сукупної вибірки двигунів АД-917 ($R_{sH}=0.022\pm 0.0011$)

Оскільки на практиці неможливо виміряти ефективність роботи фільтра Калмана з урахуванням стану помилки вимірювань, так як не відомі істинні значення стану, постає задача в розробці методів перевірки правильності роботи фільтра. Запропоновано визначення показників ефективності фільтра за допомогою «інновацій». Інновація v_{k+1} визначається як різниця між спостереженням (вимірюванням) величини і її передбаченим значенням $\hat{z}_{k+1|k}$ з використанням інформації, доступної в момент часу k

$$v_{k+1} = z_{k+1} - H_{k+1} \hat{x}_{k+1|k} \quad (7)$$

Інновації є важливою мірою того, наскільки добре працює РФК. Якщо фільтр працює правильно тоді v_k - нульове середнє і біле з коваріацією S_k . Запропоновано оцінювати відповідність фільтра шляхом застосування наступних трьох перевірок (рис.14): 1) оцінювати відповідність інновацій з їх коваріаціями, перевіривши, що величина інновацій обмежена $\pm 2\sqrt{S_k}$; 2) переконатися, що інновація незміщена і біла за допомогою перевірки гіпотези нормованих квадратичних інновацій – « χ^2 -тесту»; 3) перевірки білизни (автокореляції) інновації.

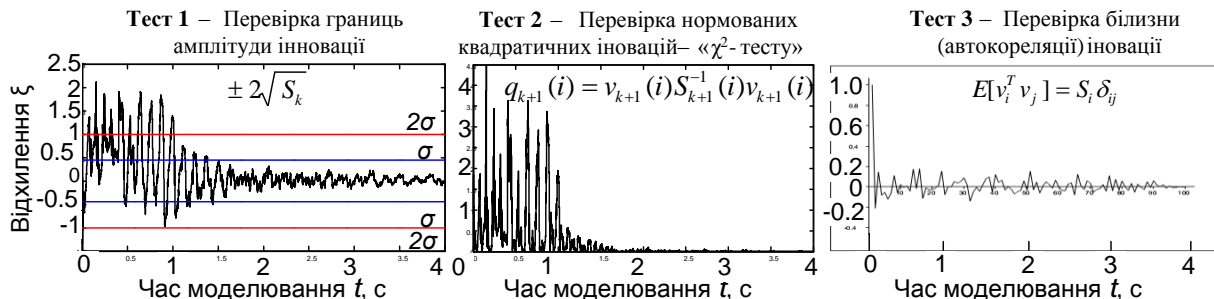


Рисунок 14 – Критерії оцінки ефективності роботи фільтра Калмана

Розроблено принципи побудови комплексної структури діагностування стану тягового асинхронного електроприводу, що передбачає поєднання методів спектрального аналізу та спостерігачів стану в цілісну багаторівневу систему захисту.

Запропоновано систему моніторингу стану для прийняття рішення про стан ТАЕП на основі алгоритмів штучних неймереж (рис.15), за допомогою яких, з урахуванням попереднього вибору типу вхідних даних (миттєвих інтервалів, середньоквадратичних значень, спектральних складових), вибору інтервалу діагностування та розгляду потенційних «шумових» завод, вцілому підтверджено ефективність розпізнавання несправностей.

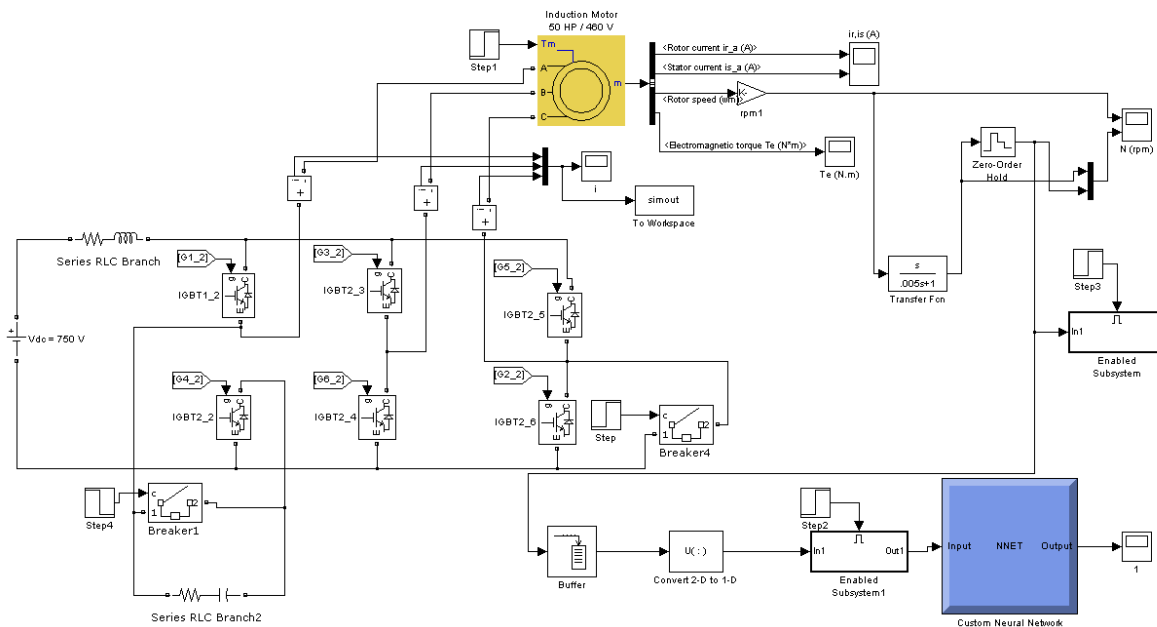


Рисунок 15 – Імітаційна модель системи діагностики на основі штучних неймереж в середовищі Simulink.

У додатках наведено комп'ютерні алгоритми розрахунку спектрального аналізу та РФК, програма-методика по осцилографуванню струмів та напруг асинхронного двигуна АД917, акти впровадження результатів дисертаційної роботи у Науково-дослідному інституті «ХЕМЗ», у навчальний процес Українського державного університету залізничного транспорту та Навчально-наукового інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів Українського державного університету залізничного транспорту.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена рішенням науково-технічної задачі по підвищенню ефективності технологій діагностування технічного стану тягового асинхронного електроприводу для забезпечення його надійної експлуатації шляхом виявлення аварійно небезпечних і аварійних режимів функціонування та їх ідентифікації, що дозволило розробити методи для раннього виявлення та запобігання виходу з ладу елементів електроприводу при виникненні в ньому несправностей, а також мінімізації експлуатаційних витрат.

На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень отримано результати та зроблено такі висновки:

1. Виконаний аналіз існуючих технологій, способів та методів діагностування та захисту тягового асинхронного електроприводу показав, що найбільш перспективними, у порівнянні з існуючими на рухомому складі, які діють на принципі контролю відхилення параметрів і запобігають розвитку аварійних режимів, є технології діагностування, що забезпечують виявлення та локалізацію відмов на ранніх стадіях.

2. Розроблено математичні описання та імітаційні моделі роботи окремих структурних елементів та тягового асинхронного електроприводу в цілому в різних варіаціях з урахуванням можливості здійснення в них симуляції аварійних ситуацій. Експериментально доведено, що математична імітаційна модель дозволяє адекватно відтворити електромагнітні процеси з похибкою не більше 10%, що є достатнім для аварійних режимів.

3. Запропоновано при проведенні досліджень перехідних процесів в аварійних режимах враховувати та уточнювати математичну модель тягового асинхронного двигуна шляхом застосування нечіткої логіки при апроксимації кривої намагнічування для зменшення обчислювальних витрат та використання статистичних даних розподілення для уточнення стохастичного значення активного опору.

4. Виконане імітаційне моделювання обраних аварійних режимів та проведений аналіз змодельованих електромагнітних процесів дозволили якісно та кількісно їх оцінити, визначивши значний ріст струмів (в 3..6 разів) та моментів (в 5..10 разів) в незворотних та суттєві (відповідно в 1,5 рази та в 3,5рази), але некритичні їх значення в усіх інших видах аварійних режимів. Шляхом аналізу подібних характерних рис та відмінностей, визначено придатні діагностичні параметри, які можуть бути використані в процесі раннього виявлення відмов.

5. Розроблено технологію ідентифікації неповнофазних режимів інвертора, спричинених зникненням одного або декількох імпульсів управління силовими ключами, та інших несправностей, на основі аналізу частотних характеристик вхідного струму інвертора, що у поєднанні зі смуговими фільтрами, адаптовано до умов змінної швидкості тягового електроприводу.

6. Розроблено технологію діагностування параметрів тягового асинхронного двигуна, шляхом використання алгоритму розширеного фільтра Калмана з оцінкою ефективності його роботи за статистичними критеріями в реальному часі. Це дозволило реалізувати процес відстеження та оцінки діагностичних параметрів ТАЕП, які не можуть бути виміряні датчиками безпосередньо.

7. Розроблено імітаційну модель для системи прийняття рішення про стан тягового асинхронного електроприводу на основі алгоритму штучних нейромереж. На основі моделі можливе здійснення ефективного автоматичного інтелектуального розпізнавання несправностей, якщо використання простих логічних принципів виявляється недостатньо.

8. Результати проведених в дисертаційній роботі досліджень передані в ДП «Науково-дослідний інститут «ХЕМЗ», використовуються в навчальному процесі Українського державного університету залізничного транс-

порту та Навчально-наукового інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів Українського державного університету залізничного транспорту.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ващенко Я. В. Багаторівнева система збору, обробки, зберігання та оцінки показників технічної експлуатації рухомого складу / С. І. Яцько, В. П. Гундарь, Я. В. Ващенко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ. – 2011. – № 5. – С. 4–7.

Здобувачем досліджено методику отримання вихідних даних шляхом збору інформації про відмови обладнання в експлуатації.

2. Ващенко Я. В. Інформаційно-керуючі системи в структурі управління та обслуговування рухомого складу / С. І. Яцько, Я. В. Ващенко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ. – 2013. – № 1. – С. 77–81.

Здобувачем визначено перспективні напрямки при розробці систем діагностування та моніторингу технічного стану рухомого складу.

3. Ващенко Я. В. Нейромережева модель діагностування системи "Автономний інвертор напруги – тяговий асинхронний двигун" тягової електропередачі / С. І. Яцько, Я. В. Ващенко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Харків: УкрДАЗТ. – 2013. – № 4. – С. 27–30.

Здобувачем розроблено технологію діагностування та імітаційну модель діагностування несправностей в системі тягового асинхронного електроприводу на основі застосування алгоритмів штучних нейромереж.

4. Ващенко Я. В. Штучна нейромережева система неперервного типу для діагностики тягового електроприводу / О. В. Макотринський, С. І. Яцько, Я. В. Ващенко // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ. – 2013. – Вип.141. – С. 230-234.

Здобувачем отримано базу даних діагностичних параметрів для здійснення процедури діагностування на основі штучних нейромереж.

5. Ващенко Я. В. Діагностика порушень у роботі тягового електропривода / С. І. Яцько, Я. В. Ващенко // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ. – 2014. – Вип.143. – С. 195-198.

Здобувачем розроблено технологію діагностування несправностей в тяговому асинхронному електроприводі за допомогою спектрального аналізу.

6. Ващенко Я. В. Система моніторингу стану асинхронного тягового електроприводу рухомого складу / С. І. Яцько, Я. В. Ващенко // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – Харків: УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 153. – С. 79-84.

Здобувачем розроблено технологію діагностування несправностей в тяговому асинхронному електроприводі за допомогою використання спектрального аналізу та смугових фільтрів.

7. Ващенко Я. В. Дослідження електромагнітних процесів при аварійних режимах у тяговому асинхронному електроприводі рухомого складу / С.І. Яцько, Б. В. Паршин, Я. В. Ващенко // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – Харків: УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 158, т.2. – С. 140-148.

Здобувачем проведено моделювання та отримано залежності електромагнітних перехідних процесів виникнення несправностей в тяговому асинхронному електроприводі.

8. Ващенко Я. В. Метод виявлення пошкоджень у тяговому асинхронному електроприводі на основі його математичної моделі / Я. В. Ващенко // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – Харків:УкрДУЗТ. – 2015. – Вип. 157. – С. 176–183.

9. Ващенко Я. В. Повышение эффективности деятельности организаций железнодорожного транспорта на базе использования системы технического диагностирования в структуре обслуживания тягового асинхронного электропривода / С. И. Яцько, Я. В. Ващенко // Рынок транспортных услуг (проблемы повышения эффективности). Международный сборник научных трудов. – Гомель: БелГУТ. – 2015. – Вып. 8. – С. 311-319.

Здобувачем обґрунтовано основні перспективи впровадження розроблених систем діагностування для підвищення економічної ефективності та надійності використання рухомого складу з асинхронним тяговим електроприводом.

10. Ващенко Я. В. Методи діагностування технічного стану обладнання рухомого складу в умовах недостатньої та недостовірної інформації / С. І. Яцько, Я. В. Ващенко // Тези доповідей 75-ї Міжнародної науково-технічної конференції. Напрямок «Рухомий склад і тяга поїздів». – Харків: УкрДАЗТ. – 2013. – Вип. 136. – С. 339.

11. Ващенко Я. В. Организация мониторинга технического состояния подвижного состава / С. И. Яцько, Я. В. Ващенко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ. – 2013. – № 4 (Додаток. Матеріали стендових доповідей та виступів учасників конференції) – С. 37.

12. Ващенко Я. В. Удосконалена система моніторингу стану асинхронного тягового електроприводу рухомого складу / С. І. Яцько, Я. В. Ващенко // Тези доповідей 76-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків: УкрДАЗТ. – 2014. – Вип. 142. – С. 224.

13. Ващенко Я. В. Підвищення ефективності виявлення пошкоджень в тяговому асинхронному двигуні на основі розширеного фільтра Калмана / С. І. Яцько, Я. В. Ващенко // Тези доповідей 77-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків: УкрДАЗТ. – 2015. – Вип. 148. – С.128.

14. Ващенко Я. В. Удосконалення технології діагностування стану тягового асинхронного електроприводу рухомого складу / С. І. Яцько, Я. В. Ващенко // Тези доповідей 78-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків: УкрДАЗТ. – 2016. – Вип. 159. – С. 256.

АНОТАЦІЇ

Ващенко Я.В. Удосконалення технології діагностування стану тягового асинхронного електроприводу рухомого складу. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2016р.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічної задачі по удосконаленню технології діагностування стану тягового асинхронного електроприводу рухомого складу на основі застосування діагностичних ознак, що свідчили б про настання аварійних режимів, а також розробці технологій, методів та алгоритмів, що дозволили б виявляти та упереджувати подальший розвиток таких режимів.

Для виконання досліджень розроблені комп'ютерні математичні імітаційні моделі тягового асинхронного електроприводу, в яких враховуються особливості аварійних режимів в залежності від системи управління, насичення магнітного кола асинхронного двигуна та ін. Виконано експериментальне підтвердження адекватності розроблених імітаційних моделей з реальним тяговим приводом для рухомого складу.

На основі розроблених моделей досліджено електромагнітні процеси, що відбуваються в аварійних режимах, що дозволило якісно та кількісно їх оцінити, а також визначити придатні для діагностування характерні ознаки.

Розроблено технології діагностування на основі гармонічного аналізу сигналу та на основі математичної моделі об'єкту, проведено комп'ютерну перевірку та підтверджено ефективність роботи таких методів. Для здійснення автоматизації прийняття рішення використано моделювання математичного алгоритму штучних нейромереж.

Ключові слова: рухомий склад, тяговий асинхронний електропривод, аварійні режими, інтелектуальні методи діагностики, методи прийняття рішення про стан.

Ващенко Я.В. Совершенствование технологии диагностирования состояния тягового асинхронного электропривода подвижного состава. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2016г.

Диссертация посвящена решению научно-технической задачи по совершенствованию технологии диагностирования состояния тягового асин-

хронного электропривода подвижного состава на основе применения диагностических признаков, свидетельствующих о наступлении аварийных режимов, а также разработке технологий, методов и алгоритмов, которые позволили бы выявлять и предупреждать дальнейшее развитие таких режимов.

Для выполнения исследований разработаны компьютерные математические имитационные модели тягового асинхронного электропривода, в которых учитываются особенности аварийных режимов в зависимости от системы управления, насыщения магнитной цепи асинхронного двигателя и др. Выполнено экспериментальное подтверждение адекватности разработанных имитационных моделей с реальным тяговым приводом для подвижного состава.

На основе разработанных моделей исследованы электромагнитные процессы, происходящие в аварийных режимах, что позволило качественно и количественно их оценить, а также определить пригодные для осуществления процесса диагностирования характерные признаки.

Разработаны технологии диагностирования на основе гармонического анализа сигнала и на основе математической модели объекта, проведено компьютерную проверку и подтверждено эффективность работы таких методов. Для осуществления автоматизации принятия решения использовано моделирование математического алгоритма искусственных нейронных сетей.

Ключевые слова: подвижной состав, тяговый асинхронный электропривод, аварийные режимы, интеллектуальные методы диагностики, методы принятия решения о состоянии.

Vashchenko Y.V. Improving technology of diagnosing state for traction asynchronous drive electric rolling stock. - Manuscript.

Thesis for a candidate degree by speciality 05.22.09 – Electric transport. – National Technical University “Kharkiv Polytechnical Institute”, Kharkiv, 2016.

Dissertation is devoted to solving scientific and technical targets improving technology of diagnosing state for traction asynchronous drive electric rolling stock by detecting abnormally dangerous and emergency modes operation and their identification, which allowed to develop methods for early detection and prevention of drive elements failure when it malfunctions occur, as well as minimizing operational costs.

The analysis of existing technologies, techniques and methods for diagnosis and protection traction asynchronous drive showed that the most promising in comparison with the existing protection systems of rolling stock, which operate on the principle of control deviations of parameters and prevent the development of emergency modes, there are diagnostics technology provides detection and localization of failures in the early stages.

To perform research are designed mathematical descriptions and universal simulation models of individual structural elements and traction induction motor as a whole in different variations with possibility of implementing them in the simulation of emergencies. It is experimentally proved that the mathematical simulation model can adequately reproduce the electromagnetic processes with accuracy no less than 10%, which is sufficient for emergency operation. It is suggested in research emergency conditions to consider and refine the mathematical model traction induction motor by applying fuzzy logic in the magnetization curve approximation to reduce the computational cost and use statistical data to clarify distribution the stochastic value of active resistance. On basis of the developed models, are studied electromagnetic processes occurring in emergency conditions of internal and external short circuits, voltage dips, unbalance of the drive and asymmetric modes inverter, allowing qualitatively and quantitatively evaluate them, and to identify suitable for diagnosing the process characteristic features.

Developed diagnosis technology based on the harmonic analysis of the signal and on the basis of a mathematical model of the object, carried out computer checks and confirmed the efficiency of these methods.

It is proposed new technology for identification inverter unbalance modes caused by disappearance one or more pulses of power keys, and other faults by analyzing frequency characteristics in the input current of inverter, which in combination with the bandpass filter, adapted to conditions of variable speed electric traction, and on unlike the others, allows a single sensor and with greater speed to recognize these regimes and to prevent more serious damage in drive.

Improved diagnosis technology based on the object model of traction induction motor by using the extended Kalman filter that can detect damage to the stator and rotor windings of traction induction motor, for which proposed to use statistical criteria in real time for assessing its effectiveness

To automate the decision approach applied mathematical algorithm simulation based on artificial neural networks for diagnostic feature variable speed oscillation induction motor rotor frequency, with which is possible to exercise effective intellectual automatic fault detection when using simple logical principles is not enough.

Developed diagnosis methods are expand existing protection technologies including real technical state of asynchronous traction electric drive and allowing to perform timely malfunctions detection and automatic decision-making to prevent further development of emergency operation, thereby increasing efficiency and reliability traction drive operation.

Key words: rolling stock, asynchronous electric traction drive, emergency mode, intelligent methods of diagnosis, state decision-making methods.

Підписано до друку _____2016р. Формат паперу 60x90/16.
Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. № ____

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
Тел. 7-170-354