

С.М. Єсаулов, О.Ф. Бабічева, М.М. Ковалик

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛООВОГО ДІАГНОСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ СПРАВНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

У статті розглянуті причини нагрівання електромеханічного обладнання (ЕМО) при його експлуатації. Використовуючи експериментальні дані при реалізації робочих циклів ЕМО, були визначені величини швидкості теплових процесів, які супроводжують змінні технологічні режими двополярною поведінкою вихідної ординати. Запропоновано алгоритми електронного формування масиву вихідних величин і сортування їх за «принципом флотації», коли забезпечується селективний відбір змінних, що належать процесам тільки нагрівання або тільки охолодження обладнання. Розглянуто шлях і алгоритм визначення швидкості зміни температури на підставі поточних даних за допомогою Д-формулача. В роботі наведені ілюстрації, які підтверджують придатність математичних описів і алгоритмів обробки вихідних даних, для практичного застосування їх в електронних вимірювальних засобах контролю і діагностики несправностей за тепловими подіями в ЕМО, що відбуваються.

Ключові слова: штучна нейронна мережа, дистанційний контроль, моделювання, перетворювач параметра, модулятор, транспорт, тяговий електродвигун, ідентифікація.

Постановка проблеми

Електричні двигуни (ЕД) різного виконання широко використовуються в технологічних процесах комунального господарства. Цілодобова експлуатація ЕД в сферах життєзабезпечення населення можлива тільки при справному електрообладнанні, що використовується, як правило, без оператора. В умовах високої інтенсивності експлуатації ЕД на транспорті, об'єктах тепло-, водо- постачання, відведення тощо можлива при наявності систем автоматичного керування (САК). Така сукупність комплектів електромеханічного обладнання (ЕМО) і САК традиційно заслужили увагу до себе при вдосконаленні їх, в яких окреме місце тепер відводиться вбудованим системам технічної діагностики (ТД), що здійснює контроль справності пристроїв і установок різної складності [1].

Теплова діагностика електричних машин, що раніше отримала популярність [2], продовжує розвиватися, тому що для її застосування істотно розширився асортимент термічних датчиків, особливо, безконтактного виконання з електронними засобами дистанційної передачі вимірних величин в реальному часі [3]. Комплекти з оригінальними пристроями перетворення температури приходять на зміну стаціонарним і мобільним установкам, застосовуваним при виконанні планових і щоденних технічних оглядів (ЩТО) транспортних засобів, електрообладнання ліфтів, ескалаторів тощо. Очевидно, що дистанційні

варіанти завжди матимуть відмінні переваги, головний з яких – можливість контролювати теплові режими при реальних навантаженнях в умовах навколишнього середовища, складно відтворювані на стаціонарних стендах.

У зв'язку з зазначеними вище причинами завдання пошуку ефективних засобів теплового контролю ЕМО залишається, як і раніше **актуальним**, від вирішення якого залежить доцільність і можливість реалізації автономного діагностичного обладнання справності електричних машин в реальному часі, синтезованих у вигляді електронних експертів автономного виконання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перегрів електричних приводів відноситься до найпоширеніших подій в електромеханічному обладнанні, наслідком якого може бути вихід з ладу дорогих елементів складного електротехнічного пристрою.

Нагрівання ЕД може бути спровокований різними причинами, які зазвичай пов'язані з перевантаженнями, умовами роботи, порушеннями алгоритмів обслуговування тощо. Уникнути причини нагрівання ЕМО в реальних умовах функціонування технологічних об'єктів (ТО) і транспортних засобів (ТЗ) не завжди представляється можливим. У більшості випадків перегрів ЕД проявляється в робочих циклах, коли порушується стабільність електропостачання, тривалий час рівень навантаження перевищує нормовану величину, проявляються механічні

удари, різкі поштовхи, вібрації на всьому обладнанні одночасно або його частинах, і багато інших [4].

Перегрів ЕД також може бути результатом навіть незначної корозії, викликаної інтенсивними і частими перепадами температури, вологості, присутністю агресивних аерозолів в зоні експлуатації ЕМО. Окислення металевих поверхонь завжди зменшує зазор між елементами, а через іржу знижується номінальна величина обертів. У таких випадках відразу нагріваються кілька частин обладнання і складно буває визначити причини подій, але очікувати генерацію тепла представляється можливим, якщо контролювати його в реальному часі [4, 5].

При пошкодженні ізоляції обмотки також можливий перегрів електроприводів. Найчастіше така проблема проявляється при попаданні під корпус сторонніх часток, накопиченні, агломерації і коагуляції дрібнодисперсних частинок пилу, недбалості дотримання правил монтажу, експлуатації, тривалому зберіганні, транспортуванні деталей, які встановлюються в ЕМО при ремонті техніки. Наслідки багатьох таких відомих обставин зазвичай проявляються у вигляді локального короткого замикання, деформації вала, нерівномірності обертання ротора, але завжди з аномальним нагріванням частин ЕД [5].

Поширене банальне засмічення вентиляційних каналів ЕД може відбуватися настільки інтенсивно, що самі незначні порушення періодів техогляду і чищення проявляються прогресуючими тепловими процесами в обладнанні.

Тісний взаємозв'язок великого числа розглянутих факторів з перегрівом експлуатованих електричних машин становить предмет пошуку ефективних методів оцінки технічного стану ЕМО по тепловому контролю окремих компонентів його в реальних умовах експлуатації. При цьому фактичний локальний контроль нагрівання окремих елементів допомагає оперативно виявляти характерний стан, що передує ненормованому нагріванню, і попереджати можливі поломки і несправності дорогого обладнання [2 – 5].

При повторно-короткочасних режимах експлуатації ЕМО найбільш ефективними засобами контролю температури є пристрої з термодатчиками самого різного виконання [1, 3, 6]. Особливе місце у всьому асортименті пристроїв займають засоби дистанційного контролю, що встановлюються безпосередньо або поблизу компонентів, що нагріваються, вихід з ладу яких відбувається з відомою ймовірністю: підшипники (51%), обмотки статора (15,8%) і ротора (4,7%), з'єднувальні вали, муфти (2,4%), зовнішні пристрої (15,6%), та ін., що становлять сукупність ЕМО [3, 7].

При контролі нагріву частин ЕМО найбільш ефективним визнаний диференційний тепловий метод, коли вимір температури здійснюється щодо навколишнього середовища. Таке парне застосування первинних перетворювачів дозволяє враховувати допустимі інтервали температури нагріву ЕД властиві конкретним класам ізоляції обмоток, використовуваних в електроприводах, а також передбачити помилки вимірювань під впливом навколишнього середовища [7, 8].

Для ідентифікації процесів генерації тепла окремими блоками, вузлами тощо з можливими несправностями в них знаходять застосування системи діагностичного контролю (СДК) на основі інтелектуальних електронних систем і штучних нейронних мереж (ШНС) прямого поширення – персептрона [8, 9]. Такі пристрої синтезуються на принципах «наслідування», коли всі можливі неполадки в експлуатованому обладнанні представляються наборами навчальних вибірок, одержуваних за допомогою прийнятного методу апроксимації теплових процесів, а також активації неполадок в конкретному об'єкті при певних умовах.

Відомо, що достовірність результатів вимірювання та ідентифікації можливих несправностей дуже залежить від якості вихідної інформації, одержуваної електронними засобами вимірювання і перетворення електричних величин. В ЕМО зі стохастичним характером варіювання температури нагріву і умов експлуатації його, вирішувати таке завдання завжди набагато складніше, ніж в об'єктах з детермінованими властивостями. При цьому знаходять застосування гібридні розробки на базі апаратних і програмних рішень [9]. У кожному разі при цьому обов'язково враховуються кращі сторони конструкторських рішень, які сприяють подальшій взаємодії між різними пристроями контролю з попередніми і майбутніми версіями. Серед причин і факторів, що перешкоджають уніфікації та тиражування такого обладнання можна виділити елементну базу з вузькою спеціалізацією і різноманіття мікроконтролерів, що мають різні функціональні властивості. З цих причин будь-яка сукупність переваг і недоліків поки не дозволяє однозначно говорити про взаємозамінність і доцільності вибору цифрових або гібридних структур при синтезі уніфікованого засобу контролю теплового параметра для конкретного призначення. Тому в кожному окремому випадку важливо розглядати кілька можливих шляхів, що дозволяють досягти необхідний кінцевий результат з урахуванням доступної елементної бази [3, 9 – 12].

З вище сказаного можна зробити висновок, що рішення завдання підвищення надійності вихідної

інформації про нагріванні компонентів ЕМО для подальшої ідентифікації результатів вимірювань залишається важливим при синтезі теплового діагностичного експерта справності ЕМО із заданими вимогами.

Метою цієї роботи є моделювання та дослідження компонентів перетворювача температури, що дозволяють підвищити ефективність формування вихідних інформаційних повідомлень.

Виклад основного матеріалу.

1. Аналіз вихідних даних

З огляду на переваги дистанційного вимірювання температури електродвигунів за допомогою датчика-перетворювача «температура-частота» (ДПТЧ) [3] з комплектом електронного пристрою це вимірювальний засіб використовувався для контролю теплових процесів в ЕД в реальному часі. Експериментальні дані, отримані при реалізації наборів вхідних параметрів, що представляють оригінальні умови робочого циклу (РЦ) електричної машини, в подальшому добре апроксимувались поліномом S_{Tq_p} виду [3]

$$S_{Tq_p} = b_0 + b_1I + b_2U + b_3R + b_4V + \dots + b_nN + \dots + b_{12}IU + \dots + b_{(n-1)n}N_{n-1}N_n + b_{11}I_1^2 + b_{22}U_2^2 + \dots + b_{mn}N_n^2 + \dots \quad (1)$$

де I, R – величини струмів ТЕД і електрогальм, відповідно;

U – напруга на клеммах електроприводу;

V – швидкість потоку охолоджуючого повітря;

S_{Tq_p} – розрахункова частота вихідного сигналу

перетворювача «температура-частота»,

b_{mn} – апроксимуючі коефіцієнти.

Результати варіювання дослідних даних на кожній ділянці РЦ, вимірювані з помилкою $\pm 0,08$ °С, були використані для аналітичного визначення середньої швидкості зміни цієї величини. Залежності дослідних T і розрахункових dT величин ілюструє рисунок 1.

З графіка (рис.1) процесу нагріву ЕД величини температури T , що зберігають завжди зі зрозумілих причин позитивні значення, супроводжуються швидкістю зміни цього параметра dT , що відрізняється знакозмінними рівнями. Таке контрастне спостереження двополярної зміни контрольованого параметра ($\pm dT$) викликає до себе переважну увагу, тому що може дозволити виконувати оцінку інтенсивності процесів генерації тепла і охолодження в будь-яких елементах ЕМО при мінливих навантаженнях і змінних умовах експлуатації його. Оскільки виявлена

характеристика порушення теплового балансу може відбуватися з різних зазначених вище причин, включаючи і можливі несправності в діючому обладнанні, то ідентифікація таких подій вимагає застосування ефективних способів обробки вихідних даних.

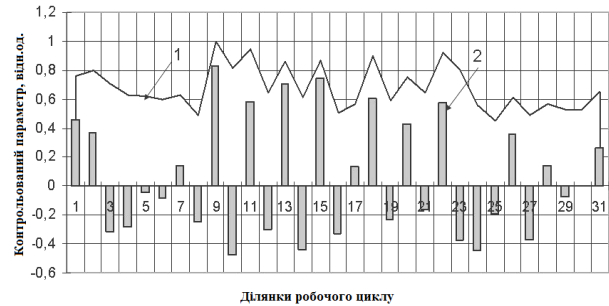


Рис.1. Зміна температури рівня і швидкості нагріву ЕД при реалізації робочого циклу:

1 – температура нагріву ЕД; 2 – швидкість зміни температури нагріву

Представлені на рисунку 1 досліджені T (1) і розрахункові dT (2) величини, отримані при експлуатації справного комплексу ЕМО, відображають випадковий характер всіх теплових подій. Тісний взаємозв'язок нагріву частин ЕМО з причинами, що провокують прояв їх, дозволяють припустити, що траєкторії контрольованих залежностей кожен раз будуть обов'язково деформуватися і відрізнятися від аналогічних, отриманих на справному обладнанні. При цьому величина $\pm dT$, як підтвердили експерименти і розрахунки, змінюється щодо модуля деякого нормованого рівня dT_0 , що характеризує будь-яку ділянку РЦ. Сама величина швидкості dT_i буде тісно пов'язана з інтенсивністю теплових подій, а контрастна поведінка $\pm dT_i$ може спростити оцінку порушень балансу припливу і відведення тепла. Крім того, очікувана тенденція поведінки $\pm dT$, змінна в часі, повинна відрізнятися відомим збільшенням $dT > 0$ або спадом $dT < 0$ щодо dT_0 , що також може підвищити оперативність пошуку несправності з усіх можливих.

Так при $dT \approx 0$, коли температура нагріву обладнання носить сталий рівень, близька ймовірність виходу з ладу блоку або елемента обладнання через перегрів його, тому що не відбувається очікуване поведінка параметра $\pm dT$.

Такі попередні інтерпретації теплових подій при аналізі змінних T_i та dT_i дозволили віддати перевагу другому параметру при синтезі теплового діагностичного експерта несправностей, не дивлячись на те, що величина dT_i визначається розрахунковим шляхом.

Виходячи з очікуваного взаємозв'язку dT_i з неполадками обладнання, що діагностується, доцільно користуватися декількома ДПТЧ, що сприяють виконуванию паралельних вимірювань. Такий прийом може також підвищити селективні властивості пропонованого технічного рішення при ідентифікації теплових подій. Місця установки ДПТЧ обумовлені раніше наведеною статистикою виходу з ладу частин ЕД і тому для розміщення датчиків насамперед доцільно вибирати корпуси статора, підшипників, елементи трансмісії реального обладнання.

Розглянуті набори технічних засобів дозволять виконувати вимірювання в будь-якому обсязі й за будь-яких режимів РЦ, на довільних ділянках, вибір яких завжди буде обумовлений можливістю формування представницьких електронних масивів вихідних даних і розрахунку величин $\pm dT_i$. Оскільки в локальних діагностичних експертів збір вихідних параметрів повинно виконуватися в автоматичному режимі, то все вище зазначені обставини важливо передбачити при синтезі інтелектуального діагностичного пристрою, особливо, з штучними нейронними мережами [3, 13].

З огляду на зазначені раніше причини, що вимагають застосування з ДПТЧ засобів математичної обробки даних, очевидно, для цього зручніше за все використовувати мікроконтролер (МК). Прикладні обчислювальні алгоритми завжди пов'язані з вирішенням завдань зберігання даних певного обсягу, логічною і математичною обробкою величин тощо, то ці обставини диктують певні вимоги і до самого МК.

На жаль, широкодоступна мікропроцесорна техніка з її функціональними можливостями не орієнтована на створення даного спеціалізованого пристрою для контролю температури з декількома прийомними елементами. Тому вибору МК завжди повинні передувати попередні дослідження з експериментальними підтвердженнями отриманих результатів та перевірені алгоритми, що забезпечують надійне отримання необхідних вихідних величин з заданою точністю.

2. Проектування алгоритму підготовки вихідних даних

Як зазначалося вище, вихідну інформацію в ЕМО можна отримувати за допомогою ДПТЧ, то хаотично мінливі дискретні величини $S_{TЧ}$ частоти вихідного сигналу перетворювача «температура-частота» попередньо слід зберігати обсягом L -елементів [3, 13].

Алгоритм *Start-1* розроблявся з урахуванням відомих реальних умов експлуатації ЕМО і припускав виконати селективний відбір вихідних

даних з потоку можливих вимірів контрольованого параметра (рис. 2). На початковому етапі *Start-1* передбачає введення всіх випадкових величин $S_{TЧi}$ (Input), які порівнюються з нормованим значенням $S_{TЧ0}$, що задається тепловими умовами технічної експлуатації ЕМО, що відрізняється певними властивостями T_{K0} [3].

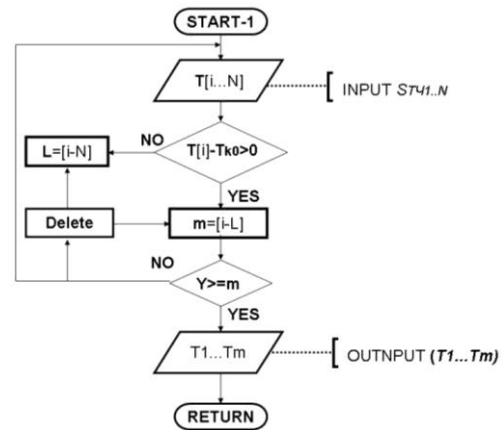


Рис.2. Алгоритм *Start-1* фільтрації вихідних даних

В результаті цієї операції непрямим шляхом визначається реальне відхилення температури нагріву обладнання $\Delta T_i = T_i - T_{K0}$ і напрямок зміни $\pm S_{TЧi}$, що відноситься до процесу нагріву $\Delta T_i > 0$ або охолодження $\Delta T_i < 0$, відповідно.

Всі допустимі вимірювання $S_{TЧ}$ в кількості L транспортуються для подальшого видалення (Delete) їх, а ненормовані m -чисельністю $Y = [i - L]$, якщо виконується умова $Y \geq m_0$ (m_0 вибирається для конкретного ЕМО) передаються (Output) для використання їх в подальших розрахунках. Далі програма *Start-1* перезапускається (Return), а всі раніше прийняті дані видаляються.

Зазначена вище величина m_0 вибирається з урахуванням інтенсивності флуктуації величин $S_{TЧi}$, наявності заважальних чинників, природа активації яких, ідентична інформаційним сигналам та інших причин, які супроводжують умови контролю режимів експлуатації ЕМО в реальному часі.

В результаті алгоритм *Start-1* забезпечує селективний відбір інформаційних повідомлень, тому що передбачає вибір величин зі стійкими ненормованими значеннями температури, ігноруючи тимчасово виявлені аномалії теплових процесів в обладнанні та перешкоди. Сам же параметр L визначає початкові вимоги до МК.

Збереження заданого L -обсягу вихідних інформаційних повідомлень дозволяє виконати

алгоритм *Start-1* і передати відфільтрований масив величин для подальшої обробки.

Після виконання алгоритму *Start-1* отриманий набір змінних буде являти собою базовий масив M_m , в якому обов'язково буде деяка екстремальна величина. Послідовності змінних в масиві $+M_m$ з найбільшою величиною $S_{TЧ\max} = +T_{\max}$ будуть ставитися до тенденції підвищення температури (нагрівання обладнання), а $-M_m$ з найменшою $S_{TЧ\min} = -T_{\min}$ – тепловіддачі або охолодження обладнання.

Повторні експерименти дозволили зробити висновок, що знаки змінних $\pm T_i$ зберігаються на будь-якій ділянці РЦ (рис. 1) при певних режимах експлуатації ЕД. Тому застосування модульованих інформаційних повідомлень $S_{TЧ_i} = T_i$, що сприяють перетворенню температури в цифрові послідовності, завжди будуть мати формат *int* з помилкою ± 1 Гц на відміну від самого контрольованого параметра – *float* з помилкою $\pm 0,08$ °С. Ці властивості перетворення інформаційних вихідних даних сприяють деякому зниженню вимог і до МК.

Після запису масиву $+M_m$ зі змінними T_i , що належать певній тенденції теплового процесу, доцільно попередньо сортувати за абсолютною величиною. Це дозволить отримати спадну або зростаючу послідовності чисел, що спростують подальший аналіз вхідних даних.

З огляду на одномірність одержуваних масивів $+M_m$, сортування всіх величин зручно проводити повторюваними проходами, попарно порівнюючи кожен з елементів з перезаписом за спаданням або зростанням їх, але в новому масиві $\pm M_n$. Створений для вирішення даного завдання алгоритм *Start-2* (рис. 3) передбачав сортування всього набору m -величин, завжди починається з $+T_{\max}$ у бік зменшення або з $-T_{\min}$ у бік зростання.

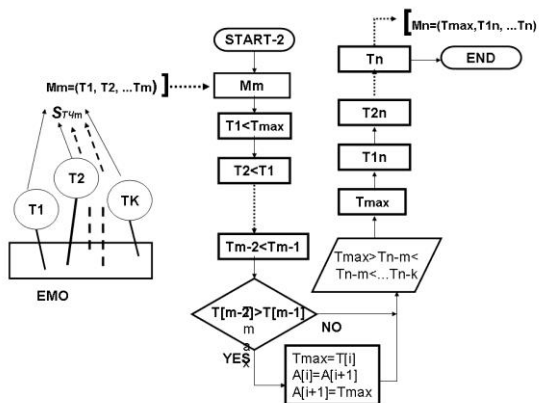


Рис. 3. Алгоритм *Start-2* сортування масиву вихідних даних

Формуємий відповідний новий масив $\pm M_n$ з набором $n = m$ -величин буде відрізнятися ранжируванням даних за модулем. При виконанні умови $m - n = 0$ завершуються всі проходи, $\pm M_n$ зберігається, а реалізація *Start-2* завершується (END).

Розглянутий алгоритм *Start-2* можна реалізувати різними зручними способами, але в будь-якому випадку до сортування величин повинен бути застосований «принцип флотажі», при якій з найбільшою швидкістю спливають бульбашки і тонуть частинки, що мають в кожному випадку найбільші розміри. Такий принцип добре узгоджується з абсолютними величинами елементів в масивах даних, сортування яких виконується для діаметрально протилежних процесів.

З огляду на інерційність теплових подій в ЕМО, при $n < m$ можна скоротити чисельність елементів в сортованому масиві, що також слід використовувати, попередньо переконавшись в можливості виконання такого заходу для зниження вимог до МК. Однак при цьому слід враховувати, що фінальний набір параметрів m, n, int не повинен знижувати достовірність вихідних даних при заданих початкових рівнях параметрів. Дана обставина, обумовлена контрастністю теплових подій, істотно залежить від наборів вихідних величин, взаємозв'язку їх з процесами теплообміну, допустимими температурами нагріву компонентів відповідного класу виконання тощо спільно впливають на цільову ідентифікацію тільки однієї причини з набору всіх можливих.

3. Алгоритм визначення швидкості зміни контрольованої температури

Беручи до уваги швидкість зміни температури, що отримується шляхом розрахунку, доцільно застосувати алгоритм для визначення цієї змінної з можливістю реалізації всіх етапів електронними засобами. Для цього розглядалися кілька алгоритмів, з яких було обрано варіант, коли при чисельному диференціюванні k -го порядку таблично задану змінну величину в деякій точці $x = x_i$ зручно представляти її у вигляді лінійної комбінації заданих значень x_0, x_1, \dots, x_n [14].

При цьому сам шуканий вираз змінної $y_i^{(k)}$ можна записати у вигляді:

$$y_i^{(k)} = C_0 y_0 + C_1 y_1 + \dots + C_n y_n \quad (2)$$

де C_0, C_1, \dots, C_n – коефіцієнти.

З огляду на (2) можна записати

$$y_i^{(k)} = C_0 y_0 + C_1 y_1 + C_2 y_2 + C_3 y_3. \quad (3)$$

Прийнявши, що ця формула має місце для многочленів:

$$y = 1; y = x - x_i; \dots; y = (x - x_i)^n, \quad (4)$$

то для знаходження похідної y_1' можна скористатися наступними многочленами:

$$y = 1; y = x - x_0; y = (x - x_0)^2; y = (x - x_0)^3 \dots \quad (5)$$

завдяки яким всі похідні буде досить у вигляді:

$$y' = 0; y' = 1; y' = 2(x - x_0); y' = 3(x - x_0)^2 \dots \quad (6)$$

Підставляючи послідовно співвідношення (5) і (6) відповідно в праву і ліву частини рівності (4), при $x = x_i$ отримаємо в загальному вигляді наступну систему лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення коефіцієнтів C_0, C_1, \dots, C_n

$$\begin{cases} 0 = C_0 + C_1 + C_2 + C_3, \\ 1 = C_0(x_0 - x_0) + C_1(x_1 - x_0) + C_2(x_2 - x_0) + C_3(x_3 - x_0), \\ 2(x_1 - x_0) = C_0(x_0 - x_0)^2 + C_1(x_1 - x_0)^2 + C_2(x_2 - x_0)^2 + C_3(x_3 - x_0)^2, \\ 3(x_1 - x_0)^2 = C_0(x_0 - x_0)^3 + C_1(x_1 - x_0)^3 + C_2(x_2 - x_0)^3 + C_3(x_3 - x_0)^3. \end{cases} \quad (7)$$

Рішення системи рівнянь (7) дозволяє отримати значення всіх коефіцієнтів і вирази для знаходження всіх похідних y_1' .

Реалізацію розглянутого громіздкого алгоритму спрощує постановка задачі, яка вимагає визначення швидкості зміни температури y' – першої похідної температури в окремих частинах обладнання. З цієї причини було прийнято масиви даних $\pm M_n$ аналізувати тільки за диференціальною величиною y' .

Беручи швидкість зміни температури у вигляді $dTi(t)/dt$ моделювання функції передбачуваного диференціатора (Д-формувач) було виконано відповідно алгоритму визначення такої аналогової компоненти у вигляді

$$S_d(t) = K_d T_d (de(t)/dt), \quad (8)$$

де $S_d(t)$ – вихідний сигнал Д-формувача;

K_d – коефіцієнт підсилення;

T_d – постійна часу диференціювання.

Для малих інтервалів дискретизації T_0 вираз (8) можна перетворити в різнісну залежність,

замінюючи похідну першою різницею, підставивши яку в рівняння, отримаємо

$$S_d(n) = K_d \cdot ((T_d/T_0)(e(n) - e(n-1))). \quad (9)$$

Залежність (9) являє собою нерекурентний алгоритм Д-формувача, для якого необхідно запам'ятовувати тільки попередні рівні неузгодженості $e(n)$ з усіх n -можливих. Таким чином, запам'ятовуючи результати наступних обчислень, попередньо зберігаючи кожне значення $S_d(n)$, можна скласти позиційний алгоритм визначення шуканої величини. Якщо попередній момент дискретизації записати у вигляді

$$S_d(n-1) = K_d \cdot ((T_d/T_0)(e(n-1) - e(n-2))) \quad (10)$$

а з (9) відняти (10), то отримаємо вираз

$$S_d(n) - S_d(n-1) = K_d \cdot (T_d/T_0) \cdot e(n-2), \quad (11)$$

на підставі, якого запишеться вираз придатний для розрахунку поточного значення вихідного сигналу Д-формувача

$$S_d(n) = S_d(n-1) + q \cdot e(n-2), \quad (12)$$

де $q = K_d \cdot (T_d/T_0)$

Реалізація такого виразу (12) можна надсилати за допомогою МК, що має обмежені обчислювальні можливості і засобами збереження проміжних даних.

Відповідно виразу (11) для обчислення нового значення $S_d(n)$ завжди використовується попереднє значення цієї величини, що і дозволяє кожен раз визначати неузгодженість між двома останніми розрахунковими величинами при відповідних кроках дискретизації. Такий алгоритм цифрового аналізу контрольованої величини за допомогою різницевого рівняння привабливий також і в якості цифрового фільтра з вхідним $e(n)$ і вихідним $S_d(n)$ сигналами.

Доречно зауважити, що вираз (12) отриманий для Д-формувача буде завжди відображати швидкість зміни контрольованої температури:

$$u[kT] = -K_d / TS_d [(k-1)T], \quad (13)$$

де $u[kT]$, $S_d(kT)$ – сигнали інформаційний та неузгодженості, відповідно;

kT – дискретний час на k -му кроці з періодом квантування T .

Застосувавши перетворення (13) відображення p -площини Лапласа на дискретні z -площини $z = \exp(p\tau)$ були отримані моделі цифрового

$$W_d(p) = (K_d/T)(1 - \exp(-p\tau)), \quad (14)$$

і класичного аналогового

$$W_d(p) = (T_d/T_0)(1 - \exp(-p\tau)), \quad (15)$$

де $T_d = K_d/K_p$;

K_p – коефіцієнт пропорційності,

варіантів Д-формувача сигналу для аналізу швидкості теплового процесу за допомогою отриманого рівняння у вигляді

$$U_m(t) = U_{m0} + (T_d/T_0)(1 - \exp(-p\tau)). \quad (16)$$

Перевірка математичних залежностей (14) – (16) з масивами даних теплових процесів, пов'язаних з реалізацією РЦ, виконувалася за допомогою серійного інженерного калькулятора і популярних програмних продуктів. Позитивні результати дозволили зробити висновок, що запропонований алгоритм для визначення рівнів інформаційного сигналу $U_{mi} = f(\pm dT_i)$ при $i = 1 \dots n$ придатний для реалізації різних технічних і програмних засобів. Результати реалізації алгоритму математичного моделювання Д-формувача виконані за допомогою доступних популярних програмних продуктів, представлені на рис. 4 [11, 14 – 19].

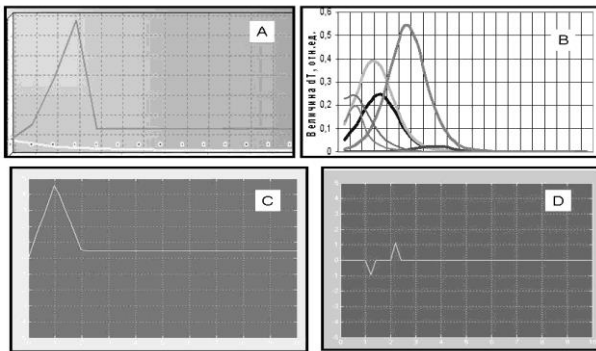


Рис. 4. Моделювання формувача сигналів U_{mi} , взаємопов'язаних зі швидкістю теплових процесів: А – пакет навчальних програм SinSys (для $-dT$); В – MS Excel (для декількох $+dT_i$); С, D – пакет візуального блокового імітаційного моделювання Simulink матричної системи MATLAB 6,7 ($+dT$ і $-dT$, відповідно)

Моделювання вихідних сигналів, залежних від швидкості теплових процесів, ілюструє придатність отриманих математичних описів та алгоритмів для

обробки масивів даних $\pm M_n$, реалізованих електронними обчислювальними засобами, включаючи МК.

Висновок

1. Розглянуто взаємозв'язок нагріву частин електричних приводів з різними відомими експлуатаційними причинами і можливими несправностями.

2. Запропоновано шлях вдосконалення пристрою контролю нагріву ЕМО в реальному часі за допомогою розрахунку швидкості зміни контрольованої величини.

3. Розроблено алгоритми сортування та попередньої підготовки вихідних інформаційних повідомлень про теплові події в електромеханічному обладнанні, що підвищують інформативність вихідних даних.

4. Моделювання швидкості теплового процесу за результатами вимірювання температури нагріву різних частин ЕМО підтвердило перевагу запропонованого шляху формування вихідної інформації, що підвищує ефективність роботи датчиків-перетворювачів «температура-частота».

5. Запропоновано алгоритм і варіант фізичної реалізації Д-формувача для визначення швидкості зміни температури на підставі поточної інформації.

6. Результати реалізації математичних описів і пристрої визначення швидкості зміни температури в ЕМО підтвердили можливість застосування їх за допомогою різних програмованих обчислювальних засобів.

Література

1. Chang Liu, Shu Zhou, Xindong Liu, Can Chen, *The Elevator Fault Diagnosis Method Based on Sequential Probability Ratio Test (SPRT)*, *Automation, Control and Intelligent Systems*, 2017, 5(4), P.50 – 55
2. Носов, В. В. *Диагностика машин и оборудования: учебное пособие [Текст] / В. В. Носов. – СПб. : Издательство «Лань», 2012. – 384 с.*
3. Єсаулов, С. М. *Контроль і моделювання параметрів для теплової діагностики порушень силового електрообладнання. [Текст] / С. М. Єсаулов, О. Ф. Бабічева, М. М. Ковалик. // Комуніальне господарство міст. – К. : Техніка. – Вып.3(149). - 2019. – С.19-28.*
4. Терехов, В. М. *Элементы автоматизированного электропривода: учебник для вузов [Текст] / В. М. Терехов. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.*
5. N. Rezki1, O. Kazar, L. H. Mouss, L. Kahloul, D. Rezki1, *A Hybrid Approach for Complex Industrial Process Monitoring*, *Journal of Scientific & Industrial Research*, Vol. 76, October 2017, P. 608 – 613
6. Li J, Shi J, & Satz D, *Modelling and Analysis of Disease and Risk Factors Through Learning Bayesian Network from Observational Data*, *Technical Report* (2006).

7. Bellini, A. Bellini, A., Filippetti, F., Tassoni, C., Capolino G. A. *Advances in diagnostic techniques for induction machines*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 12, 2008, pp. 4109 – 4126

8. Круглов, В. В. *Нечеткая логика и искусственные нейронные сети*. [Текст] / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 201 с.

9. Хайкин, С. *Нейронные сети: полный курс. 2-е издание* [Текст] / С. Хайкин. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.

10. Есаулов, С. М. *Проектирование компонентов для систем автоматического диагностирования транспорта*. [Текст] / С. М. Есаулов, О. Ф. Бабичева, Н. П. Лукашова // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – Вып.5/3(41). – 2009. – С.28–32.

11. Дьяконов, В. П. *MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании*. [Текст] / В. П. Дьяконов. – М. : Солон-Р, 2005. – 412 с.

12. Гутников, В. С. *Интегральная электроника в измерительных устройствах*. [Текст] / В. С. Гутников. – Л. : Энергия. 1980. – 387 с.

13. Есаулов, С. М. *Дослідження, моделювання і проектування компонентів штучного нейромережевого модуля для дистанційної діагностики електродвигунів*. [Текст] / С. М. Есаулов, О. Ф. Бабичева, Х. О. Рогожина. // *Комунальне господарство міст*. – К. : Техніка. – Вып.5(151). – 2019. – С.13-22.

14. Семенов, М. Г. *Введение в математическое моделирование*. [Текст] / М. Г. Семенов. – М. : Солон-Р, 2002. – 319 с.

15. *MATLAB. The Language of Technical Computing. Getting Started with MATLAB*. The Math Works, Inc. USA, 2000.

16. Бабичева, О. Ф. *Автоматизоване проектування електромеханічних пристроїв, компонентів цифрових систем керування та діагностичних комплексів : навч. посібник*. [Текст] / О. Ф. Бабичева, С. М. Есаулов ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 355 с.

17. *Simulink. Model-Based and System-Based Design. Using Simulink*. The Math Works, Inc. USA, 2002.

18. Бирюков, А. В. *Измерения скорости в микропроцессорных электроприводах с импульсным датчиком*. В кн. *Автоматизированный электропривод*. [Текст] / А. В. Бирюков, Н. Э. Фадеев, В. В. Хуторецкий. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 544 с.

19. Харин, Ю. С. *Основы имитационного и статистического моделирования: учебное пособие*. [Текст] / Ю. С. Харин, В. И. Малюгин, В. П. Кириллица и др. – М. : Дизайн ПРО, 1997. – 288 с.

References

1. Chang Liu, Shu Zhou, Xindong Liu, Can Chen (2017). The Elevator Fault Diagnosis Method Based on Sequential Probability Ratio Test (SPRT), *Automation, Control and Intelligent Systems*, 5(4), P.50 – 55.

2. Nosov, V. V. (2012). *Diagnostics of machines and equipment: study guide*. St. Petersburg : Publishing house «Lan», 384.

3. Esaulov, S. M. (2019). Control and modeling parameters for heat diagnostics of power electrical equipment failure – Urban services. *Kiev: Technics, Iss. 3 (149)*, pp. 19 – 28.

4. Terekhov, V.M. (1987) *Elements of an automated electric drive: a textbook for universities*. Moscow : Energoatomizdat, 224.

5. N. Rezkil, O. Kazar, L. H. Mouss, L. Kahloul, D. Rezkil, (2017). A hybrid Approach for Complex Industrial Process Monitoring, *Journal of Scientific & Industrial Research*, Vol. 76, pp. 608 – 613.

6. Li J, Shi J, & Satz D, (2006). *Modelling and Analysis of Disease and Risk Factors Through Learning Bayesian Network from Observational Data*, Technical Report.

7. Bellini, A. Bellini, A., Filippetti, F., Tassoni, C., Capolino G. A. (2008). *Advances in diagnostic techniques for induction machines*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 12, pp. 4109 – 4126.

8. Kruglov, V.V. (2001). *Fuzzy logic and artificial neural networks*. Moscow : FIZMATLIT, 201.

9. Khaikin, S. (2006). *Neural networks: a full course*. Moscow : Williams, 1104.

10. Esaulov, S. M. (2009). The design of components for systems for the automatic diagnosis of transport. *East European Journal of Advanced Technologies. Issue 5/3 (41)*, pp.28 – 32.

11. Dyakonov, V.P. (2005). *MATLAB 6.5 SP1 / 7 + Simulink 5/6 in mathematics and modeling*. Moscow : Solon-R, 412.

12. Gutnikov, V.S. (1980). *Integral electronics in measuring devices*. Leningrad: Energy, 387.

13. Esaulov, S. M. (2019). Research, modeling and design of components of an artificial neural network module for remote diagnostics of electric motors. – *Urban services. Kiev: Technics, Iss. 5 (151)*, pp. 13 – 22.

14. Seменов, М. Г. (2002). *Introduction to mathematical modeling*. Moscow : Solon-R, 319.

15. *MATLAB. The Language of Technical Computing. Getting Started with MATLAB*. The Math Works, Inc. USA, 2000.

16. Babicheva, O. F. (2018). *Automated design of electromechanical devices, components of digital control systems and diagnostic systems: textbook. manual*. Kharkiv : KhNUMG them. OM Beketova, 355.

17. *Simulink. Model-Based and System-Based Design. Using Simulink*. The Math Works, Inc. USA, 2002.

18. Biryukov, A. V. (1990). *Speed measurements in microprocessor electric drives with a pulse sensor*. In the book. *Automated electric drive*. Moscow : Energoatomizdat, 544.

19. Kharin, Y. S. (1997). *Fundamentals of imitation and statistical modeling: a tutorial*. Moscow : Design PRO, 288.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. П. Шпачук, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна

Автор: ЕСАУЛОВ Сергій Михайлович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричного транспорту
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – ut9li@ukr.net

Автор: БАБІЧЕВА Ольга Федорівна
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри
електричного транспорту
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – olgafedorovna@outlook.com

Автор: КОВАЛІК Микола Миколайович
студент факультету транспортних систем та
технологій
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – olgafedorovna@outlook.com

INCREASING THE EFFICIENCY OF THERMAL DIAGNOSTIC CONTROL OF ELECTRIC MOTORS

S. Yesaulov, O. Babicheva, M. Kovalik

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkov, Ukraine

The article considers the cause of electromechanical equipment heating (EME) during its operation. It has been reflected the well-known malfunctions of electric motors, that lead to overheating and failure of their individual components. Based on the analysis of existing methods of thermal diagnostics, It has been considered the trends in the creation of devices for monitoring thermal processes and it has been noted the reasons that restrain the use of technical diagnostics tools for thermal faults during the operation of EME. The purpose of this work was to increase the efficiency of the formation of initial information messages. Using the experimental data in the implementation of the EME working cycles, value of the thermal process velocity accompanying the variable technological modes with the bipolar behavior of the output ordinate were determined. Compared to the heating temperature, the rate of value change with a more noticeable contrast reflected the thermal events in the EME, thus determining the priority of this parameter to increase the efficiency of the measuring device. It has been considered methods of forming an array of initial data using a remote transducer sensor to control the heating temperature of equipment with a modulator. It has been proposed algorithms for the electronic formation of an array of initial values and their sorting according to the “principle of flotation”, when a select variables, belonging to the heating processes or cooling of equipment, is provided. A way and an algorithm for determining the rate of temperature change based on current data using a D-shaper are considered. Experimental studies of the electronic components of the diagnostic device with the D-shaper of the initial data array elements confirmed their physical implementation possibility by hardware and software. The results of data arrays formation, taking into account digital sequences in int format with an error of ± 1 Hz, in contrast to the most controlled parameter – float with an error of ± 0.08 °C, did not change the properties of information messages, but made it possible to reduce the requirements for a microcalculator or a computing device. The results, obtained using the proposed technical solution, confirmed the possibility of increasing the efficiency of thermal and diagnostic control, contributing to a more accurate identification of possible electric motor malfunctions in the EME. The work presents illustrations confirming the suitability of mathematical descriptions and algorithms for processing the initial data for their practical application in electronic measuring instruments for monitoring and diagnosing malfunctions based on thermal events.

Keywords: artificial neural network, remote control, modeling, parameter converter, modulator, transport, traction motor, identification, programming.