

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

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

КОНТРОЛЬ І МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ТЕПЛОВОЇ ДІАГНОСТИКИ ПОРУШЕНЬ СИЛОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Розглянуто шляхи моделювання генерації тепла в електроприводах, що взаємопов'язана з фізичними експлуатаційними величинами і можливими несправностями компонентів силового електрообладнання на міському електротранспорті. За допомогою перетворювача з модулятором «температура-частота» отримані дані для моделювання та синтезу дистанційних локальних засобів технічної діагностики і нейронних мереж аналізу справності силового електрообладнання на реальних маршрутах.

Ключові слова: транспорт, силове обладнання, моделювання, діагностування, дистанційний контроль, модулятор.

Постановка проблеми

Сучасна електронна техніка на транспортних засобах дозволяє синтезувати пристрої оперативного контролю технологічних величин при експлуатації рухомих одиниць (РО) і локальні діагностичні пристрої (ЛДП). На відміну від статичної діагностики на основі стаціонарних засобів вимірювання і методик для пошуку несправностей за фактом події відмови, сучасним діагностичним пристроям доступна реалізація алгоритмів визначення багатьох несправностей, які проявляються при робочих навантаженнях різного електромеханічного обладнання [1].

Прогнозування неполадок в тягових електроприводах (ТЕП) є актуальним завданням міського електротранспорту (МЕТ), рішення якого допомагає визначити перспективу можливого зносу компонентів обладнання. У більшості випадків поломки і відмови є наслідком поступового накопичення пошкоджень, поступового старіння і зношування окремих частин [2].

При цьому, наприклад, робота тягового електродвигуна можлива при наявності в ньому деяких дефектів (коротке замикання обмотки або пластин колектора, обрив секцій якоря та ін.). Подібні неполадки в електроприводах призводять лише до часткового погіршення працездатності, але активно сприяють виходу з ладу дорогого обладнання.

Оскільки тягові електродвигуни відносяться до найбільш навантаженого обладнання МЕТ з точки зору комплексного впливу на них теплових, електричних, механічних та кліматичних чинників, то рівень пошкоджуваності їх в експлуатації залишається досить високим [1, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Статистика відмов силового електромеханічного обладнання показує, що найчастіше двигуни потрапляють в ремонт з причин пробою ізоляції й міжвиткових замикань обмотки якоря – до 25%; порушення комутації (круговий вогонь) – 12%; пошкоджень якірних підшипників – 14 – 16% [4]. Розглянуті види пошкоджень ТЕП супроводжуються змінами температурних факторів при експлуатації механізмів. Перевищення температури знижує ресурс роботи окремих компонентів ТЕП і тому дуже важливо мати об'єктивну інформацію про температурне поле пристроїв в реальному часі. У зв'язку з цим при діагностичному прогнозуванні неполадок ТЕП важливе місце займають теплові математичні моделі. Ці математичні описи дозволяють прогнозувати температуру різних частин силового електрообладнання, особливо, при найбільших навантаженнях й ідентифікувати нагрів з можливими дефектами в частинах обладнання [1, 2].

Отримання експериментальної інформації вимагає присутності в РО засобів вимірювання температури і додаткових електронних пристроїв для аналізу вимірюваної величини в експлуатаційних режимах. Детальну інформацію про температурне поле ТЕП можна отримати теоретичним шляхом на основі рівняння теплопровідності. Коректні математичні моделі забезпечують повну картину поля, якщо є надійні відомості про розподіл витрат, властивості матеріалів та перебігу процесів охолодження тощо [5]. Рішення таких завдань за допомогою сукупності обчислювально-програмних засобів в свою чергу вимагає оснащення рухомого транспорту відповідною технікою [1].

Серед відомих ЛДП найбільшу привабливість мають засоби дистанційного визначення несправно-

стей на транспорті [6]. Такі базові пристрої завжди розміщуються поза РО і можуть застосовуватися для діагностики дефектів більшості типових комплектів електромеханічного та мехатронного обладнання, які є в сучасному міському електротранспорті [7, 8].

Таким чином актуальними є синтез технічних засобів дистанційного контролю параметрів і діагностування справності силового електрообладнання, що дозволяють виявляти очікувані неполадки в силовому електромеханічному обладнанні при його експлуатації.

Стохастичний характер використання потужності тягових електроприводів на електротранспорті викликає аналогічний нагрів електричних машин, що пов'язано зі змінною частотою реалізації динамічних режимів пуску, гальмування, інтенсивності впливу пасажиропотоку, навколишнього середовища та інших факторів.

З огляду на особливості експлуатації електротранспорту, температура окремих компонентів його обладнання є найбільш показовою величиною. Обумовлено це тим, що дефекти в струмопередавальних кільцях, колекторних щітках, відсутність мастила, механічний знос, забруднення підшипників тощо, завжди викликають підвищене тепловиділення і зростання енергоспоживання при загальному зниженні ефективності ТЕП на транспортному засобі.

Метою цієї роботи є моделювання теплових процесів в ТЕП і пошук шляхів реалізації засобів дистанційного контролю пріоритетних параметрів на рухомому транспорті для синтезу пристрою діагностики технічного стану тягового електроприводу в реальному часі.

Виклад основного матеріалу. Моделювання та вибір параметрів контролю теплових процесів

Електричний двигун при своїй роботі може нагріватися лише до певної, допустимої температури, яка визначається в першу чергу нагрівостійкістю застосовуваних ізоляційних матеріалів його обмоток. З огляду на обмеження за допустимою температурою нагріву, що гарантують нормативні терміни служби, очевидно, що нагрів електродвигуна відноситься до важливих параметрів контролю протягом всього терміну експлуатації електричної машини. На підставі існуючих вимог сутність перевірки двигуна по нагріванню зазвичай складається в зіставленні допустимої температури нагріву з тією, яку пристрій має при роботі [2–4]. При оцінці нагріву важлива не абсолютна температура електроприводу, а перегрів T , який є різницею температур двигуна t і навколишнього середовища t_{oc} , °C:

$$T = t - t_{oc}, \quad (1)$$

Оскільки при перегріванні електродвигуна передбачається реалізація допустимого теплового режиму, то ця умова запишеться у вигляді

$$T_{раб} < T_{дон}, \quad (2)$$

де $T_{дон}$ – допустимий перегрів двигуна, який визначається класом його ізоляції;

$T_{раб}$ – перегрів при роботі двигуна.

Відомі прийоми перевірки виконання умови (2). Практичне використання перевірки двигуна по нагріванню передбачає розрахунок і побудову кривої перегріву $T_{(0)}$ за цикл роботи двигуна [3]. Точний опис процесів нагрівання та охолодження ТЕП є досить складним завданням, яке при аналізі теплових режимів розглядають, приймаючи певні припущення: однорідність матеріалів електродвигуна, що мають нескінченно велику теплопровідність і однакову температуру в усіх точках корпусу та інших частинах; тепловіддача в зовнішнє середовище пропорційна першому ступеню різниці температур двигуна і навколишнього середовища; навколишнє середовище має нескінченно велику теплоємність, яка гарантує незалежність процесів нагрівання двигуна від її температури; теплоємність двигуна і його тепловіддача не залежить від температури (для ТЕП $T_{oc} = 40$ °C). В результаті можна записати наступне вихідне рівняння теплового балансу:

$$\Delta P \cdot dt = A \cdot T \cdot dt + C \cdot dt - V \cdot dt, \quad (3)$$

де T – перевищення температури відносно температури навколишнього середовища, °C;

ΔP – сумарні витрати потужності в ТЕП, Вт;

A – коефіцієнт тепловіддачі електродвигуна в навколишнє середовище за 1с при різниці температур двигуна і навколишнього середовища 1 °C, Дж/(с°C);

C – теплоємність двигуна для нагріву на 1 °C, Дж/°C;

V – коефіцієнт охолодження електродвигуна з додатковим (вентилятором), Дж/(с°C).

Рішення диференціального рівняння (3) при $\Delta P = const$ має вигляд:

$$T = T_{уст} + (T_{нач} - T_{уст}) \cdot \exp(-t/T_n), \quad (4)$$

де $T_{нач}$ – початкове перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища T_{oc} ;

$T_{уст} = \Delta P/A$ – усталене перевищення температури двигуна;

$T_n = (C - V)/A$ – постійна часу нагріву електродвигуна з вентилятором, с.

Оскільки постійна часу нагріву T_n залежить від часу нагріву ТЕП до усталеного перевищення температури $T_{уст}$ за умови відсутності віддачі тепла в навколишнє середовище, то при $T_{нач} = 0$ рівняння (4) запишеться у вигляді

$$T = T_{уст} (1 - \exp(-t/T_n)), \quad (5)$$

а при охолодженні з $T_{нач}$ до температури довкілля, прийнявши величину $T_{уст} = 0$, вираз (5) можна представити

$$T = T_{нач} (1 - \exp(-t/T_n)). \quad (6)$$

При змінних величинах потужності на валу ТЕП процес тепловіддачі електродвигуна залежить від припливу холодного повітря і ефективності роботи реальної системи вентиляції. Тому для електродвигунів з само- і примусовою вентиляцією доцільно враховувати коефіцієнт погіршення умов охолодження V_β силового електрообладнання. Середні значення коефіцієнта V_β при пуску, гальмуванні, змінних умов руху на міських дорогах з урахуванням факторів навколишнього середовища часто використовують табличні дані [5, 6] або результати спеціальних досліджень. Беручи до уваги величину $T_{уст}$, при номінальних витратах $V_{\beta 0}$ і незмінному значенні теплопровідності матеріалів, усталене перевищення температури ТЕП запишеться у вигляді

$$T_{уст,н} = (\Delta P_n / A). \quad (7)$$

Якщо витрати електродвигуна дорівнюють або менше номінальних ΔP_n , то нагрів пристрою ніколи не перевищить допустимого рівня. Незважаючи на деяку різницю реально допустимих від нормованих, витрати в ТЕП при змінній температурі нагріву з деякими припущеннями можна розглядати застосовними до об'єкту, що володіє детермінованими властивостями і дозволяє перевірку виконання умови температури нагріву компонентів ТЕП представити у вигляді

$$T_{max} \leq T_{дон}. \quad (8)$$

Дану умову можна прийняти для оцінки справності електрообладнання, що експлуатується в реальному часі. Якщо за допомогою формули (4) отримати залежність $T(t)$ і по ній визначити T_{max} , то результат залежності (8) може використовуватися для автоматизації діагностичного аналізу справності електромашини по нагріванню за допомогою електронного обчислювального пристрою.

Оскільки графік руху електротранспорту на міських маршрутах досить надійно дотримується, то цей фактор сприяє застосуванню оцінки середніх витрат струму, моменту або потужності ТЕП за відомий цикл роботи РО, як більш зручний для аналізу за допомогою будь-якого методу розрахунку обраної еквівалентної електричної величини [5, 6, 8]. Наприклад, метод середніх витрат може бути використаний як універсальний для аналізу теплових процесів в ТЕП. Визначивши середні витрати потужності ΔP_{cp} , для всього робочого циклу РО або окремих інтервалів цю величину в подальшому можна зіставляти з аналогічними розрахунковими номінальними витратами потужності ΔP_n . Розглядаючи цикл роботи ТЕП для $T_{cp} = const$, коли кількість теплоти, що акумульована в електромашині, приймається дорівнюючою нулю, можна відоме рівняння теплового балансу (3) представити наступною залежністю

$$\int_0^{T_u} \Delta P \cdot dt = A T_{cp} \cdot T_u, \quad (9)$$

звідки отримуємо вираз

$$T_{cp} = (1 / A \cdot T_u) \int_0^{T_u} \Delta P \cdot dt = \Delta P_{cp} / A, \quad (10)$$

де $\Delta P_{cp} = (1 / T_u) \int_0^{T_u} \Delta P \cdot dt$ – середні витрати потужності за цикл.

Умови (7), (8) і середні витрати теплового режиму експлуатації ТЕП додатково дозволяють отримати вираз зручнішим для теплового діагностичного контролю справності обладнання:

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_n = P_H (1 - \eta_H) / \eta_H. \quad (11)$$

де η_H – ККД електродвигуна при номінальному режимі;

P_H – номінальна потужність електродвигуна.

Якщо на окремих інтервалах циклу T_{cp} рівень навантаження прийняти величиною постійною, то середні витрати потужності на тепло визначаються виразом

$$\Delta P_{cp} = (\Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_2 \cdot t_2 + \dots + \Delta P_n \cdot t_n) / (t_1 + t_2 + \dots + t_n) \quad (12)$$

На підставі (12) очевидно, що даний метод цілком придатний, якщо час роботи двигуна з максимальним навантаженням менше його постійної часу нагріву T_H , тому що в іншому випадку буде відбу-

ватися значне перевищення допустимої температури нагріву обладнання. Чим більше значення T_H буде перевищувати величину T_{\max}

$$T_H > T_{\max}, \quad (13)$$

тим інтенсивніше відстань між параметрами T_{cp} і T_{\max} буде скорочуватися, негативно впливаючи на технічний стан компонентів ТЕП [4 – 15]. Найбільш ефективний контроль температури для діагностичного аналізу повинен здійснюватися з точністю, не менше $\pm 0,5^\circ\text{C}$ [2, 3].

З огляду на відомий взаємозв'язок витрати потужності в двигунах на тепло з квадратом струму в його обмотках, очевидно, що еквівалентну величину струму I_e для різних режимів роботи електродвигуна на всіх інтервалах робочого циклу можна використовувати й при вирішенні задач діагностичного порівняння розглянутих параметрів [1, 5, 6].

Величину еквівалентного струму I_e , що викликає зміни температури обладнання, аналогічну реально змінюваному струму на найхарактерніших інтервалах (з підйомами, найбільшим пасажиропотоком та ін.) робочого циклу, можна представити залежністю

$$I_e = \left(\left(1/T_u \right) \cdot \int_0^{T_u} T_u(t) dt \right)^{0,5} = \left[(I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n) / (t_1 + t_2 + \dots + t_n) \right]^{0,5} \quad (14)$$

В цьому випадку умовою нормованої оцінки нагрівання може бути вираз вигляду:

$$I_e \leq I_{\text{норм}}. \quad (15)$$

Прийнявши незмінними початкові умови постійних витрат потужності на тепло ΔP_{cp} , залежність (15) для методу середніх витрат можна використовувати при обробці даних дистанційного контролю сили струму лише на окремих ділянках контактної мережі, які доступні на енергопостачальних тягових підстанціях МЕТ. Цей факт істотно спрощує рішення задачі контролю навантажень в реальному часі без установки спеціального обладнання на рухомому складі.

Для обліку змінних умов охолодження ТЕП на маршрутах руху РО в міських умовах вираз (14) з урахуванням величин $V\beta_n$ можна записати у вигляді

$$I_e = \left[(I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n) / (V\beta_1 \cdot t_1 + V\beta_2 \cdot t_2 + \dots + V\beta_n \cdot t_n) \right]^{0,5}. \quad (16)$$

Цей вираз (16) найбільш переважно застосовувати для однотипних РО МЕТ зі змінними режимами експлуатації електроприводів, тому що за допомогою $V\beta_n$ можна враховувати комплексний вплив електричних, механічних і кліматичних чинників, включаючи продуктивність засобів примусової вентиляції. Приклад змінних навантажень на фрагменті електронного запису робочого циклу ілюструє рисунок 1.

Розглянутий вище тісний взаємозв'язок параметрів, що впливають на нагрівання частин ТЕП в реальних умовах, для моделювання робочого циклу були проведені експериментальні дослідження з використанням лабораторного комплексу обладнання. Фізична модель ТЕП була реалізована на базі двох електродвигунів GMP28-NEC2838 постійного струму. Один електродвигун виконував функцію тягового електроприводу (ТЕП), а другий – навантаження на валу зі змінними рівнями, що задаються реверсивними режимами його роботи.



Рис. 1 Електронний запис навантаження ТЕП на ділянках робочого циклу: 1 – струм навантаження; 2 – напруга контактної мережі

Нагрівання електродвигуна щодо температури навколишнього середовища контролювався за допомогою диференціального електронного термометра. Сталі режими нагріву ТЕП при кожному експерименті фіксувалися для подальшого їх аналізу. Лабораторний термометр складався з двох термопар ХК, формувача уніфікованого інформаційного сигналу на операційному підсилювачі з напругою U_{MV} в інтервалі від 0,2 до 2 В і низькочастотного генератора (НЧГ) [8]. НЧГ застосовувався для перетворення вихідної інформації про нагрівання ТЕП за принципом «параметр-частота» (Т-Ч). Частота вихідного інформаційного сигналу $S_{TЧ}$ перетворювача Т-Ч від температури нагрітого вузла визначається залежністю:

$$S_{TЧ} = f(U_{MV}, T, C_i), \quad (17)$$

де U_{MV} – нормований вихідний сигнал вимірювальної схеми з датчиком температури T ;

C_i – ємність конденсаторів, що визначають опорну частоту модулятора-перетворювача Т-Ч.

У лабораторному пристрої Т-Ч вихідний сигнал відрізнявся достатньою високою лінійністю, забезпечуючи при цьому точність дискретних вимірювань, з помилкою менш $\pm 0,4^\circ\text{C}$ і можливість змінювати чутливість приладу на 1°C . Оскільки сигнал $S_{TЧ}$ можна передавати на відстані по бездротовій лінії зв'язку, то його вибір був виправданий можливістю застосовувати безконтактний засіб дистанційного контролю нагріву частин ТЕП за допомогою приймально-передавального пристрою, в якості якого застосовувався комплект високочастотного генератора (ВЧГ) з формувачем режиму балансної модуляції [9] на несучій частоті з гармонійним коливанням

$$U_H(t) = U_m \cos \omega_0 t. \quad (18)$$

Пристрій для формування сигналу однополосної амплітудної модуляції, містив два фазообертача ($\Phi 1$, $\Phi 2$). Такий комплект забезпечує зрушення фази дорівнюючий $\pi/2$ для подальшого перетворення інформаційних сигналів в балансних модуляторах ($BM1$, $BM2$) і суматорі (SM).

При надходженні на входи першого $BM1$ інформаційного сигналу $s(t)$ вигляду

$$s(t) = S_0 \cos \Omega t \quad (19)$$

і коливань несучої частоти $U_H(t)$ (18) на виході $BM1$ отримуємо сигнал відповідно до виразу:

$$U_{BM1}(t) = k_{AM} U_m \cos(\omega - \Omega)t + k_{AM} U_m \cos(\omega + \Omega)t. \quad (20)$$

На другому балансному модуляторі $BM2$ при вхідних сигналах, що надходять через інвертори фаз у вигляді

$$U_{\phi 1}(t) = S_0 \sin \Omega t; \quad (21)$$

$$U_{\phi 2}(t) = S_0 \sin \omega_0 t \quad (22)$$

результуючими будуть коливання, описувані відповідно до заміни косинусів на синуси, наступним виразом

$$U_{BM2}(t) = 2k_{AM} \cdot U_m \cdot \sin \Omega t \cdot \sin \omega_0 t. \quad (23)$$

З урахуванням відомого тригонометричного співвідношення

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = 0,5[\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)], \quad (24)$$

вихідний сигнал $BM2$ можна представити таким виразом

$$U_{BM2}(t) = k_{AM} U_m \cos(\omega_0 - \Omega)t - k_{AM} U_0 \cos(\omega + \Omega)t. \quad (25)$$

При додаванні сигналів (20) і (25) в суматорі SM отримуємо рівняння вихідного сигналу

$$U_{SM}(t) = 2k_{AM} U_m \cos(\omega_0 - \Omega)t. \quad (26)$$

який характеризується однією бічною смугою. Такий сигнал гарантує енергетичний виграш для передавального пристрою [7, 9], що використовується з автономним джерелом електроживлення, тому що не випромінює несний сигнал при відсутності інформаційного повідомлення і представляє можливість одночасно застосовувати декілька локальних НЧГ з різними значеннями опорних частот ω_{o1} , ω_{o2} ... ω_{oN} . Для $\omega_{oN} = S_{TЧN}$ можна записати:

$$U_{SM}(t) = 2k_{AM} U_m \cos\left(\left(\sum_{i=1}^N S_{TЧN}\right) - \Omega\right)t. \quad (27)$$

де N – кількість монотонних інформаційних сигналів від різних НЧГ.

Зазначені переваги зручні ще й тим, що дозволяють за допомогою декількох датчиків температури контролювати нагрів корпусів, підшипників, ізоляційних конструкцій, контактів та інших компонентів ТЕП одночасно для оцінки градієнта цього параметра без транспортного запізнення. На рисунку 2 представлені спектрограми інформаційних повідомлень від одного (а) і декількох (б) перетворювачів Т-Ч з однотональною модуляцією, отримані за допомогою лабораторного приймально-передавального пристрою з експериментальним спектроаналізатором в смузі огляду від 200 до 3000 Гц.



Рис. 2 Експериментальний спектроаналіз модульованих сигналів від перетворювачів «температура-частота»: а – інтерфейс програми контролю монотонного сигналу; б – інформаційні сигнали від різних джерел з частотами $S_{TЧ1}$, $S_{TЧ2}$, $S_{TЧ3}$.

На підставі вищевикладених теоретичних і практичних досліджень для експериментального вивчення робочого циклу ТЕП був обраний перелік параметрів контролю і засоби їх вимірювання. Комплект дослідної установки містив регульовані джерела електроживлення, задатчик навантаження і вентилятор охолодження з приладами для вимірювання: I , R – струмів навантаження і гальм,

відповідно; U – напруги на клеммах; V – швидкості потоку охолоджуючого повітря і $S_{TЧ}$ – частоти вихідного сигналу перетворювача «темпера-частота».

Моделювання робочого циклу ТЕП

Для моделювання та аналізу експериментальних даних застосовувався класичний факторний аналіз [10]. Оскільки факторні змінні є лінійною комбінацією вихідних фізичних величин, то метод базувався на вибірці показників, що дозволяють сформулювати математичний опис об'єкта дослідження з необхідною точністю, зменшуючи при цьому розмірність самого завдання. З огляду на ефективність застосування ортогональних статечних поліномів [11] при багатфакторному аналізі аналогічних теплових процесів, для досліджень був прийнятий план експериментів з урахуванням різних режимів експлуатації електродвигунів дослідної установки для подальшої апроксимації даних методом найменших квадратів. Перевагою обраного способу є можливість визначення коефіцієнтів математичних моделей ТЕП з реалізацією автоматизації визначення їх в середовищі підпрограми матричної алгебри, що входить в популярний пакет прикладних програм Microsoft Office.

План експериментів передбачав реалізацію і варіювання номінальних режимів роботи справного комплексу електрообладнання, який наведений в таблиці 1.

Таблиця 1

План реалізації робочого циклу для моделювання номінального режиму нагріву електродвигунами

№ on.	I	U	I_r	V
1	1	1	1	1
2	-1	1	1	1
3	1	-1	1	1
4	-1	-1	1	1
5	1	1	-1	1
6	-1	1	-1	1
7	1	-1	-1	1
8	-1	-1	-1	1
9	1	1	1	-1
10	-1	1	1	-1
11	1	-1	1	-1
12	-1	-1	1	-1
13	1	1	-1	-1
14	-1	1	-1	-1
15	1	-1	-1	-1
16	-1	-1	-1	-1
17	-2	0	0	0
18	2	0	0	0
19	0	-2	0	0
20	0	2	0	0
21	0	0	-2	0
22	0	0	2	0
23	0	0	0	-2
24	0	0	0	2

Результати контролю нагріву ТЕП представлені на рисунку 3.

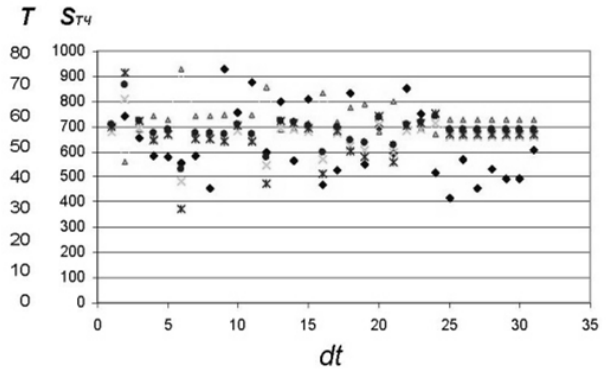


Рис. 3 Середні величини параметра нагріву електродвигуна при експериментальному варіюванні номінальних значень обраних вхідних факторів: T – диференціальне значення температури нагріву, $^{\circ}\text{C}$; $S_{TЧ}$ – частота вихідного сигналу перетворювача «темпера-частота», Гц; dt – умовні ділянки робочого циклу

Всі експерименти проводилися при наступних обмеженнях:

$$\begin{aligned}
 -(2 + \Delta I) &\leq I \leq +(2 + \Delta I); \\
 -(2 + \Delta U) &\leq U \leq +(2 + \Delta U); \\
 -(2 + \Delta R) &\leq R \leq +(2 + \Delta R); \\
 -(2 + \Delta V) &\leq V \leq +(2 + \Delta V).
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

Для моделювання нагріву дослідного ТЕП при реалізації робочого циклу використовувався регресійний аналіз [10], відповідно якому визначалися коефіцієнти апроксимуючого полінома $S_{TЧp}$ вигляду

$$\begin{aligned}
 S_{TЧp} &= b_0 + b_1 I + b_2 U + b_3 R + b_4 V + \dots + \\
 &+ b_n N + b_{12} I U + \dots + b_{(n-1)n} N_{n-1} N_n + \\
 &+ b_{11} I_1^2 + b_{22} U_2^2 + \dots + b_{nn} N_n^2 + \dots
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

Прикладний шлях вибору математичного опису враховував вимоги до точності апроксимації, щоб в пристрої технічної діагностики можна було визначити можливі несправності обладнання з оповіщенням цієї події всім зацікавленим операторам без втручання в технологічний процес експлуатації ТЕП. Оскільки необхідну точність апроксимації можна досягти за рахунок процедури вибору порядку регресійного аналізу, то разом з цим була передбачена потреба обчислювальної техніки для практичного використання математичних описів в умовах експлуатації реальних РО. Виходячи з вищесказаного, задовільну точність вдалося отримати за допомогою регресійної моделі другого порядку. Для даного полінома був виконаний розрахунок коефіцієнтів на

підставі результатів вимірювань більше 96 груп вхідних величин.

Коефіцієнти апроксимуючого полінома мали величини, що представлені в таблиці 2.

На рисунку 4 ілюструються усереднені дані експериментів $S_{Tч}$ і розраховані $S_{Tчр}$ методом регресійного аналізу. З огляду на особливості формування сигналів перетворювача «Т-Ч», всі розрахункові величини округлювалися до цілочисельних значень з точністю ± 1 Гц. розбіжність між $S_{Tчр}$ та $S_{Tч}$ склало 5,4%. Оскільки не можна встановити, чи залежить вид розподілу помилки вимірювань від значень вхідних параметрів, супутніх даними вимірів, чи постійні параметри цього розподілу або змінюються від точки до точки, додатково було проведено аналіз залишків між $S_{Tчр}$ та $S_{Tч}$. Виявилось, що помилки вимірювань у всьому інтервалі зміни значень вихідної величини виявилися досить рівномірно розподілені і при середньоквадратичному відхиленні, що досягає 14 Гц, межа помилки контрольованої реальної температури не перевищувала $\pm 2^\circ\text{C}$, що говорить про задовільний опис робочого циклу і можливості використання його для подальших досліджень.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів апроксимуючого полінома

Коефіцієнти регресії	Величина коефіцієнта	Коефіцієнти регресії	Величина коефіцієнта	Коефіцієнти регресії	Величина коефіцієнта
b_0	419,24	b_{11}	47,19	b_{12}	-26,37
b_1	75,83	b_{22}	33,47	b_{13}	-15,04
b_2	37,54	b_{33}	58,32	b_{14}	-52,54
b_3	64,78	b_{44}	35,87	b_{23}	14,74
b_4	-58,37				

Дані реалізації плану експериментів і моделювання робочого циклу електродвигуна за допомогою лабораторного стенду ілюструє рисунок 4.

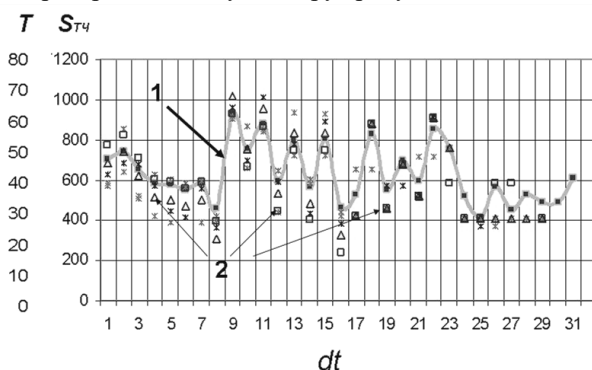


Рис. 4 Результати контролю і моделювання нагріву корпусу ТЕП при експериментальному робочому циклі: 1 моделювання; 2 експеримент

Дослідження і аналіз дистанційного засобу контролю нагріву ТЕП

Оскільки в поліномі сила впливу кожного фактора оцінюється коефіцієнтом при ньому, але додаткові компоненти рівняння регресії дозволяють виділяти перехідні області механізму процесу нагріву ТЕП та інтерпретувати події на контрольованому об'єкті, що важливо при ідентифікації поломок, то був виконаний аналіз компонентів залежності (29). Сімейства імпульсних кривих (рис. 5), що відображають параметричну чутливість теплових процесів до всіх вибраних вхідних величин, допомагають ідентифікувати градієнти температури з конкретними несправними частинами обладнання.

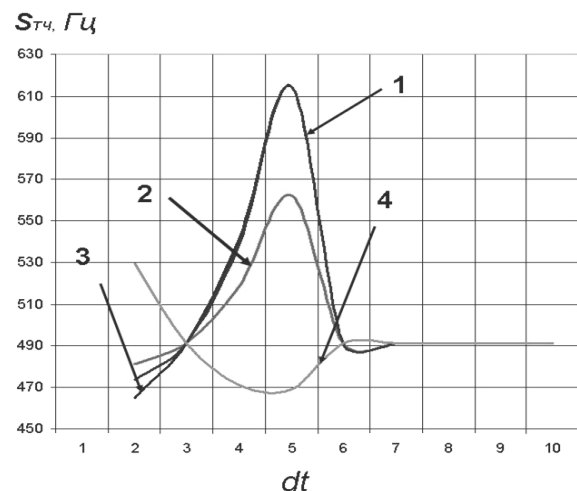


Рис. 5 Аналіз параметричної чутливості теплових процесів при імпульсному варіюванні вхідних величин: 1 – струм; 2 – напруга; 3 – навантаження; 4 – охолодження

Скориставшись виразами (4) і (26) за допомогою (29) додатково була отримана допустима варіативна зона (рис. 6) для діагностичного контролю нормованого нагріву частин ТЕП на досліджених інтервалах робочого циклу.

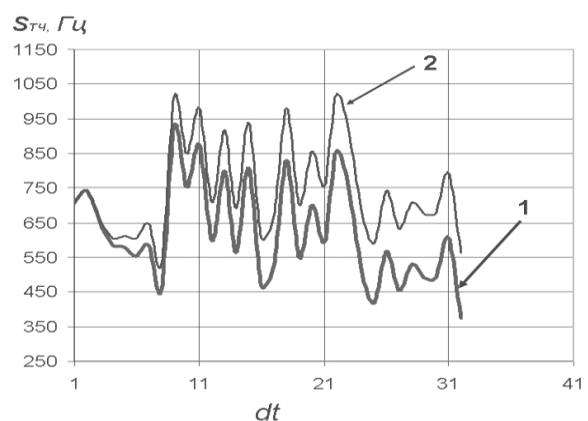


Рис. 6 Варіювальна зона нормованого нагріву ТЕП: 1 – нижній рівень; 2 – верхній рівень

З рисунка 6 видно, що діагностична система контролю нагрівання частин ТЕП за межами, особливо верхнього рівня нормованої варіативної зони, кожну подію буде розцінювати, як неполадку. Доповнивши систему контролю додатковими диференціальними датчиками для вимірювання градієнта температури в зонах «корпус-підшипник», «корпус-клеми», «корпус-ізоляція» та ін., можна підвищити селективні властивості пристрою при ідентифікації неполадок в частинах силового електрообладнання.

Застосування отриманих результатів в експериментальному комплекті приладу для діагностичного контролю ТЕП за допомогою спектрографа ілюструють рисунки 7 і 8 [12].

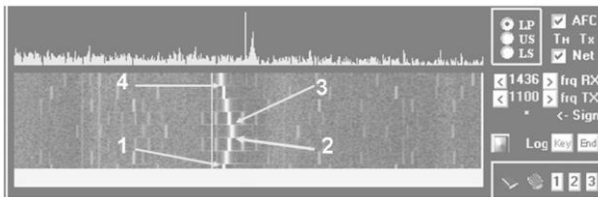


Рис. 7 Спектрограма контролю зміни температури компонента ТЕП: 1 – 2 – нагрів; 2 – 3 – сталий режим; 3 – 4 – охолодження

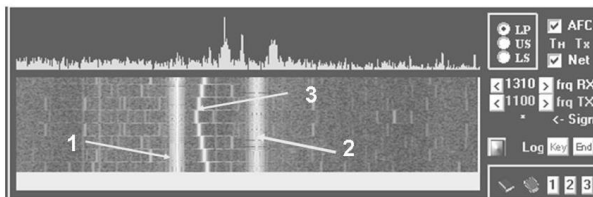


Рис. 8 Спектрограма контролю температури з електронними мітками прийнятого допустимого інтервалу варіювання параметра: 1, 2 – мітки нижнього і верхнього рівнів; 3 – контрольований параметр

Підтвердженням надійності використання даного комплексу діагностичного приладу в умовах перешкод від різних джерел може служити ілюстрація на рисунку 9 отримана при рівні інформаційного сигналу $-13,7\text{dB}$, що відповідає умовам, коли перешкоди в 5,3 рази переважали над корисним сигналом [13].

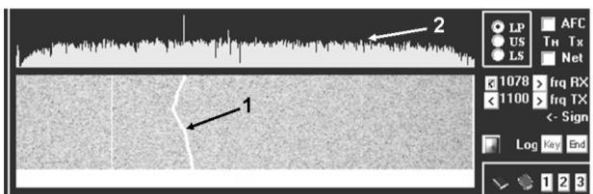


Рис. 9 – Спектрограма контролю температури в умовах перешкод: 1 – контрольований параметр; 2 – рівень перешкод в смузі частот спектрального контролю

Аналіз експериментальних спектрограм показав також, що на мітках меж варіативної зони (рис. 8) допустимих величин вихідної ординати може

виникати зниження точності апроксимації, яка негативно позначається на результатах діагностики. Очевидний шлях вирішення цієї проблеми підвищенням порядку полінома може привести до зайвої громіздкості математичного виразу (29), але зазначений недолік можна також усунути, якщо підвищити рівень апроксимації моделі лише на характерних інтервалах робочого циклу з урахуванням

$$\begin{aligned} (2 + \Delta I) &\leq I \leq I_m; \\ (2 + \Delta U) &\leq U \leq U_m; \\ (2 + \Delta R) &\leq R \leq R_m; \\ (2 + \Delta V) &\leq V \leq V_m, \end{aligned} \quad (30)$$

де I_m , U_m , R_m , V_m – гранично допустимі значення технологічних величин. Крім цього, точність ідентифікації діагностичного пристрою можна поліпшити, ретельніше вибираючи масштаб нормованого сигналу U_{MV} . На експериментальному стенді настройка U_{MV} дозволяла варіювати чутливість перетворювача Т-Ч від 3 до 17 Гц при зміні температури на $\pm 1^\circ\text{C}$, знижуючи тим помилки, особливо, у верхнього прикордонного рівня допустимої зони варіювання ординати відгуку (рис. 8) [14].

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що подальші дослідження розглянутого комплексу приладу для більш повного виявлення математичних і електронних можливостей апроксимації відомих неполадок ТЕП з застосуванням інших прийомів полиномиального моделювання і дистанційних засобів контролю параметрів РО, залишаються актуальними завданнями в технічній діагностиці електротранспорту. Очевидно, що на основі найбільш якісних апроксимаційних виразів можна створювати ефективні засоби нейромережевої діагностики всього рухомого складу, які містять електромеханічне і мехатронне обладнання, що серійно випускається, в якому прогноз можливих дефектів можна буде виконувати без штатного персоналу транспортних підприємств, постійно розширюючи електронну бібліотеку можливих поломок [12].

Висновок

На підставі аналізу процесів нагріву частин силового електроприводу різного призначення при його експлуатації розглянуті прийоми математичного опису подій, що розкривають взаємозв'язок електричних величин з генерацією тепла, рівень якого можна вимірювати за допомогою диференціального перетворювача «температура-частота».

Експериментальна реалізація на дослідній установці робочого циклу міського

електротранспорту, використана для отримання регресійного математичного опису процесу нагріву частин силового обладнання, дозволила виявити можливості застосування таких рівнянь для діагностики типових несправностей електроприводів за даними найбільшого навантаження на ділянках контактної мережі, яка вимірюється приладом, розміщеним на тяговій підстанції.

Дослідження математичних описів і комплексу експериментального пристрою для аналізу вихідної ординати процесу нагріву ТЕП за допомогою спектроаналізатора підтверджують можливість використання дистанційних засобів контролю технологічних величин в локальних і нейронних діагностичних системах визначення справності силового електрообладнання МЕТ експлуатованого на маршрутах.

Література

1. Яковлев, В. Ф. *Диагностика электронных систем автомобиля [Текст]* / В. Ф. Яковлев. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 272 с.
2. Сипайлов, Г. А. *Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах [Текст]* / Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан. – М.: Высшая школа, 1989. – 239 с.
3. Исмаилов, Ш.К. *Тепловое состояние тяговых и вспомогательных электрических машин электровозов постоянного и переменного тока [Текст]* / Ш. К. Исмаилов. – Омск: ОмГУПС, 2001. – 76 с.
4. Максимов, А. Н. *Городской электротранспорт. Троллейбус [Текст]* / А. Н. Максимов. – М.: Академия, 2004. – 249 с.
5. *Проектирование тяговых электрических машин [Текст]* / Под ред. М. Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
6. Алексеев, А. Е. *Тяговые электрические машины и преобразователи [Текст]* / А. Е. Алексеев. – Л.: Энергия, 1967. – 432 с.
7. Есаулов, С. М. *Проектирование эталонной модели для системы диагностирования оборудования на транспорте [Текст]* / С.М. Есаулов, О.Ф. Бабичева, В.М. Шавкун // *Восточно-европейский журнал передовых* – Вып.6/2(36). – 2008. – С. 39 – 42.
8. 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.
9. Скляр, Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд.2-е испр.: Пер.с англ. [Текст]* / Б. Скляр – М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. – 1104 с.
10. Шашков, В. Б. *Прикладной регрессионный анализ. Многофакторная регрессия: Учебное пособие [Текст]* / В. Б. Шашков. – Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. – 363 с.
11. Гмурман, В. Е. *Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]* / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2001. – 479 с.
12. Zieme, R. E. and Peterson, R.I. (1985) Digital Communications fnd Spread Spectrum system. Macmillan Publishing Company, Inc., New York.
13. Korn, I. (1985) Digital Communications. Van Nostrand Reinhold Company, Inc., New York.
14. Prabhu, V. K. and Salz, J. (1981). On the Performance of Phase-Shift Keying Systems. *Bell Syst. Tech.J*, 60, December, 2307-2343
15. Скалозуб, В.В. *Нейросетевые модели диагностики электродвигателей постоянного тока [Текст]* / В. В. Скалозуб, О. М. Швец // *ИКСЗТ*, 2009. – №4. – С. 7 – 11.

References

1. Yakovlev, V.F. (2003). *Diagnostics of automobile electronic systems*. Moscow: SOLON-Press, 272.
2. Sipailov, G. A., Sannikov, D. I., Zhadan, V. A. (1989). *Thermal, hydraulic and aerodynamic calculations in electric cars*. Moscow: High School, 239.
3. Ismailov, S. K. (2001). *Thermal condition of traction and auxiliary electric machines of electric locomotives of direct and alternating current*. Omsk: OmGUPS, 76.
4. Maksimov, A. N. (2004). *Urban electric transport. Trolley bus*. Moscow: Academy, 249.
5. *Design of electric traction machines*. (1976). Ed. M.D. Nahodkina. Moscow: Transport, 624.
6. Alekseev, A. E. (1967) *Traction electrical machines and converters*. Leningrad: Energy, 432.
7. Esaulov, S.M., Babicheva, O.F., Shavkun, V. M. (2008). *Planning of standard model for the system of diagnosticating of equipment on a transport*. *East is the European magazine of front-rank technologies*, 6/2(36), 39 – 42.
8. Esaulov, S.M., Babicheva, O.F., Lukashova, N.P. (2009). *Planning of components for the systems of the automatic diagnosticating of transport*. *East is the European magazine of front-rank technologies*, 5/3(41), 28 – 32.
9. Sklar, B. (2007). *Digital communication. Theoretical foundations and practical application*. Izd.2-efr. : Per. s Eng. Moscow: Williams Publishing House, 1104 p.
10. Gmurman, V. Y. (2001). *The theory of allegiances and mathematical statistics*. Moscow: High School, 479.
12. Zieme, R. E. and Peterson, R.I. (1985) *Digital Communications fnd Spread Spectrum system*. Macmillan Publishing Company, Inc., New York.
13. Korn, I. (1985) *Digital Communications*. Van Nostrand Reinhold Company, Inc., New York.
14. Prabhu, V. K. and Salz, J. (1981). *On the Performance of Phase-Shift Keying Systems*. *Bell Syst. Tech.J*, 60, December, 2307-2343
15. Skalozub, V. V. (2009). *Shvets OM Neural network models for diagnostics of direct current electric motors*. // *IKSZT*, No. 4. 7 - 11.

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

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

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

CONTROL AND MODELING PARAMETERS FOR HEAT DIAGNOSTICS OF POWER ELECTRICAL EQUIPMENT FAILURE

S. Yesaulov, O. Babicheva, M. Kovalik

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

It has been considered the heat processes of traction electric engines parts in the maintenance and possible ways of heat generation modeling, which intensity is interconnected with operating physical quantities and possible components failure of traction electric drives in urban electric transport.

The reasonable choice of input parameters, which control is possible with the help of remote techniques, located outside the mobile vehicle, was used in the development of pilot plant. By means of experimental equipment set containing electromechanical device in the form of a traction drive and brake, means for setting, regulation and control of technological input values and experimental device for measuring heating temperature electric engine with a given accuracy, it was realized the prepared experiment plan, implemented the variation of thermal processes in possible duty cycles of traction power equipment occurring on real urban routes.

By means of differential electronic transducer “temperature-frequency” (T–F), the results of changing output ordinate were recorded and used in polynomial modeling of heating process in electric engine. The regression second order model, describing the thermal process, a spectral analyzer for record and visual control of output ordinate, were used for studying heat generation in laboratory-like environments and for evaluating the possibility of using standard and experimental control device for real traction substations of urban electric transport during remote technical diagnostics equipment according to its heating temperature. Using experimental differential electronic transducer T–F with a modulator and short mathematical description of heating process of traction electric drive allow to identify thermal processes with using of computing tools, which are different in few resources.

It has been considered hardware-based ways to achieve the desired measuring set accuracy of the output ordinate and a program solution variant of the spectral low-frequency signal analyzer, which realization is possible by means of popular microcontrollers.

The results have confirmed the appropriateness of studying thermal processes in electrical equipment and devices for synthesis of local compact remote equipment, which allows to create technical diagnostics devices and neural networks for possible failures evaluation, determined by the heat gradient in parts of power equipment of urban electric vehicles, operated on various routes and in different conditions.

Keywords: transport, power equipment, modeling, diagnostics, remote control, modulator.