

**КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ В MatLab ЕЛЕКТРОПРИВОДА
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ СЕРІЇ Lenze 530 З ВІД'ЄМНИМ
ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ ЗА НАПРУГОЮ ЯКОРЯ**

***І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, кандидати технічних наук
Національний університет біоресурсів
і природокористування України
А.В. Торопов, кандидат технічних наук
ТОВ "ЦІТ Альтера"***

Наведено модель електропривода постійного струму з тиристорним регулятором напруги Lenze 534 з від'ємним зворотним зв'язком за напругою якоря та результати досліджень електромеханічних характеристик.

Перехідний процес, напівпровідниковий перетворювач напруги, зворотний зв'язок, П-регулятор, електромеханічна характеристика, модель.

Автори публікують серію статей, в яких дано рекомендації з отримання інформації про роботу в перехідних режимах регульованого електропривода на базі сучасних напівпровідникових перетворювачів напруги, зокрема привода постійного струму серії Lenze 530. Дослідження приводних характеристик рекомендується проводити на базі комп'ютерної моделі в системі MatLab. Регулятори напруги серії Lenze 530 можуть працювати з від'ємним зворотним зв'язком або за швидкістю, або напругою якоря (IR- компенсація) [3]. У роботі [2] наведена модель електропривода з тиристорним регулятором напруги Lenze 534 і від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю та результати досліджень роботи електропривода. Ця робота присвячена моделюванню електропривода з регулятором Lenze 534 і від'ємним зворотним зв'язком за напругою якоря.

Мета досліджень – отримання достовірних характеристик електропривода постійного струму з напівпровідниковим перетворювачем напруги серії Lenze 530 у перехідних процесах на комп'ютерній моделі в системі MatLab при значному скороченні часу і зменшенні матеріальних затрат.

Матеріали та методика досліджень. Аналіз приводних характеристик проводився на основі положень теорії електропривода з використанням комп'ютерної моделі в системі MatLab.

Результати досліджень. Двоконтурна система "тиристорний перетворювач напруги – двигун" з від'ємними зворотними зв'язками за струмом і напругою якоря наведена на рис. 1. Введенням у систему електропривода зворотного зв'язку за струмом досягається обмеження струму і моменту, а за напругою якоря – автоматичну стабілізацію швидкості.

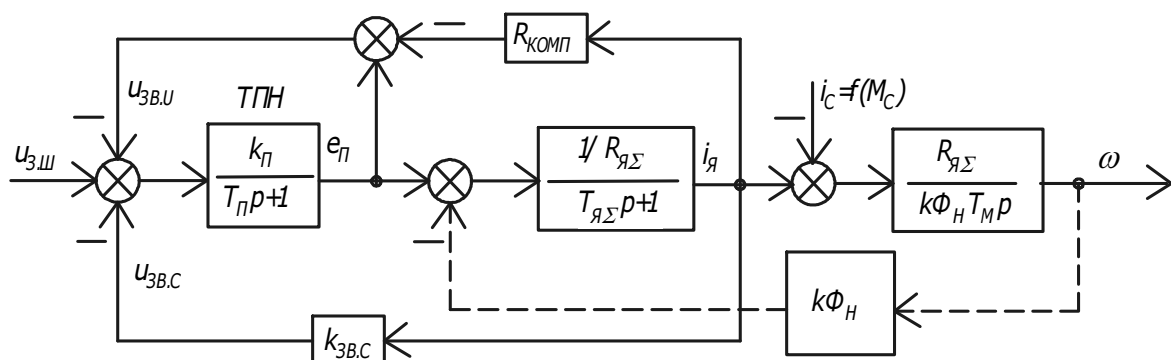


Рис. 1. Двоконтурна структурна схема електропривода в системі ТПН-Д з від'ємними зворотними зв'язками за струмом і напругою якоря:

$u_{з.ш}$ – задаючий сигнал швидкості; $u_{зв.у}$ – сигнал зворотного зв'язку за напругою якоря; $u_{зв.с}$ – сигнал зворотного зв'язку за струмом; $R_{комп}$ – компенсаційний опір; $R_{я\sigma}$ – сумарний опір якорного кола; ТПН – тиристорний перетворювач напруги; k_{π} – коефіцієнт підсилення ТПН; $k\Phi_H$ – номінальний магнітний потік двигуна; $k_{зв.с}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом; T_{π} , $T_{я\sigma}$ – електромагнітні сталі часу ТПН та якорного кола; T_M – електромеханічна стала часу; e_{π} – ЕРС тиристорного перетворювача напруги; $i_{я}$, i_c – миттєві значення струму якорного кола та струму, пропорційного моменту статичного опору робочої машини; p – оператор Лапласа

Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом $k_{зв.с}$ можна визначити за максимальною напругою завдання швидкості $U_{з.ш.макс}$ і максимальним (пусковим) струмом двигуна:

$$k_{зв.с} = \frac{U_{з.ш.макс}}{\lambda_I I_H}, \quad (1)$$

де λ_I – допустима кратність пускового струму; I_H – номінальний струм електродвигуна.

Стабілізація ЕРС ТПН здійснюється шляхом подачі узгодженого від'ємного сигналу зворотного зв'язку $u_{зв.у} = e_{\pi} - i_{я}R_{комп}$ на вхід задаючого сигналу швидкості. Змінюючи величину $R_{комп}$, змінюють величину коефіцієнта зворотного зв'язку. При збільшенні навантаження напруга на затискачах двигуна знижується за рахунок втрат в якорному колі. При цьому збільшуються втрати напруги на опорі $R_{комп}$, сигнал з якого віднімається від e_{π} та узгоджено подається на вхід $u_{з.ш}$. Напруга на виході ТРН автоматично збільшується.

Згідно зі структурною схемою електропривода (див. рис. 1) можна записати таку систему рівнянь електромеханічної характеристики:

$$\begin{cases} k_{\pi}[u_{з.ш} - (e_{\pi} - i_{я}R_{комп}) - k_{зв.с}i_{я}] = (T_{\pi}p + 1)e_{\pi}; \\ e_{\pi} - k\Phi_H\omega = R_{я}(T_{я\sigma}p + 1)i_{я}. \end{cases} \quad (2)$$

Після перетворень рівнянь (2) одержимо вирази динамічних електромеханічної і механічної характеристик електропривода:

$$\omega = \frac{k_{\pi}u_{з.ш}}{k\Phi_H[(T_{\pi}p+1)+k_{\pi}]} - \frac{R_{я}[(T_{\pi}p+1)+k_{\pi}](T_{я\sigma}p+1)+k_{\pi}k_{зв.с}-k_{\pi}R_{комп}}{k\Phi_H[(T_{\pi}p+1)+k_{\pi}]} i_{я}; \quad (3)$$

$$\omega = \frac{k_{\pi} u_{\Sigma \Sigma}}{k_{\Phi_H} [(T_{\pi} p + 1) + k_{\pi}] - \frac{R_{\Sigma} [(T_{\pi} p + 1) + k_{\pi}] (T_{\Sigma} p + 1) + k_{\pi} k_{\Sigma \Sigma} - k_{\pi} R_{\text{КОМП}}}{(k_{\Phi_H})^2 [(T_{\pi} p + 1) + k_{\pi}]} m. \quad (4)$$

При $p=0$ рівняння (3) і (4) являють собою рівняння статичних електромеханічної і механічної характеристик:

$$\omega = \frac{k_{\pi} u_{\Sigma \Sigma}}{k_{\Phi_H} (k_{\pi} + 1)} - \frac{R_{\Sigma} + k_{\pi} k_{\Sigma \Sigma} - k_{\pi} R_{\text{КОМП}}}{k_{\Phi_H} (k_{\pi} + 1)} i_{\Sigma}; \quad (5)$$

$$\omega = \frac{k_{\pi} u_{\Sigma \Sigma}}{k_{\Phi_H} (k_{\pi} + 1)} - \frac{R_{\Sigma} + k_{\pi} k_{\Sigma \Sigma} - k_{\pi} R_{\text{КОМП}}}{(k_{\Phi_H})^2 (k_{\pi} + 1)} m. \quad (6)$$

Жорсткість механічних характеристик у цій замкненій системі залежить від величини зворотних зв'язків, отже від коефіцієнтів $k_{\Sigma \Sigma}$ і $R_{\text{КОМП}}$. Так, при $R_{\Sigma} = k_{\pi} k_{\Sigma \Sigma} - k_{\pi} R_{\text{КОМП}}$ характеристика має нескінченно велику жорсткість $\beta = \infty$, а при $R_{\Sigma} < k_{\pi} k_{\Sigma \Sigma} - k_{\pi} R_{\text{КОМП}}$ – додатну жорсткість $\beta > 0$.

У MatLab була створена модель електропривода, який складається з ТПН Lenze 534 і двигуна постійного струму незалежного збудження МИ32 314-02, з від'ємними зворотними зв'язками за струмом і напругою якоря (рис 2). Технічні характеристики вказаного двигуна наведено в [2].

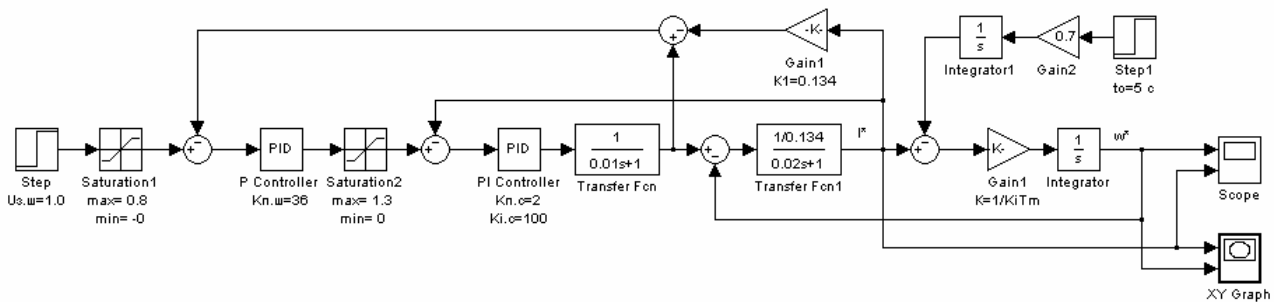


Рис. 2. Комп'ютерна модель електропривода постійного струму з від'ємним зворотним зв'язком за струмом та напругою якоря

Вхідні параметри моделі задаються у відносних одиницях. Для перекладення їх з відносних одиниць в іменовані необхідно перемножити отримані результати на відповідні базові величини U_H , I_H , R_H та ω_0 .

У наведеній моделі блок Transfer Fcn моделює ланку якоря двигуна з $T_{\Sigma} = 0,02$ с та коефіцієнт підсилення $1/R_{\Sigma}^*$, а блок Transfer Fcn1 – ланку тиристорного перетворювача напруги з $T_{\pi} = 0,01$ с. Блоки Integrator і підсилювач Gain з коефіцієнтом підсилення $K = 1/k_I T_M$ реалізують рівняння руху електропривода. Струм навантаження формується блоками Step1, Gain2 з коефіцієнтом підсилення $K_2 = 0,7$ та Integrator1 як інтеграл від постійного сигналу.

Для досягнення високої точності регулювання швидкості виникла необхідність одночасного регулювання струму (моменту). При цьому використана системи підпорядкованого керування з певними стандартними настройками.

Основою першого контуру є ПІ-регулятор і ланки ТПН та якоря двигуна, які охоплені від'ємним зворотним зв'язком за струмом якоря. Зазви-

чай регулятор струму налаштовують на технічний оптимум. При цьому згідно з теорією автоматичного керування [1, 4] необхідно, щоб передаточна функція регулятора мала вигляд:

$$W_{P.C}(p) = \frac{T_{\Sigma}p+1}{T_{\Pi}p}. \quad (7)$$

Згідно з (7) коефіцієнти підсилення регулятора струму мають значення:

- коефіцієнт інтегрального підсилення

$$k_{I.C} = 1/T_{\Pi} = 1/0,01 = 100;$$

- коефіцієнт пропорційного підсилення

$$k_{P.C} = T_{\Sigma}/T_{\Pi} = 0,02/0,01 = 2.$$

Другий контур з від'ємним зворотним зв'язком за напругою якоря налаштований також на технічний оптимум і має пропорційний П-регулятор. Коефіцієнти визначено за передаточною функцією регулятора швидкості [1, 4]:

$$W_{P.ш.}(p) = \frac{T_M}{2T_{\Pi}}. \quad (8)$$

Згідно з (8) коефіцієнт підсилення регулятора швидкості:

$$k_{P.ш.} = 0,72/(2 \cdot 0,01) = 36.$$

Керування моделлю здійснює блок Step, який задає напругу на виході TRN. Модель має два обмежувальних блоки Saturation. Saturation1 призначений для обмеження максимальної $n_{\max}$ і мінімальної $n_{\min}$ швидкості, Saturation2 – для обмеження максимального струму $I_{\max}$. Для візуалізації електромеханічної (механічної) характеристики використано блок XYGraph, а на осцилографі Scope можна спостерігати за зміною швидкості та струму якоря в часі.

Результати моделювання роботи електропривода наведено на рис. 3 та 4.

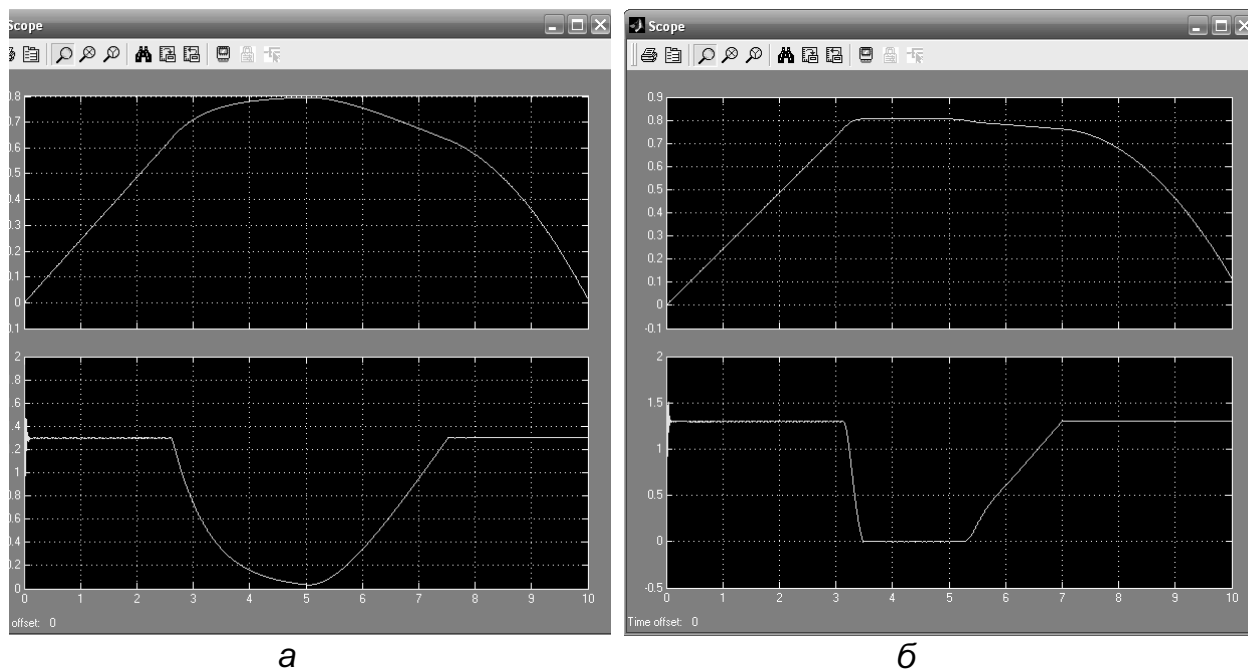


Рис. 3. Графіки миттєвих значень швидкості (верхній) та струму (нижній):

a – $R_{\text{комп}} = 0,034$ в.о.; *б* – $R_{\text{комп}} = 0,134$ в.о.

Процес роботи двигуна змодельований так. Запуск відбувається без навантаження (див. рис 3), а через 5 с починає плавно зростати навантаження. Згідно з завданням встановлено обмеження: швидкості до $0,8\omega_0$, а максимального струму – $1,3I_H$. Встановлені граничні значення модель точно відслідковує, що видно з рис. 4. На початку пуску, коли різниця між заданим та дійсним значеннями швидкості є досить великою, регулятор швидкості переходить у режим "насичення". При цьому сигнал завдання за струмом є сталим і в системі працює тільки контур регулювання струму якоря. Завдяки ПІ-регулятору значення струму залишається незмінним, а швидкість лінійно зростає (див. рис.3). Коли П-регулятор швидкості (напруги) виходить з "насичення", система керування фактично стає двоконтурною: із внутрішнім контуром регулювання струму та зовнішнім контуром регулювання напруги. При цьому жорсткість характеристик підвищується, але вони не стають абсолютно жорсткими через наявність П-регулятора швидкості. Пусковий струм розпочинає спадати, а система стабілізувати швидкість на заданому рівні. Коли навантаження на двигун стає більшим його максимального моменту, двигун починає зупинятися та знову переходить у режим стабілізації струму.

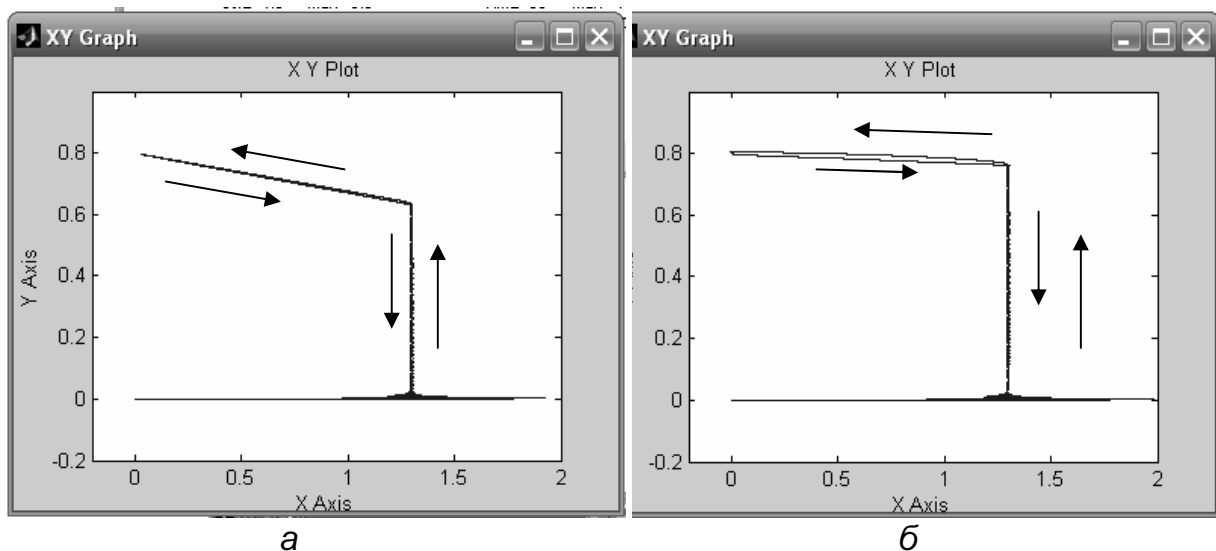


Рис. 4. Електромеханічні характеристики електропривода:

а – $R_{КОМП} = 0,034$ в.о.; *б* – $R_{КОМП} = 0,134$ в.о.

Пояснити отримані електромеханічні характеристики (див. рис. 4) можна так. При пуску двигуна відбувається незначне коливання пускового струму, потім він утримується на максимально допустимому рівні, а швидкість двигуна збільшується. Коли струм стає меншим максимального, швидкість лінійно збільшується до максимально допустимої $0,8\omega_0$. При збільшенні навантаження відбувається зворотний процес. На рис. 4, б добре видно вплив динамічного моменту при розгоні двигуна (верхня крива електромеханічної характеристики).

Моделювання проведено при двох значеннях коефіцієнтів зворотного зв'язку за напругою якоря, який визначається опором $R_{КОМП}$ (коефіцієнт компенсації). Як видно з рис. 4 жорсткість електромеханічної характе-

ристики збільшується при збільшенні коефіцієнтів зворотного зв'язку, що підтверджує раніше наведені теоретичні викладки. Коефіцієнт компенсації в електроприводі серії Lenze 530 установлюється регулятором "I×R" на лицевій панелі пристрою.

На рис. 5 наведено електромеханічну характеристику, яка знята на лабораторній установці. Аналіз графіків підтверджує адекватність результатів, отриманих на моделі і реальній установці.

Висновки

Створена в MatLab комп'ютерна модель електропривода, що складається з ТПН серії Lenze

530 і двигуна постійного струму незалежного збудження, в якій передбачено обмеження максимальної і мінімальної швидкостей та максимального струму, стабілізацію заданої швидкості за рахунок від'ємного зворотного зв'язку за напругою якоря. Аналіз результатів досліджень підтвердив адекватність моделі реальним характеристикам електропривода.

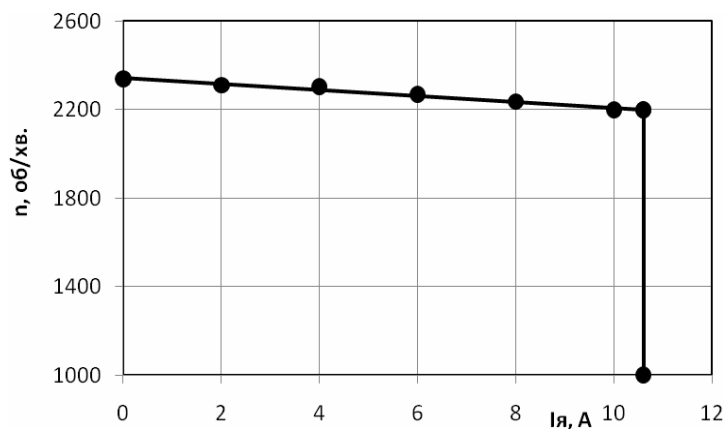


Рис. 5. Електромеханічна характеристика, знята на лабораторній установці ($R_{\text{комп}}=0,134$ в.о.)

Список літератури

1. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0: учеб. пособие / С.Г. Герман-Галкин. – СПб: КОРОНА принт, 2002. – 304 с.
2. Голодний І.М. Дослідження на моделі в MatLab характеристик електропривода постійного струму серії Lenze 530 / І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, А.В. Торопов // Науковий вісник НУБіП України. Серія "Техніка та енергетика АПК". – 2013. – Вип. 184, ч. 1. – С. 120-125.
3. Инструкция по эксплуатации электропривода постоянного тока серии Lenze 530: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.lenze.org.ua/pdf/530_Speed_controllers_1202_EN.pdf.
4. Регульований електропривод. Теорія. Моделювання: [підруч. для студ. вищ. навч. закладів] / [І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, М.В. Синявський та ін.]; за ред. І.М. Голодного. – К.: Аграр Медіа Груп, 2011. – 513 с.

Приведена модель електропривода постійного тока с тиристорным регулятором напряжения Lenze 534 с отрицательной обратной связью по напряжению якоря и результаты исследований электромеханических характеристик.

Переходной процесс, тиристорный преобразователь напряжения, обратная связь, П-регулятор, электромеханическая характеристика, модель.

DC drive model with thyristor voltage regulator Lenze 534 and results of investigations of electromechanical properties are presented.

Transition process, semiconductor voltage converters, feedback, P-controls, electromechanical characteristics, model.

УДК 621.384.3

РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ДЕФЕКТНИХ КОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ З УРАХУВАННЯМ ВЕЛИЧИНИ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ

***М.Т. Лут, А.В. Міщенко, кандидати технічних наук
Ю.В. Смаглюк, інженер***

Проведено дослідження впливу теплових потоків у зоні дефектного контактного з'єднання на температуру його поверхні. Встановлено залежність поверхневої температури дефектного лінійного контактного з'єднання від питомого опору провідника та умов теплообміну з навколишнім середовищем.

Електричний струм, електричний опір, температура, тепловий потік, теплопровідність, тепловіддача.

Тепловізори та пірометри дають нові можливості дистанційного контролю технічного стану силового електрообладнання, зокрема виявлення дефектів струмопровідних елементів електричних апаратів. Тепловізійне обстеження контактних з'єднань має дві суттєві переваги перед іншими способами діагностування:

- проводиться на працюючому обладнанні без зняття напруги;
- дозволяє виявляти дефекти на ранній стадії їх розвитку.

Сучасна тепловізійна техніка здатна реєструвати перегрівання обстежуваного об'єкта від 0,1 °С, що дозволяє виявити дефекти контактних з'єднань електрообладнання при струмах 2–5 % від номінального. Експертами рекомендується виконувати перерахунок отриманого при обстеженні значення перевищення температури над нормованим [5].

Мета досліджень – встановлення взаємозв'язку температури поверхні дефектного контактного з'єднання з його електрофізичними характеристиками та умовами теплообміну з навколишнім середовищем.

Матеріали і методика досліджень. Оцінка теплового стану дефектних контактних з'єднань при різних струмах навантаження проводилась з використанням положень чинних нормативних документів у галузі випробування електрообладнання.

Використовуючи положення теорії теплообміну в твердих тілах і газах, визначали залежність температури поверхні дефектного контактного