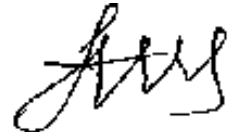


**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Жорняк Людмила Борисівна



УДК 621.316.342.2

**ПРИСКОРЕННЯ ТЕПЛОВИХ ВИПРОБУВАНЬ КОМПЛЕКТНИХ  
ПРИСТРОЇВ РОЗПОДІЛЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

Спеціальність 05.09.01- Електричні машини і апарати

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2004

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі електричних апаратів Запорізького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України, м. Запоріжжя

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
**Рассальський Олександр Миколайович**,  
Запорізький національний технічний університет,  
завідувач кафедри електричних апаратів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Сосков Анатолій Георгійович**,  
Харківська національна академія міського господарства, м. Харків,  
завідувач кафедри електротехніки;  
доктор технічних наук, професор  
**Федоров Михайло Михайлович**,  
Донецький національний технічний університет, м. Донецьк,  
професор кафедри електромеханіки і теоретичних основ електротехніки.

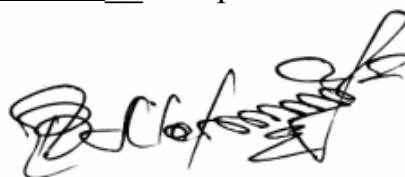
Провідна установа: Національний університет “Львівська політехніка”, Міністерство освіти і науки України, м. Львів

Захист відбудеться « 25 » листопада 2004 р. о 12 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий “ 5 ” жовтня 2004р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Марков В.С.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Широке застосування в енергоустановках різних конструкцій комплектних розподільних пристроїв (КРП) і комплектних трансформаторних підстанцій (КТП) потребує підвищення вимог щодо забезпечення їх довгострокової безаварійної роботи, а також до функціональних характеристик та масо - габаритних і вартісних показників комплектних пристроїв (КП) у цілому. Виконання цих вимог значною мірою повинне забезпечуватися коректно проведеними розрахунками теплових режимів КП та ефективними методиками теплових випробувань у процесі розробки цих пристроїв. Проведення випробувань таких енергоємних пристроїв є достатньо високовартісним процесом, пов'язаним із значними витратами електроенергії та робочого часу. Значні витрати часу зумовлені конструктивними особливостями пристроїв даного типу, в яких величини сталої часу складають від десятків хвилин до декількох годин. Зокрема, час, що витрачається тільки на один цикл випробувань, може сягати 5...8 годин, а для деяких типів КРП - навіть 12 годин. Скорочення часу проведення різних режимів теплових випробувань на одному устаткуванні є актуальною задачею енергозбереження та підвищення продуктивності випробувань і дозволяє одержати значний економічний ефект при їх промисловому впровадженні.

**в'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу було виконано в рамках науково-дослідних робіт кафедри електричних апаратів Запорізького національного технічного університету, тематика яких безпосередньо пов'язана з держбюджетною темою № 05216 «Підвищення надійності, довговічності і техніко-економічних показників електричних апаратів» з державною реєстрацією № 01860124728 (1990 р.) (здобувач - виконавець); держбюджетною темою № 05210 «Дослідження і розробка електричних апаратів», затвердженою на засіданні НТС ЗНТУ 18.10.2000 р. (здобувач - виконавець).

**Мета і задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи – скорочення часу проведення теплових випробувань, енергозбереження та підвищення продуктивності випробувань комплектних пристроїв розподілу електроенергії.

Для досягнення поставленої мети в дисертації необхідно вирішити такі науково-технічні задачі:

- Експериментальним шляхом дослідити нестационарний тепловий режим шаф розподільних пристроїв низької напруги (РПНН).
- Розробити математичну модель нестационарного природного конвективного теплообміну струмопровідних елементів з оточуючим їх повітрям у шафах розподільних пристроїв, що дозволяє розрахувати параметри теплообміну.
- Уточнити аналітичні залежності для параметрів нестационарного теплообміну струмопровідного контуру в низьковольтних комплектних пристроях.
- Розробити методику розрахунку часових параметрів нагрівання комплектних пристроїв при плануванні прискорених теплових випробувань.

*Об'єктом дослідження є низьковольтні розподільні шафи пересувних комплектних трансформаторних підстанцій блокового типу.*

*Предметом дослідження є нестационарні режими теплообміну струмопровідних елементів розподільних шаф низької напруги комплектних трансформаторних підстанцій.*

*Методи дослідження.* Для одержання функціональних залежностей, що характеризують нестационарний тепловий режим РПНН, використовувалися методи експериментального дослідження, для одержання основних рівнянь математичної моделі нестационарного теплообміну струмопровідних елементів шаф КТП і КРП застосовувалися методи теорії подібності і розмірностей; методи розв'язання рівнянь математичної фізики; для одержання усередненого об'єму і визначального розміру однієї секції шафи розподільного пристрою низької напруги КТП застосовувався периметричний метод; для обробки експериментальних даних, одержаних при проведенні теплових випробувань різних РПНН КТП, застосовувалися методи математичного моделювання, афінних перетворень та чисельні методи програмування.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В дисертації запропоновані такі наукові положення:

- Вперше введена поправкова критеріальна функція, яка враховує складність геометрії струмопровідного контуру, кінцеві розміри шафи, затруднений природний конвективний теплообмін та зміни властивостей повітря у часі, яка дозволяє провести розрахунки, що відповідають реальному процесу нагріву у шафах комплектних пристроїв розподілу електроенергії.

- На основі проведених експериментальних досліджень розроблено математичну модель нестационарного природного конвективного теплообміну в замкненому об'ємі КРП та КТП, що враховує кінцеві геометричні розміри самої шафи та характер руху навколишнього середовища біля струмопровідного контуру, має статистичний характер і дозволяє якісно та кількісно оцінити нестационарні теплові процеси в комплектних пристроях.

- Одержано нові аналітичні залежності параметрів нестационарного природного конвективного теплообміну в замкненому об'ємі (для коефіцієнта теплообміну та критерію Нуссельта) на основі аналізу та обробки експериментальних даних, які дозволяють здійснювати теплові розрахунки нестационарних та перехідних теплових режимів комплектних пристроїв.

- Удосконалено методику розрахунку часових параметрів нагрівання комплектних пристроїв для різних варіантів навантаження, що дозволяє планувати прискорені теплові випробування на стадіях розробки і виробництва комплектних пристроїв. Економія часу проведення випробувань може досягати 40%, а електроенергії – 25%.

**Практичне значення одержаних результатів.** Запропонована модель нестационарного теплообміну струмопровідного контуру в замкненому об'ємі шафи РПНН може бути використана в роботі конструкторських бюро, дослідницьких лабораторій науково-проектних інститутів, що розробляють і випробовують КТП та КРП. Наведені в дисертаційній роботі аналітичні вирази можуть бути використані науково-дослідними інститутами і заводськими лабораторіями для проведення теплових випробувань комплектних пристроїв, як тих, що розробляються, так і тих, що знаходяться в експлуатації.

Розроблена методика розрахунку параметрів прискорених теплових випробувань комплектних пристроїв вирішує одну з головних задач економії електроенергії і трудовитрат при проектних роботах та типових випробуваннях електротехнічної продукції.

Результати дисертаційної роботи спрямовані на підвищення точності розрахунків та ефективності теплових випробувань, що проводяться під час розробки та виготовлення комплектних пристроїв розподілу електроенергії, а також на вирішення задачі енергозбереження при випробуваннях КП. Зокрема, це стосується комплектних трансформаторних підстанцій і комплектних розподільних пристроїв, які розробляють і випускають НДІ ВАТ «Український інститут трансформаторобудування (ВІТ)» і ВАТ «Запорізький завод високовольтної апаратури». Висновки і рекомендації, отримані в результаті проведеної роботи, були враховані і практично реалізовані у НДІ ВАТ «Український інститут трансформаторобудування (ВІТ)», на ВАТ «Запорізький завод високовольтної апаратури» та ВАТ заводі «Перетворювач» (м. Запоріжжя).

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати дисертації, що виносяться на захист, отримані автором особисто і полягають в наступному:

- Експериментально досліджено нестационарний режим шаф РПНН КТП.
- Розроблено математичну модель нестационарного природного конвективного теплообміну струмопровідних елементів з оточуючим їх повітрям у шафах розподільних пристроїв на основі аналізу та узагальнення результатів експериментальних досліджень за допомогою теорії подібності.
- Отримано нові аналітичні залежності параметрів нестационарного природного конвективного теплообміну в замкненому об'ємі навколо струмопровідного контуру в комплектних пристроях на основі обробки експериментальних даних за допомогою чисельних методів програмування.
- Розроблено методику розрахунку часових параметрів нагрівання комплектних пристроїв та рекомендацій щодо планування прискорених теплових випробувань.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 3-й Міжнародній науково-технічній конференції «Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці» (м. Львів, 1999 р.), на двох міжнародних симпозиумах "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика" (SIEMA'2002, SIEMA'2003) (м. Харків, 2002 і 2003 р.), а також на науково-технічних семінарах, що проводилися на кафедрі електричних апаратів Запорізького національного технічного університету, з представниками інженерно-технічних служб НДІ ВАТ «Український інститут трансформаторобудування (ВІТ)», ВАТ «Запорізький завод високовольтної апаратури» і ВАТ завод «Перетворювач» м. Запоріжжя.

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи відображені в 6 публікаціях, серед яких 2 виконано без співавторів, у тому числі: 4 статті в наукових фахових виданнях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, 3 розділів, висновків та 8 додатків. Повний обсяг дисертації складає 200 сторінок, з них 22 ілюстрації до тексту, 20 ілюстрацій на 18 сторінках; 8 таблиць на 12 сторінках, 8 додат-

ків на 31 сторінці; 149 найменувань використаних літературних джерел на 14 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність вибраної теми, визначені мета та основні задачі дослідження, викладено основні наукові та практичні результати, що були отримані в роботі, а також основні положення, які виносяться на захист.

**У першому розділі** проведено аналітичний огляд вітчизняних та закордонних літературних джерел, пов'язаних з тематикою теплових випробувань комплектних пристроїв та моделювання нестационарного теплообміну в замкнених об'ємах. Проведений огляд показав, що вивченню нестационарних моделей тепловіддачі з погляду їх застосування щодо оптимізації теплових випробувань приділено недостатньо уваги. А питання розробки нестационарної теплової моделі з метою визначення часових параметрів при плануванні проведення теплових випробувань не знайшло необхідного відображення в літературних джерелах. Аналіз літературних джерел показав, що існуючі математичні моделі теплообміну базуються на чисельних методах розрахунку систем рівнянь, що описують теплообмін, методах електротеплової аналогії, а також теорії теплової подібності.

Чисельні методи розв'язання системи параболічних рівнянь нестационарного теплообміну в частинних похідних досить складні, вимагають великих затрат машинного часу і дуже точного визначення крайових умов.

Метод електротеплової аналогії добре описує усталені режими тепловіддачі через простоту і достатню точність розрахунку, тому що в даному випадку розв'язується система лінійних рівнянь. Однак для характеристики нестационарного теплообміну необхідно в цю систему рівнянь вводити нелінійні елементи, наприклад, ємність, що не завжди дозволяє одержати необхідну збіжність розв'язання такої системи. До того ж розрахунок теплових конвективних опорів спирається на точність визначення коефіцієнтів тепловіддачі, тобто на критеріальні рівняння, що, в свою чергу, визначаються з експериментальних даних.

Уникнути цих ускладнень значною мірою дозволяє теорія подібності, яка за своєю сутністю є теорією експерименту, про що вказується в роботах Михеева М.О., Кірпишева М.В., Шлихтинга Г., Ликова О.В. та інших авторів. Тому в роботі для обробки експериментальних даних нестационарного теплообміну розподільних пристроїв низької напруги було використано теорію подібності теплових процесів та розмірностей як найбільш просту та універсальну.

**У другому розділі** наведено результати промислових випробувань та дослідження експериментального зразка РПНН пересувної КТП, що швидко ремонтується (ПКТПР), потужністю 1000, 1600 кВ·А 6 (10)/0,4 кВ, призначеної для використання в складі пересувних і стаціонарних систем постійного і тимчасового електропостачання. Дослідний зразок ПКТПР дозволяє визначити параметри нагрівання повітря навколо струмопровідних елементів усередині шафи у функції часу (рис.1).

У результаті дослідження температурного режиму шаф РПНН двох типів КТП були отримані і температурно-часові залежності нагрівання повітря у різних частинах об'єму шаф при різних значеннях навантаження: номінальним струмом 200

(рис.2, а) і 1450 А для ПКТПР потужністю 1000 кВА (рис.2, б), а також - номінальним струмом 2320 А для ПКТПР потужністю 1600 кВА (рис.3).

Розрахована похибка параметрів при вимірі нестационарних теплових процесів не перевищувала: для струму –  $\pm 1,5\%$ ; для температури нагрівання до  $200^{\circ}\text{C}$  –  $\pm 3,0\%$ ; електричного опору –  $\pm 1,5\%$ .

У **третьому розділі** наведено результати експериментальних досліджень нестационарного режиму теплообміну РПНН різних КТП за допомогою математичного моделювання. При цьому використовуються методи теорії розмірностей та р-теореми, які дозволяють зменшити кількість змінних у системі рівнянь, що характеризує тепловіддачу з поверхні струмопровідного контуру, зумовлену характером руху потоку середовища, яка відводить тепло.

На основі геометричних параметрів елементів і теплофізичних властивостей повітря при заданих температурних умовах визначені значення чисел Рейнольдса (Re), Грасгофа (Gr), Прандтля (Pr) і Релея (Ra), що характеризують режим конвективного теплообміну. Вони складають:

$$\text{Re} = uL/\nu = 2 \dots 5 \cdot 10^5; \text{Gr} = gH^3 \beta (T - T_0) / \nu^2 = 8.8 \cdot 10^6 \dots 56 \cdot 10^9;$$

$$\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr} = (8.8 \cdot 10^6 \dots 56 \cdot 10^9) \cdot 0.694 = 6.6 \cdot 10^6 \dots 38.8 \cdot 10^9$$

З цих розрахунків, складності конструкції шафи (див.рис.1), а також неоднорідності температурного поля було встановлено, що на різних ділянках струмопровідного контуру можуть мати місце як ламінарний, так і перехідний режими руху повітря. За наявного характеру розміщення поверхонь, що віддають тепло, утворюватимуться теплові граничні шари. При ламінарному режимі вони можуть сягати великої товщини, у зв'язку з чим коефіцієнти тепловіддачі мають низьке значення. Структура потоків повітря в даному випадку визначається розміщенням тепловидільвальних елементів відносно один одного (характером компонування тепловидільвальних елементів в об'ємі шафи. Аналіз конструктивних і режимних параметрів шаф РПНН КТП із повітряним охолодженням показує, що конструкцію шаф можна охарактеризувати таким видом теплової моделі (рис.4).. В одній секції шафи РПНН розташовується певне еквівалентне джерело тепла, що має сумарну потужність теплових втрат вимикачів, струмоведучих шин і всіх контактних з'єднань, що знаходяться в цій секції. Умовно таке еквівалентне джерело має форму паралелограма і вертикально орієнтоване по висоті шафи. Для спрощення задачі, що описує теплообмін у разі обтікання розвиненої поверхні складної форми, можуть бути прийняті такі припущення. Можна знехтувати витоками повітря через стінки шафи, спростити геометрію тепловидільвальних елементів і прийняти, що всі тепловидільвальні елементи мають форму паралелепіпеда, висота якого набагато більша від одного з горизонтальних розмірів, що дозволяє розглядати задачу плоскої стінки з внутрішніми джерелами тепла. Компонування елементів по висоті практично не варіюється і визначального впливу на температурний режим у разі природної конвекції не має. Теплообмін у шафі характеризується тим, що тепловий потік, виділений струмопровідними елементами, сприймається повітрям в об'ємі шафи, а теплопередача здійснюється за рахунок теплопровідності та конвекції.

Частка переданої випромінюванням теплоти в загальному теплообміні усередині шафи в перехідний період незначна, що пов'язано з приблизно однаковим температурним рівнем усіх тепловиділювальних елементів шафи. Однак, у ustalеному режимі ця величина може досягати 40% втрат через стінки шафи. Тому теплообмін випромінюванням враховується тільки при розрахунку температури стінок шафи в ustalеному режимі за допомогою теплових схем заміщення. Теплота, акумульована повітрям в об'ємі шафи, відводиться в навколишнє середовище через стінки шафи випромінюванням і вільним конвективним потоком повітря. Оцінка теплових потоків у неусталеному режимі свідчить про переважне значення конвективної складової.

Для обробки одержаних експериментальних даних необхідно виходити з того, що в загальному випадку тепловіддача є неусталеним рухом повітря біля вертикально орієнтованої шини (стінки), яка підігривається електричним струмом, і знаходиться в замкненому об'ємі.

Описати перехідний процес теплопереносу можна за допомогою рівнянь гідродинамічного граничного шару в площині  $YOX$ , що впливають з основних законів збереження маси, кількості руху та енергії і мають такий вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0; \\ \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = g \Delta \rho + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right); \\ C_p \cdot \rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right). \end{cases} \quad (1)$$

Тут вісь  $OX$  спрямована паралельно струмопровідному елементу, а вісь  $OY$  - по нормалі до його поверхні.

Найпростішими початковими і граничними умовами в розглянутій нелінійній системі диференціальних рівнянь у частинних похідних можуть бути прийняті такі співвідношення для різних значень часу  $t$ :

$$\begin{cases} \text{при } t = 0: & u(x, y, 0) = v(x, y, 0) = 0; \quad T(x, y, 0) = T_0 = \text{const}; \\ \text{при } y = 0: & u(x, 0, t) = v(x, 0, t) = 0; \quad T(x, 0, t) = T_1 = \text{const}; \\ \text{при } y \rightarrow \infty: & u(x, y, t) = v(x, y, t) = 0; \quad T(x, y, t) = T_0. \end{cases} \quad (2)$$

У цій системі передбачається, що функція  $T(x, y, t)$  за  $y \rightarrow \infty$  обмежена і приймає постійне значення  $T_0$ .

У системах (1) і (2) прийняті такі позначення:  $c$  – густина повітря,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $U$  і  $V$  – швидкості повітря,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $g \Delta c$  – архімедова сила, що виштовхує,  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}^2$ ;  $C_p$  – теплоємність повітря,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності середовища,  $\text{Дж}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К})$ ;  $t$  – фізичний час у секундах,  $\text{с}$ ;  $x, y$  – декартові координати в метрах;  $T(x, y, t)$ ;  $T_0 = \text{const}$ ;  $T_1 = \text{const}$  – температури в градусах Цельсія,  $^\circ\text{C}$ ;  $\mu$  – динамічна в'язкість повітря,  $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$ .



Розв'язання системи (1) з умовами (2) можна записати у вигляді таких функцій, якщо скористатися числами подібності, а саме:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0; \\ \frac{\partial U}{\partial \eta} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = \text{Ra} \cdot \vartheta + \frac{1}{\text{Pr}} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}; \\ \frac{\partial \vartheta}{\partial \eta} + U \frac{\partial \vartheta}{\partial X} + V \frac{\partial \vartheta}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Pr}} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial Y^2} \end{cases} \quad (3)$$

з початковими та граничними умовами:

$$\begin{cases} \text{при } \eta = 0; & U = V = 0; & \vartheta = 0; \\ \text{при } \eta = 0; & U = V = 0; & \vartheta = 1; \\ \text{при } X = 0; & U = V = 0; & \vartheta = 0; \\ \text{при } Y \rightarrow \infty; & U = V = 0; & \vartheta = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Розв'язання системи (3) з умовами (4) має певні складності навіть при реалізації чисельних методів. Цього можна уникнути, якщо скористатися критеріальними рівняннями, та записати у вигляді таких функцій:

$$\begin{aligned} U &= U\left(\eta, \text{Ra}, \frac{Y}{X}\right); & V &= V\left(\eta, \text{Ra}, \frac{Y}{X}\right); & \vartheta &= \vartheta\left(\eta, \text{Ra}, \frac{Y}{X}\right); & \vartheta &= \frac{T(x, y, t) - T_0}{T - T_0}; \\ U &= \frac{u}{\sqrt{g \cdot H \cdot \beta(T_1 - T_0)}}; & V &= \frac{v}{\sqrt{g \cdot H \cdot \beta(T_1 - T_0)}}; & X &= \frac{x}{H}; & Y &= \frac{y}{H}. \end{aligned} \quad (5)$$

З цих рівнянь видно, що конвективні швидкості і температура навколишнього середовища є функціями трьох безрозмірних змінних:

$$\eta^2 = \frac{\chi \cdot t}{H^2}; \quad \text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr}; \quad \frac{Y}{X} = \frac{y}{x}. \quad (6)$$

Число Грасгофа Gr як параметр інтенсивності руху у випадку вільної конвекції заміщує число Рейнольдса Re, яке є параметром змушених рухів. Число Грасгофа є відношенням сили інерції до відповідного силам в'язкості потоку. Параметр конвекції Ra є числом або критерієм Релея. Він відіграє важливу роль для описування режиму вільної конвекції повітря в замкнених об'ємах. Величина  $F_0 = (\chi \cdot t)/H^2$  у формулах систем (3 - 6) є числом Фур'є і визначає нестационарні процеси при тепло- і масопереносі в повітрі. Теплоперенос залежить так само від числа Прандтля  $\text{Pr} = \nu/\chi$ , яке пропорційно відношенню інтенсивності молекулярного переносу кількості руху і переносу теплової енергії теплопровідності. Тут  $\chi = \lambda/c\rho$  - коефіцієнт температуропровідності повітря, м<sup>2</sup>/с, H – визначальний розмір (висота шафи), м;  $\nu$

– коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення повітря,  $1/\text{К}$ , а в системі (5) прийняті такі позначення:

$$\begin{cases} X = \frac{x}{H} \cdot \text{Gr}^{1/3}; & Y = \frac{y}{H} \cdot \text{Gr}^{1/3}; & \eta = \frac{\nu}{H^2} \cdot \text{Gr}^{1/3} \cdot t = \frac{\nu \cdot t}{H^2} \cdot \text{Gr}^{1/3}; \\ U = \frac{u \cdot H}{\nu \cdot \text{Gr}^{1/3}}; & V = \frac{v \cdot H}{\nu \cdot \text{Gr}^{1/3}}; & \vartheta = \frac{T(x, y, t) - T_0}{T_1 - T_0}. \end{cases} \quad (7)$$

Початкові та граничні умови системи можна записати таким чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{при } \eta = 0; \quad U = V = 0; \quad \vartheta = 0; \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{при } Y = 0; \quad U = V = 0; \quad \vartheta = 1; \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{при } Y \rightarrow \infty; \quad U = V = 0; \quad \vartheta = 0; \end{array} \right. \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{при } X = 0; \quad U = V = 0; \quad \vartheta = 0. \end{array} \right. \quad (11)$$

Початкова умова (8) означає, що в початковий момент при  $\eta = 0$  навколишнє середовище перебуває в спокої і має постійну температуру. Умова прилипання і непроникності стінки визначається умовою (9), а вираз (10) показує, що далеко від стінки навколишнє середовище нерухоме.

Товщина теплового граничного шару залежить від таких параметрів:

$$\delta = f(u, \nu, \chi, x) \quad (12)$$

Взаємодію теплового, гідродинамічного та електричного полів можна описати з урахуванням теорії граничного шару такими функціональними рівняннями:

$$\begin{cases} F_1(t, g\Delta p, p, \nu, \chi, T(x, y, t), T_1, T_0, x, y, H) = 0; \\ F_2(t, g\Delta p, p, \nu, \chi, T(x, y, t), T_1, T_0, x, y, H) = 0; \\ F_3(t, g\Delta p, p, \nu, \chi, T(x, y, t), T_1, T_0, x, y, H) = 0; \\ F_4(j, \rho_1, T_1, T_0, \lambda, S, P, l) = 0, \end{cases} \quad (13)$$

де позначено:  $j$  – густина електричного струму,  $\text{А}/\text{м}^2$ ;  $c_1$  – питомий електричний опір,  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ ;  $P$  – периметр перерізу,  $\text{м}$ ;  $S$  – площа перерізу провідника,  $\text{м}^2$ .

У цій системі три перших рівняння аналогічні системі диференціальних рівнянь у частинних похідних (3). У цілому ж ця система рівнянь експериментально визначає взаємодію полів, що розглядаються.

Характерну швидкість  $u$  у разі вільної конвекції навколишнього середовища можна визначити таким чином:

$$u = \sqrt{g \cdot x \cdot \beta \cdot \frac{\nu}{\chi} \cdot (T_1 - T_0)} \quad (14)$$

Складовими в цьому виразі є критерії Грасгофа та Прандтля відповідно:  $Gr = g \cdot x^3 \cdot \beta \cdot (T_1 - T_0) / \nu^2$  і  $Pr = \nu / \chi$ . Товщина граничного шару  $\delta$  є функцією відстані від краю стінки, тобто коли  $x = 0$ , а також швидкості потоку повітря  $u$  та коефіцієнта кінематичної в'язкості  $\nu$  і дорівнює  $\delta = 5 \cdot \left( \frac{x \cdot \nu}{u} \right)^{1/2}$ .

Отже, цей вираз можна переписати у формі, що добре узгоджується з теорією граничного шару, а саме:

$$\varphi = \frac{y}{x \cdot 5} \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/4} = \frac{y}{x \cdot 5} \cdot Ra^{1/4}, \quad \text{якщо } \eta = \frac{\sqrt{\chi \cdot t}}{H}. \quad (15)$$

Згідно з  $\pi$ -теоремою можна скласти безрозмірні комплекси, що враховують зв'язок між електричною і тепловою взаємодією, тому у системі (13) можна одержати чотири функції трьох змінних у неявній формі у вигляді:

$$\begin{cases} F_1(\eta, \varphi, \mathcal{G}) = 0; \\ F_2(\eta, \varphi, U) = 0; \\ F_3(\eta, \varphi, V) = 0; \\ F_4(q) = 0. \end{cases} \quad (16)$$

При цьому фізичні і геометричні величини визначені у такому вигляді:

$$\begin{cases} \varphi = \frac{y}{x \cdot 5} \cdot Ra^{1/4}; \quad \eta = \frac{\sqrt{\chi \cdot t}}{H}; \quad q = \frac{\lambda \cdot H \cdot (T_1 - T_0)}{j^2 \cdot \rho_1 \cdot S \cdot l} < 1; \\ \mathcal{G} = \frac{T(x, y, t) - T_0}{T_1 - T_0}; \quad U = \frac{U}{\sqrt{g \cdot H \cdot \beta \cdot (T_1 - T_0) Pr}}; \quad V = \frac{V}{\sqrt{g \cdot H \cdot \beta \cdot (T_1 - T_0) Pr}}. \end{cases} \quad (17)$$

Розв'язуючи систему функцій (16) відносно величин  $\mathcal{G}$ ,  $U$ ,  $V$  і  $q$ , можна знайти явні значення температурного, гідродинамічного та електричного полів, а саме:

$$\begin{cases} \mathcal{G} = F(\eta, \varphi); \\ U = U(\eta, \varphi); \\ V = V(\eta, \varphi); \\ q = \text{const} = k \leq 1. \end{cases} \quad (18)$$

Теплове поле повітря біля вертикально орієнтованого еквівалентного провідника описується першим рівнянням системи (18). Розділяючи змінні  $\eta$  і  $\varphi$  у цьому рівнянні, можна записати:

$$\mathcal{G} = \theta(\eta) \cdot \Phi(\varphi). \quad (19)$$

У цьому рівнянні температурне поле було розділено на усталене або стаціонарне, позначене як  $\Phi(\varphi)$ , і неусталене або перехідне -  $\theta(\eta)$ . Можна відзначити, що в інтервалі  $0 \leq \eta < \infty$  значення функції  $\theta(\eta)$  знаходяться в інтервалі  $0 \leq \theta(\eta) \leq 1$ . Для функції  $\Phi(\varphi)$  відомо, що при  $\varphi = 0$  вона приймає значення  $\Phi(0) = 0$ . Дослідження поведінки функції  $\mathcal{G}(\eta, \varphi)$  (18) для аргументу  $\eta$ , який змінюється від 0 до  $\infty$  показує, що вона змінюється в такому інтервалі:  $0 \leq \mathcal{G} \leq 1$ .

Початкові та кінцеві умови для функції  $\mathcal{G}(\eta, \varphi)$ , що розглядається, будуть відповідно:

$$\begin{cases} \text{при } \eta = 0; & \theta = 0; & \mathcal{G} = 0; \\ \text{при } \eta \rightarrow \infty; & \lim \theta(\eta) = 1; & \mathcal{G} - \text{обмежена.} \end{cases} \quad (20)$$

Обробка експериментальних даних, одержаних при дослідженні нестационарного теплового режиму РПНН в умовах натурних і лабораторних випробувань, проведена таким чином. У випадку протікання по струмопровідному контуру струмів 200, 1450 і 2320 А повітря у середині шафи РПНН нагрівається відповідно до сімейства кривих, зображених на рис.2, 3. Безрозмірну температуру  $\theta$  можна записати у вигляді:  $\mathcal{G}/\Phi(\varphi) = \theta(\eta)$ , а після застосування інтегралу ймовірності та чисельних методів

можна визначити частинну похідну для функції  $\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \eta} = \Phi(\varphi)$  при обробці експериментальних даних. Отримані графічні залежності похідних температур за часом в об'ємі для всіх варіантів шаф РПНН наведені на рис.1, з якого випливає, що функція  $\Phi(\varphi)$  має такі граничні умови:

$$\begin{cases} \text{при } y = 0; & \varphi = 0; & \Phi(0) = 0; \\ \text{при } y \rightarrow \infty; & \varphi \rightarrow \infty; & \Phi(0) - \text{обмежена.} \end{cases}$$

Отримані результати обробки експериментальних даних наведені на рис.5. Цю залежність можна задовільно апроксимувати функціями наступної системи, як це зображено на рис.6:

$$\begin{cases} \text{для } 0 < \varphi < 4,5: & \Phi(\varphi) = 0,25 \cdot \varphi \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\left(\frac{\varphi}{4}\right)^2 - 1\right)\right]; \\ \text{для } \varphi \geq 4,5: & \Phi(\varphi) = 0,085(\varphi - 4,9)^{-0,35}. \end{cases} \quad (21)$$

Аналіз та обробка експериментальних даних (див. рис. 2, 3) за допомогою теорії розмірностей та чисельних методів дозволяє зробити висновок, що функція  $\theta(\eta)$  може бути наближено апроксимована співвідношеннями (22).

$$\theta(\eta) = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\chi \cdot t}}\right) = \operatorname{erf}\left(\frac{H}{2\sqrt{\chi \cdot t}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta} e^{-\eta^2} d\eta, \text{ для } \eta = \frac{\sqrt{\chi \cdot t}}{H}. \quad (22)$$

Характер зміни цієї функції зображено на рис. 7.

В остаточному вигляді теплову модель нестационарного теплообміну струмопровідного контуру з оточуючим його повітрям можна представити у вигляді системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{для } 0 < \varphi < 4.5: \quad \mathcal{G} = 0.25 \cdot \varphi \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\left(\frac{\varphi}{4}\right)^2 - 1\right)\right] \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta} e^{-\eta^2} d\eta; \\ \text{для } \varphi \geq 4.5: \quad \mathcal{G} = 0.085 \cdot (\varphi - 4.9)^{-0.35} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta} e^{-\eta^2} d\eta. \end{array} \right. \quad (23)$$

В графічному вигляді загальна картина теплового поля представлена на рис. 8.

Коефіцієнт тепловіддачі у разі нестационарного теплообміну в шафах комплектних пристроїв можна визначити за співвідношенням:

$$\lambda \cdot (\partial(T(y, x, t) - T_0) / \partial y) \Big|_{y=0} = \alpha \cdot (T_1 - T_0)$$

Для безрозмірної температури:  $\alpha(t) / \lambda = 0,413 \cdot Ra^{1/4} / 5x \cdot \theta(\eta)$ ,

$$Nu(t) = \frac{\alpha(t) \cdot H}{\lambda} = 0,09 \cdot \frac{Ra^{1/4} \cdot H}{x} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-\eta^2} d\eta$$

а число Нуссельта буде дорівнювати:

Отже, закон для нестационарної теплопередачі в шафах комплектних розподільних пристроїв у загальному випадку визначається такими співвідношеннями:

$$\left\{ \begin{array}{l} Nu(t) = 0,413 \cdot \frac{H}{x} \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/4} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-\eta^2} d\eta; \\ \eta = \frac{\sqrt{\chi \cdot t}}{H} \end{array} \right. \quad (24)$$

Значення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha(t) = Nu(t) \cdot \lambda / H = f(\eta)$  змінюються пропорційно залежностям  $Nu(t) = f(\eta)$  (див. рис. 9) та відповідно графікам, яких зображено на рис. 10.

Одержані результати дозволяють визначити сталу часу нагрівання комплектного пристрою графічним шляхом після побудови теплової картини поля. На рис. 11 наведено розрахункові графічні залежності, які дозволяють визначити величину сталої часу для КТП потужністю 1000 кВ·А.

Методика розрахунку часових параметрів нагрівання для проведення прискорених теплових випробувань комплектних пристроїв полягає у визначенні: постійної часу нагрівання та часу нагрівання в усталеному та прискореному режимах випробувань КП за трьома значеннями струму (варіанти номінального і двох значень форсованого струму), які попередньо розраховуються за допомогою теплових схем

заміщення для цього пристрою. Значення форсованого струму вибирається за найменшим припустимим значенням для комплектуючої апаратури згідно з класом ізоляції (у даній конструкції – для вимикачів).

Перед проведенням прискорених теплових випробувань комплектних пристроїв розподілу електроенергії необхідно:

1. Розрахувати температуру нагрівання в усталеному режимі для номінального струму комплектного пристрою за допомогою методики теплових схем заміщення, як найбільш точної.

2. Розрахувати температуру нагрівання в усталеному режимі для двох варіантів  $n$  - кратного (форсованого) струму комплектного пристрою за допомогою методики теплових схем заміщення. Значення форсованого струму вибирається згідно з класом ізоляції комплектуючого обладнання для КРП або КТП.

3. Побудувати за тепловою моделлю три варіанти кривих нагрівання для комплектного пристрою (у випадку протікання номінального і двох варіантів  $n$ -кратного струмів).

4. Визначити сталу часу нагрівання за отриманими графічними залежностями.

5. Визначити оптимальний режим прискорених випробувань, тобто значення форсованого струму та час його протікання по КРП для досягнення пристроєм температури, що відповідає номінальному режиму навантаження.

6. Визначити час встановлення комплектним пристроєм усталеного режиму після зниження струму до номінального значення відповідно нормативним документам на випробування.

## ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової проблеми, що полягає у розробці адаптованої до реальних нестаціонарних теплових процесів математичної моделі теплообміну у комплектних пристроях розподілу електроенергії з природним повітряним охолодженням. На основі експериментальних досліджень та розробленої моделі теплообміну отримано нові науково обґрунтовані функціональні залежності параметрів нестаціонарного теплообміну в шафах КПП. Розроблено методика визначення часових параметрів прискорених теплових випробувань, що дозволяє вирішити конкретну науково-технічну задачу – енергозбереження та підвищення продуктивності випробувань КРП та КТП.

1. Аналіз літературних джерел та стану проблеми за темою дисертаційної роботи показав, що вивченню нестаціонарних моделей тепловіддачі з точки зору їх застосування до оптимізації теплових випробувань приділено недостатню увагу. Це можна пояснити тим, що інтерес з точки зору теплових режимів становить усталений режим. Такий підхід, як розробка нестаціонарної теплової моделі з метою визначення часових параметрів для планування проведення теплових випробувань недостатньо висвітлений літературних джерелах.

2. На основі проведених експериментальних досліджень встановлені температурно-часові залежності, що характеризують нестаціонарні процеси теплообміну, які протікають у шафах низької напруги КТП у разі природного повітряного охолодження.

3. Розроблено математичну модель нестаціонарного природного конвективного теплообміну в замкненому об'ємі КРП та КТП, що враховує кінцеві геометричні розміри шафи та характер руху навколишнього середовища навколо струмопровідного контура, має статистичний характер та дозволяє якісно та кількісно оцінити нестаціонарні теплові процеси в комплектних пристроях.

4. Адекватність запропонованої математичної моделі теплообміну підтверджується задовільною збіжністю розрахункових даних з експериментальними, що отримані на підприємстві ВАТ «Запорізькому заводі високовольтної апаратури» (м. Запоріжжя), та теоретичними розрахунками, наведеними в літературі. Величина похибки за умови, коли час дорівнює нескінченності (число Нуссельта  $Nu \approx 0,1 \cdot (H/x) \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}$ ), не перевищує 6% порівняно з розрахунками за відомими формулами для тепловіддачі при природній конвекції.

5. На основі аналізу та обробки експериментальних даних отримано нові аналітичні та функціональні залежності параметрів нестаціонарного природного конвективного теплообміну в замкненому об'ємі (коефіцієнта теплообміну та критерію Нуссельта), які дозволяють здійснювати уточнені теплові розрахунки нестаціонарних та перехідних теплових режимів комплектних пристроїв.

6. Отримала подальший розвиток методика розрахунку часових параметрів прискорених теплових випробувань, що дозволяє скоротити час їх проведення до 40% та отримати економію електроенергії до 25%.

7. Математична модель нестаціонарного теплообміну шаф комплектних пристроїв та методика розрахунку основних часових параметрів при плануванні прис-



корених випробувань різних теплових режимів цих пристроїв розроблені та реалізовані у вигляді комп'ютерних програм.

8. Результати дисертаційної роботи спрямовані на дослідження нестационарних теплових режимів комплектних пристроїв розподілу електроенергії, удосконалення проектування, підвищення якості розрахунків та ефективності теплових випробувань таких пристроїв і призначаються для використання електромашинобудівниками, які займаються проектуванням, випробуваннями та реалізацією КРП та КТП.

9. Результати роботи використовуються при проведенні теплових випробувань комплектних пристроїв у ВАТ “Український інститут трансформаторобудування (ВІТ)”, що підтверджується відповідним актом впровадження.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Жорняк Л.Б. О нестационарном теплообмене в комплектных электрических аппаратах // Электрический журнал. – Запоріжжя. – 1997. – № 2. – С. 41-46.

2. Жорняк Л.Б. Анализ методик расчетов тепловых процессов комплектных электрических аппаратов // Электрический журнал. – Запоріжжя. – 1998. – № 2. – С. 64 – 68.

3. Жорняк Л.Б., Каплиенко А.О., Шило С.И. Применение теории размерностей к обработке экспериментальных данных при температурных исследованиях электрических аппаратов // Электротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя. – 2002. – № 1. – С. 41–47.

*Здобувачем отримано функціональні залежності, що характеризують нестационарний процес теплообміну у комплектних електричних апаратах.*

4. Асатурян А.Ш., Жорняк Л.Б. Применение теории подобия к обработке экспериментальных данных нестационарного теплового процесса вертикально ориентированного токопровода, расположенного в замкнутом пространстве // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – Київ. – 2002. – № 2 (2). – С.102 – 106.

*Здобувачем оброблено експериментальні дані нестационарного теплового режиму нагрівання низьковольтних розподільних пристроїв за допомогою теорії подібності.*

5. Асатурян А.Ш., Жорняк Л.Б., Бояринцева Е.В. Об оптимизации температурных режимов в электрических аппаратах // Электротехніка і електромеханіка. – Харків. – 2003. – № 1. – С. 5 – 10.

*Здобувачем розроблено математичну модель, що описує теплопередачу еквівалентного струмопровідного елемента і враховує орієнтацію його в об'ємі шафи КРП та умови теплообміну з оточуючим середовищем.*

6. Рассальский А.Н., Зиновкин В.В., Жорняк Л.Б. Математическое моделирование оптимизационных параметров трансформаторов специального назначения // Тези доповідей. 3-я Міжнародна науково-технічна конференція «Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці». – Львів. – 1999. – С.230 – 231.

*Здобувачем чисельними методами вирішено систему диференціальних рівнянь, що описують тепловіддачу у трансформаторному обладнанні.*

## АНОТАЦІЇ

**Жорняк Людмила Борисівна. Прискорення теплових випробувань комплектних пристроїв розподілення електроенергії. - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.09.01- електричні машини і апарати. - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2004.

Дисертація присвячена дослідженню нестационарних процесів природного конвективного теплообміну в шафах комплектних пристроїв розподілу електроенергії, удосконаленню їх проектування та прискорення проведення теплових випробувань комплектних пристроїв розподілу електроенергії з використанням математичного моделювання.

У роботі на основі експериментальних досліджень розроблено математичну модель нестационарного теплообміну комплектних розподільних пристроїв та комплектних трансформаторних підстанцій, що враховує кінцеві геометричні розміри самої шафи та характер руху навколишнього середовища навколо струмопровідного контуру, має статистичний характер і дозволяє якісно та кількісно оцінити нестационарні теплові процеси в комплектних пристроях. Отримано нові аналітичні залежності параметрів (коефіцієнта теплообміну та число Нуссельта) нестационарного природного конвективного теплообміну в замкненому об'ємі, що дозволяють здійснювати теплові розрахунки нестационарних та перехідних режимів комплектних пристроїв. На основі отриманої математичної моделі нестационарного теплообміну розроблено методику розрахунку часових параметрів прискорених теплових випробувань, що дозволяє скоротити час проведення таких випробувань до 40% та отримати економію електроенергії – до 25%.

*Ключові слова:* струмопровідний контур, комплектний пристрій, нестационарний конвективний теплообмін, математична модель теплообміну, прискорені теплові випробування.

**Жорняк Людмила Борисовна. Ускорение тепловых испытаний комплектных устройств распределения электроэнергии - Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01. – Электрические машины и аппараты. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2004.

Диссертация посвящена исследованию нестационарных процессов естественного конвективного теплообмена в шкафах комплектных устройств распределения электроэнергии, усовершенствованию их проектирования и ускорению проведения тепловых испытаний комплектных устройств распределения электроэнергии с использованием математического моделирования. В работе проведены экспериментальные исследования нестационарного режима нагрева шкафов распределения низкого напряжения комплектных трансформаторных подстанций и установлены температурно-временные зависимости, характеризующие протекание нестационарных процессов при естественном воздушном охлаждении.

На основе экспериментальных исследований разработана математическая модель нестационарного естественного конвективного теплообмена в замкнутом объеме комплектных устройств электроэнергии, учитывающая конечные геометрические

размеры и характер движения окружающей среды вокруг их токоведущих контуров, имеющая статистический характер и позволяющая качественно и количественно оценить нестационарные тепловые процессы в проектируемых и испытываемых комплектных устройствах. Впервые введены новые функциональные зависимости параметров теплообмена (коэффициента теплоотдачи и критерия Нуссельта) на основе анализа и обработки экспериментальных данных, позволяющие осуществлять расчеты нестационарных и переходных тепловых режимов комплектных устройств.

Для адаптации модели нестационарного теплообмена к реальным процессам, а также описания кривой нагрева воздуха в шкафах комплектных устройств распределения электроэнергии впервые введена поправочная критериальная функция. Полученные графические зависимости учитывают сложность геометрии токоведущего контура, конечные размеры самого шкафа, стесненный естественный конвективный теплообмен и изменения свойств воздуха во времени, что позволяет провести расчеты соответственно реальному процессу нагрева.

Исходя из проведенных экспериментальных исследований и на основе разработанной математической модели, получила дальнейшее развитие методика расчета временных параметров ускоренных тепловых испытаний комплектных устройств, позволяющая сократить время их проведения до 40%, повысить их производительность и получить экономию электроэнергии – до 25%.

*Ключевые слова:* токоведущий контур, комплектное устройство, нестационарный конвективный теплообмен, математическая модель теплообмена, ускоренные тепловые испытания.

**Zhorneyak L.B. The thermal test accelerating of factory assembled switch-gears.**  
– Manuscript.

The Thesis is for the scientific degree of Technical Science Candidate specializing in the Electric Machines and Apparatus (05.09.01). - National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkiv, 2004.

The Thesis is devoted to the designing and accelerating of the thermal test carrying out improvement of the electric powers distribution factory assembled switch-gear on the base of the non-stationary heat state investigations of the factory assembled transformer substation low voltage cabinets and factory assembled switch-gears by the mathematical modeling.

In work experimental investigations non-stationary heat state of the factory assembled transformer substation low voltage cabinets are organized, and thermal dependences in functions of time are installed. These dependences characterize running non-stationary heat processes under the condition of natural air-cooling in them. The mathematical model non-stationary natural convective heat transfer is designed on the base of the closed volume electric power factory assembled switchgears experimental investigations. This model takes to account geometric sizes of these devices and nature of the atmosphere environment motion around their current flow circuits and allows to qualitative and quantitative estimate of the non-stationary heat processes in designed and being tested devices. On base of the analysis and experimental data adaptation new analytical heat transfer parameter dependencies (the convective heat transfer coefficient and Nusselt number) are given. They give possibility to calculate of non-stationary and transitional heat states of the factory assembled switch-gears. On base of the experimental investigations and designed math-

emational model the methods of the accelerated thermal test temporary parameter calculation of the electric powers distribution factory assembled switchgear is created. It gives possibility of significantly time reduction of test carrying up to 40%, increasing of their capacity and saving of electric power up to 25%.

*Key words:* current flow circuit, factory assembled switch-gear, unsteady convective heat transfer , mathematical model of heat transfer, accelerated thermal test.

### ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

РПНН	-	розподільний пристрій низької напруги.
КТП	-	комплектна трансформаторна підстанція.
ПКТПР	-	пересувна комплектна трансформаторна підстанція.
КРП	-	комплектний розподільний пристрій.
РПН	-	пристрій регулювання напруги під навантаженням.
КП	-	комплектний пристрій
в.о.	-	відносні одиниці

