

Державний університет "Львівська політехніка"

**АТАМАНЧУК Богдан Миколайович**

УДК 536.5:534-8

**Перевірка статичної характеристики  
терморезистивних перетворювачів шляхом нагріву  
електричним струмом**

*Спеціальність 05.11.04- прилади та методи вимірювання  
теплових величин*

**Автореферат дисертації на здобуття наукового  
ступеня кандидата технічних наук**

**ЛЬВІВ - 1997**

021.18.08

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00360405 (1)

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Державному

*Науковий керівник*

доктор технічних наук, професор,  
Заслужений винахідник України

**Стадник Богдан Іванович,**  
ДУ "Львівська політехніка", зав. кафедрою  
"Інформаційно-вимірювальна техніка";

кандидат технічних наук, доцент

**Бернгард Франк,**  
ТУ Ільменау (Німеччина)

*Офіційні опоненти:*

1. Доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Грищенко Татяна Георгіївна**, зав. відділом Інституту проблем енергозбереження НАН України.
2. Кандидат технічних наук, доцент **Яцук Василь Олександрович**,  
ДУ "Львівська політехніка", кафедра "Метрологія, стандартизація та сертифікація".

*Провідна установа*

**НВО АТ "Термоприлад", відділення первинних перетворювачів, м. Львів.**

Захист відбудеться 26 вересня 1997р. о 16 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 04.06.11 у Державному університеті "Львівська політехніка" в ауд.226 головного корпусу (290646, Львів-13, вул.С.Бандери, 12).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного університету "Львівська політехніка" (290013, Львів-13, вул.Професорська,1).

Автореферат розісланий "22" серпня 1997р.

*Вчений секретар спеціалізованої*

*вченої ради, д.т.н.*

**Луцик Я.Т.**

78. 38. 347

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність роботи. В процесі експлуатації терморезистивних перетворювачів (ТРП) їх статична характеристика (СХ) під дією різноманітних дестабілізуючих чинників може зазнавати значних змін, які виходять за межі присвоєного класу і призводять до відповідних похибок вимірювання температури. Це, в першу чергу, стосується високотемпературних вимірювань, вимірювань в хімічно агресивних середовищах, в середовищах з підвищеним рівнем радіоактивного випромінювання та вібрації. Такі екстремальні умови значно скорочують термін служби ТРП і вимагають їх періодичної перевірки.

Традиційні методи перевірки потребують вилучення ТРП з робочого середовища і вимагають значних затрат кваліфікованої праці та часу. Окрім того, є багато технологічних процесів, де навіть короткотривале вилучення ТРП передбачає їх зупинку, або взагалі неможливе. Це зумовило значний інтерес до розробки засобів та методик бездемонтажної перевірки ТРП.

Перевірка ТРП передбачає аналіз його реакції на відповідне входнє збурення з відомими амплітудно-часовими характеристиками. В умовах експлуатації одним із небагатьох можливих каналів для формування таких збурень є лінія зв'язку ТРП з вторинними засобами вимірювання. Пропонована дисертаційна робота присвячена розробці методики перевірки ТРП без попереднього вилучення з умов експлуатації шляхом його нагрівання електричним струмом. Традиційно такий спосіб створення входнього збурення використовувався для визначення динамічних характеристик термоперетворювачів. На основі проведеного аналізу процесів теплопередачі при нагріванні ТРП електричним струмом та фізичних основ електропровідності і теплоємності перехідних металів, зроблено висновок, що початкова ділянка теплового перехідного процесу не залежить від зовнішніх дестабілізуючих чинників і характеризується вищою стабільністю, ніж СХ. Показано, що значення приросту температури в кожний момент часу є пропорційним потужності електричного струму через ТРП. Це дає можливість формувати фіксовані прирости температури термочутливого матеріалу перетворювача без його вилучення з робочого середовища. Відомі окремі пропозиції щодо перевірки ТРП шляхом їх нагрівання електричним струмом, які базуються на порівнянні виміряного значення відповідного приросту температури термочутливого матеріалу з теоретично визначеним і не набули подальшого розвитку в наслідок низької точності. В даній роботі запропоновано проводити тестові нагрівання перетворювачів імпульсами струму з фіксованими параметрами до початку та під час експлуатації. На основі порівняння виміряних відповідних приростів опору ТРП робиться висновок про зміну температурного коефіцієнта опору, який є інтегральним параметром його СХ. Розроблений алгоритм, з метою підвищення точності, передбачає попередню оптимізацію тривалості початкової ділянки теплового перехідного процесу для кожного типу ТРП, враховуючи

залежність значення нагріву від температури робочого середовища та нелінійність СХ платинових перетворювачів.

Запропонована методика перевірки дозволить визначати зміни СХ в процесі експлуатації без попереднього вилучення ТРП з робочого середовища. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження, запропоновані схемотехнічні рішення та алгоритмічне забезпечення можуть бути використаними в інтелектуальних засобах вимірювання температури з елементами перевірки первинних перетворювачів. Це дасть змогу підвищити надійність повного каналу перетворення температури, повністю уникнути затрат часу та праці на періодичні перевірки ТРП.

Таким чином, тема роботи є актуальною і має велике теоретичне та практичне значення.

Метою дисертаційної роботи є розробка методики, схемотехнічного та алгоритмічного забезпечення перевірки ТРП без попереднього вилучення з робочого середовища на основі теоретичних та експериментальних досліджень динаміки їх нагріву електричним струмом.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

- на основі теоретичних та експериментальних досліджень динаміки нагріву терморезистивних перетворювачів електричним струмом показано, що початкова ділянка теплового перехідного процесу є характеристикою термочутливого матеріалу, більш стійкою до впливу експлуатаційних дестабілізуючих факторів, ніж його статична характеристика;
- вказано критерії для визначення початкової ділянки теплового перехідного процесу при нагріванні ТРП електричним струмом і, на основі математичного моделювання, визначено її прогнозовані параметри для промислових перетворювачів;
- на основі експериментальних досліджень визначено фактичні параметри початкових ділянок теплового перехідного процесу за умов впливу різних дестабілізуючих чинників для ТРП типових конструкцій, показано, що похідна від функції, яка описує перехідний процес, в початковий момент часу однозначно характеризує тип та конструктивні особливості термочутливого матеріалу перетворювача;
- на основі моделювання та експериментальних досліджень комутаційних електричних процесів при нагріванні ТРП імпульсами електричного струму показано, що вплив реактивних складових опору на значення приросту температури складає менше 0,01% при тривалості нагрівання понад 1мс;
- показано, що щільне розміщення ділянок термочутливого матеріалу перетворювача приводить до значного збільшення тривалості початкової ділянки перехідного процесу за рахунок взаємокомпенсації теплового потоку при нагріванні

електричним струмом, це в свою чергу спрощує реалізацію запропонованої перевірки;

- запропоновано алгоритми та засоби для реалізації перевірки ТРП без вилучення з робочого середовища, розроблено основні вимоги до засобів вимірювання.

Практична цінність роботи. Запропонована методика та засоби складають основу перспективного напрямку бездемонтажної перевірки ТРП, розвиток якого є надзвичайно важливий для металургії, атомної енергетики та інших технологічних процесів, що характеризуються високим рівнем дестабілізуючих чинників СХ перетворення. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження параметрів початкової ділянки теплового перехідного процесу при нагріванні терморезистивних перетворювачів електричним струмом, запропоновані схемотехнічні рішення та алгоритмічне забезпечення можуть бути використаними в інтелектуальних засобах вимірювання температури з елементами перевірки первинних перетворювачів. Це дасть змогу підвищити надійність повного каналу перетворення температури, повністю уникнути затрат часу та праці на періодичні перевірки ТРП.

Отримані результати складають базу для подальших досліджень можливостей перевірки терморезистивних в умовах експлуатації.

Особистий внесок здобувача. Основна частина теоретичних та експериментальних досліджень, розробка оригінальних засобів вимірювання виконані автором самостійно. Аналіз результатів окремих досліджень проводився в співавторстві згідно наведеного списку літератури.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались та обговорювались на 7-ій міжнародній науково-технічній конференції "Електричні методи та засоби вимірювання температури". Львів, 1992; на ІІІ міжнародному науковому семінарі "Metody i technika przetwarzania sygnalow w pomiarach fizycznych". Rzeszow, 1993/94; на 13-ій Міжнародній конференції метрологів МКМ'96. Czestochowa, 1996; на 1-th International modelling school, Алушта, Крим, 1996; на 41-ому Міжнародному colloquium. Ільменау, 1996.

Публікації. За результатами виконаних теоретичних та експериментальних досліджень опубліковано 14 друкованих робіт.

Структура і об'єм роботи. Дисертація викладена на 140 сторінках основного друкованого тексту, містить 38 рисунків і складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури з 66 найменувань.

### ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі показано актуальність дисертаційної роботи, приведено короткий аналіз проблем дослідження первинних перетворювачів в умовах експлуатації. Визначено мету та наукову новизну досліджень.

В першому розділі роботи зроблено огляд існуючих методів перевірки терморезистивних перетворювачів без попереднього вилучення їх з робочого середовища. Проаналізовано можливі шляхи вирішення цієї проблеми. Проведено оцінку методів самодіагностики перетворювачів температури на основі вбудованих калібраторів. Вказано, що, поряд з можливістю забезпечення високої точності перевірки, такі методи вимагають значного ускладнення конструкції ТРП та збільшення його собівартості. Окрім того, методи вбудованих калібраторів вимагають відповідної динаміки температури робочого середовища, що не завжди можна забезпечити. Вказано, що задача дослідження в умовах експлуатації первинних перетворювачів взагалі, і первинних перетворювачів температури зокрема, на сьогодні ще далека до вирішення. Розв'язання цієї задачі в першу чергу пов'язане з проблемою створення вхідного збурення з відомими амплітудно-часовими характеристиками.

Основна увага зосереджена на застосуванні нагрівання термочутливого матеріалу перетворювача імпульсами електричного струму для створення вхідного збурення при перевірці ТРП. Розглянуто особливості початкової ділянки теплового перехідного процесу, яка характеризується властивостями термочутливого матеріалу (ТЧМ) і найменш чутлива до процесів в зовнішніх елементах конструкції перетворювача та в робочому середовищі. Запропоновано розглядати початкову ділянку теплового перехідного процесу, для якої виконується умова:

$$(Q_{ТЧМ2} - Q_{ТЧМ1})/Q_{ТЧМ1} \leq K_d,$$

де  $Q_{ТЧМ2}$ ,  $Q_{ТЧМ1}$  — акумульовані в ТЧМ кількості тепла за двох можливих граничних умов теплообміну з оточуючим середовищем;

$K_d$  — заданий допустимий коефіцієнт відносної нестабільності перехідного процесу нагрівання, що визначається вимогами до точності перевірки ТРП.

Проведено попередній аналіз початкової ділянки теплового перехідного процесу при нагріванні терморезистивних перетворювачів електричним струмом на базі типових конструкцій термочутливих елементів. На основі порівняння впливу експлуатаційних дестабілізуючих факторів (хімічна забрудненість, механічні напруження і т.д.) на електричні та теплофізичні характеристики перехідних металів зроблено висновок, що зміна температури термочутливого матеріалу ТРП при його нагріванні електричним струмом відповідної тривалості та потужності є більш стабільною, ніж його статична характеристика перетворення. Тому ця зміна температури може бути використаною для перевірки ТРП в умовах експлуатації. Такий метод передбачає перевірку температурного коефіцієнта опору, який є інтегральним параметром СХ перетворювача.

Проведено критичний аналіз відомих методів перевірки ТРП шляхом нагріву електричним струмом, які базуються на порівнянні виміряного значення відповідного

приросту температури термочутливого матеріалу з теоретично визначеним. Показано, що досягнути необхідної точності можна лише на основі визначення зміни температурного коефіцієнта опору при порівнянні результатів тестових нагрівань до і під час експлуатації ТРП.

В другому розділі шляхом математичного моделювання визначено прогнозовану тривалість початкової ділянки теплового перехідного процесу при нагріванні електричним струмом перетворювача типової конструкції. Проаналізовано відому модель, побудовану на основі однорідних концентричних циліндрів, процеси теплообміну в якій описуються наступною системою рівнянь:

$$c_i \gamma_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left( \frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \times \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + w,$$

$$c_i \gamma_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left( \frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \times \frac{\partial T_i}{\partial r} \right),$$

де  $c_i$ - питома теплоємність ТЧМ (Дж/кг×К);

$\gamma_i$ - густина ТЧМ (кг/м<sup>3</sup>);

$T_i$ - температура ТЧМ (К);

$\lambda_i$ - коефіцієнт теплопровідності ТЧМ (Вт/м×К);

$\tau$ - час (с);

$r$ - радіальна координата (м);

$w$ - питома потужність джерела тепла (Вт/м<sup>3</sup>);

$i$ - індекс, який вказує на відношення означених вище величин до зовнішніх циліндрів моделі.

Для кожного з рівнянь задаються відповідні початкові та граничні умови. Показано, що в такій моделі відображення спіральної будови ТЧМ платинових ТРП при розв'язуванні нестационарної задачі з врахуванням міжвиткової взаємокомпенсації теплових потоків є достатньо складним, і може бути предметом окремої роботи.

Для розв'язку поставленої задачі запропоновано дискретний варіант моделі, в якій масив ТЧМ розбито на скінченну кількість однорідних циліндрів, відображених інтегральними значеннями теплоємності та теплопровідності. Масив засипки ТЧМ розбито на три зони: міжвиткову М31, внутрішню М32 та зовнішню М33 (рис.1). Зважаючи на незначний вплив зовнішніх елементів конструкції ТРП на перебіг початкової ділянки теплового перехідного процесу, враховано інтегральний відвід тепла від чутливого елемента. На основі запропонованої моделі, визначено прогнозований перехідний процес (рис.2) при нагріванні чутливого елемента ЕЧП-0183 Pt100 електричним струмом.

Критерієм для визначення тривалості початкової ділянки перехідного процесу запропоновано виконання умови:

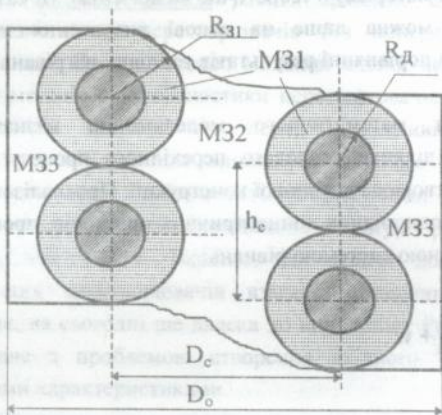
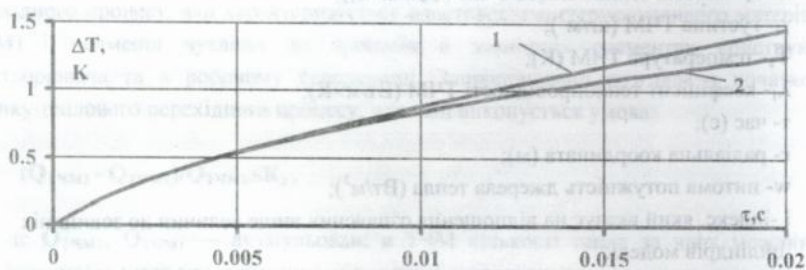
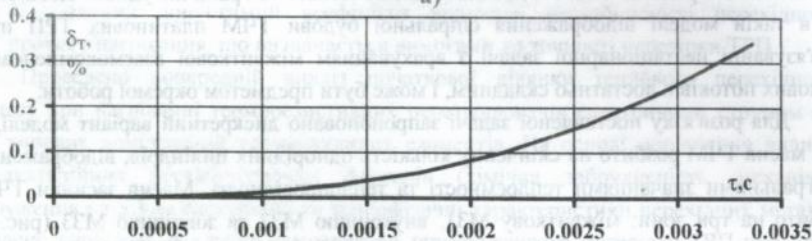


Рис.1. Фізична модель ЕЧП-0183 для відтворення початкової ділянки теплового перехідного процесу при нагріванні електричним струмом.

Тут:  $R_d$  - радіус дротини;  $R_{з1}$  - радіус міжвиткового масиву засипки М31;  $h_c$  - крок намотки;  $D_c$  - середній діаметр спіралі;  $D_o$  - діаметр отвору в керамічному каркасі; М33, М32 - зовнішній та внутрішній масиви засипки.



а)



б)

Рис.2. а) Розрахункові перехідні процеси при нагріванні ЕЧП-0183 Pt100 електричним струмом потужністю 1Вт. Крива 1- перехідний процес при теплопровідності ТЧМ  $\lambda_1=0,995\lambda_{1ном}$ , теплопровідності засипки  $\lambda_2=0,9\lambda_{2ном}$ , теплоємності засипки  $c_2=1,05c_{2ном}$ ; крива 2- при  $\lambda_1=1,015\lambda_{1ном}$ ,  $\lambda_2=1,1\lambda_{2ном}$ ,  $c_2=0,95c_{2ном}$ . б) Відносна зміна приросту температури ТЧМ  $\Delta T(\tau)$  при вказаних граничних змінах теплофізичних характеристик елементів конструкції.

$$\frac{1}{\Delta T} \left[ \left| \frac{\partial \Delta T}{\partial \lambda_1} \Delta \lambda_1 \right| + \left| \frac{\partial \Delta T}{\partial \lambda_2} \Delta \lambda_2 \right| + \left| \frac{\partial \Delta T}{\partial c_2} \Delta c_2 \right| \right] \times 100\% \leq \delta_n,$$

де  $\Delta T$ - усереднене значення нагріву ТЧМ;

$\Delta \lambda_1, \Delta \lambda_2, \Delta c_2$ - значення можливих абсолютних змін відповідних теплопровідностей та теплоємності засипки;

$\delta_n$  - допустиме значення відносної зміни значення  $\Delta T$ .

Задавши відповідними значеннями  $\Delta \lambda_1, \Delta \lambda_2, \Delta c_2$  (див. рис. 2), показано, що тривалість початкової ділянки перехідного процесу, яка зазнає відносної зміни не більше 0,05%, складає близько 1,6мс при діаметрі платинової дротини 0,05мм. Встановлено, що для даної конструкції чутливого елемента тривалість вказаної ділянки може бути визначена шляхом аналізу перехідних процесів при граничних умовах теплообміну з оточуючим середовищем (зміна коефіцієнта тепловідводу на три порядки) з наступним введенням відповідної поправки. Це дає можливість експериментально визначити параметри початкових ділянок теплового перехідного процесу, що характеризують термочутливий матеріал платинового ТЧЕ без порушення цілісності його конструкції.

Оскільки запропонована перевірка ТРП передбачає стрибкоподібну зміну електричного струму, певний вплив на процес нагрівання можуть мати реактивні складові опору. На базі запропонованої електричної моделі (рис.3) чутливого елемента типу ЕЧП-0183 проаналізовано перехідні електричні процеси в ТРП при стрибкоподібній зміні струму через нього.

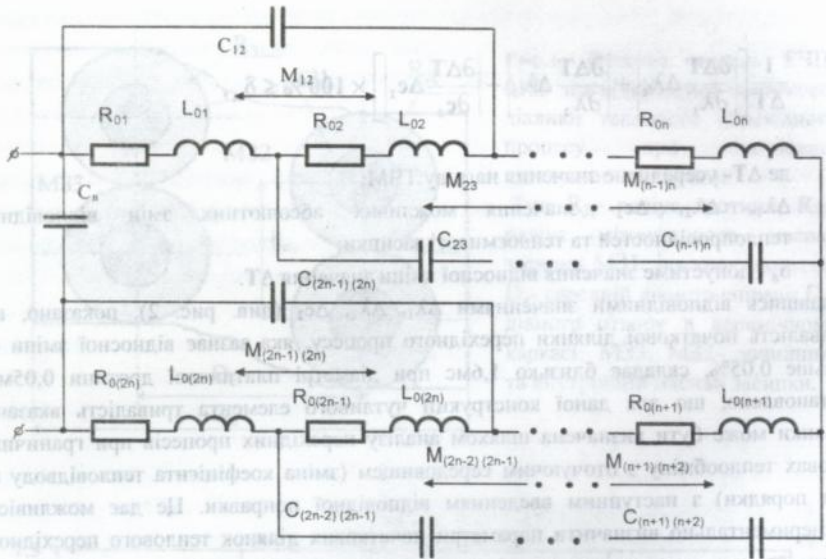
Отримано вираз, який описує вказані перехідні процеси:

$$h(\tau) = I + e^{-\tau/\tau_n} + e^{-\tau/\tau_k} \times \cos(\omega_k \tau),$$

де  $\tau_n$  - стала часу експоненційної складової перехідного процесу;

$\tau_k, \omega_k$  - стала часу згасання та кругова частота коливної складової перехідного процесу.

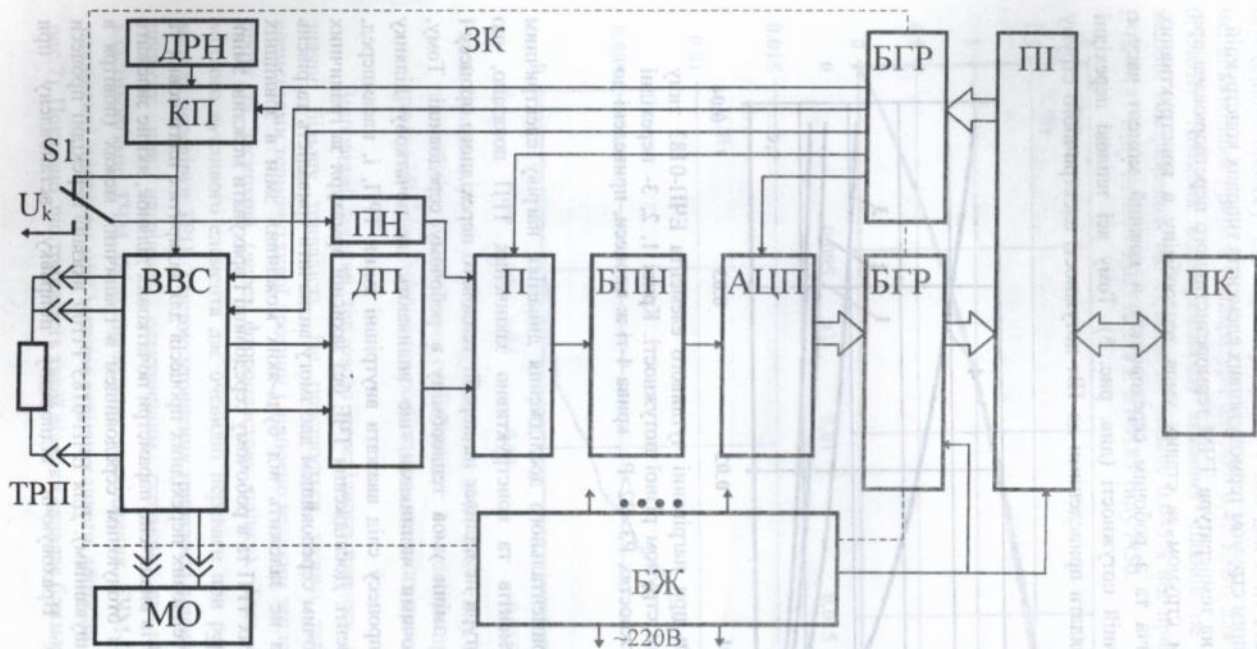
Вказані комутаційні процеси впливають на сумарну електричну енергію, що підводиться до ТЧМ за час його нагріву. Показано, що зміна сумарної електричної енергії під дією такого впливу не перевищує 0,01% при тривалості нагрівання понад 1мс. При збільшенні тривалості вплив реактивних складових опору ТРП на перебіг теплового перехідного процесу пропорційно зменшується. Оскільки вплив реактивних складових опору носить систематичний характер, то це не вносить додаткової похибки в результати проведених досліджень. Результати моделювання підтверджують експериментальні дослідження.



**Рис.3.** Електрична схема заміщення ЕЧП-0183. Тут:  $R_{0i}$ ,  $L_{0i}$  - активний опір та індуктивність одного витка спіралі ТЧМ;  $M_{i(i+1)}$ ,  $C_{i(i+1)}$  - взаємоддуктивність та ємність між сусідніми витками,  $C_n$  - ємність між відводами ТЧЕ

Розроблено апаратно-програмні засоби для проведення експериментальних досліджень початкової ділянки теплового перехідного процесу при нагріванні ТРП електричним струмом. Функціональна схема пристрою зображена на рис.4. Така структура пристрою забезпечує високу швидкодію та гнучкість алгоритму роботи. Фактично кожен вузол пристрою є програмно керованим. Вимірювальна схема пристрою побудована на основі рівноплечого моста. Це дозволяє забезпечити стабільність потужності електричного струму ТРП при зміні його опору в межах кількох відсотків і високу чутливість. Застосування алгоритмів автоматичної калібровки дозволяє спростити процес настройки та знизити вимоги до стабільності елементної бази.

На основі аналізу загальної функції перетворення розробленого пристрою показано, що гранична похибка вимірювання приростів температури ТЧМ внаслідок його нагріву імпульсами електричного струму не перевищує 0,8%. Оскільки дослідження передбачають визначення змін теплового перехідного процесу, то вплив систематичної складової похибки є несуттєвим. Проведено аналіз впливу нагрівання резистивних елементів мостової вимірювальної схеми. Показано, що розроблений пристрій забезпечує реєстрацію відтворюваності початкової ділянки теплового перехідного процесу з похибкою в межах  $\pm 0,01\%$ .



**Рис. 4.** Функціональна схема пристрою для дослідження процесів нагріву ТРП електричним струмом. ДРН - джерело регульованої напруги; КП - комутуючий пристрій; ВВС - вхідна вимірювальна схема; ТРП - досліджуваний терморезистивний перетворювач; МО - магазин опору;  $U_k$  - каліброчна напруга; S1 - перемикач; ДП - диференційний підсилювач; ПН - резистивний подільник напруги; П - перемикач; БПН - буферний повторювач напруги; АЦП - аналого-цифровий перетворювач; БГР Вх - блок гальванічної розв'язки вхідний; БГР Вих - блок гальванічної розв'язки вихідний; ПІ - паралельний інтерфейс; ПК - персональний комп'ютер; БЖ - блок живлення; А1-А5 - сигнали керування вузлами пристрою; ЗК - захисне кільце, як конструктивний елемент захисту від зовнішніх завад, що діють через паразитні провідності

В третьому розділі приведено результати експериментальних досліджень впливу різних дестабілізуючих чинників на перебіг теплових перехідних процесів при нагріванні електричним струмом термочутливих елементів типових конструкцій.

Показано, що зміна температури ТЧМ терморезистивного перетворювача при нагріванні електричним струмом за сталих умов теплообміну в конструктивних елементах перетворювача та з робочим середовищем в кожний момент часу є пропорційною електричній потужності (див. рис. 5). Тому всі теплові перехідні процеси доцільно розглядати приведеними до 1Вт потужності електричного струму ТЧМ.

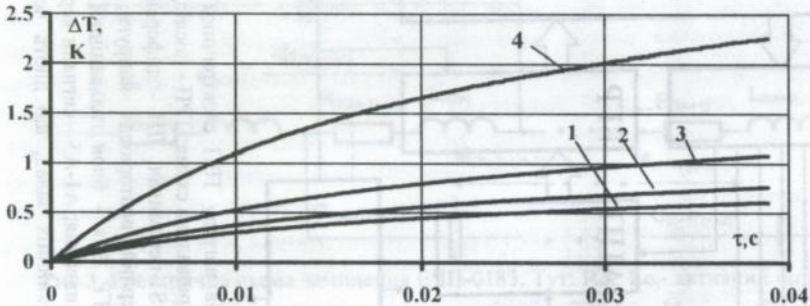


Рис.5. Перехідні процеси при нагріванні чутливого елемента ЕЧП-0183 типу Pt100 електричним струмом різної потужності. Криві 1, 2, 3- перехідні процеси при потужностях  $P_3 > P_2 > P_1$ , крива 4-ті ж процеси, приведені до 1Вт потужності.

На основі експериментального дослідження динаміки нагріву електричним струмом чутливих елементів та конструктивно закінчених ТРП показано, що наявність захисної арматури не впливає на перебіг теплового перехідного процесу і значно зменшує вплив зміни умов теплообміну в робочому середовищі. Тому, основними дестабілізуючими чинниками, що впливають на початкову ділянку теплового перехідного процесу слід вважати внутрішні зміни ТРП, і, насамперед, зміни в чутливому елементі. Дослідження ТЧЕ без захисної арматури за граничних умов теплообміну з робочим середовищем дає змогу визначити тривалість та рівень початкової ділянки, яка не залежить від будь-яких можливих змін в зовнішніх конструктивних елементах ТРП та в робочому середовищі і врахувати можливі зміни в конструкції самого ТЧЕ.

При дослідженні теплових перехідних процесів для відкритих платинових та мідних чутливих елементів визначено параметри початкових ділянок, які не залежать від зміни теплообміну з оточуючим середовищем в граничних межах (повітря в спокої та вода з перемішуванням). Для ЕЧП-0183 Pt100 вказані перехідні процеси зображені на рис. 6. Враховуючи відповідну поправку, встановлену при

моделюванні, визначено наступні параметри початкових ділянок теплового перехідного процесу, що характеризують ТЧМ: для ЕЧП-0183 Pt100 тривалість 3,2 мс, відповідний приріст температури близько 0,45 К/Вт, для ЕЧП-0183 Pt50 12 мс і 0,75К/Вт. Похибка відтворюваності вказаних ділянок не перевищує чутливості засобів вимірювання, що складає не більше 0,045% від приросту температури для ЕЧП-0183 типу Pt100 і 0,027% для ЕЧП-0183 типу Pt50.

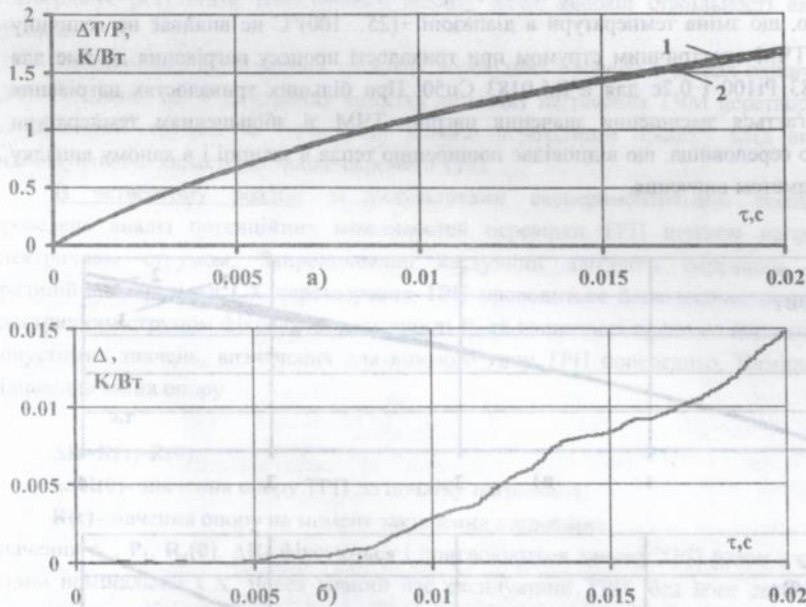


Рис.6. Процеси нагріву чутливого елемента ЕЧП-0183 типу Pt100 за різних умов теплообміну з оточуючим середовищем: 1 - повітря при  $t=+25^{\circ}\text{C}$ ; 2 - вода при  $t=+25^{\circ}\text{C}$  (а). Абсолютна розбіжність вказаних процесів (б).

Відповідні ділянки теплового перехідного процесу для мідних ТЧЕ мають значно більшу тривалість. Це пояснюється тісним тепловим контактом між елементами термочутливої дротини і відносно великим тепловим опором між мотком дроту та засипкою (через фторопластову плівку). Така особливість конструкції мідного чутливого елемента дає очевидні переваги при реалізації запропонованого методу перевірки ТРП. З метою уточнення тривалості ділянки теплового перехідного процесу при нагріванні електричним струмом, яка визначається виключно властивостями ТЧМ було проведено дослідження ЕЧМ-0183 Cu50 при різному заповненні простору між мотком термочутливого дроту та металевою гільзою (див рис.7). Показано, що тривалість такої ділянки складає близько 0,7с.

Дотична до кривої теплового перехідного процесу в початковий момент характеризує адіабатний процес нагрівання ТЧМ електричним струмом. Її нахил узагальнено характеризує тип та конструкцію ТЧЕ. Ця особливість може бути використаною для автоматичної ідентифікації ТРП в інтелектуальних засобах вимірювання температури.

Проведено дослідження впливу температури робочого середовища на перебіг початкової ділянки перехідного процесу при нагріванні плітинкових та мідних ТРП. Показано, що зміна температури в діапазоні  $(25 \dots 100)^\circ\text{C}$  не впливає на величину нагріву ТЧМ електричним струмом при тривалості процесу нагрівання до 5мс для ЕЧП-0183 Pt100 і 0,7с для ЕЧМ-0183 Cu50. При більших тривалостях нагрівання спостерігається зменшення значення нагріву ТЧМ зі збільшенням температури робочого середовища, що відповідає поширенню тепла в засипці і в даному випадку не є предметом вивчення.

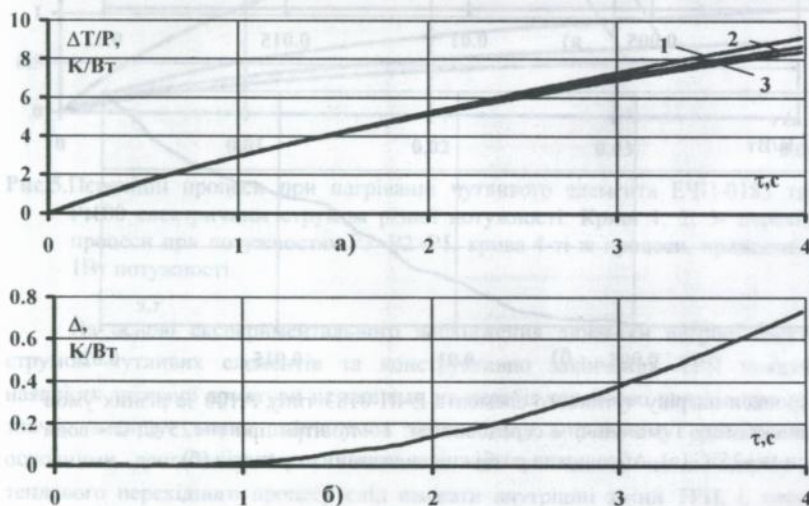


Рис. 7. Процеси нагріву чутливого елемента ЕЧМ-0183 типу Cu50 за різних типів заповнення простору між термочутливим матеріалом і захисною гільзою: 1 - повітря; 2 - засипка оксиду алюмінію; 3 - вода (а). Абсолютна розбіжність кривих 1 та 3 (б).

Проведено дослідження впливу потужності та тривалості імпульсів електричного струму на зміну статичної характеристики перетворення ТРП. Встановлено, що СХ не змінюється при потужностях електричного струму до 8,7Вт і тривалості до 20мс для ЕЧП-0183 Pt100 та 17,4Вт і 0,5с для ЕЧМ-0183 Cu50.

З метою дослідження впливу на початкову ділянку теплового перехідного процесу проводилось штучне спотворення статичної характеристики ТРП в наслідок тривалого циклічного пропускання через ТЧМ імпульсів струму значної амплітуди (близько 0,7А). Показано, що зміна температурного коефіцієнта опору ТРП не призводить до суттєвих змін приросту температури на початковій ділянці теплового перехідного процесу (співвідношення відповідних відносних змін не менше 5). Це підтверджує результати теоретичного аналізу щодо високої стабільності вказаної ділянки.

Проводилось дослідження теплових перехідних процесів в межах одного типу ТРП. Показано, що в загальному випадку динаміку нагрівання ТЧМ перетворювача електричним струмом на початковій ділянці перехідного процесу слід вважати індивідуальною характеристикою окремого ТРП.

В четвертому розділі за результатами експериментальних досліджень проведено аналіз потенційних можливостей перевірки ТРП шляхом нагрівання електричним струмом. Запропоновано наступний алгоритм перевірки. Після традиційної перевірки СХ перетворення ТРП проводиться його тестове нагрівання електричним струмом фіксованої потужності  $P_1$  та тривалості  $\tau_1$ , що не перевищують допустимих значень, визначених для кожного типу ТРП попередньо. Вимірюється відповідна зміна опору

$$\Delta R = R(\tau) - R(0),$$

де  $R(0)$  - значення опору ТРП до початку нагрівання;

$R(\tau)$  - значення опору на момент закінчення нагрівання.

Значення  $\tau_1$ ,  $P_1$ ,  $R_1(0)$ ,  $\Delta R_1$  фіксуються і присвоюються даному ТРП разом з класом згідно номінальної СХ. Через певний час експлуатації ТРП, без його демонтажу, проводиться аналогічне нагрівання електричним імпульсом потужністю  $P_2$  і тривалістю  $\tau_2$ . Відповідно фіксуються значення потужності  $P_2$ , початкового опору  $R_2(0)$  та його приросту  $\Delta R_2$ . Реєстрація значення опорів  $R_1(0)$  та  $R_2(0)$  необхідна для врахування нелінійності СХ перетворення (для платинових ТРП). Чутливість перетворення в умовах експлуатації може бути виражена:

$$S_2 = \frac{E_1 \Delta R_2}{E_2 \Delta R_1} S_1,$$

де  $S_1$  - чутливість, присвоєна ТРП при традиційній перевірці до початку експлуатації;

$E_1$ ,  $E_2$  - кількість електричної енергії, що підводиться до ТЧМ при відповідних тестових нагріваннях.

Враховуючи нелінійність СХ перетворення платинових ТРП, отримано вираз для визначення значення зміни опору, зведеного до температури робочого середовища при тестовому нагріванні в умовах експлуатації:

$$\Delta R_{120} = (MR_0 - R_2) - (\sqrt{MR_0 - R_2} - \sqrt{MR_0 - R_1} + \sqrt{MR_0 - R_1 - \Delta R_1})^2,$$

де  $M = 1 - \frac{A^2}{4B}$ ;

$R_0$ ,  $A$ ,  $B$  - коефіцієнти полінома, що описує номінальну статичну характеристику перетворення ТРП.

Отримано залежність додаткової похибки методу від різниці температур робочого середовища при тестових нагріваннях до і під час експлуатації ТРП, за умови нелінійності СХ.

Показано, що проведені дослідження доводять можливість перевірки ТРП згідно запропонованої методики принаймні в межах класу С. Відтворюваність визначених експериментально початкових ділянок в значній мірі визначалася точністю засобів вимірювання. Тобто, існує потенційна можливість підвищення точності методики за рахунок проведення додаткових досліджень з використанням більш досконалих засобів. Вказано, що зменшити вплив інструментальної складової похибки можна за рахунок відповідних змін конструкції ТЧЕ, направлених на збільшення тривалості та рівня початкових ділянок теплового перехідного процесу, наприклад, збільшення діаметру термочутливої дротини та теплового контакту між її елементами, застосування (де це можливо) засипок з меншою теплопровідністю та вищою стабільністю теплофізичних характеристик.

Вказано, що проведені теоретичні та експериментальні дослідження, запропоновані схемотехнічні рішення та алгоритмічне забезпечення можуть бути використаними в інтелектуальних засобах вимірювання температури з елементами перевірки первинних перетворювачів. Це дасть змогу підвищити надійність повного каналу перетворення температури, повністю уникнути затрат часу та праці на періодичні перевірки ТРП.

## ВИСНОВКИ.

1. На основі теоретичних та експериментальних досліджень динаміки нагріву ТРП електричним струмом показано, що початкова ділянка теплового перехідного процесу не залежить від зовнішніх дестабілізуючих факторів і є характеристикою властивостей термочутливого матеріалу.

2. На основі запропонованих математичних моделей теплових та електричних процесів при нагріванні ТРП електричним струмом вказано критерії для визначення та визначено прогнозовані параметри початкової ділянки. Показано, що вплив реактивних складових електричного опору ТРП на перебіг теплового перехідного процесу не вносить вагомих похибок при тривалості нагрівання понад 1мс.

3. На основі експериментальних досліджень динаміки нагріву ТРП типових конструкцій електричним струмом за умов впливу різних дестабілізуючих факторів встановлено фактичні параметри початкових ділянок теплового перехідного процесу.

доведено їх високу стабільність і придатність для перевірки перетворювачів без вилучення з робочого середовища.

4. Розроблено алгоритми та схемні рішення для перевірки ТРП в умовах експлуатації на основі нагрівання імпульсами електричного струму. Отримано співвідношення для врахування нелінійності платинових ТРП.

5. Показано, що запропонована методика перевірки ТРП згідно проведених експериментальних досліджень може бути застосованою принаймні до перетворювачів класу С з діаметром термочутливого дроту не менше 0,05 мм. Вказано на можливі шляхи підвищення точності перевірки.

7. Вказано, що проведені теоретичні та експериментальні дослідження, запропоновані схемотехнічні рішення та алгоритмічне забезпечення можуть бути використаними в інтелектуальних засобах вимірювання температури з елементами перевірки первинних перетворювачів.

### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ВІДОБРАЖЕНІ В НАСТУПНИХ ПУБЛІКАЦІЯХ:

1. Атаманчук Б., Базилевич О., Ришковський О. Імпульсний режим терморезистивних перетворювачів у засобах прецизійного вимірювання температури // Вісник ДУ "Львівська політехніка", "Автоматика, вимірювання та керування", Львів.-1995.- Вип. № 292. - С. 39-42.

2. Атаманчук Б. М., Микитюк З. М., Питьель І. Д., Поліщук С. С., Ришковський О. П., Федорчук А. А., Гарнавська Р. Ю. Система вимірювання і регулювання температурних режимів газотурбінних двигунів // Вимірювальна техніка та метрологія. Львів-1995.- №51.- С.30-32.

3. Atamanchuk B., Stadnyk B., Sljusarenko O., Bernhard F. Wykorzystanie nagrzewania termorezystancyjnych przetwornikow pradem elektrycznym dla celow diagnostyki // Праці в матеріалах 13 Międzyuczelnianej konferencji metrologow MKM'96. Czestochowa.-1996.- С.19-23.

4. Atamanchuk B., Stadnyk B., Sljusarenko O. Nutzung des LCSR-Tests fuer die Pruefung der Statischen Kennlinie von Widerstandsthermometern // Праці в матеріалах 41-го Міжнародного colloquium. Львенау.-1996.- Ч.1- С.682-687.

5. Атаманчук Б., Стадник Б., Слюсаренко О., Бернгард Ф. LCSR-тест як метод діагностики терморезистивних перетворювачів // Вимірювальна техніка та метрологія. Львів.- 1996.- № 52.- С.44-46.

6. Атаманчук Б., Бернгард Ф. Нагрів терморезистивних перетворювачів електричним струмом як характеристика їх стану // Вісник ДУ "Львівська політехніка" "Автоматика, вимірювання та керування", Львів.- 1997.- Вип. №314.- С.105-109.

7. Атаманчук Б. Н., Ковальчук Н. Г., Микитюк З. М., Питьель І. Д. Коррекция инерционности термопреобразователей в системе сбора и обработки информации // Тез. докл. 6-ой Всесоюзной конференции "Электрические методы и

средства измерения температуры. "Электротермометрия-88". Луцк.- 1988.- ч.1.- С.28.

8. Атаманчук Б.Н., Ковальчук Н.Г., Мироненко Д.И., Микитюк З.М., Пытель И.Д., Полищук Е.С., Рышковский А.П., Тарнавская Р.Ю., Тищенко Л.М. Система измерения и регулирования температуры// Тез. докл. 6-ой Всесоюзной конференции "Электрические методы и средства измерения температуры. "Электротермометрия-88", Луцк.- 1988.- ч.1.- С.29.

9. Атаманчук Б.Н., Ковальчук Н.Г., Пытель И.Д. Коррекция динамических характеристик термопреобразователей в многоканальных системах контроля температурного поля газотурбинного двигателя// Тез. докл. межотраслевой научно-технической конференции "Диагностика-90", Москва-Харьков-Рыбачье.- 1990- Т.2.- С.65-66.

10. Атаманчук Б.Н., Микитюк З.М., Пытель И.Д., Рышковский А.П., Федорчук А.А. ИИС контроля и регулирования температуры газотурбинных двигателей// Тез. докл. Всесоюзной научно-технической конференции "ИИС-91". Санкт-Петербург.- 1991.- С. 24-25.

11. Атаманчук Б.М., Микитюк З.М., Пытель И.Д., Полищук Е.С., Рышковский О.П., Федорчук А.А., Тищенко Л.М., Тарнавская Р.Ю. Система вимірювання і регулювання температури газів газотурбінних двигунів// Тез. доп. 7-ї міжнародної науково-технічної конференції "Електричні методи та засоби вимірювання температури". Львів.- 1992.- С. 8.

12. Атаманчук Б.М., Ковальчук М.Г., Пытель И.Д. Корекція інерційності термоперетворювачів в системах контролю температури// Тез. доп. 7-ї міжнародної науково-технічної конференції "Електричні методи та засоби вимірювання температури". Львів.- 1992.- С. 9.

13. Atamanchuk B., Basylevych O., Stadnyk B., Ryshkovsky A., Chaikovskiy O. Optimization of inductive voltage dividers in the precision temperature measurement system// Тези доп. Materialy I/II miedzynarodowego seminarium naukowego "Metody i technika przetwarzania sygnalow w pomiarach fizycznych". Rzeszow.- 1993/94.- С.25-27.

14. Атаманчук Б., Стадник Б., Слюсаренко О., Бернгард Ф. LCSR-тест як метод діагностики терморезистивних перетворювачів// Тез. доп. на 1-th International modelling school, Алушга, Крим.- 1996.- С.20.

#### АНОТАЦІЯ

**АТАМАНЧУК Б. Перевірка статичної характеристики терморезистивних перетворювачів шляхом нагріву електричним струмом.**

Дисертація в вигляді рукопису на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05.11.04 - прилади та методи вимірювання теплових величин. Державний університет "Львівська політехніка". Львів. 1997.

В дисертації розроблено методику, засоби і алгоритми бездемонтажної перевірки терморезистивних перетворювачів. Проведено аналіз запропонованої методики на базі розроблених математичних моделей. Викладено результати

експериментальних досліджень для базових конструкцій перетворювачів. Проведено аналіз метрологічних характеристик засобів для практичної реалізації запропонованої методики. Розглянуто можливості застосування початкової ділянки теплового перехідного процесу в інтелектуальних засобах вимірювання температури.

Ключові слова: терморезистивний перетворювач, теплосмність, перехідний процес, статична характеристика перетворення.

**АТАМАНЧУК Б. Проверка статической характеристики терморезистивных преобразователей путём нагрева электрическим током.**

Диссертация в виде рукописи на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.04 - приборы и методы измерения тепловых величин. Государственный университет "Львівська політехніка". Львов. 1997.

В диссертации разработаны методика, средства и алгоритмы бездемонтажной проверки терморезистивных преобразователей. Проведён анализ предложенной методики на базе разработанных математических моделей. Изложены результаты экспериментальных исследований для базовых конструкций преобразователей. Проведён анализ метрологических характеристик средств для практической реализации предложенной методики. Рассмотрены возможности применения начального участка теплового переходного процесса в интеллектуальных устройствах измерения температуры.

Ключевые слова: термопреобразователь сопротивления, нагрев, переходный процесс, статическая характеристика преобразования.

**ATAMANCHUK B. TEST OF STATIC CHARACTERISTICS THERMOCONVERTER OF RESISTANCE BY ELECTRIC HEATING.**

The dissertation as manuscript for obtaining of the degree of candidate of technical sciences, speciality 05.11.04 - Devices and methods for measuring thermal values. State University "Lviv Polytechnic", Lviv, 1997.

Method, equipment and algorithm for nonremovable test of characteristic of conversion of thermoconverter of resistance are worked out in the dissertation and on the basis of proposed mathematics model has been carried out the analysis of the method. The results of experimental researching for basic designs are given. Metrological analysis of practical potentialities of the proposed method has been done. The possibility of application of the beginning section of heat transient process in intelligent devices for measuring temperature.

Keywords: thermoconverter of resistance, heating, transient process, static characteristic of conversion.

Підписано до друку 28.07.97. Формат 60\*84/16.

Друк офсетний. Папір офсетний. Обсяг 1 др. арк.

Зам. № 97/8-15. Тир. 100 прим.

Друк ТзОВ "Простір М"

285075

AB 38347

**AB 38.347**