

Державний університет "Львівська політехніка"

На правах рукопису

УДК 536.532

МІНКІНА Вальдемар

ВИМІРЮВАННЯ ВИСОКОЇ СТАЦІОНАРНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ
МЕТОДАМИ ЕКСТРАПОЛЯЦІЇ ПЕРЕХІДНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Спеціальність 05.11.04 - прилади та методи вимірю-
вання теплових величин

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів - 1995



Дисертація є рукопис

Робота виконана у Державному Санкт-Петербурзькому інституті точної механіки і оптики (Технічному університеті)

Науковий консультант: д.т.н., професор, чл.-кор.
метрологічної академії Росії ЯРИШЕВ М.О.

Офіційні опоненти :

- 1.Д.т.н., професор Симбірський Д.Ф.
- 2.Д.т.н., професор Столярчук П.Г.
- 3.Д.т.н., с.н.с. Семерак М.М.

Провідна організація: НВО "Термоприлад", м.Львів

Захист дисертації відбудеться "02" VI 1995р.
о 14⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д04.06.11 у Державному університеті "Львівська
політехніка" (290646, м.Львів-13, вул.С.Бандери,12)
ауд. 226 гол. корп.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці
Державного університету "Львівська політехніка"
(290646, м.Львів-13, вул.Професорська,1).

Автореферат розісланий "20" IV 1995 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради , к.т.н.

Я.Т.Лушчик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Проблема надійності і підвищення точності вимірювання температури в наукових і прикладних задачах зберігає свою актуальність, незважаючи на значний внесок в її вирішення силами дослідників та інженерів на протязі останнього десятиріччя. Температурний діапазон роботи різноманітних по конструкції контактних засобів вимірювання температури є обмежений, по-перше, стійкістю елементів термоперетворювачів до впливу факторів, характерних для досліджуваного об'єкту вимірювання, і, по-друге, стабільністю їх метрологічних характеристик. Особливо гостро це проявляється при широкодіапазонних вимірюваннях температури в потоках газу, хімічній промисловості, атомній енергетиці, розплавлених металах, при вимірюванні температури плазми та в спеціалізованих технологічних процесах.

Обмеженість виміральної інформації, яка отримується від термоперетворювача, вимагає розширеної постановки досліджень систематичних похибок засобів вимірювання, формування нових підходів до визначення:

- статико-динамічних характеристик термоперетворювачів;
- фізичних та нелінійних математичних моделей, які би забезпечили прогнозування (екстраполяцію) вимі-

ривальної інформації.

При цьому найбільш цінним має бути теоретичне обґрунтування та практична реалізація методів екстраполяції результатів експеримента за межі температурного діапазону фізичного існування термперетворювачів.

Незважаючи на порівняно велику кількість публікацій, патентів і авторських свідоцтв, практичний вихід на вимірювання температури, яка лежить за межами допустимого температурного інтервалу роботи вимірвального перетворювача температури (ВІП), на теперішній час є скромним. Це пояснюється двома причинами: недостатньою проробкою методичних основ та малим практичним досвідом, накопиченим в цій галузі. Значна частина досліджень направлена на вирішення задачі визначення стаціонарної температури рідких або газоподібних середовищ, що відображено в десятках цитованих публікацій, з яких відзначимо роботи таких авторів, як : F. Bernhard, F. Burger-Scheidlin, S. Wiśniewski, O.M.Гордов, Ю.Н. Доденко, Г.Н.Дульнев, Є.М.Душин, Дво-Тхай-Зіеу, В.Г.-Зубов, М.Г.Ковальчук, І.П.Курітник, В.І.Лах, F. Lineneweg, O. Lutz, Я.В.Малков, L. Michalski, K. Mollenhauer, T. Nábauer, І.Д.Питель, І.П.Пеллепейченко, С.П.Поляков, Є.С.Полішук, А.Д.Пінчевський, M. Rożko, Б.І.Стадник, К.С.Семенистий, Д.Ф.Симбірський, Л.І.Сметяніна, Л.М.Тищенко, D. Hofmann, T. Haupt, W. Szewczyk, K. Eckersdorf, М.О.Яришев, T. Jaszczur.

Окремим напрямком досліджень є теоретичне об-

грунтування динамічних моделей термоперетворювачів, розробкою яких займалися: А.М.Азізов, Н.П.Бувін, F. Bernhard, S. Wisniewski, O.M.Гордов, A. Zuchowski, Л.А.Коздоба, Г.М.Кондратьєв, E. Kacki, A.B.Ликов, F. Lieneweg, L. Michalski, Б.М.Олейник, А.Д.Пінчевський, Є.С.Платунов, А.О.Саченко, Д.Ф.Симбірський, Л.І.Сметаніна, S. Skoczowski, П.Г.Столярчук, D. Hofmann, T. Haupt, M. Hering, В.Є.Шукшунов, K. Eckersdorf, М.О.Яришев.

В процесі вивчення розрахункових моделей термоперетворювачів загальнопромислового призначення та модернізації існуючих методик вимірювання високої температури проявилась нагальна необхідність більш глибокого підходу до обґрунтування галузей застосування екстраполяційних методів вимірювання та чіткого формулювання тих умов, які би обмежували їх практичне використання та впровадження.

Пропонована дисертація присвячена розробці нового напрямку у розвитку екстраполяційних методів вимірювання високих стаціонарних температур на основі нелінійних математичних моделей ВПТ з використанням сучасних машинних засобів і процедур обробки виміральної інформації. Тим самим ставиться на надійну теоретичну основу вирішення важливої науково-технічної задачі створення засобів вимірювання температури багаторазового застосування, які забезпечують відновлення з прогнозованою похибкою температури об'єктів за межами фізичного існування (виживання) ВПТ.

Наукові дослідження автора по динамічних методах вимірювання високої стаціонарної температури є складовою частиною наукової програми Інституту електроніки та систем керування Ченстоховського політехнічного інституту.

Мета і задачі роботи. Основним завданням роботи є підвищення надійності і рівня точності вимірювання високих стаціонарних температур, які виходять за межі температурних діапазонів нормованих метрологічних характеристик термоперетворювачів.

Для досягнення цієї мети було необхідно:

- критично проаналізувати описані в літературних джерелах методи екстраполяції та корекції показів термоперетворювачів, які базуються на перехідних часових характеристиках, що отримані на основі рішень лінійних задач теплообміну ВІПТ;
- створити лінійні та квазілінійні моделі динамічних характеристик термоперетворювачів;
- обґрунтувати необхідність і розробити нелінійні моделі термоперетворювачів першого і вищого порядків;
- отримати перехідні характеристики для однопараметричної нелінійної моделі ВІПТ для різних типів температурних залежностей показників термічної інерції;
- провести математичне моделювання процесів екстраполяції та на його основі дати метрологічну оцінку похибок в залежності від довжини ділянки перехідної характеристики, діапазону екстраполяції, вибору

апроксимуваних залежностей;

- розробити алгоритми статистичної обробки результатів вимірювань і визначити вплив ступеня дискретизації експериментальних даних на точність відновлення значень температури;
- провести експериментальну лабораторну перевірку запропонованих нелінійних моделей ВПТ і засобів обробки даних з попередньою оцінкою ступеня нелінійності процесу теплообміну стосовно до вимірювання температури киплячої води та газового середовища;
- провести серію вимірювань температури рідкої сталі і визначити метрологічні (по точності) можливості динамічного методу екстраполяції в умовах суттєво нелінійного процесу теплообміну при застосуванні різноманітних типів термоперетворювачів, включаючи авторські розробки ВПТ багатократної дії;
- обґрунтувати розробку комп'ютеризованого (на базі IBM-PC-486) вимірювального комплексу і практично перевірити програму обробки експериментальних даних по принципу "on-line", тобто в реальному масштабі часу.

На захист виносяться:

- квазілінійні та нелінійні динамічні моделі ВПТ та їх перехідні характеристики, як основа екстраполяційних методів відновлення стаціонарної температури об'єктів дослідження;
- результати аналітичних оцінок ступеня нелінійності процесів при вимірюванні температури рідин і газів, включаючи розплавлені метали;

- система показників точності, що визначають похибки відновлення температури методами екстраполяції при зміні вхідних даних реєстрованої ділянки кривої перехідного процесу;
- програми комп'ютеризованої статистичної обробки експериментальних даних;
- результати лабораторних і промислових випробувань термоперетворювачів різних типів;

Методи досліджень. Поставлені задачі вирішені в дисертації на основі аналітичної теорії теплообміну з врахуванням внутрішньої структури і температурних залежностей теплофізичних властивостей матеріалів ВПТ; методами математичної статистики теорії випадкових процесів (метод Монте-Карло); методами теорії подібності та математичного моделювання.

Наукова новизна роботи полягає у розвитку нового напрямку екстраполяційних методів визначення температури при обмеженому об'ємі інформації. У відповідності з цим в дисертації:

- запропоновані нелінійні теплові моделі ВПТ, на основі яких проведено аналіз точності різних варіантів обробки кривих перехідних процесів з метов встановлення значень стаціонарних температур різних середовищ;
- виявлені обмеження лінійних та квазілінійних моделей динаміки теплообміну термоперетворювачів, які використовуються в різноманітних варіантах корекції та екстраполяції їх показів;
- визначено характер нелінійності процесу теплооб-

міну ВПТ в різних середовищах;

- запропоновані апроксимаційні характеристики, які враховують температурні залежності параметрів моделі;

- виявлено вплив вільно-конвективного та променистого теплообмінів в газах на характер нелінійності процесу теплообміну (із-за їх протилежних тенденцій змін в процесі наближення t до t_m існує неоднозначність залежності відношення показників термічної інерції $\tau(t, t_m) / \tau(t, t_p)$); встановлено, що це відношення для заліза та сталей становить $\tau(t, t_m) / \tau(t, t_p) \approx 0,55-0,75$; виявлена значна (40 %) нелінійність навіть у вузькому температурному інтервалі ($t < 100^\circ\text{C}$) при конвективному теплообміні у воді; для розплавлених сталей ($t < 1500^\circ\text{C}$) коефіцієнт вільно-конвективної тепловіддачі зменшується в 0,5-0,6 разів, тобто нелінійність теж виявляється значно;

- встановлені кількісні критерії надійності застосування динамічних методів відновлення значень температури; методами математичного моделювання та статистичної обробки вхідних даних визначені систематичні та випадкові складові похибки динамічних методів;

- на основі формулювання нелінійної задачі для ВПТ з врахуванням його внутрішньої структури для практичних цілей вимірювання температури розплавлених сталей створена однопараметрична нелінійна модель, як найбільш прийнятна в умовах дефіциту інформації.

Практична цінність дисертації визначається:

- можливостями широкої реалізації теоретичних положень роботи і впровадження динамічних методів відновлення стаціонарних температур в умовах, які виключають безпосереднє вимірювання контактними ВПТ;
- лабораторними дослідженнями екстраполяційного методу вимірювання температури, узгодженість результатів вимірювань з теоретичними оцінками значень похибок;
- результатами великої кількості вимірювань температури розплавленої сталі при її промисловому виробництві на Ченстоховському (Польща) металургійному комбінаті з використанням типових конструкцій ВПТ одноразової дії, їх авторських модернізацій і конструкцій ВПТ багатократного застосування, які підтвердили перспективність і конкурентноспроможність екстраполяційного методу, сумішеного з сучасною системою статистичної обробки даних експерименту.

Економічна ефективність роботи підтверджена співставленням оцінок вартості застосування промислових платинородій-платинових ВПТ одноразової дії при їх заміні при динамічному методі вимірювання на ВПТ багатократного застосування і переході на чутливі елементи хромель-альмелевої групи. При заміні 3-4 одноразових ВПТ в процесі одної плавки, наявності 3-х мартеновських печей і триразової виплавки за добу річний економічний ефект оцінюється для ливарного цеху комбіната на рівні 70 млн. злотих в

цінах початку 1993 р., що підтверджується атестатом металургійного комбінату.

Особистий внесок автора є основним на всіх етапах досліджень і полягає у формулюванні завдань та безпосередньому виконанні розрахункової та експериментальної частин роботи. Автором обґрунтовані підходи до використання нелінійних моделей при динамічних методах вимірювання стаціонарних температур.

Апробація роботи. По мірі виконання роботи її результати доповідались автором на конгресах, наукових конференціях, нарадах і семінарах, в тому числі на xiv (Ченстохов, 1979, дві доповіді), xv (Варшава, 1981), xvi (Люблін, 1983) Міжвузівських конференціях метрологів; iv Науковому симпозиумі по метрології (Вільга, 1987); Міжнародній конференції "Температура '89" (Зуль, ФРН, 1989); Науковому семінарі "Застосування сенсорів в технології і організації продукції" (Ченстохов, 1991), в Технічному університеті Карлсруе (ФРН, 1987 і 1990) і Технічному університеті Західного Берліну (1990); в Державному Санкт-Петербурзькому інституті точної механіки і оптики (Технічному університеті) на кафедрах фізики, теплофізики і факультеті підвищення кваліфікації викладачів (1991, 1992, 1993, 1994); Міжнародній конференції в Ільменау (ФРН, 1992, 1995); Науковому конгресі "Сенсор-93" в Нюрнберзі (ФРН, 1993). Окремі фрагменти роботи доповідались на нарадах кафедри вимірвальної техніки Ченстоховського політехнічно-

го інституту, науково-технічних радах Ченстоховського металургійного заводу, зборах громадських технічних організацій (Громада польських електриків, Громада інженерів і техніків металургійної промисловості).

Публікації. Основні результати дисертації викладені в 43 публікаціях автора в науково-технічних журналах Польщі, Росії, Німеччини (НДР, ФРН), Швейцарії, Словаччини, матеріалах конгресів, конференцій і симпозіумів, а також в описах 4-х патентів на винаходи і у 8-ми звітах по виконаних науково-дослідних господарсько-технічних роботах.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти глав, заключних висновків, списку літератури. Дисертація містить 239 стор. основного тексту, 124 рисунки і схеми, 23 таблиці, три пакети комп'ютерних програм і 6 додатків, які містять роздрук розрахункових даних. Список літератури містить 216 бібліографічних посилань.

ЗМІСТ РОБОТИ

В першій главі проведено критичний огляд стану теорії динаміки термоперетворювачів і оцінки ефективності методів і засобів, що застосовуються для скорочення часу вимірювання стаціонарної температури (корекція динамічних характеристик ВІП (1-9, 13, 18-21, 36-38, 42), пульсаційні методи, застосування двох або більше термоперетворювачів). Тут

же викладені авторські варіанти лінійних моделей динаміки термоперетворювачів (10-14,16,17,22,39, 40-42), сіткові моделі ВПТ (10,13,15,17,29, 34,38, 39,43) і винесені в додаток розрахункові залежності теплообміну об'єктів із застосуванням спеціальних систем координат (подвійної циліндричної, еліптично-циліндричної, тороїдальної, параболічно-циліндричної та ін.) (29,34). Проведена класифікація методів, направлених на скорочення часу вимірювання температури (рис.1). Виконано аналіз літературних

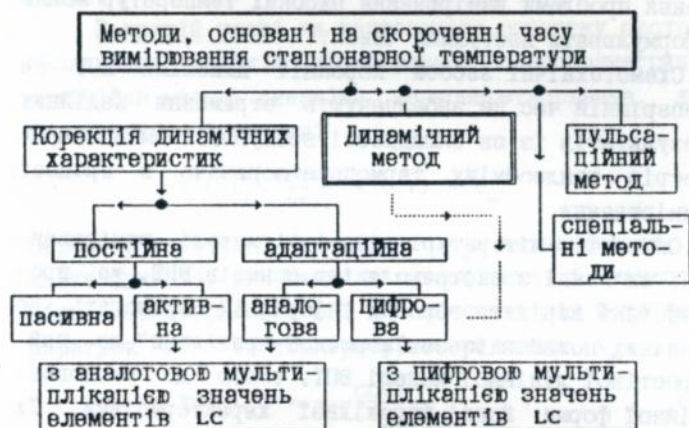


Рис.1. Різновиди методів, основаних на скороченні часу вимірювання стаціонарної температури

першоджерел і проведена авторська оцінка похибок відновлення значень стаціонарної температури для

різних варіантів динамічних методів, які основані на експоненційній характеристиці перехідного процесу в залежності від ступеня екстраполяції показів ВПТ (23,32,33).

Детально розглянута динаміка лінійної моделі з передаточною функцією $Y(s)^{-1} = (Ts+1)^m$ для різних дійсних значень m з метою її використання для опису перехідних характеристик ВПТ центральної, об'ємної або поверхневої дії (22,25,26,28).

Підсумкові результати огляду стосовно до вирішення проблеми вимірювання високих температур можна сформулювати наступним чином:

1. Схемотехнічні засоби корекції динаміки ВПТ на теперішній час не забезпечують отримання надійних результатів із-за складності врахування змін параметрів теплообміну термоперетворювача в процесі вимірювання.

2. Описані в літературі динамічні моделі вимірювання, зв'язані з екстраполяцією показів ВПТ, та пропонувані варіанти обробки інформації приводять до значних помилок із-за "жорсткої прив'язки" до найпростішої лінійної моделі ВПТ, тобто до експоненційної форми його перехідної характеристики. Їх температурна границя є обмеженою і навряд чи може перевищувати 1000°C , тобто в багатьох практичних застосуваннях вони не є конкурентноспроможними перед прямими контактними методами.

3. Для розширення температурних меж застосування динамічних методів необхідно: а) більш повне теоре-

тичне обґрунтування з врахуванням особливостей як зовнішнього, так і внутрішнього механізмів теплообміну ВПТ, а також температурної залежності теплофізичних характеристик; б) використання сучасних методів і засобів обчислювальної техніки для обробки експериментальних даних. Рішення цих задач представляється актуальним, бо підносить проблему екстраполяційних методів вимірювання температури на новий рівень і розширює прикладні галузі її застосування при вимірюванні температури в промисловості.

В другій главі як першооснова розвитку екстраполяційних методів пропонується однопараметрична нелінійна модель динаміки термодетворювача, яка формулюється у вигляді

$$\tau(t, t_m) \frac{dt(t)}{dt} + t(t) = t_m \quad (1)$$

Параметр термічної інерції $\tau(t, t_m)$ визначається, як деяка функція, яка включає теплофізичні і теплообмінні характеристики ВПТ в залежності від його температури $t(t)$ та температури середовища t_m :

$$\tau(t, t_m) = \frac{c(t)}{\alpha(t, t_m) S} \quad (2)$$

де $c(t)$ - повна теплоємність, $W \cdot s / K$; α - коефіцієнт тепловіддачі (або теплопередачі), $W / (m^2 K)$; S - площа зовнішньої поверхні теплообміну ВПТ з досліджуванним середовищем, m^2 .

По аналогії з лінійною моделлю, коли $T = const$, про- водиться уточнення границь можливого застосування

моделі (1) з точки зору неоднорідності температури по об'єму термоперетворювача, розрахунку теплоємності $c = c(t)$ та ін. Однак головну увагу зосереджено на розрахунках і оцінках ступеня нелінійності параметра T та виду його температурної залежності в межах зміни t від початкової (t_p) до вимірюваної (t_m) температур.

У зв'язку з недостатнім об'ємом даних для розрахунку конвективного теплообміну в динамічному процесі автор був змушений використовувати наведені в різних літературних джерелах критеріальні формули теплообміну, виведені із умов стаціонарного режиму. Послідовно виконані розрахунки зміни показника термічної інерції в процесі конвективно-променистого теплообміну з газовим середовищем (24,35), конвективного теплообміну у воді і розплавлених металах. Ступінь нелінійності процесу визначена, як відношення $\tau(t_m, t_p) / \tau(t_p)$, де t_p відповідає або початковій t_0 температурі ВПТ, або температурі t_p регулярної стадії.

Вплив вільно-конвективного та променистого теплообміну із-за їх протилежних тенденцій змін в процесі наближення t до t_m приводить до неоднозначної залежності відношення $\tau(t_m, t_p) / \tau(t_p)$. Однак, в діапазоні $0 \leq t \leq 1000^\circ\text{C}$ з врахуванням залежності $c(t)$ для заліза і сталей воно міняється в межах $1 \leq \tau(t_m, t_p) / \tau(t_p) < 0,55-0,75$ (24,35). Нелінійність виявляється значною навіть у вузькому температурному інтервалі $0 < t < 100^\circ\text{C}$ при конвек-

тивному теплообміні у воді. Тут, по мірі наближення t до t_m маємо $1 \leq \tau(t, t_m) / \tau(t, T_P) < 1.4$, тобто нелінійність τ перевищує 40 %.

Для розплавлених сталей із-за обмеженості експериментального матеріалу проведено декілька варіантів оціночних розрахунків, які спираються на критеріальні формули, отримані, в основному, для легкоплавких металів лужної групи. При певних допущеннях в температурному інтервалі $0 < t < 1500^\circ\text{C}$, коефіцієнт вільної конвективної тепловіддачі зменшується у 0,5-0,6 рази, тобто нелінійність $\tau(t)$ виявляється значною.

На основі виконаних розрахунків зроблено висновки про необхідність застосування нелінійної квазіоднорідної по структурі моделі (1), в якій залежність (2) параметра $\tau(t)$ по характеру його зміни з температурою може бути апроксимована степеневою функцією $\tau(t) = T_P + bt + at^2$, де T_P , b і a повинні визначатися у процесі обробки даних вимірювання температури $t(\tau)$ чутливого елемента ВПТ.

Однопараметрична модель ВПТ приваблює простою опису динамічних характеристик, але не враховує внутрішньої структури термоперетворювачів. З метою її уточнення в завершальній частині глави сформульована "двоємнісна" нелінійна модель теплообміну, що описується рівняннями (див. рис.2)

$$- C_{\bullet} dt_{\bullet} = k_{\bullet} \cdot S_{\bullet} (t_{\bullet} - t_{\bullet\bullet}) \cdot dr, \quad (3)$$

$$- (C_{\bullet} dt_{\bullet} + C_{\bullet\bullet} dt_{\bullet\bullet}) = k_{\bullet\bullet} \cdot S_{\bullet\bullet} (t_{\bullet\bullet} - t_m) \cdot dr, \quad (4)$$

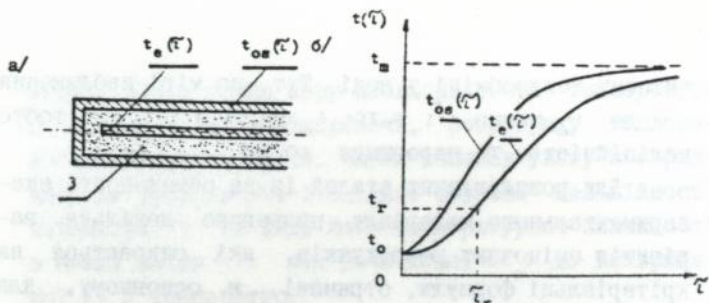


Рис.2. Модель двоелементного ВІТ (а); криві нагріву оболонки $t_{oe}(\tau)$ і чутливого елемента $t_e(\tau)$ - (б)

в яких $t_e(\tau)$, $t_{oe}(\tau)$, $t_m(\tau)$ - температури термо-чутливого елемента ВІТ, його захисної оболонки та оточуючого середовища; C_e, k_e, S_e і C_{oe}, k_{oe}, S_{oe} - відповідно повні теплоємності, коефіцієнти теплопередачі і площі поверхонь теплообміну.

Рештована в дослідях температура $t_e(\tau)$ на основі (3) і (4) визначається нелінійним рівнянням другого порядку

$$T_2 \cdot \frac{d^2 t_e(\tau)}{d\tau^2} + T_1 \cdot \frac{dt_e(\tau)}{d\tau} + t_e(\tau) = t_m(\tau), \quad (5)$$

з температурозалежними від t_e , t_{oe} і t_m параметрами

$$T_1(t_e, t_{oe}, t_m) = T_{oe}(t_{oe}, t_m) \cdot \left[1 + \frac{\beta T_e(t_e, t_{oe})}{\alpha T_{oe}(t_{oe}, t_m)} \right] + \left[T_e(t_e, t_{oe}) + \beta(t_e, t_{oe}) \cdot T_{oe}(t_{oe}, t_m) \right], \quad (6)$$

$$T_2^2(t_{\bullet}, t_{\bullet\bullet}, t_m) = T_{\bullet}(t_{\bullet}, t_{\bullet\bullet}) \cdot T_{\bullet\bullet}(t_{\bullet\bullet}, t_m), \quad (7)$$

в структуру яких включені три параметри відповідної лінійної моделі ВПТ

$$T_{\bullet}(t_{\bullet}, t_{\bullet\bullet}) = \frac{C_{\bullet}(t_{\bullet})}{k_{\bullet}(t_{\bullet}, t_{\bullet\bullet}) \cdot S_{\bullet}}; \quad \beta(t_{\bullet}, t_{\bullet\bullet}) = \frac{C_{\bullet\bullet}(t_{\bullet\bullet})}{C_{\bullet\bullet}(t_{\bullet\bullet})};$$

$$T_{\bullet\bullet}(t_{\bullet\bullet}, t_m) = \frac{C_{\bullet\bullet}(t_{\bullet\bullet})}{k_{\bullet\bullet}(t_{\bullet\bullet}, t_m) \cdot S_{\bullet\bullet}}. \quad (8)$$

В реальних умовах вимірювань вигляд залежностей параметрів (6)-(8) є невідомий і може бути оцінений тільки наближено в межах початкової і максимальної змін відомої із дослідів температури $t_{\bullet}(\tau)$ з врахуванням реальних границь зміни температури $t_m(\tau)$ досліджуваного середовища, якщо відома структура ВПТ. Оскільки аналіз рівняння (5) і отримання його рішення складає значні труднощі, воно використовується тільки для обґрунтування нелінійної моделі (1).

Центральне (на осі) розташування чутливого елемента визначає типовий вигляд кривої розігріву $t_{\bullet}(\tau)$ в експерименті (див.рис.2,б) з ділянкою дорегулярної стадії теплообміну, після якої зміна температури $t_{\bullet}(\tau)$ має чітко виражений експонентоподібний характер. Ця особливість, яка підтверджується виконаними експериментами, дозволяє звести рівняння (5) до рівняння першого порядку з запізненням аргументу

$$T \cdot \frac{dt(\tau - \tau_p)}{d\tau} - \frac{t_m}{T} + t(\tau - \tau_p) = t_m(\tau), \quad (9)$$

В якому наближено

$$T \approx \sqrt{T_1^2 - 2T_2}, \quad \tau_p \approx T_1 - T. \quad (10)$$

На мові передаточних функцій лінійних моделей це еквівалентно заміні передаточної функції $Y(s) = 1 + T_1 s + T_2 s^2$ на функцію $Y(s) = (1 + Ts)^{-1} \cdot \exp(-\tau_p s)$ - див.рис.3.

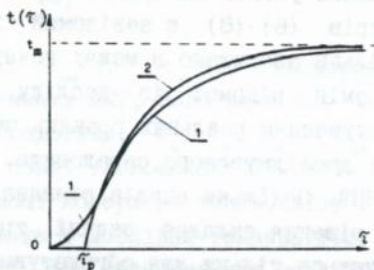


Рис.3. Графічна ілюстрація можливості заміни передаточної функції $Y(s) = 1 + T_1 s + T_2 s^2$ (крива 1) на функцію $Y(s) = (1 + Ts)^{-1} \exp(-\tau_p s)$ (крива 2)

Якщо $t_m = \text{const.}$ то рівняння перехідного процесу з врахуванням експериментально підтвердженої слабої залежності τ_p від температури t_0 при $\tau \geq \tau_p$ представляється у вигляді експоненти

$$t(\tau - \tau_p) = t_m \left[1 - \exp \left[-\frac{\tau - \tau_p}{T} \right] \right], \quad \text{при } \tau \geq \tau_p \quad (11)$$

Висловлені міркування, які детально викладені

в завершальній частині гл.2, підтверджують доцільність використання однопараметричної моделі тим більше, що обробка експериментально отриманої ділянки перехідної характеристики $t_c(\tau)$ починається після дорегулярної стадії, тобто відрахунок значень температури і часу починається з моменту $\tau > \tau_p$ (або $\tau > \tau_r$) і $t_c(\tau) > t_r$. Це не виключає в майбутньому застосування нелінійних моделей виду (5)-(8) або більш високого порядку, якщо експериментальна основа для характерних випадків вимірювання високих температур і конструкцій ВПГ буде більш повною.

В третій главі викладене теоретичне обґрунтування екстраполяційних методів вимірювання температури середовища на основі однопараметричної нелінійної моделі (1) з врахуванням двох характерних залежностей $T(t)$: степеневої у вигляді

$$T(t) = T_p + bt + at^2, \quad (12)$$

або її часткових варіантів ($a=0$ або $b=0$) і експоненційної

$$T(t) = T_p \cdot \exp(at). \quad (13)$$

Інтегрування рівняння (1) з врахуванням (12) дає наступний вираз для перехідного процесу (4,27,30-33,42,43):

$$\tau - \tau_0 = T_m \cdot \ln \frac{t_m - t}{t_m - t_0} - (t - t_0) \cdot \left[b + \frac{a}{2} (2t_m + t_0 + t) \right], \quad (14)$$

$$\text{де } T_m = T_p + bt_m + at_m^2, \quad (15)$$

t_m - значення шуканого значення температури середовища, °C; t_0 - значення $t(\tau)$ при $\tau = \tau_0$; T_p - початкове значення показника термічної інерції T_0 при $t=t_0$; a і b - коефіцієнти, що характеризують температурну залежність показника термічної інерції і які визначаються при обробці експериментально знятої кривої $t(\tau)$. Як початок відліку τ_0 і t_0 можуть бути вибрані різні значення, включаючи τ_r і t_r або інші.

Рівняння (14) і (15) включають часткові залежності, коли $a = 0$; $b = 0$ і лінійний варіант при $a = b = 0$. В останньому випадку перехідна характеристика ВПТ (14) перетворюється у звичайну експоненту

$$t_m - t(\tau) = (t_m - t_0) \cdot \exp\left[-\frac{\tau - \tau_0}{T_0}\right]. \quad (16)$$

При експоненційній температурній залежності $T(t)$, яка визначається виразом (13), рішення рівняння (1) запишеться у вигляді

$$\tau - \tau_0 = T_p \cdot \exp(at_m) \left\{ E_1[-a(t_m - t_0)] - E_1[-a(t_m - t)] \right\}. \quad (17)$$

В рівнянні (17) E_1 - це інтегральна показникова функція, яка для $a > 0$ запишеться у вигляді функції E_1 :

$$\tau - \tau_0 = T_p \cdot \exp(at_m) \left\{ E_1[a(t_m - t)] - E_1[a(t_m - t_0)] \right\}. \quad (18)$$

Рівняння (14), (15), (17) і (18) є базовими для прогнозування температури t_m по екстраполяційному мето-

ду. В матеріалах гл.3 представлено детальний чисельний аналіз перехідних характеристик ВПТ (14), (17), (18) для різних варіантів температурної залежності τ_{∞} та ступеня нелінійності τ_m/τ_p . Як приклад, на рис 4 і рис.5 наведені графіки співставлення моделей динаміки ВПТ з різними видами параболічної (криві 1,3,4) і експоненційної (крива 2) нелінійностями показника термічної інерції τ_{∞} для $\tau_m/\tau_p = 0,5$ (рис.4) і $\tau_m/\tau_p = 2,0$ (рис.5), причому графіки 1, 2, 3 і 4 відповідають наступним умовам вибору значень величин a і b у виразі (12):

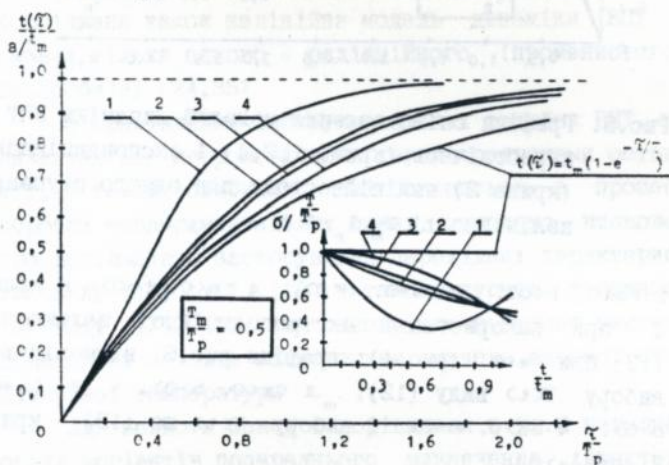


Рис.4. Графіки співставлення моделей динаміки ВПТ з параболічною (криві 1,3,4) і експоненційною (крива 2) нелінійностями для одного ступеня нелінійності $\tau_m/\tau_p = 0,5$

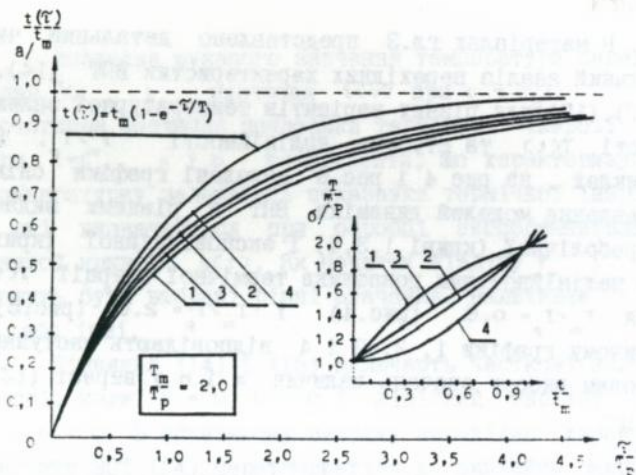


Рис.5. Графіки співставлення моделей динаміки ВГТ з параболічною (криві 1,3,4) і експоненційною (крива 2) нелінійностями для одного ступеня нелінійності $T_m/T_p = 2,0$

1 ($a > 0$, $b < 0$), 3 ($a = 0$, $b < 0$), 4 ($a < 0$, $b = 0$) а крива 2 - при використанні екстраполяційної залежності (13) при $a < 0$ (рис.4); графіки рис.5 відповідають вибору $T(t)$ виду (12): 1 ($a < 0$, $b > 0$), 3 ($a = 0$, $b > 0$), 4 ($a > 0$, $b = 0$) і вибору $T(t)$ по (13) - крива 2 (при $a > 0$)

На основі аналізу отриманих даних, які частково відображені на рис.4 та рис.5, впливає, що відмінність перехідних характеристик нелінійних моделей від лінійної (експоненційної) тим більше,

чим вища нелінійність процесу. Із можливих видів апроксимації $t(t)$, які визначаються виразами (12), (13) або іншими, з практичних міркувань, пов'язаних із спрощенням статистичної обробки результатів вимірювань, перевагу належить віддати формулюванню типу нелінійності у вигляді $T = T_p + \gamma t$ або $T = T_p + at^2$, а для аналітичного опису перехідних характеристик використати вираз (14) замість (17), що також спрощує процес складання обчислювальних програм.

Для повноти аналізу в гл.3 додатково детально досліджена також нелінійна модель динаміки ВПТ в умовах тільки одного - радіаційного (променистого) теплообміну [24,35].

З врахуванням інструментальних похибок ВПТ, що визначається метрологічними характеристиками останніх, а також похибками, які вносяться в процесі обробки експериментальних даних, зроблено висновок про доцільність застосування перехідних характеристик виду (14), (17), (18) і температурних залежностей виду (12), (13), як основи для побудови екстраполяційних методів відновлення значень високої стаціонарної температури t_m .

Для повноти опису і порівняння в гл.3 наведено огляд варіантів попереднього визначення характеру нелінійності показника термічної інерції (методи приросту, дотичних, "двоярусної" печі). На основі загальної теорії апроксимації неперервних функцій (безвідносно до вибору лінійних або нелінійних мо-

делей ВПТ) ставиться задача апроксимування характеристик так званих квазілінійних моделей, формулюються умови їх рівномірної апроксимації. Завершальним результатом є розробка програм, які реалізують процес середньоквадратичної апроксимації експериментальних даних. Метод середньоквадратичної апроксимації заснований на обробці отриманих в процесі проведення досліду даних в цифровій формі (з цифрового регістратора), які представляють собою експериментальну перехідну характеристику у вигляді таблиці з певним вибраним кроком її квантування в часі. Алгоритм середньоквадратичної апроксимації пояснюється на рис.6 і рис.7. Комп'ютер, функціонуючи по алгоритму, наведеному на рис.6, підбирає параметри a, T_p нелінійної моделі динаміки з параболічним видом нелінійності $T = T_p + at^2$ і визначає вимірювану температуру t_m . Розрахункова характеристика $t(\tau)$ знаходиться між точками $\{\tau_i, t(\tau_i)\}$ таблиці даних, отриманих із експерименту. Апроксимацію вважають закінченою, якщо середньоквадратична похибка функціонала [11-14, 23]

$$J(t_m, a, T_p) = \sum_{i=1}^n [t(\tau_i) - t_m(\tau_i)]^2. \quad (10)$$

набуває мінімального значення.

Тут: n - кількість точок, якими задається експериментальна перехідна характеристика ВПТ; $t(\tau_i) = t_i$ - значення функції $t(\tau)$ по даних вимірювання експериментальної перехідної характеристики; $t_m(\tau_i) = t_{mi}$ - значення функції $t(\tau)$, порашовані

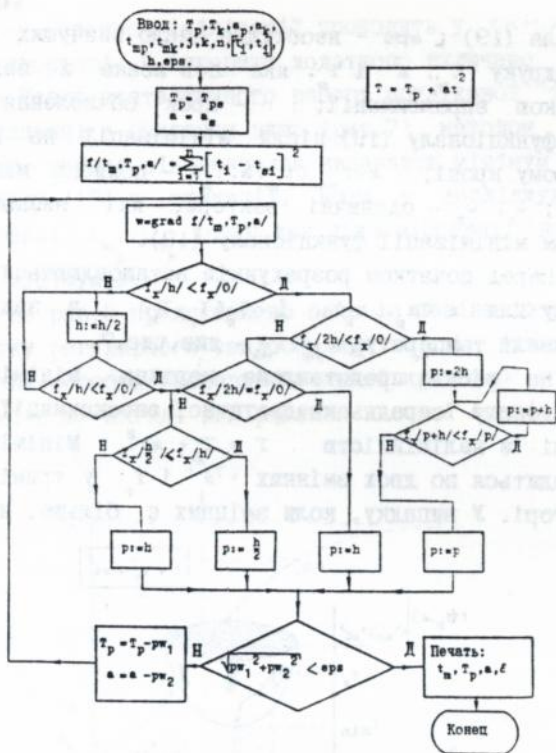


Рис.6. Блок-схема програми, що реалізує процес середньоквадратичної апроксимації

на основі перехідної характеристики нелінійної моделі (див. рівняння (14), (15)). В блок-схемі рис.6 прийняті наступні позначення: T_p, a - початкові значення T_p і a для початку мінімізації функ-

ціонала (19); ϵ_{ps} - необхідне число значущих цифр в роздруку t_m , а $i T_p$, яке пов'язане з заданою похибкою апроксимації; h - крок обчислення значень функціоналу (19) після мінімізації на попередньому кроці; $\epsilon = f_{\min}(t_m, a, T_p)$ - похибка мінімізації; w_1, w_2 - одиничні вектори, які визначають напрям мінімізації функціоналу (19).

Перед початком розрахунків встановлюються межі пошуку для $a (a_p, a_k)$, і $T_p (T_p, T_k)$ в заданому інтервалі температур t_{mp}, t_{mk} - див.рис.7.

На рис.7 представлена картина мінімізації функціоналу середньоквадратичної апроксимації для моделі з нелінійністю $T = T_p + at^2$. Мінімізація проводиться по двох змінних a і T_p у тримірному просторі. У випадку, коли змінних є більше, напри-

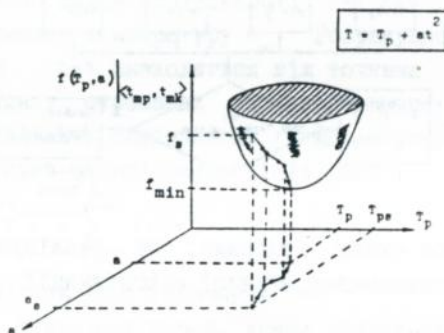


Рис.7. Послідовність процесу мінімізації функції (19) для нелінійної моделі з нелінійністю типу $T = T_p + at^2$ по блок-схемі рис.6

клад n , процес мінімізації проходить у $(n+1)$ -мірному просторі. В алгоритм додатково включено метод Монте-Карло статистичного вибору початкової точки. У поєднанні з описаним вище (рис.7) методом швидкісного спуску він дозволяє визначити мінімум функціоналу (19) в ситуації, коли у досліджуваному інтервалі $t_{m_p} \dots t_{m_k}$ існує декілька місцевих (локальних) мінімумів.

На рис.8 представлено один із варіантів вибору початку регулярного теплообміну t_r і визначення ділянки обробки експериментальної кривої $o'-o''$ при динамічному методі вимірювання високої стаціонарної

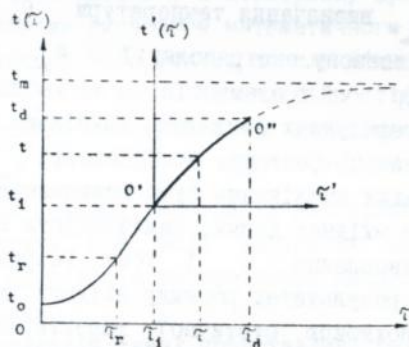


Рис.8. Вибір початку регулярного теплообміну t_r і визначення ділянки обробки експериментальної кривої $o'-o''$

температури. Робочою ділянкою перехідної характеристики, яка використовується для прогнозування 1

розрахунку стаціонарної температури t_m , є діапазон температур $t_i \leq t \leq t_d$ і часу $\tau_i \leq \tau \leq \tau_d$. В момент часу τ_d , що відповідає температурі t_d , процес вимірювання припиняється із-за ризику фізичного знищення ВПГ.

В третій главі також ставилося і вирішувалося завдання визначення похибки екстраполяційного методу знаходження t_m методами математичного моделювання процесу вимірювань. За базові вибрані лінійна і нелінійна моделі динаміки ВПГ. Чисельні дані для розрахунків наближено відповідали умовам реальних вимірювань температури рідкої сталі. Досліджена похибка ∂_{t_m} визначення температури t_m в залежності від діапазону екстраполяції R_m , кількості значущих цифр k і елементів n таблиці даних (τ_i, t_i) . В розрахунках закладено найбільш невигідні умови для значень фактору нелінійності $T_m/T_p = 3$. Метою модельних досліджень було визначення зв'язку між похибкою вхідних даних, нелінійністю процесу і похибкою відновлення t_m і т.д. Розрахунки проводились по результатах розкиду вхідних даних, викликаного похибкою статичної характеристики ВПГ згідно відповідного стандарту та похибкою реєструючого пристрою. Отримані результати не виявили кореляції залежності між n і ∂_{t_m} , якщо $10 \leq n \leq 30$, що визначає реальний діапазон квантування даних. У випадку, коли таблиця даних, що заводилася у комп'ютер, задавалася з трьома значущими цифрами, тобто з похибкою, близькою до експериментальної,

похибка екстраполяції була на рівні $\delta_{t_m} \leq (0,4-0,5) \%$, якщо діапазон екстраполяції $R_m \leq 40\%$ для моделі з нелінійністю виду $T = T_p + at^2$, незалежно від того, по якій причині змінюється R_m , тобто $t_r = \text{var}, t_d = \text{const}$ чи $t_d = \text{var}, t_r = \text{const}$ (див. рис. 7).

Виявлено, що похибки для моделей з нелінійностями $T = T_p + bt$ і $T = T_p + at^2$ є приблизно однаковими. Застосування нелінійності виду $T = T_p + bt + at^2$ збільшує похибку визначення t_m , тому що мінімізація функціонала середньоквадратичної апроксимації проводиться у п'ятимірному просторі.

Головним висновком математичного моделювання є обґрунтування того факту, що для діапазону екстраполяції $R_m = (25-40) \%$ та нелінійності виду $T = T_p + at^2$ похибка методу обробки даних вимірювань складає $\delta_{t_m} \approx (0,4-0,5) \%$ при $10 < n < 30$ та типових значеннях похибок реєстрації експериментальної характеристики. При всіх варіантах обробки відбувається фільтрація несподіваних викидів даних та їх згладжування.

В четвертій главі представлені результати експериментальної перевірки методів відновлення (екстраполяції) значень температури середовища. Для цього автором були виготовлені декілька конструкцій нікелевих списоподібних (NiCr-NiAl) термоелектричних перетворювачів занурювання (СНТЕЗ) багаторазової дії з метою вибору оптимального варіанту.

Розроблена також вимірвальна система в складі комп'ютера IBM-PC-486, інтерфейсної плати узгодження і розробленого автором прецизійного (високого класу) підсилювача вихідного сигналу СНПЗ. На мові TURBO-PASCAL складені програми, які керують процесом реєстрації даних і розрахунку шуканого значення температури t_m .

Вимірювання проводились в наступних середовищах: у киплячій воді, у повітряному просторі печі для градування ВПГ та у розплавлених металах.

Для вимірювання температури киплячої води застосовані термоелементи (ТЕ) NiCr-NiAl діаметром Φ 6,5 мм типу CNRE, TPK-J64-SP з захисним чохлам із сталі X15CrNiSi 25.20, яка серійно випускається польською промисловістю. Метою експериментів було визначення можливості вимірювання температури киплячої води із застосуванням динамічного методу, а також, що більш важливо, встановлення характеру і ступеня нелінійності процесу теплообміну ТЕ з киплячою водою. Встановлено, що навіть при невеликих перепадах температури (порядку $\Delta t \leq 84^\circ\text{C}$) процес теплообміну є нелінійний; відносно значення показника термічної інерції t_m/t_p змінюється на 20 і більше відсотків, причому ця зміна передається параболою типу $t = t_p + at^2$ при $a > 0$. Отримані дані по значеннях і характеру змін $t(t)$ узгоджуються з розрахунками і оцінками гл.2.

При вимірюванні температури повітря застосований ТЕ NiCr-NiAl Φ 3 мм з чохлам із X15CrNiSi 25.20

виробництва ФРН. Так само, як і для киплячої води, реєструвалася вся перехідна характеристика до стаціонарного значення температури печі t_m . Метою експериментів було визначення характеру нелінійності процесу теплообміну, співставлення з теоретичним прогнозом (гл.2), а також перевірка точності динамічного методу вимірювання відносно високої (до 1000°C) стаціонарної температури. Виконана серія вимірювань дозволяє зробити висновок, що характер нелінійності процесу більше відповідає параболі типу $T = T_p + at^2$, але для газових середовищ показник термічної інерції зменшується з температурою (35). Ця особливість підтверджується також аналізом літературних даних, наведених, наприклад, в довіднику Міхальського. Похибка відновлення t_m в камері печі за допомогою ТЕ NiCr-NiAl Φ 3 мм по динамічному методу і моделі з нелінійністю $T = T_p + at^2$ можна оцінити на рівні $\delta_{t_m} = \pm(0,5-1,5) \%$ для $R_{\kappa} \leq 25\%$. Значення R_{κ} визначено при відкиданні даних вимірювання як "знизу", тобто вище t_r ($t_d = \text{const}$), так і "зверху", тобто нижче t_d ($t_r = \text{const}$), причому характер відкидання даних (t_r, t_d) на значення δ_{t_m} особливого впливу не створює.

Головні по прикладному значенню результати комплексного вимірювання температури розплавлених сталей наведені в заклучній п'ятій главі дисертації. В ній наведено опис стосованого в сучасній практиці методу вимірювань температури з викорис-

танням списоподібних платинородієвих ($PtRh_{10}-Pt$) СНТІЗ одноразової дії. Відмічені окремі недоліки їх застосування (одноразовість, дороговизна при масовому використанні порівняно з термоперетворювачами хромель-алюмелевої групи, можливість порушення електричного контакту між термоперетворювачем і тримачем). Детально досліджуються можливості по точності екстраполяційного методу відновлення значень температури розплавлених сталей. Для цього використані різні конструкції термоперетворювачів: 1) платинородієві промислові; 2) виготовлені на замовлення автора фірмов MERAZET-Sosnowiec (тепер філія бельгійсько-німецької фірми Heraeus & Electro-Nite) списоподібні хромель-алюмелеві СНТІЗ однократної дії, а також 3) авторські розробки СНТІЗ багаторазового застосування.

Перші дві групи перетворювачів в кінцевому підсумку виявилися по ряду причин (руйнування конструкцій ВПТ, затягнутий в часі процес регуляризації до $\sim 1000^{\circ}C$ та ін.) неконкурентноспроможними порівняно з хромель-алюмелевими СНТІЗ багатократно-го застосування, значно поступаючи їм по точності.

Складність і нестабільність процесу теплообміну в промислових конструкціях ВПТ (руйнування захисного ковпачка, U-подібної кварцевої трубки, варіації перехідних характеристик) в значній мірі усувається при застосуванні СНТІЗ багатократної дії, опис яких наведено у гл.4. На рис.9,а пред-

ставлені типові експериментальні перехідні характеристики одного з таких СНТІЗ при триразовому вимірюванні температури сталі. На рис.9,б ті самі криві показані в напівлогарифмічному масштабі по методу Г.М.Кондратьєва. Дотична до кривої 1 відображає нелінійність процесу в стадії квазірегулярного теплообміну в інтервалі температур $t_{m-r} = t_m - t_r$. На рис.9,в представлені результати визначення температурної залежності показника інерції, тобто криві типу $\tau/T_p = f(t/t_{m_a})$, де t_{m_a} - значення температури сталі t_m , отримані в результаті екстраполяційної обробки експериментальних даних. Характер змін цих

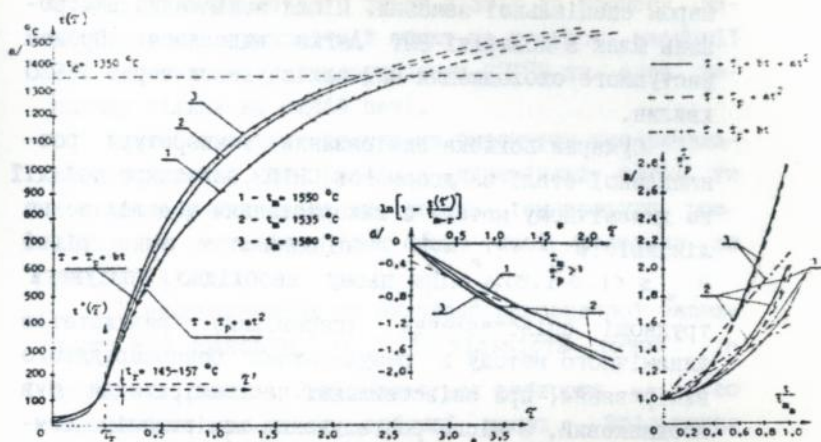


Рис.9. Експериментальні перехідні характеристики СНТІЗ багатократної дії при вимірюванні температури рідкої сталі

кривих від температури є близький до параболічної залежності виду $T = T_p + at^2$, при $a > 0$.

Кратність можливого застосування СНТПЗ залежить від вибору матеріалу захисного чохла. Виготовлені автором СНТПЗ з використанням стосованих на практиці захисних чохла витримували 2-4 занурення. Перехід на чохла з більш термостійких металічних, металокерамічних та інших матеріалів повинні би були значно підвищити кратність застосування ВПГ, але їх у розпорядженні автора не було. В наших дослідках СНТПЗ перед вимірюванням покривався тонким шаром спеціальної замазки. Після закінчення вимірювань шлак з поверхні ВПГ легко видалявся. Процес наступного охолодження ВПГ закінчувався через 15-20 хвилин.

Сумарна похибка вимірювання температури розплавленої сталі за допомогою СНТПЗ багатократної дії по динамічному методу з використанням моделі з не лінійністю $T = T_p + at^2$ оцінюється на рівні $\partial_{t_m} \leq (1,0-1,5)\%$. При цьому необхідно врахувати труднощі співставлення (перевірки) результатів динамічного методу з результатами безпосереднього вимірювання; при співставленні час вимірювання був неоднаковий, а місце розташування вимірювачів температури в мартенівській печі не завжди співпадало. При усуненні дії цих факторів можна розраховувати на зменшення похибки ∂_{t_m} .

Технологія виплавки вимагає вимірювати темпе-

ратуру розплавленої сталі з похибков $\partial_{t_m} = 0.5\%$. Похибка динамічного методу при застосуванні описаних вище засобів вимірювання оцінюється на рівні $\partial_{t_m} = <1.0-1.5\%$. В такій ситуації для практики можна рекомендувати наступне. Попередні вимірювання температури на початкових стадіях плавки сталі і відновлення t_m рекомендується проводити за допомогою екстраполяції показів термоперетворювачів, тобто динамічного методу. Вимірювання t_m на заключній стадії плавки проводиться по загальноприйнятому прямому методу. Такий підхід до процесу вимірювань дає економічний ефект за рахунок економії 3-4 одноразових платинородієвих СТПЗ на одну виплавку тільки на одній печі.

Автором подана заявка на структуру вимірювального комплексу, що реалізує динамічний метод та порядок обробки даних вимірювань температури розплавлених металів, блок-схема якої наведена на рис.10 (4).

В експериментах не виявлено однозначної залежності між похибков ∂_{t_m} і кількіств точок n даних вимірювань. Рекомендується вибирати $n = 10-20$ елементів $\{t_i, t_i\}$ з таблиці даних. Збільшення числа n відповідно збільшує затрати часу на виконання розрахунків і є джерелом додаткових похибок за рахунок округлення результатів. Занадто мале n приводить до збільшення розходжень між експериментальною та апроксимувачою характеристиками, що

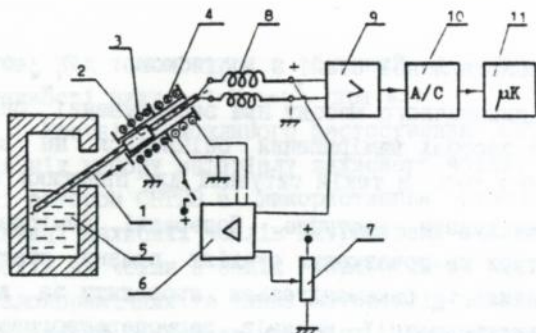


Рис.10. Зпрощена блок-схема системи для вимірювання температури рідкої сталі по динамічному методу [4]

1-спісоподібний нікелевий (NiCr-NiAl) термоелектричний перетворювач занурення; 2- осердя; 3,4- котушка яка забезпечує ввід і вивід перетворювача із об'єкту; 5- розплавлена сталь; 6-компаратор; 7- потенціометр; 8- пружні подовжувчі дроти; 9- прецизійний підсилювач; 10- інтерфейсна плата узгодження А/С-С/А; 11- комп'ютер.

збільшує $\delta_{\text{т.н.}}$.

Результати теоретичного аналізу характеру та ступеня нелінійності процесу теплообміну ВПТ у рідкому металі узгоджуються з експериментально отриманими значеннями при вимірюванні температури рідин і газів. Тим самим експериментально підтверджується перспективність застосування нелінійних моделей в екстраполяційних методах вимірювання температури.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

В дисертаційній роботі послідовно розглянуто весь комплекс завдань, розв'язання яких направлено на розширення можливостей застосування контактних засобів вимірювання температури за межами температурного діапазону нормованих метрологічних характеристик або навіть за межами фізичного існування ВПТ. Отримані в роботі результати можна сформулювати наступним чином:

1. Виявлені обмеження лінійних та квазілінійних моделей динаміки теплообміну термоперетворювачів, які використовуються в різних варіантах корекції і екстраполяції показів.

2. Теоретично обґрунтована необхідність створення нелінійних моделей теплообміну ВПТ з різними видами функціональних залежностей їх параметрів від температури.

3. Запропоновані нелінійні теплові моделі термоперетворювачів першого та вищих порядків, отримані розрахункові перехідні характеристики для однопараметричної нелінійної моделі ВПТ.

4. Проведено математичне моделювання процесів екстраполяції і на його основі подана метрологічна оцінка похибки відслідження стаціонарної температури газоподібних та рідких середовищ, включаючи розплавлені метали.

5. Розроблені алгоритми статистичної обробки результатів вимірювань; проведені чисельні оцінки

похибок мінімізації функціонала середньоквадратичної апроксимації в залежності від мірності простору (числа параметрів), ступеня дискретизації вхідних даних та діапазону екстраполяції.

6. Проведена експериментальна лабораторна перевірка нелінійних моделей ВПГ та способів обробки даних з попередньою оцінкою нелінійності процесу теплообміну при вимірюванні температури киплячої води та повітряного середовища.

7. На базі IBM-PC-486 створено комп'ютеризований вимірювальний комплекс та перевірена ефективність запропонованої програми статистичної обробки експериментальних даних.

8. Виконано цикл вимірювань температури розплавленої сталі в промислових умовах із застосуванням термоперетворювачів різних типів. Доведено практичну цінність екстраполяційних методів вимірювання температури рідких металів на рівні 1550-1600°C, які забезпечують похибку відновлення значення температури в межах 1,0-1,5 % при діапазоні екстраполяції 25-30 %. Підтверджено економічну ефективність екстраполяційного методу контролю температури рідкої сталі на попередніх стадіях виплавки.

Отримані результати дозволили зробити висновок, що автором розроблені і експериментально підтверджені теоретичні положення та методи обробки інформації, сукупність яких можна трактувати, як новий напрямок у розвитку екстраполяційних методів прогнозування та вимірювання високої стаціонарної

температури на основі нелінійних математичних моделей ВІПТ.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ВІДОБРАЖЕНІ
В НАСТУПНИХ ПУБЛІКАЦІЯХ:

1. Minkina W., Biernacki Z. Urządzenie do kontroli wymiarów geometrycznych przedmiotów płaskich zaopatrzonych w otwory. - Patent PL INT Cl³. G 01B 11/04, B 07 C 5/10.
2. Minkina W., Stępień M. Układ elektroniczny korektora charakterystyk dynamicznych czujnika termometrycznego. - Patent PL INT Cl³. G 01 K 7/14.
3. Minkina W., Nikolajuk D. Układ do pomiaru temperatury. - Patent PL INT Cl⁵. G 01 K 7/02.
4. Minkina W., Jaryshev N.A. Urządzenie do pomiaru temperatury. - Zgłoszenie patentowe Nr. P. 295012.
5. Kiełtyka L., Biernacki Z., Minkina W. Urządzenie elektryczne do automatycznej kontroli wymiarów geometrycznych krążków cynkowych. - Materiały XIV Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów. - Częstochowa, 1979, s.211-216.
6. Minkina W., Biernacki Z., Mrozek J. Metoda i aparatura do kontroli wymiarów geometrycznych oraz selekcji elementów na podstawie różnej przepuszczalności świetlnej. - Materiały XIV Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów. - Częstochowa, 1979, s.217-222.
7. Biernacki Z., Kiełtyka L., Minkina W. Metoda i aparatura kontrolno-sygnalizacyjna do selekcji

gotowych wyrobów metalowych. - Materiały XV Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów. - Warszawa, 1981, s.125-131.

8. Minkina W., Stępień M. Analiza wybranych metod korekcji charakterystyk dynamicznych czujników termometrycznych. - Pomiary-Automatyka-Kontrola, 1981, Vol.27, No 7/8, s.234-236.

9. Minkina W., Stępień M. Korektor charakterystyk dynamicznych czujników termometrycznych. - Pomiary-Automatyka-Kontrola, 1982, Vol.28, No 8/9, s.269-270.

10. Minkina W. Analiza stanów nieustalonych w dowolnym liniowym obwodzie RLC przy zastosowaniu elektronicznej maszyny cyfrowej. - Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej, seria Elektrotechnika, 1982, No 9, s.107-125.

11. Minkina W., Biernacki Z. Methode zur Approximation der Übergangsfunktionen von Temperaturfühlern mit einem Digitalrechner. - messen-steuern-regeln, Berlin, 1983, Vol.26, No 8, S. 465-466.

12. Minkina W., Biernacki Z. Metoda wyznaczania własności dynamicznych czujników termometrycznych. - Materiały XVI Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów. - Lublin, 1983, s.14-21.

13. Minkina W. Modelowe badania własności dynamicznych czujników termoelektrycznych w celu poprawienia jakości ich przetwarzania. - praca doktorska, Instytut Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1983, 143s.

14. Minkina W. Regresyjna metoda wyznaczania włas-

ności dynamicznych czujników termometrycznych. - Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. - Elektrotechnika, 1984, No 11, s.5-16.

15. Minkina W., Biernacki Z. Simulationsuntersuchungen von Modellen thermoelektrischer Sensoren. - messen-steuern-regeln, Berlin, 1986, Vol. 29, No 7, S. 307-309.

16. Biernacki Z., Minkina W., Mrozek J. Modelowanie przetworników termoanemometrycznych oraz analiza ich podatności na wielkości wpływowe. Materiały IV Sympozjum: Kierunki Rozwoju Metrologii Elektrycznej - Wilga k/Warszawy, 1987. - s.65-71.

17. Minkina W., Biernacki Z. Models of transient states in the sensor of the impulse thermoanemometer. - Modelling, Simulation & Control, B, AMSE-Press, 1987, Vol. 11, No 3, pp.23-33.

18. Minkina W. Analyse ausgewählter Methoden der Korrektur der dynamischen Kennlinie von thermometrischen Fühlern. - messen, prüfen, automatisieren, 1987, Vol. 23, No 7/8, S.438-445.

19. Minkina W., Nikołajuk D. Układy przetwornika analogowo-cyfrowego do pomiaru temperatury. - Pomiar-Automatyka-Kontrola, 1988, Vol.34, No 1, s.1-4.

20. Minkina W. O dokładności symulacji elementów parametrycznych LC za pomocą wybranych konwerterów impedancji. - Pomiar-Automatyka-Kontrola, 1988, Vol. 34, No 9, s.201-203.

21. Minkina W., Sołtysiak W. Methode der dynamischen Zustände zur Kapazitätsmessung unter Verwendung

- eines Mikrorechners. messen, prüfen, automatisieren, 1989, Vol. 25, No 1/2, S. 48-53.
22. Minkina W. Modelle für die Dynamik von Temperatursensoren. - Fachtagung "TEMPERATUR'89"-Suhl BRD, 1989, S. 224-236.
23. Minkina W. Dynamische Meßmethode für hohe stationäre Temperatur bei Überschreiten des zulässigen Anwendungsbereiches von Temperaturmeßsensoren. - Forschung im Ingenieurwesen, Berlin, 1991, Vol. 57, No 3, S. 95-104.
24. Minkina W. Problemy modelowania dynamiki termometrów w pomiarze wysokiej temperatury. - Materiały Seminarium Promocyjnego "Zastosowania Sensorów w Technologii i Organizacji Produkcji"-Częstochowa, 1991, s. 30-34.
25. Minkina W. Non-linear models of temperature sensor dynamics. - Sensors & Actuators, 1992, Vol. 30, No 3, pp. 209-214.
26. Minkina W. Temperaturmessung von flüssigem Stahl mit der Temperaturstoßmethode. - 37. Int. -Wiss. Kolloquium, TU Ilmenau BRD, 1992, S. 617-622.
27. Minkina W., Jaryshev N.A. Modelle für die Dynamik von Temperatursensoren und ihre Anwendung bei der Messung der Temperatur von flüssigem Stahl. - Elektrowärme International, iew, 1993, Vol. 51, No B2, Juni, S. B96-B97.
28. Minkina W. Allgemeine Lehre für die Dynamik von Temperatursensoren. - 6. Intern. Kongreß für Sensorik & Systemtechnik, "SENSOR'93", X 1993, Nürnberg-BRD,

Vol. 3, S. 95-102.

29. Minkina W. Space discretization in solving chosen problems of unsteady heat conduction by means of electric modelling. - Journal of Electrical Engineering (Elektrotechnicky Casopis), 1994, - Vol. 45, No 1, pp. 8-15.

30. Минкина В., Ярышев Н. А. Моделирование динамики термопреобразователей с учетом нелинейности процесса теплообмена. - Известия ВУЗ-ов. Приборостроение, 1994, Т. 37, №. 1, С. 87-90.

31. Минкина В., Ярышев Н. А. Измерение температуры жидкой стали по методу экстраполяции показаний термопреобразователя. - Известия ВУЗ-ов. Приборостроение, 1994, Т. 37, №. 2, С. 75-78.

32. Minkina W., Yaryshev N.A. Modelling of temperature sensor dynamics by the temperature measurement of fluid steel, part 1, Theoretical Fundamentals. - The Archive of Mechanical Engineering (Archiwum Budowy Maszyn), 1994, Vol. 41, Nr. 1, - pp. 53-67

33. Minkina W., Yaryshev N.A. Modelling of temperature sensor dynamics by the temperature measurement of fluid steel, part 2, Measurements. - The Archive of Mechanical Engineering (Archiwum Budowy Maszyn), 1994, Vol. 41, Nr. 2, pp. 145-159.

34. Minkina W. On some singularities in space discretization while solving the problems of unsteady heat conduction. - Experimental Technique of Physics (ETP), 1995, Vol. 41.

35. Minkina W., Yaryshev N.A. Identifikation und

Erkennung von Nichtlinearität der Sprungantwortkurve bei der Lufttemperaturmessung.-40th International Scientific Colloquium (IWK), TU Ilmenau BRD, 1995.

36. Biernacki Z., Minkina W. i inni. Opracowanie i wdrożenie urządzenia do automatycznego pomiaru asynchronizmu obrotów wałów klatki walcowniczej z uwzględnieniem nacisków walcowania, praca zlecona dla Huty Częstochowa.-Politechnika Częstochowska, 1978, Sprawozdania z realizacji umów BZ-VI/3/79, BZ-VI/104/80, 23s., 29s.

37. Biernacki Z., Minkina W. i inni. Urządzenie do ciągłej kontroli stopnia zapełnienia cementem silosów w Fabryce Domów Lisów k/Częstochowy, praca zlecona.-Politechnika Częstochowska, 1978, Sprawozdanie z realizacji umowy BZ-VI/6/78, 19 s.

38. Biernacki Z., Minkina W. i inni. Badanie i weryfikacja parametrów pracy aparatury kontrolno-pomiarowej zespołów produkcyjnych w Spółdzielni Inwalidów "Nowe Życie" w Częstochowie, praca zlecona.- Politechnika Częstochowska, 1983, Sprawozdanie z realizacji umowy BZ-VI/2/83, 17 s.

39. Biernacki Z., Minkina W. i inni. Badania i analiza rozkładu temperatury w powlekarce firmy Luigi Banderri TR-45, Włochy, praca zlecona dla FSM - "POLMO" -filia w Częstochowie.-Politechnika Częstochowska, 1984, Sprawozdanie z realizacji umowy BZ-21/3/84/S, 22 s.

40. Biernacki Z., Minkina W. i inni. Opracowanie

i wdrożenie układu do pomiaru i regulacji temperatury w ZATiG "POLGAL" w Częstochowie, praca zlecona.-Politechnika Częstochowska,1984, Sprawozdanie z realizacji umowy BZ-21/101/84/S/W, 18 s.

41. Biernacki Z., Minkina W. i inni. Opracowanie metody pomiaru temperatury łożysk ślizgowych dużych maszyn hutniczych oraz wykonanie wdrożenia urządzenia pomiarowo-sygnalizacyjnego silnika walcarek rur w Hucie "Częstochowa", praca zlecona.- Politechnika Częstochowska,1986,Sprawozdanie z realizacji umowy BZ-21/102/85/S/W, 63 s.

42. Biernacki Z., Minkina W. i inni. Układ pomiarowy wspomagany mikroprocesorem do pomiarów parametrów przepływającego medium, praca zlecona w ramach Centralnego Programu Badań Podstawowych dla Politechniki Warszawskiej.-Politechnika Częstochowska,1986-1990, Sprawozdanie z realizacji umowy BZ-21-5/86/P/CPBP/02/20, 133s.

43. Biernacki Z., Minkina W. i inni. Automatyczny pomiar temperatury i obciążeń silników alongatora i pielgrzyma w Hucie Częstochowa, praca zlecona.- Politechnika Częstochowska,1987, Sprawozdanie z realizacji umowy BZ-21-103/87/W, 93 s.

Aut.

UKD: 536.532

Praca nie recenzowana

Na prawach rękopisu

Druk wykonano z matryc dostarczonych przez autora

Nakład 145 + 45 egz.

Ark. wyd. 1,58. Ark. druk. 3,25

Oddano do druku w marcu 1995 r.

Druk ukończono w kwietniu 1995 r.

Wykonano w Dziale Poligraficznym Politechniki Częstochowskiej
Częstochowa, ul. Dąbrowskiego 69

Минькина В. Измерение высокой стационарной температуры методами экстраполяции показаний переходной характеристики термопреобразователей.

Диссертация в виде рукописи на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.04-приборы и методы измерения тепловых величин, Государственный университет "Львівська політехніка", Львов, 1995.

Защищается 43 научные работы (в том числе 31 статья, 4 авторских свидетельства и 8 хозяйственных работ), которые посвящены разработке нового направления экстраполяционных методов измерения высоких стационарных температур на основе нелинейных математических моделей измерительных преобразователей температуры (ИПТ) с использованием современных машинных средств и процедур обработки измерительной информации.

В диссертации разработаны линейные и нелинейные модели ИПТ, на основе которых проведен анализ точности различных вариантов обработки переходных характеристик ИПТ с целью установления значений стационарных температур различных сред. Выполнены расчеты степени нелинейности процессов теплопередачи ИПТ, предложены аппроксимационные характеристики для учета температурных зависимостей параметров моделей. Методами математического моделирования и статистической обработки данных расчетов и измерений определены погрешности динамических методов восстановления температуры, установлены количественные критерии применения этих методов.

Minkina W. The measurement of high stationary temperature using extrapolation methods of temperature sensors unit step response

Dissertation as manuscript for obtaining of the degree of doctor of technical sciences, speciality 05.11.04 - Devices and methods for measuring thermal values, State University "Lviv Polytechnic", Lviv, 1995.

Suggested for defending 43 scientific works (31 articles, 4 author's rights and 8 works for industry) that are devoted to developing a new direction in research on measurement methods of high, stationary temperatures on the basis of non-linear mathematical models of thermocouples using the possibilities offered by modern measurement techniques and numerical procedures for measurement data processing.

Non-linear models of thermocouples dynamics are worked out in the dissertation. Using this models, a precision analysis of various kinds of step responses elaboration has been carried out in order to determine the steady-state value of temperature in various media. The calculations of the non-linearity degree of heat exchange process have been done. Approximate characteristics, taking into account the temperature variations of model parameters, are presented. Using methods of mathematical modelling and statistical analysis of measured and calculated data, the precision of dynamical methods of temperature determining is evaluated as well, as criteria of employing these methods are given.

Ключові слова:

вимірювання температури, термоперетворювач, термометр, метод екстраполяції, перехідна характеристика.

AB 32.475