

Національний університет цивільного захисту України
Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Кальченко Ярослав Юрійович

УДК 614.8

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
ТЕПЛОВИХ ПОЖЕЖНИХ СПОВІЩУВАЧІВ ШЛЯХОМ
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ЇХ ВИПРОБУВАНЬ

261 – пожежна безпека

26 – цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Я. Ю. Кальченко

Науковий керівник Абрамов Ю. О., доктор технічних наук, професор

Харків – 2020

АНОТАЦІЯ

Кальченко Я.Ю. Підвищення ефективності системи експлуатації теплових пожежних сповіщувачів шляхом удосконалення методів та засобів їх випробувань. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 – пожежна безпека. Національний університет цивільного захисту України, Харків, 2020 р.

Дисертаційна робота присвячена розв’язанню актуальної наукової задачі – підвищення ефективності системи експлуатації теплових пожежних сповіщувачів. Основна увага приділена методам та засобам випробувань теплових пожежних сповіщувачів, що основані на використанні його динамічних властивостей.

Система експлуатації теплових пожежних сповіщувачів є комплексом заходів, направлених на підтримання їх ефективного функціонування, одним з яких є їх випробування. Проведено аналіз методів випробувань теплових пожежних сповіщувачів та визначено, що їх основними недоліками є значний час проведення випробувань, неможливість їх здійснення у автоматичному режимі та те, що при проведенні об’єктових випробувань не визначаються динамічні характеристики їх чутливих елементів, а результат їх випробувань визначається за допустовим критерієм «спрацював-не спрацював», що обумовлює низьку ефективність таких випробувань. Подальші дослідження у роботі направлені на усунення цих недоліків.

Розроблено узагальнену математичну модель теплового пожежного сповіщувача (чутливий елемент якого може бути представлений у вигляді пластинки, циліндру або шару), що описує теплові процеси в ньому при створенні на нього стаціонарного теплового впливу. Визначено, що час

спрацьовування теплових пожежних сповіщувачів залежить від величини його постійної часу, яка в свою чергу, залежить від характеристик чутливого елемента, середовища та умов проведення випробувань. У зв'язку з цим, проведено обчислювальний експеримент та побудована регресійна модель для постійної часу теплового пожежного сповіщувача. За цією моделлю можна оцінити вагу впливу характерного розміру чутливого елемента R , швидкості руху теплового потоку V та діаметру труби $d_{тр}$, по якій він рухається, на величину постійної часу теплового пожежного сповіщувача.

Визначено, що величина постійної часу в більшій мірі буде залежати від характерного розміру чутливого елемента, причому прямо пропорційно. За умов, що $d_{тр}=0,3$ м, а $V=0,8$ м/с постійна часу при зростанні характерного розміру чутливого елемента R від 0,1 мм до 1 мм зросте на 0,98 с. Від швидкості теплового потоку та діаметру труби постійна часу чутливого елемента теплового пожежного сповіщувача залежить обернено пропорційно, але не так вагомо, як від характерного розміру. При збільшенні $d_{тр}$ з 0,1 м до 0,3 м величина постійної часу зменшиться лише на 0,35 с, а при збільшенні V з 0,6 м/с до 1,0 м/с зменшиться лише на 0,31 с.

Сплановано експеримент та проведені експериментальні дослідження по визначенню параметрів формування теплового потоку, сформованого у конструкції теплового пожежного сповіщувача. Для проведення експерименту сконструйовано макет у вигляді екрана (25x25x65) мм, в якому встановлено вентилятор DC BRUSHLESS FUN та нагрівальний елемент, що виконаний з ніхромової проволочки довжиною 293 мм та діаметром 0,3 мм і закріпленої на текстолітові пластини (30x10x2) мм. Побудовані регресійні моделі залежностей швидкості теплового потоку від електричної напруги, поданої на вентилятор, відстані до нагрівального елемента та температури теплового потоку від

електричної напруги поданої на нагрівальний елемент, та відстані до чутливого елемента. Було визначено, що для створення теплового потоку з температурою 54 °С, яка є мінімальною температурою спрацьовування теплових пожежних сповіщувачів класу А1, на нагрівальний елемент необхідно подати електричну напругу 23,4 В, а відстань від нього до чутливого елемента повинна становити 3,4 мм.

Розроблений метод визначення перехідної функції теплового пожежного сповіщувача при впливі на нього тест-сигналом у вигляді лінійно-зростаючої функції. Побудовані графічні залежності для похибки, що виникає при визначенні перехідної функції теплового пожежного сповіщувача з постійною часу $\tau = 20$ с від інтервалу дискретності τ_0 та показано, що для такого сповіщувача він повинен бути $\tau_0 \leq 1,05$ с.

Розроблені методи визначення амплітудно-частотної та фазово-частотної характеристик теплових пожежних сповіщувачів на основі інформації про їх перехідну функцію. Побудовано залежності величини похибки при визначенні частотних характеристик теплового пожежного сповіщувача від постійної часу приладу τ_1 , що формує тепловий вплив, та інтервалу дискретності τ_0 . Показано, що при визначенні амплітудно-частотної характеристики теплового пожежного сповіщувача з постійною часу $\tau = 5$ с доцільно обрати інтервал дискретності $\tau_0 = 0,225$ с та постійну часу приладу, що формує тест-вплив, $\tau_1 = 0,1$ с для сповіщувача з постійною часу $\tau = 10$ с – інтервал дискретності $\tau_0 = 0,26$ с та постійну часу приладу, що формує тест-вплив, $\tau_1 = 0,1$ с, а для сповіщувача з постійною часу $\tau = 20$ с – інтервал дискретності $\tau_0 = 0,68$ с. При визначенні фазово-частотної характеристики цим методом доцільно обрати інтервал дискретності $\tau_0 = 2$ с та постійну часу приладу, що формує тест-вплив $\tau_1 = 0,073$ с. Такий метод визначення частотних характеристик дозволяє

зменшити час їх визначення приблизно у 50-60 разів, у порівнянні з класичним методом.

Розроблені методи визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів при впливі на них тест-впливом у вигляді температури, що змінюється за квадратичним та лінійним законами. Отримано математичне описання реакції терморезистивних чутливих елементів теплових пожежних сповіщувачів на теплову дію постійного та синусоїдального електричного струму, а також вирази для їх постійних часу.

Розроблено метод випробувань теплових пожежних сповіщувачів, що полягає у визначенні його перехідної функції та порівнянні її з перехідною функцією, яка була визначена у лабораторних умовах на заводі виробнику, у моменти часу, що визначаються за теоремою Котельникова. Показано, що використання цього методу дозволить зменшити час проведення випробувань теплових пожежних сповіщувачів у 4 рази, порівняно з випробуванням тестовим осередком пожежі TF-5, та у 16 разів, порівняно з випробуваннями у тепловому каналі.

Розроблені методи випробувань теплових пожежних сповіщувачів, що полягають у визначенні його частних динамічних характеристик на основі використання інформації про його загальні частотні характеристики. Перший метод передбачає визначення постійної часу сповіщувача на основі використання інформації про його амплітудно-частотну характеристику. Реалізація цього методу передбачає вимірювання амплітуди вихідного сигналу чутливого елемента лише на двох частотах, що значно скорочує час випробування і зменшує час його проведення у 8 разів у порівнянні з випробуваннями у тепловому каналі.

Другий метод випробувань полягає у визначенні постійної часу теплового пожежного сповіщувача на основі використання інформації про його фазово-частотну характеристику, що показано на прикладі сповіщувачів з терморезистивним чутливим елементом, однією з особливостей яких є те, що згідно з законом Джоуля-Ленца тепловий

вплив на їх ЧЕ можна створити пропусканням через нього електричного струму. Показано, що час проведення випробувань таким методом дорівнює часу перехідного процесу, що для сповіщувачів класу А1 дорівнює (60 ÷ 80) с.

На основі математичної моделі теплового пожежного сповіщувача з узагальненим чутливим елементом розроблений метод випробувань теплових пожежних сповіщувачів, який полягає у створенні на нього зовнішнього теплового потоку, визначення його постійної часу та порівняння її з нормативною величиною. Такий метод є універсальний і може бути використаний як для проведення стаціонарних, так і для об'єктових випробувань теплових пожежних сповіщувачів з будь-яким чутливим елементом. Використання цього методу випробувань дозволяє зменшити час їх проведення у 1,8 разів у порівнянні з існуючим методом об'єктових випробувань, а з урахуванням додаткового часу, який необхідний для проведення випробувань і складається з підготовки приладу до роботи та переміщення оператора для проведення випробувань сповіщувачів у різних приміщеннях та на різних поверхах, у 3,3 рази.

На прикладі теплових пожежних сповіщувачів з терморезистивним елементом розроблений метод випробувань теплових пожежних сповіщувачів, що оснований на вимірюванні параметрів вихідних сигналів в умовах теплової дії на їх чутливі елементи електричного струму у вигляді косинусоїди, що дозволяє проводити випробування сповіщувачів у автоматичному режимі безпосередньо на об'єкті, що охороняється.

Розроблені пристрої для випробувань теплових пожежних сповіщувачів, що представлені у вигляді структурних схем, які дозволяють здійснювати випробування сповіщувачів у автоматичному режимі безпосередньо на об'єкті, що зменшує час їх проведення та виключає можливість появи суб'єктивних похибок. Розроблені рекомендації щодо проведення випробувань теплових пожежних сповіщувачів.

Визначено, що періодичність проведення випробувань теплових пожежних сповіщувачів, яка встановлена діючим нормативним документом, ніяк не обґрунтована. У зв'язку з цим, була розрахована рекомендована періодичність проведення випробувань теплових пожежних сповіщувачів, яка складає 1,44 роки.

Таким чином, була вирішена актуальна наукова задача підвищення ефективності системи експлуатації теплових пожежних сповіщувачів.

Ключові слова: тепловий пожежний сповіщувач, перехідна функція, частотні характеристики, методи випробування, математична модель, система експлуатації, постійна часу, час спрацьовування.

Список опублікованих праць за темою дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

1. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. А. Математичні моделі теплових пожежних сповіщувачів // Проблемы пожарной безопасности. 2018. Вып. 43. С. 58-63.

2. Абрамов Ю. А., Кальченко Я. Ю. Визначення параметрів формування теплового потоку при проведенні об'єктових випробувань теплових пожежних сповіщувачів // Проблемы пожарной безопасности. 2017. Вып. 41. С. 3-9.

3. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. А. Випробування теплових пожежних сповіщувачів // Проблемы пожарной безопасности. 2019. Вып. 45. С. 60-64.

4. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. А. Ідентифікація параметрів при визначенні динамічних характеристик теплових пожежних сповіщувачів // Проблемы пожарной безопасности. 2017. Вып. 42. С. 41-51.

5. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю.О. Алгоритми контролю технічного стану датчиків первинної інформації системи ослаблення наслідків

надзвичайних ситуацій // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2018. Вип. 27. С. 39-46.

6. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. О. Способи контролю технічного стану теплових пожежних сповіщувачів // Проблеми пожежної безпеки. 2018. Вип. 44. С. 44-48.

7. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. О. Способи визначення часу спрацьовування теплових пожежних сповіщувачів // Проблеми пожежної безпеки. 2019. Вип. 46. С. 65-70.

Статті у наукових фахових виданнях України:

8. Абрамов Ю. А., Кальченко Я. Ю. Математическое обеспечение тестирования тепловых пожарных извещателей // Проблеми пожежної безпеки. 2015. Вип. 40. С. 5-11.

9. Абрамов Ю. А., Кальченко Я. Ю. Математическое обеспечение автономного метода об'єктовых испытаний тепловых пожарных извещателей // Проблеми пожежної безпеки. 2015. Вип. 38. С. 3-8.

10. Kalchenko Y. Y., Abramov Y. A. Models of primary information sensors of emergency effects mitigation systems // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2015. Вип. 22. С. 65-69.

11. Abramov Y. A., Kalchenko Y. Y. Mathematical models for object tests of thermal fire detectors // Проблеми пожежної безпеки. 2016. Вип. 39. С. 3-8.

12. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. А. Идентификация динамического параметра пожарных извещателей с терморезистивным чувствительным // Проблеми пожежної безпеки. 2015. Вип. 37. С. 71-74.

13. Абрамов Ю. А., Кальченко Я. Ю. Выбор метода определения периода проведения регламентных работ датчиков систем ослабления последствий чрезвычайных ситуаций // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2015. Вип. 21. С. 3-6.

Стаття у науковому періодичному виданні інших держав з напрямку, з якого підготовлено дисертацію:

14. Абрамов Ю. А., Кальченко Я. Ю Выбор периода дискретизации при определении динамических характеристик тепловых пожарных извещателей // Вестник университета гражданской защиты Беларуси. 2019. Т.3. № 1. URL: <https://journals.ucp.by/index.php/jcp/article/view/168>.

Стаття у науковому журналі країни Євросоюзу, що входить до бази даних Scopus:

15. Abramov Yu., Kalchenko Y., Liashevskaya O. Determination of dynamic characteristics of heat fire detectors // Eureka: Physics and Engineering. 2019. №3. URL: <http://eu-jr.eu/engineering/article/view/898>.

Патенти:

16. Спосіб випробувань теплових пожежних сповіщувачів: пат 125948 Україна. № у 201800548; заявл. 19.01.2018; опубл. 25.05.2018, Бюл. № 10. 4 с.

17. Спосіб визначення динамічних характеристик теплових пожежних сповіщувачів: пат. №111447 Україна. № у 201604945; заявл. 04.05.2016; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 21. 4 с.

18. Спосіб визначення динамічних характеристик теплових пожежних сповіщувачів: пат. №118847 Україна. № у 201702866; заявл. 27.03.2017; опубл. 28.08.2017, Бюл. № 16. 6 с.

19. Спосіб визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів: пат. №110086 Україна. № а 201413822; заявл. 23.12.2014; опубл. 10.11.2017, Бюл. № 21. 3 с.

20. Спосіб визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів: пат. №116932 Україна. № а 201607780; заявл. 14.07.2016; опубл. 25.05.2018, Бюл. № 10. 3 с.

21. Спосіб визначення постійної часу теплового пожежного сповіщувача з терморезистивним чутливим елементом: пат. №126609 Україна. № у 201801076; заявл. 05.02.2018; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12. 2 с.

22. Спосіб випробувань теплових пожежних сповіщувачів: пат. 114947 Україна. № у 201610468; заявл. 17.10.2016 ; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 16. 2 с.

23. Спосіб тестування теплових пожежних сповіщувачів: пат. 109863 Україна. № у 201602817; заявл. 21.03.2016 ; опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17. 3 с.

24. Спосіб контролю технічного стану теплових пожежних сповіщувачів: пат. 126312 Україна. № у 201801080; заявл. 05.02.2018 ; опубл. 11.06.2018, Бюл. № 11.

25. Спосіб контролю теплових пожежних сповіщувачів: пат. 128949 Україна. № у 201805107; заявл. 08.05.2018; опубл. 10.10.2018, Бюл. № 19.

26. Спосіб тестування теплових пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом: пат. 113824 Україна. № у 201609584; заявл. 16.09.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3.

27. Спосіб контролю технічного стану теплових пожежних сповіщувачів пат. 114979 Україна. № у 201610794; заявл. 27.10.2016; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6.

28. Спосіб визначення часу спрацьовування теплових пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом: пат. 110590 Україна. № а 201501322; заявл. 10.07.2015; опубл. 12.01.2016, Бюл. №1.

29. Спосіб визначення часу спрацьовування теплових пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом: пат. 115933 Україна. № а 201604947; заявл. 26.12.2016; опубл. 10.01.2018, Бюл. №1.

30. Тепловий пожежний сповіщувач: пат. 111924 Україна. № у201505720; заявл. 10.06.2015; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.

31. Пристрій для реєстрації пожежі: пат. 109671 Україна. № u201603129; заявл. 28.03.2016; опубл. 25.08.2016, Бюл. № 16. 5 с.

32. Пристрій для виявлення пожежі: пат. 119158 Україна. № u201703726; заявл. 18.04.2017; опубл. 11.09.2017, Бюл. № 17.

33. Пристрій для виявлення пожежі: пат. 114948 Україна. – № u201610470; заявл. 17.10.2016 ; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6.

34. Пристрій для виявлення пожежі: пат. 120533 Україна. № u201704007; заявл. 24.04.2017; опубл. 10.11.2017, Бюл. №21.

35. Тепловий пожежний сповіщувач: пат. 110189 Україна. № u201503033; заявл. 01.04.2015; опубл. 25.11.2015, Бюл. № 22.

Тези доповідей, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

36. Абрамов Ю. О., Кальченко Я. Ю. Аналіз системи експлуатації теплових пожежних сповіщувачів // Матеріали VIII Міжнародної НПК «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». Черкаси, 2017. С. 107-108.

37. Абрамов Ю. А., Кальченко Я. Ю. Математическая модель воздушного потока при тестировании тепловых пожарных извещателей // Материалы НПК «Проблемы гражданской защиты: управление, предупреждение, аварийно-спасательные и специальные работы». Кокшетау, 2017. С.4-5.

38. Абрамов Ю. О., Кальченко Я. Ю. Математичне забезпечення об'єктових випробувань теплових пожежних сповіщувачів // Матеріали 19 Всеукраїнської НПК «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку». Київ, 2017. С. 13.

39. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. О. Визначення динамічних характеристик теплових пожежних сповіщувачів у частотній області // Тези доповідей Всеукраїнської НПК «Пожежна безпека: проблеми та перспективи». Харків, 2018. С. 210-211.

SUMMARY

Kalchenko Y.Y. Improvement the operation system of heat detectors by organization and technical implementation of their tests.

Thesis for a PhD in speciality 261 «Fire Safety». National University of Civil Defence of Ukraine, State Emergency Service of Ukraine, Kharkiv, 2019.

Dissertation work is devoted to solving the current scientific problem - improvement of the system of operation of heat detectors. The focus is on methods and means of testing heat detectors based on the use of its dynamic properties.

The system of operation of heat detectors is a set of measures aimed at maintaining their effective functioning, one of which is their testing. Analysis of test methods of heat detectors was carried out and it was determined that their main disadvantages are considerable time for carrying out tests, impossibility of their implementation in automatic mode and that during carrying out of "design tests dynamic characteristics of their sensitive elements are not determined, and the result of their tests is determined by additional criterion "worked or did not work", which causes low efficiency of such tests. Further research in the work aims to address these shortcomings.

A generalized mathematical model of a heat detector (the sensitive element of which can be presented in the form of a plate, cylinder or ball) has been developed, describing thermal processes in it when creating a stationary thermal influence on it. It has been determined that the response time of heat detectors depends on the value of its time constant, which in turn depends on the characteristics of the sensor, the medium and the test conditions. In this regard, a computational experiment was conducted and a regression model for the time constant of the heat detector was constructed. From this model, it is possible to estimate the weight of the effect of the characteristic size of the sensor R , the

velocity of the heat flow V and the diameter of the pipe d_{tp} along which it travels by the value of the time constant of the heat detector.

It is determined that the magnitude of the time constant will depend to a greater extent on the characteristic size of the sensor element, directly proportional. Under conditions that $d_{tp} = 0,3$ m, and $V = 0,8$ m/s the time constant as the characteristic size of the sensor R from 0,1 mm to 1 mm will increase by 0.98 s. The rate of heat flow and the diameter of the pipe, the time constant of the heat detector sensor, is inversely proportional, but not as heavy as the characteristic size. At increase d_{tp} from 0.1 m to 0.3 m the value of time constant will decrease only by 0.35 s, and at increase V from 0.6 m/s to 1.0 m/s it will decrease only by 0.31 s.

The experiment was planned and experimental studies were carried out to determine the parameters of heat flow formation formed in the structure of the heat detector. For the experiment, a screen-like layout (25x25x65) mm is constructed, in which a «DC BRUSHLESS FUN» fan and a heating element are installed, which is made of nichromic wire with a length of 293 mm and a diameter of 0.3 mm and fixed on textilite plates (30x10x2) mm. Regression models of heat flow rate dependencies from electric voltage supplied to fan, distance to heating element and temperature of heat flow from electric voltage supplied to heating element, and distance to sensitive element are constructed. It has been determined that in order to produce a heat flux of 54 °C, which is the minimum operating temperature of Class A1 heat detectors, 23.4 V must be applied to the heating element and the distance from it to the sensor must be 3.4 mm.

The method of definition of the transitional thermal fire announcer of function at impact on it the test by a signal in the form of linearly growing function is developed. Graphic dependences for an error are constructed that arises when determining the transitional heat detector of function from time

constant $\tau = 20$ s from an interval of discretization τ_0 and it is shown that for such an announcer it has to be $\tau_0 \leq 1,05$ s.

Methods of determining amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of thermal fire detectors based on information on their transient function have been developed. The dependence of the error value at determined frequency characteristics of the thermal fire detector on the time constant of the device τ_1 that generates the thermal impact and the interval of discreteness τ_0 are built. It is shown that when determining the amplitude-frequency characteristic of a thermal fire detector with a time constant $\tau = 5$ s, it is advisable to select a discreteness interval of $\tau_0 = 0,225$ s and a time constant of the device, which forms a thermal impact $\tau_1 = 0,1$ s; for detector with time constant $\tau = 10$ s - interval of discreteness $\tau_0 = 0,26$ s and time constant of device, which generates thermal impact $\tau_1 = 0,1$ s, and for detector with time constant $\tau = 20$ s - interval of discreteness $\tau_0 = 0,68$ s. When determining phase-frequency characteristic by this method it is advisable to select interval of discreteness 2 s and time constant of the device, which forms thermal impact, $\tau_1 = 0,073$ s. Such method of determining frequency characteristics allows to reduce time of their determination by about 50-60 times, compared to the classical method.

Methods have been developed to determine the time constant of heat detectors when exposed to a test in the form of temperature, which varies according to quadratic and linear laws. Mathematical description of reaction of thermoresistive sensitive elements of heat detectors to thermal action of direct and sinusoidal electric current is obtained, as well as expressions for their constant time.

A method of testing heat detectors has been developed, which consists in determining its transient function and comparing it with the transient function, which was determined in laboratory conditions at the manufacturer's plant, at times determined by Kotelnikov's theorem.

It has been shown that the use of this method will reduce the test time of heat detectors by 4 times, compared to the test site of fire TF 5, and by 16 times compared to the tests in the heat channel.

Methods of testing of heat detectors have been developed, consisting in determination of its frequency dynamic characteristics based on use of information on its general frequency characteristics. The first method involves determining the time constant of the detector based on the use of information on its amplitude-frequency characteristic. The implementation of this method involves measuring the amplitude of the output signal of the sensitive element at only two frequencies, which significantly reduces the test time and reduces its time by 8 times compared to the tests in the thermal channel.

The second test method is to determine the time constant of a heat detector based on the phase-frequency response information, as illustrated by detectors with a thermoresistive sensitive element, one of the features of which is that, according to Joule-Lenz law, a thermal effect on their sensitive element can be created by passing an electric current therethrough. It is shown that the time of testing by this method is equal to the time of transient process, that for detectors of class A1 is equal to (60-80) s.

Based on a mathematical model of a heat detector with a generalized sensitive element, a method of testing thermal fire detectors has been developed, which consists in creating an external heat flux on it, determining its time constant and comparing it with a standard value. Such method is universal and can be used for both stationary and object tests of heat detectors with any sensitive element. The use of this test method allows to reduce the time of their performance by 1.8 times compared to the existing object testing method, and taking into account the additional time required for testing and consists of preparation of the instrument for operation and movement of the operator for testing of detectors in different premises and on different floors by 3.3 times.

On the example of heat detectors with a thermoresistant sensitive element, a method of testing thermal fire detectors has been developed, which is based on

measurement of parameters of output signals under conditions of thermal influence on their sensitive elements of electric current in the form of cosine-like, which allows to carry out tests of detectors in automatic mode directly on the object, which is protected.

Devices for testing of heat detectors have been developed, which are presented in the form of structural diagrams, which allow to carry out tests of detectors in automatic mode directly on the site, which reduces the time of their carrying out and eliminates the possibility of occurrence of subunit-critical misses. Recommendations for testing of heat detectors have been developed.

It has been determined that the frequency of tests of heat detectors, which is established by the current regulatory document, is not justified in any way. Therefore, the recommended frequency of testing of heat detectors was calculated, which is 1.44 years.

Thus, the current scientific task of improving the system of operation of thermal fire detectors was solved.

Keywords: Heat detector, transient function, frequency characteristics, test methods, mathematical model, operation system, time constant, response time.

List of publications of the applicant

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

Articles in the scientific professional editions of Ukraine, which are included in the international scientometric bases:

1. Kalchenko, Y. Y., Abramov, Y. A. Mathematical models of thermal fresh water heating // Fire Safety Problems. 2018. Issue 43. P. 58-63.
2. Abramov Y. A., Kalchenko Y. Y.. Determination of parameters of heat flow formation during object tests of thermal fire detectors // Fire Safety Problems. 2017. Issue 41. P. 3-9.

3. Kalchenko Y. Y., Abramov Y. A. Testing of thermal fire detectors // Problems of fire safety. 2019. Issue 45. P. 60-64.

4. Kalchenko Y. Y., Abramov Y. A. Identification of parameters in determining the dynamic characteristics of thermal fire detectors // Fire Safety Problems. 2017. Issue 42. P. 41-51.

5. Kalchenko, Y. Y. Abramov Y. O. Algorithms for control of the technical state of the sensors of the primary information of the system of mitigation of consequences of emergency situations // Problems of emergency situations. 2018. Issue 27. P. 39-46.

6. Kalchenko Y. Y., Abramov Y. O. Ways to control the technical condition of thermal fire detectors // Problems of emergency situations. 2018. Issue 44. P. 44-48.

7. Kalchenko Y. Y., Abramov Y. O. Ways of determining the time of activation of thermal fire detectors // Fire Safety Problems. 2020. Issue 46. P. 44-48.

Articles in scientific professional editions of Ukraine:

8. Abramov Y. A., Kalchenko Y. Yu. Mathematical support for testing thermal fire detectors // Fire Safety Problems. 2015. Issue 40. P. 5-11.

9. Abramov Y. A., Kalchenko Y. Y. Mathematical support of the autonomous method of field tests of thermal fire detectors // Fire Safety Problems. 2015. Issue 38. P. 3-8.

10. Kalchenko Y. Y., Abramov Y. A. Models of primary information sensors of emergency effects mitigation systems // Problems of emergency situations. 2015. Issue 22. P. 65-69.

11. Abramov Y. A., Kalchenko Y.Y. Mathematical models for object tests of thermal fire detectors // Fire Safety Problems. 2016. Issue 39. P. 3-8.

12. Kalchenko, Y. Yu., Abramov, Yu. A. Identification of the dynamic parameter of fire detectors with thermoresistive sensitive // Problems of fire safety. 2015. Issue. 37. P. 71-74.

13. Abramov Y. A., Kalchenko Y. Y. Choice of a method for determining the period of routine maintenance of sensors for mitigating the consequences of emergencies // Fire Safety Problems. 2015. Issue 21. P. 3-6.

Article in scientific edition of other countries in the direction from which the dissertation was prepared:

14. Abramov Yu., Kalchenko Y., Liashevskaya O. Determination of dynamic characteristics of heat fire detectors // Eureka: Physics and Engineering. 2019. №3. URL: <http://eu-jr.eu/engineering/article/view/898>.

Article in the scientific edition of the EU country which included in the Scopus database:

15. Abramov Yu. A., Kalchenko Ya. Yu. Choice of a sampling period when determining the dynamic characteristics of thermal fire detectors // Bulletin of the University of Civil Protection of Belarus. 2019. V.3. Issue 1. URL: <https://journals.ucp.by/index.php/jcp/article/view/168>.

Patents:

16. Test method for thermal fire detectors: Pat. 125948 Ukraine. № u201800548; applied 19.01.2018; published 25.05.2018, Bul. № 10. 4 p.

17. Method for determining the dynamic characteristics of thermal fire detectors: Pat. №111447 Ukraine. № u201604945; applied 04.05.2016; published 10.11.2016, Bul. № 21. 4 p.

18. Method for determining the dynamic characteristics of thermal fire detectors: Pat. № 118847 Ukraine. № u201702866; applied 27.03.2017; published 08.28.2017, Bul. № 16. 6 p.

19. The method of determining the time constant of thermal fire detectors: Pat. № 110086 Ukraine. № a 201413822; applied 23.12.2014; published 10.11.2017, Bul. № 21. 3 p.

20. The method of determining the time constant of thermal fire detectors: Pat. № 116932 Ukraine. № a 201607780; applied 14.07.2016; published 25.05.2018, Bul. № 10. 3 p.

21. The method for determining the time constant of a thermal fire detector with a thermally resistive sensing element: Pat. № 126609 Ukraine. № u 201801076; applied 02.05.2018; published 25.06.2018, Bul. № 12. 2 p.

22. Test method for thermal fire detectors: Pat. № 114947 Ukraine. № u 201610468; applied 17.10.2016; published 03.27.2017, Bul. № 16. 2 p.

23. Test method for thermal fire detectors: Pat. № 109863 Ukraine. № u 201602817; applied 03.21.2016; published 12.09.2016, Bul. № 17. 3 p.

24. Method for monitoring the technical condition of thermal fire detectors: Pat. № 126312 Ukraine. № u 2018 01080; applied 02/05/2018; published 11.06.2018, Bul. № 11.

25. Method for controlling thermal fire detectors: Pat. № 128949 Ukraine. № u 201805107; applied 08.05.2018; published 10.10.2018, Bul. № 19.

26. Method for testing thermal fire detectors with a thermally resistive sensing element: Pat. № 113824 Ukraine. № u 201609584; applied 16.09.2016; published 10.02.2017, Bul. № 3.

27. The method of monitoring the technical condition of thermal fire detectors: Pat. № 114979 Ukraine. № u 201610794; applied 10/27/2016; published 03.27.2017, Bul. № 6.

28. Method for determining the time of activation of thermal fire detectors with a thermally resistive sensing element: Pat. 110590 Ukraine. № a 2015 01322; applied 10.07.2015; published 01.12.2016, Bul. №1.

29. Method for determining the time of activation of thermal fire detectors with a thermally resistive sensing element: Pat. № 115933 Ukraine. № a 201604947; applied 12.26.2016; published 01.10.2018, Bul. №1.

30. Thermal Fire Detector: Pat. 111924 Ukraine. № u201505720; applied 10.06.2015; published 24.06.2016, Bul. № 12.

31. Fire detection device: Pat. 109671 Ukraine. № u201603129; applied 03.28.2016; published 08.25.2016, Bul. № 16. 5 p.

32. Fire detection device: Pat. 119158 Ukraine. № u201703726; applied 18.04.2017; published 09.09.2017, Bul. № 17.

33. Fire detection device: Pat. 114948 Ukraine. № u201610470; applied 17.10.2016; published 03.27.2017, Bul. № 6.

34. Fire detection device: Pat. 120533 Ukraine. № u201704007; applied 24.04.2017; published 10.11.2017, Bul. №21.

35. Thermal fire detector: Pat. 110189 Ukraine. № u201503033; applied 01.04.2015; published 25.11.2015, Bul. № 22.

Abstracts certifying the approbation of the dissertation materials:

36. Abramov Y. A., Kalchenko Y. Y. Analysis of the system of operation of thermal fire detectors // Materials of the VIII International scientific-practical conference "Theory and practice of firefighting and emergency management". Cherkasy, 2017. P. 107-108.

37. Abramov Y. A., Kalchenko Y. Y. Mathematical model of air flow during testing of heat fire detectors // Materials of International scientific-practical conference "Problems of civil protection: control, warning, emergency and rescue and special work." Kokshetau, 2017. P. 4-5.

38. Abramov Y. O., Kalchenko Y. Y. Mathematical Support for Object Testing of Thermal Fire Detectors // Materials of the 19th All-Ukrainian scientific-practical conference "The Current State of Civil Protection of Ukraine and Prospects for Development." Kyiv, 2017. P. 13.

39. Kalchenko Y. Y., Abramov Y. O. Determination of dynamic characteristics of thermal fire detectors in the frequency domain // Abstracts of the All-Ukrainian scientific-practical conference "Fire Safety: Problems and Prospects". Kharkiv, 2018. P. 210-211.

40. Kalchenko Y. Y., Abramov Y. O. Dynamic error in the formation of a test impact on a thermal fire detector // Abstracts of the All-Ukrainian scientific-practical conference "Fire Safety: Problems and Prospects". Kharkov, 2018. P. 219-220.

41. Kalchenko Y. Y., Abramov Y. O. The choice of discreteness interval in determining the dynamic characteristics of thermal fire detectors // Proceedings of the VIII International scientific-practical conference "Theory and Practice of Fire Extinguishing and Emergency Management". Cherkasy, 2019. P. 5-7.

ЗМІСТ

ВСТУП	25
РОЗДІЛ 1. ТЕПЛОВІ ПОЖЕЖНІ СПОВІЩУВАЧІ ТА ЇХ СИСТЕМА ЕКСПЛУАТАЦІЇ	31
1.1. Теплові пожежні сповіщувачі та їх технічні характеристики	31
1.2. Аналіз системи експлуатації теплових пожежних сповіщувачів	38
1.3. Методи визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів	60
1.4. Постановка задачі дослідження та особливості її рішення	67
1.5. Висновки	68
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТЕПЛОВИХ ПОЖЕЖНИХ СПОВІЩУВАЧІВ	74
2.1. Узагальнена математична модель теплового пожежного сповіщувача в умовах впливу на нього стаціонарним тепловим потоком	74
2.2. Узагальнена математична модель теплового пожежного сповіщувача в умовах впливу на нього тепловою дією у вигляді стрибкоподібної зміни температури	89
2.3. Математична модель теплового пожежного сповіщувача з терморезистивним чутливим елементом	97
2.4. Регресійна модель теплових пожежних сповіщувачів	101
2.5. Висновки	120
РОЗДІЛ 3. ЗАГАЛЬНІ ТА ЧАСНІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВИХ ПОЖЕЖНИХ СПОВІЩУВАЧІВ ТА МЕТОДИ ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ	122
3.1. Динамічні характеристики та передаточна функція теплових пожежних сповіщувачів	122
3.2. Перехідна функція теплових пожежних сповіщувачів та методи її визначення	127

3.3. Частотні характеристики теплових пожежних сповіщувачів та методи їх визначення	138
3.3.1. Аналітичні методи визначення частотних характеристик теплових пожежних сповіщувачів	138
3.3.2. Експериментальні методи визначення частотних характеристик теплових пожежних сповіщувачів	142
3.4. Методи визначення часної динамічної характеристики теплових пожежних сповіщувачів.....	155
3.4.1. Визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів при зміні температури впливу на нього за квадратичним законом.....	155
3.4.2. Визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів при зміні температури впливу за лінійним законом.....	157
3.4.3. Визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів з терморезистивним чутливим елементом	159
3.5. Висновки	163

РОЗДІЛ 4. МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ ТЕПЛОВИХ ПОЖЕЖНИХ СПОВІЩУВАЧІВ, ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ, ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО ВИКОРИСТАННЮ.....

165

4.1. Методи випробувань теплових пожежних сповіщувачів, оснований на використанні її перехідної функції.....	165
4.2. Методи випробувань теплових пожежних сповіщувачів, оснований на використанні їх частотних характеристик.....	167
4.2.1. Метод випробувань теплових пожежних сповіщувачів, оснований на використанні його амплітудно-частотної характеристики.....	168
4.2.2. Метод випробувань теплових пожежних сповіщувачів, оснований на використанні його фазово-частотної характеристики.....	170

4.3. Методи випробувань теплових пожежних сповіщувачів, основані на визначенні його постійної часу.....	173
4.4. Методи випробувань теплових пожежних сповіщувачів, основані на визначенні його часу спрацьовування	175
4.5. Пристрої для проведення випробувань теплових пожежних сповіщувачів	182
4.5.1. Універсальний тепловий пожежний сповіщувач з функцією самоконтролю	182
4.5.2. Теплові пожежні сповіщувачі з терморезистивним чутливим елементом	185
4.6. Оцінка ефективності методів випробувань теплових пожежних сповіщувачів	199
4.7. Рекомендації, щодо проведення випробувань теплових пожежних сповіщувачів	206
4.8. Висновки	216
ВИСНОВКИ	220
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	221
ДОДАТКИ.....	232

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток і розширення виробництва, розробка та впровадження нових технологій, удосконалення технологічних процесів, використання нових матеріалів для виготовлення продукції, реконструкція підприємства та ін. – обумовлюють підвищення ефективності систем виявлення небезпечних факторів пожежі та необхідність в удосконаленні їх системи експлуатації.

Використання автоматичних систем пожежної сигналізації дозволяє здійснювати виявлення небезпечних факторів пожежі на ранній стадії, тим самим, зменшувати збитки від неї. Ефективність роботи таких систем багато в чому визначається ефективністю датчиків первинної інформації, зокрема теплових пожежних сповіщувачів. Проблеми удосконалення системи пожежної автоматики та технічних характеристик теплових пожежних сповіщувачів розглядалися у роботах В.П. Бабурова, Н.Ф. Бубиря, Ф.І. Шаровара, А.В. Долговидова, Ю.О. Абрамова, В.М. Гвоздя, Є.О. Тищенко, С.В. Карлаша, Е.В. Куринного, Ю.Ю. Перести, D. Drysdale, D. Smith, S. Welch, M.Schwenke та ін.

Ефективність функціонування теплових пожежних сповіщувачів залежить від багатьох факторів, одним з яких є ступінь досконалості їх системи експлуатації. Одним із етапів експлуатації теплових пожежних сповіщувачів є їх випробування, які регламентуються євростандартом EN-54, що передбачає визначення лише однієї кількісної характеристики – часу спрацювання. Випробування теплових пожежних сповіщувачів, що установлені на об'єктах, проводяться без визначення їх кількісних характеристик, а висновок про їх працездатність робиться за критерієм «спрацював-не спрацював», що обумовлює низьку ефективність таких випробувань.

Виходячи з цього, можна стверджувати, що при проведенні випробувань теплових пожежних сповіщувачів методами, які

регламентовані чинними нормативними документами, властивості теплових пожежних сповіщувачів використовуються не в повній мірі, що знижує ефективність їх системи експлуатації. У зв'язку з цим, актуальною науковою задачею є удосконалення системи експлуатації теплових пожежних сповіщувачів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Робота виконувалась у рамках державних бюджетних науково-дослідних робіт № 0116U002017, № 0118U001013.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності системи експлуатації теплових пожежних сповіщувачів шляхом удосконалення методів та засобів їх випробувань, оснований на використанні їх динамічних властивостей.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- побудувати узагальнену математичну модель теплового пожежного сповіщувача, яка характеризує теплові процеси в його чутливому елементі різної геометрії і, на основі цієї інформації побудувати регресійні моделі часної динамічної характеристики такого сповіщувача (шляхом проведення експериментальних та обчислювальних досліджень) та встановити її зв'язок з фізичними характеристиками середовища;
- розробити методи визначення перехідної функції теплових пожежних сповіщувачів при впливі на нього тест-сигналом у вигляді лінійно-зростаючої функції;
- розробити методи визначення амплітудно-частотної та фазово-частотної характеристик теплових пожежних сповіщувачів, в основі яких лежить використання їх узагальненої математичної моделі, а час їх визначення не перевищує час перехідного процесу;
- розробити методи визначення часних динамічних характеристик теплових пожежних сповіщувачів на прикладі їх постійної часу;

- розробити методи та засоби випробувань теплових пожежних сповіщувачів, які дозволять удосконалити їх систему експлуатації шляхом автоматизації процесу цих випробувань та скорочення їх часу проведення;
- оцінити ефективність удосконаленої системи експлуатації теплових пожежних сповіщувачів.

Об'єкт дослідження – процеси, які характеризують експлуатацію теплових пожежних сповіщувачів.

Предмет дослідження – методи та засоби випробувань теплових пожежних сповіщувачів.

Методи дослідження. Методи рішення рівнянь математичної фізики, теорії планування експерименту, теорії автоматичного управління, математичної статистики та теорії надійності.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що

- вперше розроблена узагальнена математична модель, що описує теплові процеси у тепловому пожежному сповіщувачі з чутливим елементом, що може бути представлений у вигляді циліндра, шару або пластинки, при впливі на нього тепловим потоком постійної величини;
- вперше розроблені методи визначення динамічних характеристик теплових пожежних сповіщувачів, в основі яких лежить використання їх перехідної функції;
- вперше розроблені методи визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів, які ґрунтуються на використанні інформації про їх динамічні характеристики;
- вперше розроблений метод визначення часу спрацьовування теплових пожежних сповіщувачів на прикладі сповіщувачів з терморезистивним чутливим елементом, що оснований на вимірюванні параметрів вихідних сигналів в умовах теплової дії на їх терморезистивні чутливі елементи електричного струму у вигляді косинусоїди, що дозволяє проводити випробування сповіщувачів у автоматичному режимі;

- вперше розроблені методи випробувань теплових пожежних сповіщувачів, висновок про працездатність яких робиться на основі порівняння визначених загальних динамічних характеристик сповіщувача з нормативними;
- вперше розроблені структурні схеми пристроїв для об'єктових випробувань теплових пожежних сповіщувачів, які дозволяють проводити їх випробування у автоматичному режимі;
- отримав подальший розвиток математичний опис процесів, що протікають у чутливих елементах теплових пожежних сповіщувачів в умовах зміни температури навколишнього середовища.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені математичні моделі, методи випробувань та пристрої для їх реалізації дозволили підвищити ефективність системи експлуатації теплових пожежних сповіщувачів. Крім того, результати досліджень є основою для подальшого удосконалення нормативної бази стосовно випробувань теплових пожежних сповіщувачів.

Розроблені методи стаціонарних випробувань теплових пожежних сповіщувачів, що оснований на використанні його перехідної функції, впроваджені в Черкаському міськрайонному відділі Управління ДСНС України у Черкаській області (Акт від 15.01.2020 р.), що дозволило скоротити час їх проведення у порівнянні з методами, що приведені у EN-54, майже на два порядки. Метод об'єктових випробувань теплових пожежних сповіщувачів, оснований на визначенні його постійної часу, впроваджений на ПП «НПП Спецпожтехніка» при стендових випробуваннях сповіщувачів (Акт від 22.01.2020 р.), що забезпечило повну автоматизацію проведення випробувань та дозволило скоротити час їх проведення у 1,8 рази.

Особистий внесок здобувача. У роботах, що були опубліковані у співавторстві, особистий внесок автора заключається в отриманні узагальнених математичних моделей теплових пожежних сповіщувачів, з

чутливим елементом, що може бути представлений у вигляді прямокутної пластини, циліндра та шару [57, 62, 64, 65]; проведенні обчислювального експерименту та отриманні аналітичного виразу для постійної часу сповіщувача у вигляді регресійної моделі при впливі на нього тепловим потоком постійної величини [77]; плануванні та проведенні експерименту з визначення параметрів формування теплового потоку, що створений у конструкції теплового пожежного сповіщувача, та побудова його математичної моделі [79]; розробці методів визначення загальних динамічних характеристик теплових пожежних сповіщувачів та знаходженні меж параметрів при їх визначенні [89,92,94,96]; розробці методів визначення часної динамічної характеристики теплових пожежних сповіщувачів – постійної часу [100]; розробці методів випробувань теплових пожежних сповіщувачів, що основані на використанні його загальних та часних динамічних характеристик [105,107]; розробці методів визначення часу спрацьовування теплових пожежних сповіщувачів [112]; розробці метода визначення періоду проведення випробувань теплових пожежних сповіщувачів [120].

Апробація матеріалів дисертації. Основні наукові результати дисертаційного дослідження доповідалися на: міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2017 р., 2019 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы гражданской защиты: управление, предупреждение, аварийно-спасательные и специальные работы» (м. Кокшетау, 2017 р.); всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку» (м. Київ, 2017 р.); всеукраїнській науково-практичній конференції «Пожежна безпека: проблеми та перспективи» (м. Харків, 2018 р.)

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 15 наукових статтях у фахових виданнях України та Республіки Білорусі та

одна стаття у науковому журналі країни Євросоюзу, що входить до бази даних Scopus. Також за результатами дисертаційного дослідження отримано 20 патентів України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний об'єм дисертації складає 235 с. та включає 73 рис., 41 табл. та 121 джерело використаної літератури.

РОЗДІЛ 1

ТЕПЛОВІ ПОЖЕЖНІ СПОВІЩУВАЧІ ТА ЇХ СИСТЕМА ЕКСПЛУАТАЦІЇ

1.1. Теплові пожежні сповіщувачі та їх технічні характеристики

Пожежний сповіщувач — технічний пристрій, призначений для формування сигналу в разі виникнення ознак горіння, який спрацьовує під впливом тепла [1].

Теплові пожежні сповіщувачі (ТПС) реагують на підвищення температури середовища. Вони застосовуються, якщо в зоні контролю, на початковій стадії виникнення пожежі, передбачається значне тепловиділення, або горіння рідин та матеріалів, яке не супроводжується виділенням диму. Класифікація ТПС приведена на рис. 1.1. Основні технічні характеристики ТПС приведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Технічні характеристики ТПС

Технічні характеристики	Значення	
	Min	Max
Статична температура спрацьовування, °С	Див. табл. 1.2	
Максимальна температура використання, °С		
Нормальна температура використання, °С		
Час спрацьовування, с	Див в табл.1.3 та табл.1.4	
Постійна часу, с	Див. табл. 1.9	
Сила струму у черговому режимі, мА	0,1	0,3
Сила струму у режимі «Пожежа», мА	17	50
Напруга живлення у номінальному режимі, В	9	30
Строк служби, р	10	
Вихідний електричний опір сповіщувача, Ом	200	500
Робочий діапазон температур, °С	Приведені в табл. 1.2	

Класифікація ТПС



Рис. 1.1. Структурна схема класифікації ТПС

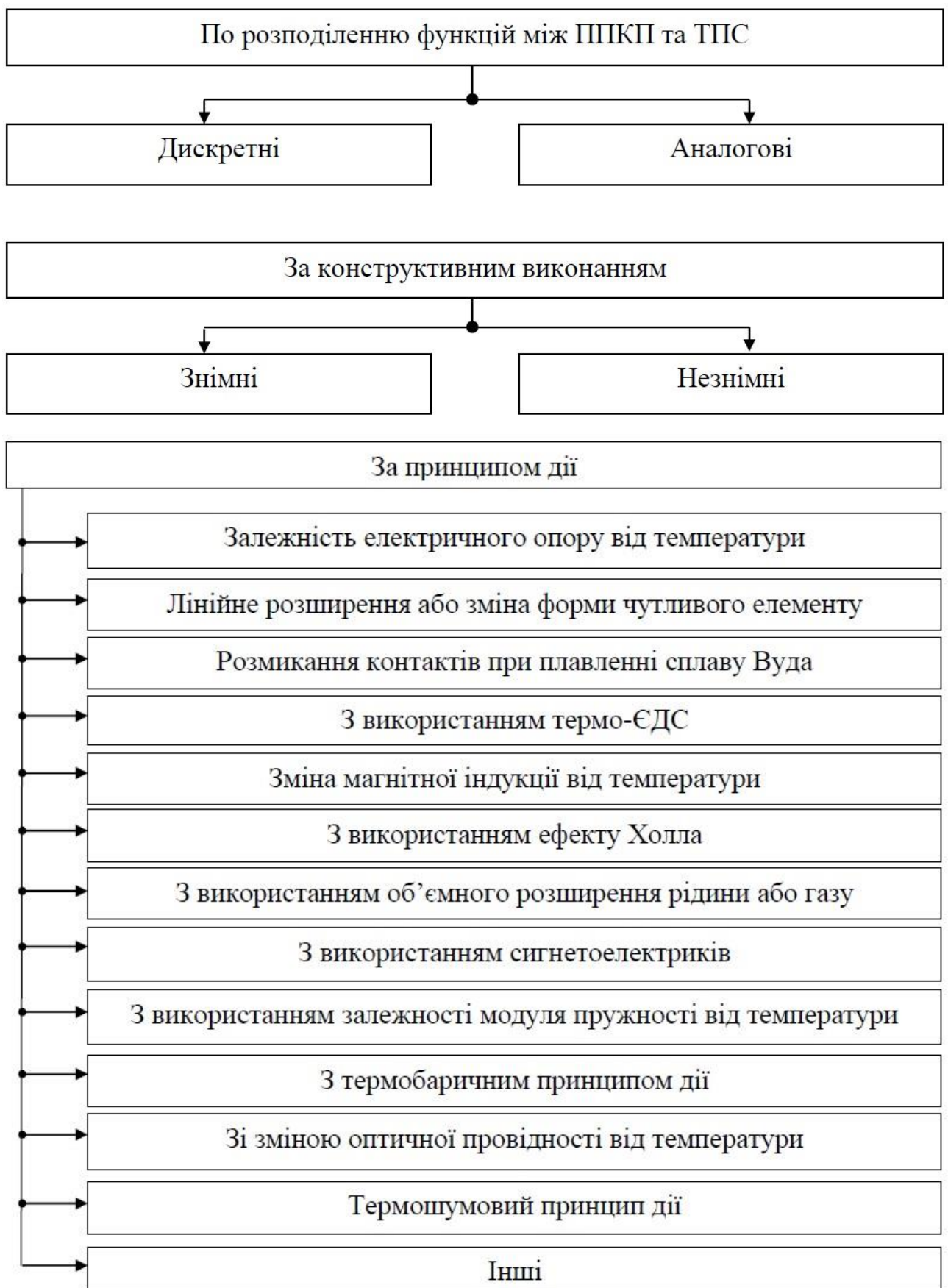


Рис. 1.1. Структурна схема класифікації ТПС (продовження)

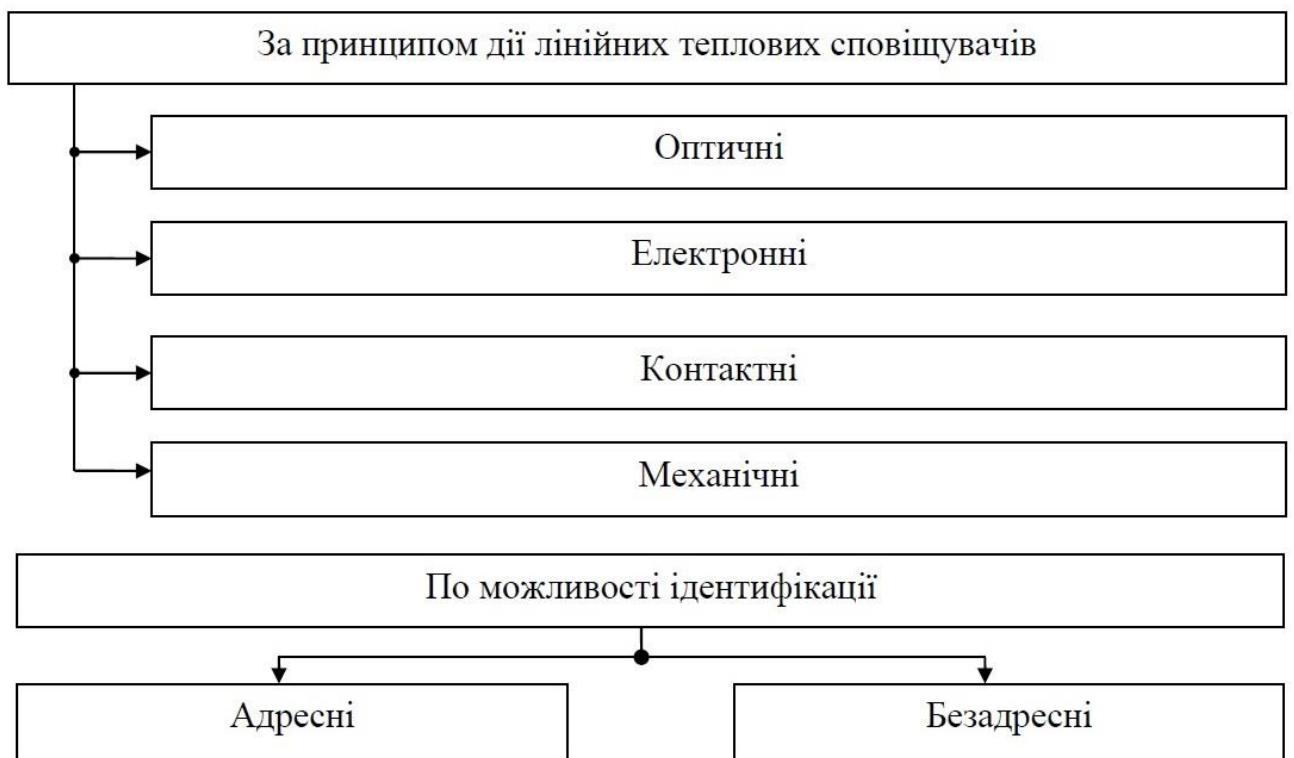


Рис. 1.1. Структурна схема класифікації ТПС (продовження)

Основними класифікаційними ознаками ТПС є [2]:

- час спрацьовування;
- вид зони виявлення;
- температура спрацьовування;
- контрольований характер підвищення температури;
- принцип дії;
- конструктивне виконання.

ТПС в залежності від температури та часу спрацьовування поділяються на десять класів: А1, А2, А3, В, С, D, Е, F, G, Н, як показано в табл. 1.2 [3]. Час спрацьовування визначається проміжком часу від початку теплового впливу на сповіщувач до його спрацьовування. Цей час включає в себе час прогрівання навколишнього середовища до температури спрацьовування та час прогрівання самого чутливого елемента ТПС. Таким чином, час спрацьовування ТПС залежить від конструкції

сповіщувача і його чутливого елемента, а також від характеристик контролюваного впливу (умов випробування).

Таблиця 1.2

Температурна класифікація ТПС

Клас сповіщувача	Температура		Температура спрацювання	
	Нормальна	Максимальна	Мінімальна	Максимальна
A1	25	50	54	65
A2	25	50	54	70
B	40	65	69	85
C	55	80	84	100
D	70	95	99	115
E	85	110	114	130
F	100	125	129	145
G	115	140	144	160

Таблиця 1.3

Межі часу спрацювання

Швидкість підвищення температури повітря	Сповіщувачі класу A1				Сповіщувачі класів A2, B, C, D, E, F, G			
	Нижня межа часу спрацювання		Верхня межа часу спрацювання		Нижня межа часу спрацювання		Верхня межа часу спрацювання	
К/хв	хв	с	хв	с	хв	с	хв	с
1	29	0	40	20	29	0	46	0
3	7	13	13	40	7	13	16	0
5	4	9	8	20	4	9	10	0
10	1	0	4	20	2	0	5	30
20		30	2	20	1	0	3	13
30		20	1	40		40	2	25

Час спрацьовування пожежних сповіщувачів повинен знаходитись між нижньою і верхньою межами спрацьовування, відповідно до класу ТПС [3], як показано в табл. 1.3.

На рис. 1.2 приведений графік залежності температури спрацьовування ТПС класу А2 від швидкості зростання температури. Червоним кольором показані допустимі зони часу спрацьовування, а горизонтальні чорні лінії відділяють зону статичних температур спрацьовування [4].

Залежності температури спрацьовування максимально-диференціальних теплових сповіщувачів класу А2R від швидкості зростання температури наведені на рис. 1.3. Виходячи з графіка на рис. 1.3, максимально-диференціальний ТПС спрацьовує, якщо температура навколишнього середовища в приміщенні зростає на 20 °С за час менший ніж 2 хвилини [4].

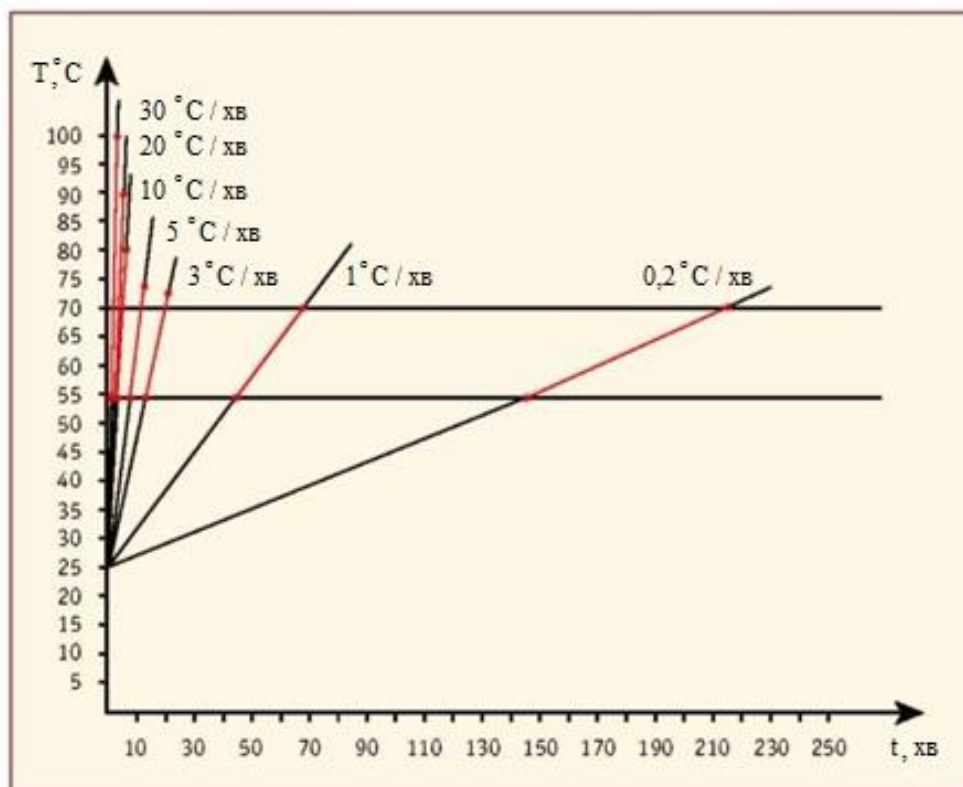


Рис. 1.2. Графік залежності температури спрацьовування максимальних теплових сповіщувачів класу А2 від швидкості зростання температури

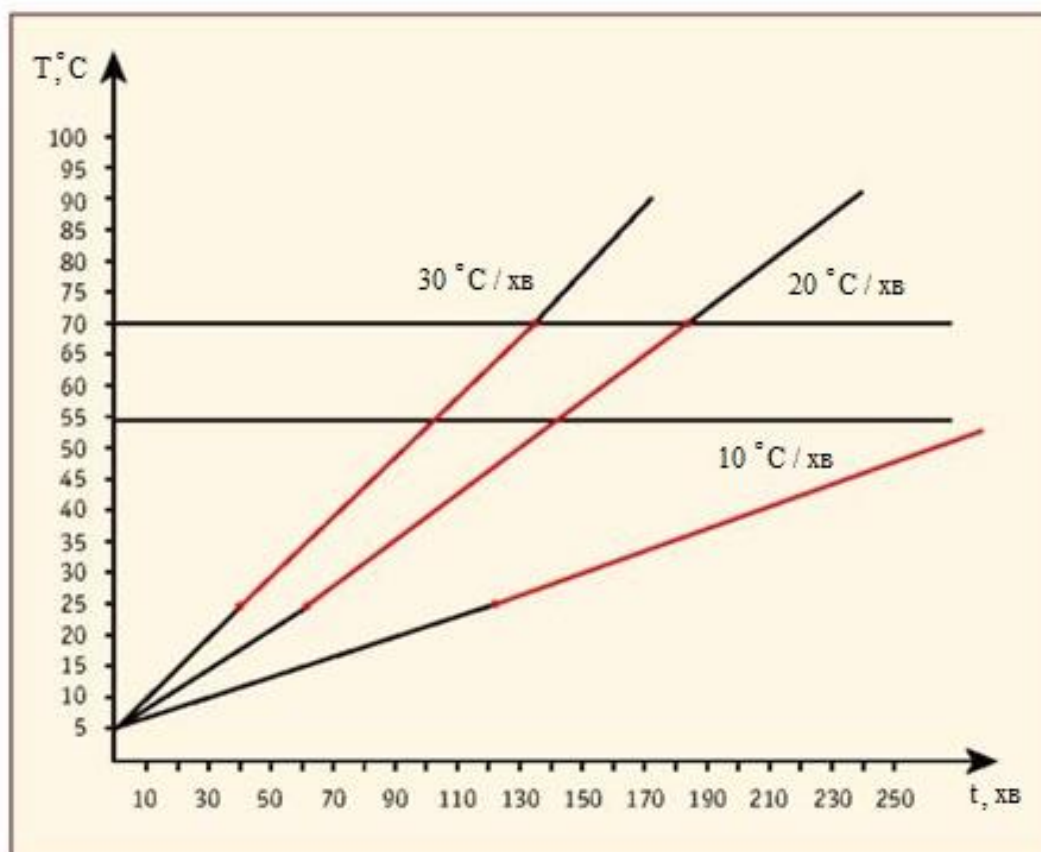


Рис. 1.3. Графік залежності температури спрацювання максимально-диференціальних теплових сповіщувачів класу A2R від швидкості зростання температури

До числа часових характеристик ТПС необхідно віднести величину постійної часу чутливого елемента, яка відповідно до [3] використовується при нормуванні меж вимірів часу спрацювання ТПС. Цей нормативний документ регламентує два значення постійної часу для чутливого елемента сповіщувача, як показано у табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Теплові константи, що були використані для вирахування значень табл. 1.3

Клас сповіщувача	Теплові константи верхніх меж	
	θ_0, K	τ, c
A1	40	≤ 20
Всі інші	45	≤ 60

Величина постійної часу чутливого елемента ТПС визначається за формулою

$$\tau = \frac{C}{NA}, \quad (1.1)$$

де C – теплоємність чутливого елемента, N – коефіцієнт конвекційної передачі, A – площа поверхні чутливого елемента [3].

1.2. Аналіз системи експлуатації теплових пожежних сповіщувачів

Експлуатація – це стадія життєвого циклу виробу, під час якої реалізується, підтримується та відновлюється його якість [5]. Усі ТПС повинні задовольняти вимоги ДСТУ EN 54-5:2003, тому перед введенням в експлуатацію кожен сповіщувач повинен пройти випробування відповідно до розділу 5 цього нормативного документу [3]. Регламент проведення таких випробувань наведений у табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Регламент проведення випробування теплових пожежних сповіщувачів, згідно із ДСТУ EN 54-5:2003

Випробування	№ пункту	Номер(и) зразка (-ів)							
		Швидкість підвищення температури повітря (К/хв)							
		< 0,2	1	3	5	10	20	30	Занурення
Залежність від напрямку	5.2					1			
Статична температура спрацьовування	5.3	1;2							
Часи спрацьовування від нормальної температури	5.4		1; 2	1; 2	1; 2	1; 2	1; 2	1;2	
Часи спрацьовування від 25 °С	5.5			1			1		
Часи спрацьовування від високої температури спрацьовування	5.6			1			1		

Продовження таблиці 1.5

Зміна параметрів електроживлення	5.7			1; 2			1; 2		
Відтворність (часи спрацьовування перед випробуванням на впливання довкілля)	5.8			3- 15			3- 15		
Холод (стійкість)	5.9			3			3		
Сухе тепло (тривкість)	5.10			4			4		
Вологе тепло, циклічне (стійкість)	5.11			5			5		
Вологе тепло, постійний стан (тривкість)	5.12			6			6		
Корозійне впливання діоксиду сірки SO ₂ (тривкість)	5.13			7			7		
Поштовх (стійкість)	5.14			8			8		
Удар (стійкість)	5.15			9			9		
Вібрація синусоїдна (стійкість)	5.16			10			10		
Вібрація синусоїдна (тривкість)	5.17			10			10		
Електростатичний розряд (стійкість)	5.18			11			11		
Випромінювані електромагнітні поля (стійкість)	5.18			12			12		
Кондуктивні завади, викликані електромагнітними полями (стійкість)	5.18			13			13		
Пачки короткочасних перехідних імпульсів (стійкість)	5.18			14			14		
Повільні кидки напруги великої енергії (стійкість)	5.18			15			15		
Додаткове випробування для сповіщувачів з індексом S	6.1								1
Додаткове випробування для сповіщувачів з індексом R	6.2					1; 2	1; 2	1;2	

Сповіщувачі, що пройшли випробування, вважаються працездатними і можуть бути допущені до встановлення на об'єкті. Розміщення ТПС на об'єкті повинно відповідати нормам, приведеним у [2,6].

Наступним етапом є введення сповіщувачів в експлуатацію, що включає в себе зовнішній огляд сповіщувачів, перевірку правильності монтажу відповідно до проекту та перевірку їх спрацьовування. При введенні в експлуатацію необхідно переконатися в тому, що монтаж виконаний належним чином, матеріали, компоненти і методи, що були використані для монтажу системи пожежної автоматики, відповідають усім діючим вимогам і що змонтована система відповідає вимогам креслеників і технічних описів [6].

При введенні в експлуатацію необхідно перевірити, що:

- усі автоматичні та ручні пожежні сповіщувачі функціонують;
- будь-які з'єднання з пунктом приймання пожежної тривоги або з пунктом приймання попередження про несправності функціонують, та повідомлення передаються правильно та зрозуміло;
- в повному обсязі підготовлено документацію та інструкції.

Перед початком перевірки змонтованої системи повинен бути передбачений певний час для того, щоб переконатися, що система працює стабільно за звичайних умов довкілля.

Приймальні випробування складаються з:

- перевірки наявності необхідної документації;
- візуальної перевірки системи, а також проведення оцінювань, що можуть бути виконані під час огляду на предмет відповідності змонтованої системи технічними умовам;
- перевірки спрацьовування погодженої кількості сповіщувачів у системі.

Після виконання цих заходів ТПС можуть використовуватися за призначенням. Для всіх ТПС, що встановлені на об'єктах та функціонують передбачено проведення регулярного технічного обслуговування, що

призначене для підтримування системи в робочому стані за нормальних умов. Технічне обслуговування системи повинен проводити тільки спеціально навчений персонал, який є компетентним у провадженні діяльності, яка потрібна для проведення перевірки, проведення регламентних робіт та ремонту змонтованої системи [6]. Технічне обслуговування ТПС поділяється на планове та позапланове.

Планове технічне обслуговування ТПС повинно здійснюватись відповідно затвердженого регламенту технічного огляду і перевірки, приклад якого приведено у додатку А.11.2.1 ДСТУ-Н СЕН/TS 54-14. У відповідності з цим нормативним документом, технічне обслуговування ТПС повинно складатися з таких етапів [6]:

- щоквартально повинна здійснюватись перевірка спрацьовування щонайменше одного сповіщувача з кожної зони;
- щорічно повинна здійснюватись перевірка правильності функціонування кожного ТПС відповідно до вказівок виробника (допускається тестувати до 25% сповіщувачів під час проведення щоквартального обслуговування).

Позапланове технічне обслуговування ТПС не відрізняється від планового, а його здійснення передбачається за таких умов [6]:

- будь-яка пожежа (яка виявлена автоматично або людиною);
- будь-який випадок хибної тривоги;
- розширення, перепланування або ремонт приміщень;
- зміни призначень приміщень або виду діяльності на площах, контрольованих системою;
- пошкодження системи, навіть якщо несправність одразу не буде очевидною;
- будь-які зміни в додатковому устаткуванні;
- використання системи до закінчення будівельних робіт і до повного передавання будівлі в експлуатування.

Планування та проведення технічного обслуговування ТПС на об'єкті, його періодичність та заходи, що здійснюються під час його проведення, повністю визначаються організацією, з якою укладено договір на проведення технічного обслуговування цього об'єкту [6]. Якщо проведення технічного обслуговування планується виконувати власними силами, то на підприємстві наказом керівника створюється спеціалізований підрозділ за яким закріплюються відповідні обов'язки [7]. Перевагою здійснення технічного обслуговування таким чином є індивідуальність проведення випробування для різних ТПС. При проведенні технічного обслуговування різних видів ТПС можуть виконуватися різні операції, які приведені у їх технічній документації. Найчастіше, окрім перевірки спрацьовування, виробники ТПС вимагають проведення наступних заходів:

- зовнішній огляд сповіщувача та проведення очистки його забруднених поверхонь;
- перевірка правильності роботи оптичних індикаторів;
- регулярно, не рідше ніж раз на 6 місяців, виконувати продувку сповіщувачів повітрям на протязі 1 хв з усіх сторін, використовуючи пілосос або компресор з тиском $(0,5 \div 3,0) \text{ кг / см}^2$.

Недоліком проведення технічного обслуговування ТПС є те, що нормативними документами не встановлені обов'язкові заходи при проведенні технічного обслуговування та періодичність їх виконання.

Наступним етапом експлуатації ТПС є ремонт. Згідно з п. 11.5. ДСТУ-Н CEN/TS 54-14 резервна кількість ТПС на об'єкті не обов'язкова. Як наслідок, при виявленні несправності сповіщувача його буде направлено на ремонт, а область його контролю залишиться неконтрольованою, до моменту заміни на інший сповіщувач або його відремонтування, що може зайняти багато часу.

Ремонт ТПС передбачається у випадках [7]:

- будь-якої індикації несправної роботи сповіщувача;
- пошкодження будь-якого сповіщувача.

Загалом систему експлуатації ТПС можна представити у вигляді схеми, як показано на рис. 1.4.



Рис. 1.4. Структурна схема експлуатації ТПС

Із аналізу схеми на рис. 1.4., витікає, що одним із важливих етапів експлуатації ТПС є перевірка його працездатності, яка виконується перед

та на етапі введення його в експлуатацію та під час його технічного обслуговування.

Перевірка працездатності ТПС на різних етапах експлуатації виконується по різному. Перед введенням в експлуатацію сповіщувачі повинні пройти усі випробування, згідно регламенту, приведеному у табл. 1.5.

На етапі введення в експлуатацію перевірка працездатності здійснюється лише для визначеної кількості сповіщувачів, причому випробування відбуваються без визначення його технічних характеристик, а за принципом «спрацював – не спрацював». Метою здійснення перевірки працездатності ТПС під час технічного обслуговування також є перевірка факту спрацювання сповіщувача, а не визначення його технічних характеристик.

Перевірка працездатності ТПС може виконуватися двома видами випробувань: стаціонарними та об'єктовими. Як правило, стаціонарні випробування теплових пожежних сповіщувачів проводяться перед введенням в експлуатацію, а об'єктові на етапі введення в експлуатацію та технічного обслуговування. Сповіщувач вважається працездатним у випадку його спрацювання за певний період часу, як показано у табл. 1.3.

Стаціонарні випробування згідно [3,8] проводяться у тепловому каналі та у спеціальних приміщеннях за допомогою тестових осередків пожеж. У тепловому каналі випробування проводяться відповідно до плану проведення випробувань, що приведений в табл.1.5 [3]. Зовнішній вигляд теплового каналу показаний на рис. 1.7.

Тепловий канал складається з аеродинамічної труби замкнутого типу, має горизонтальну робочу секцію, поперечний переріз якої є квадратним або прямокутним. При цьому, необхідно передбачити можливість створення в трубі потоку гарячого повітря, температура якого може підвищуватися зі швидкістю від 0,2 °С/хв до 30,0 °С/хв із

збереженням масової витрати, еквівалентного швидкості потоку повітря ($0,80 \pm 0,04$) м/с при температурі 25 °С. Поперечний перетин робочої секції труби має бути не менше (305x305) мм, щоб стінки не чинили впливу на потік повітря поблизу ТПС, що випробовується. Канал сконструйований таким чином, щоб пряме теплове випромінювання нагрівача не впливало безпосередньо на ТПС. Температура в камері повинна регулюватися в межах від 25 °С до 160 °С.



Рис. 1.7. Зовнішній вигляд теплового каналу

На рис. 1.8 приведений рекомендований варіант конструкції випробувальної камери [8], а основні технічні характеристики – в табл. 1.6. ТПС, що випробовується, встановлюють в робочому положенні на площадці, яку утворює частина стелі робочої секції. Площадка розташована симетрично, до бокових стінок робочої секції і має поворотний пристрій, що дозволяє повертати ТПС на 360° навколо вертикальної осі. Прилади контролю і управління забезпечують вимірювання і управління необхідних значень температури, швидкості її

підвищення, а також швидкості повітряного потоку в безпосередній близькості від випробовуваного ТПС, як показано на рис. 1.9 [8].

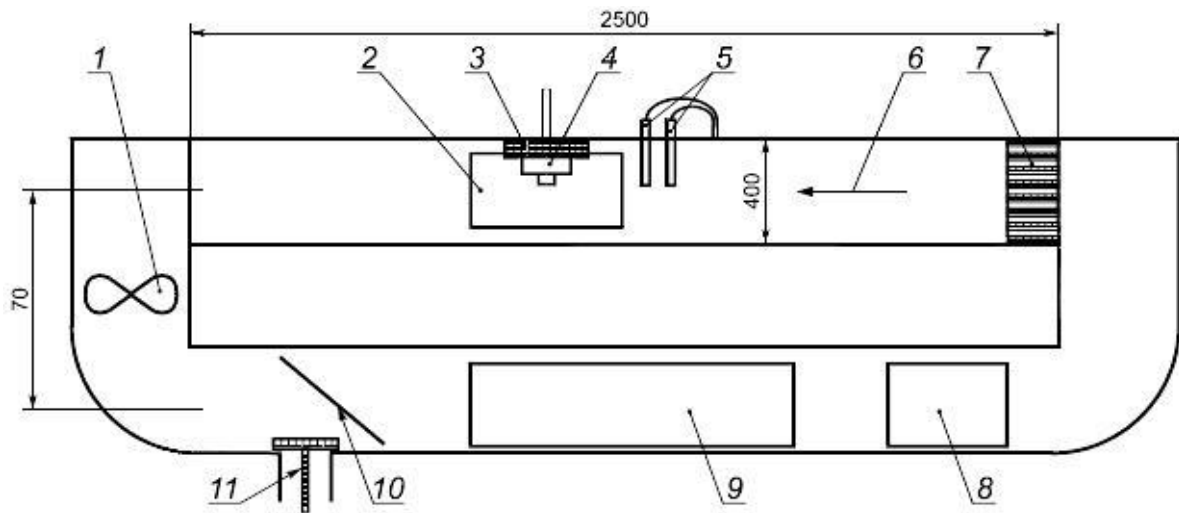


Рис. 1.8. Конструкція теплової камери для вимірювання часу і температури спрацювання ТПС: 1 – вентилятор з двигуном; 2 – кришка відсіку для установки ТПС, що випробується зі скляним оглядовим вікном; 3 – майданчик з поворотним пристроєм для установки ТПС, що тестується; 4 – випробовуваний ТПС; 5 – вимірювачі температури і швидкості потоку повітря; 6 – напрямок потоку повітря; 7 – лінеаризатор; 8 – кришка для установки холодильного агрегату для випробувань при знижених температурах; 9 – відсік нагрівача; 10 – регулятор швидкості потоку повітря; 11 – вентиляційний отвір

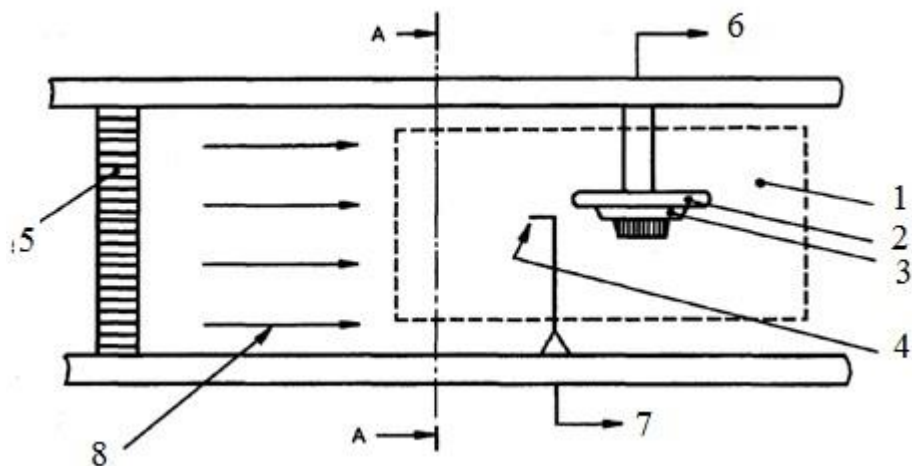


Рис. 1.9. Схема робочої секції теплового каналу: 1 – робочий об'єм, 2 – монтажна модель, 3 – ТПС, що перевіряється, 4 – температурний давач, 5 – елемент, що спрямовує потік повітря, 6 – до устаткування джерела живлення та контролювання, 7 – до устаткування регулювання та вимірювання, 8 – повітряний потік

Таблиця 1.6

Основні технічні характеристики теплового каналу

Діапазон початкових температур випробувань, °С	(25 - 155) ± 2
Діапазон випробувальних температур, °С	25-160
Діапазон швидкостей наростання повітряного потоку, С/хв	0,2-30
Похибка відпрацювання швидкості наростання температури, %	10
Діапазон швидкостей повітряного потоку, м/с	0,75-3,6
Кількість програмованих періодів в межах циклу роботи	4
Розмір випробувальної зони камери, мм	585×305×305
Кут установки випробуваного виробу в камері, щодо направлення повітряного потоку, °	0-360 (крок 45)
Напруга живлення, В	380
Максимальна споживана потужність, кВт	16
Контроль спрацьовування виробу, що перевіряється	автоматичний
Габаритні розміри, м	3,5×2,2×1

Орієнтація ТПС, що випробовується відносно напрямку повітряного потоку, повинна бути такою, щоб отримати максимальний час спрацьовування під час випробування відповідно до п. 5.2 [3]. Спочатку перевіряється залежність часу спрацьовування ТПС від напрямку. Зразок, що установлений в тепловому каналі, повинен бути випробуваний у 8 різних положеннях, повертаючись при кожному наступному випробуванні на 45° відносно вертикальної вісі.

Температура навколо ТПС повинна зростати зі швидкістю 10 К/хв. Час спрацьовування сповіщувачів повинен бути зареєстрований і для класу А1 бути в межах від 60 с до 260 с, а для сповіщувачів класу А2, В, С, D, Е, F, G в межах від 120 с до 330 с.

Після чого визначають, в якому з положень було отримано максимальний час спрацьовування, а в якому мінімальний. В цих положеннях повинні відбуватися випробування ТПС згідно з регламентом, що приведений у табл. 1.5. Основним критерієм, по якому визначають працездатність сповіщувача, є його час спрацьовування, який визначається під час кожного з випробувань за цим регламентом. Загальний час

проведення стаціонарних випробувань, теплових пожежних сповіщувачів згідно з регламентом, що приведено у табл. 1.5., складає 36 год [9].

Недоліками теплового каналу є несиметричний розподіл повітряного потоку і температури по поперечному перерізі замкнутого корпусу, що має, як правило, форму кільця, через різницю кутових швидкостей повітряного потоку і нерівномірної тепловіддачі стінки корпусу. Крім того, контакт створюваного повітряного теплового потоку зі стінкою корпусу, що знаходиться в прямому контакті з навколишнім середовищем, зумовлює високу різницю температури потоку від стінки корпусу до його середини в зоні вимірювань [1]. Альтернативні установки для проведення стаціонарних випробувань, які усувають недоліки теплового каналу приведені в [10, 11].

Іншим видом стаціонарних випробувань є вогневі випробування, які проводяться згідно з ГОСТ Р 53325-2012 [8]. Для проведення випробувань встановлюють шість видів тестових осередків пожеж (TF), що позначаються TF-1, TF-2, TF-3, TF-4, TF-5, TF-6. Їх якісні характеристики наведені в табл. 1.7 [8].

Таблиця 1.7

Якісні характеристики тестових осередків пожежі

Назва	Тип горіння	Якісні характеристики		
		Інтенсивність тепловиділення	Потік, що підіймається	Дим
TF-1	Відкрите горіння деревини	Висока	Сильний	+
TF-2	Піролізне тління деревини	Дуже незначна	Слабкий	+
TF-3	Тління хлопку	Дуже незначна	Дуже слабкий	+
TF-4	Горіння полімерних матеріалів	Не значна	Сильний	+
TF-5	Горіння легкозаймистої рідини з виділенням диму	Висока	Сильний	+
TF-6	Горіння легкозаймистої рідини	Висока	Сильний	-

Випробування ТПС можливо лише трьома видами тестових пожеж (TF-1, TF-5, TF-6). На рис. 1.10 приведено співвідношення факторів при різних тестових осередках пожежі [12].

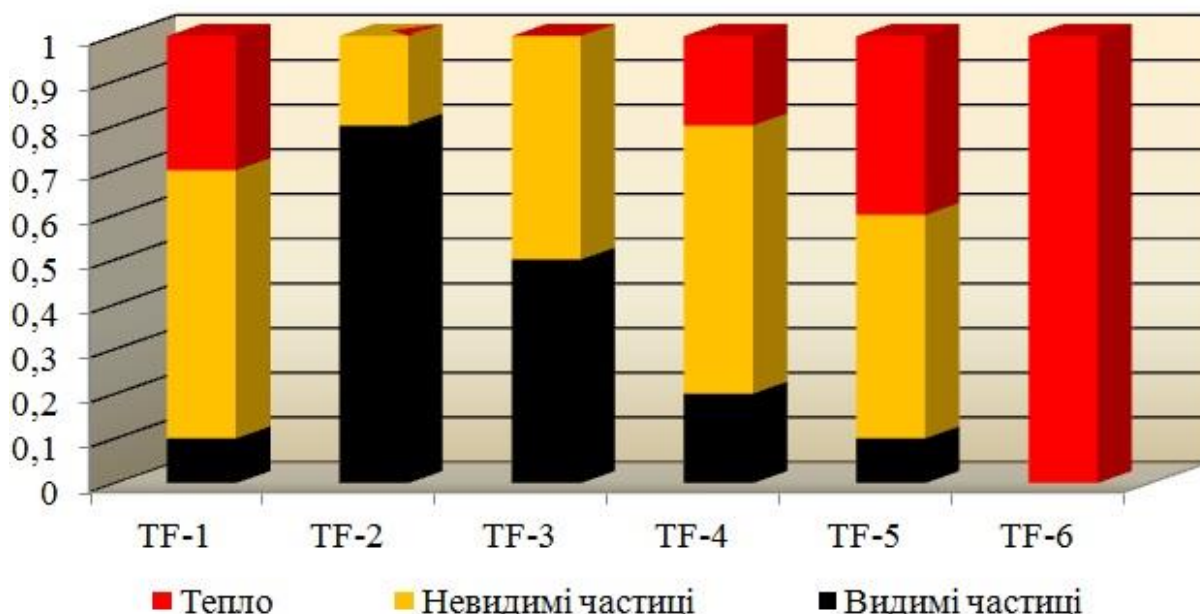


Рис. 1.10. Співвідношення факторів при різних тестових осередках пожежі

Випробуванням піддаються не менше чотирьох сповіщувачів кожного типу. Випробування ТПС проводять в приміщенні з довжиною (10 ± 1) м, шириною (7 ± 1) м та висотою ($4,0 \pm 0,2$) м. Стеля приміщення повинна бути горизонтальною, без виступів. Стіни, підлога і стелі мають бути оздоблені негорючими матеріалами [8]. Схема приміщення представлена на рис. 1.11.

Перед початком випробувань в приміщенні повинні бути встановлені нормальні кліматичні умови:

- температура навколишнього повітря від $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $28\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- відносна вологість від 30% до 80%;
- атмосферний тиск від 98 до 104 кПа;
- концентрація продуктів горіння $<0,05$;
- оптична щільність менше 0,02 дБ/м.

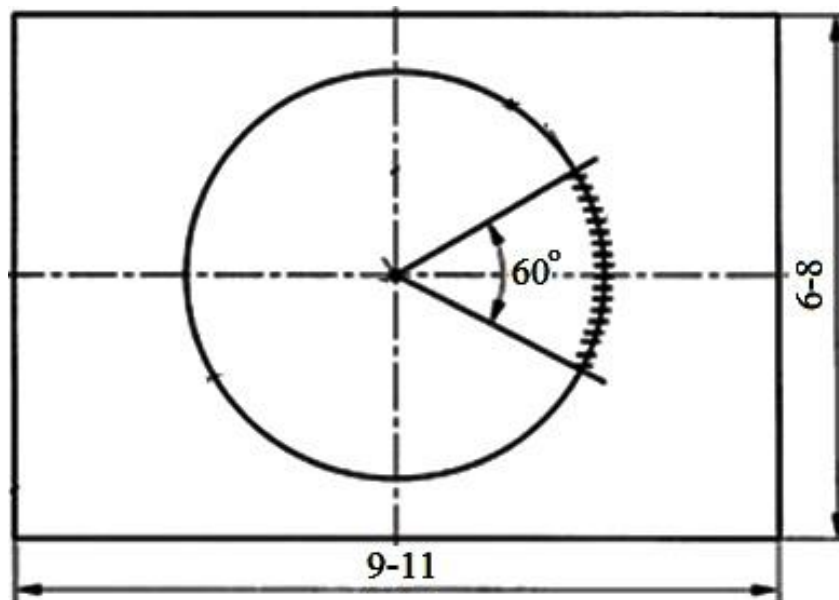


Рис. 1.11. Схема приміщення для проведення випробувань ТПС

Тестовий осередок пожежі TF-1 складається з 70 букових брусків розміром (250x20x10) мм кожен, покладених у 7 шарів на підставі (500x500) мм, як показано на рис. 1.12, і підпалюється за допомогою 5 мл спирту в ємності діаметром 50 мм, встановленій в центрі підстави штабеля. Час спрацьовування ТПС під час проведення випробування повинен бути не більше ніж 370 с.

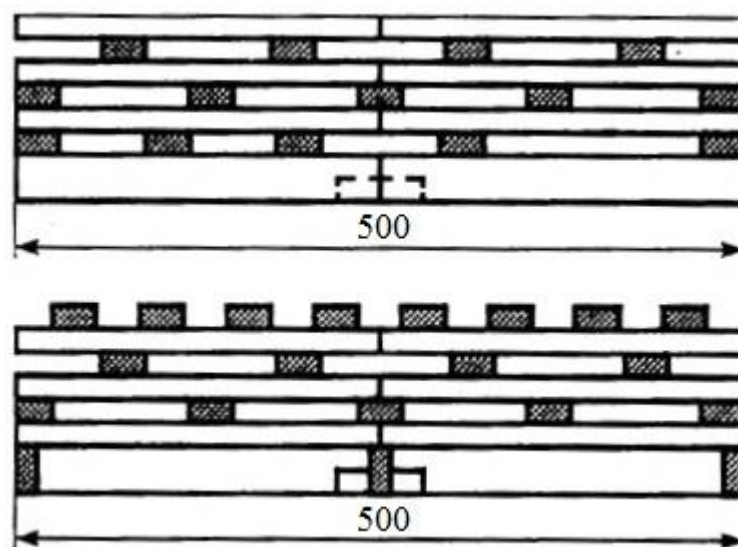


Рис. 1.12. Розташування дерев'яних брусків для TF-1

Тестовий осередок пожежі TF-5 – це 650 г н-гептану в квадратному піддоні зі сталі розмірами (330x330x50) мм, що підпалюється відкритим полум'ям або іскровим розрядом, як показано на рис. 1.13. Випробування проводяться в приміщенні 70 м² і висотою 4 м, в центрі якого на підлозі розташовується тестовий осередок пожежі, а точкові сповіщувачі, що випробовуються та вимірювальна апаратура (вимірювач відносної оптичної щільності середовища) встановлюються на стельовому перекритті по колу на відстані 3 м від його центру в секторі 60° [8]. Час спрацьовування ТПС при проведенні такого випробування повинен бути не більше 240 с.



Рис. 1.13. Тестовий осередок пожежі TF-5

При цьому випробуванні за (120-240) с спалюється 0,65 кг суміші н-гептану з толуолом. Висота відкритого полум'я сягає півтора метра, що сприяє утворенню значної кількості іонізованих частинок і прискореному повітряному потоку так, що повітря поблизу сповіщувачів, що випробовуються прогрівається до моменту їх спрацьовування [13].

При випробуваннях ТПС за допомогою тестової пожежі TF-6 використовують (2,0 ± 0,1) кг етилового спирту. Спирт наливають у піддон

розмірами (435x435x50) мм, виготовлений з листової сталі товщиною 2 мм (допуск на розміри – 5%).

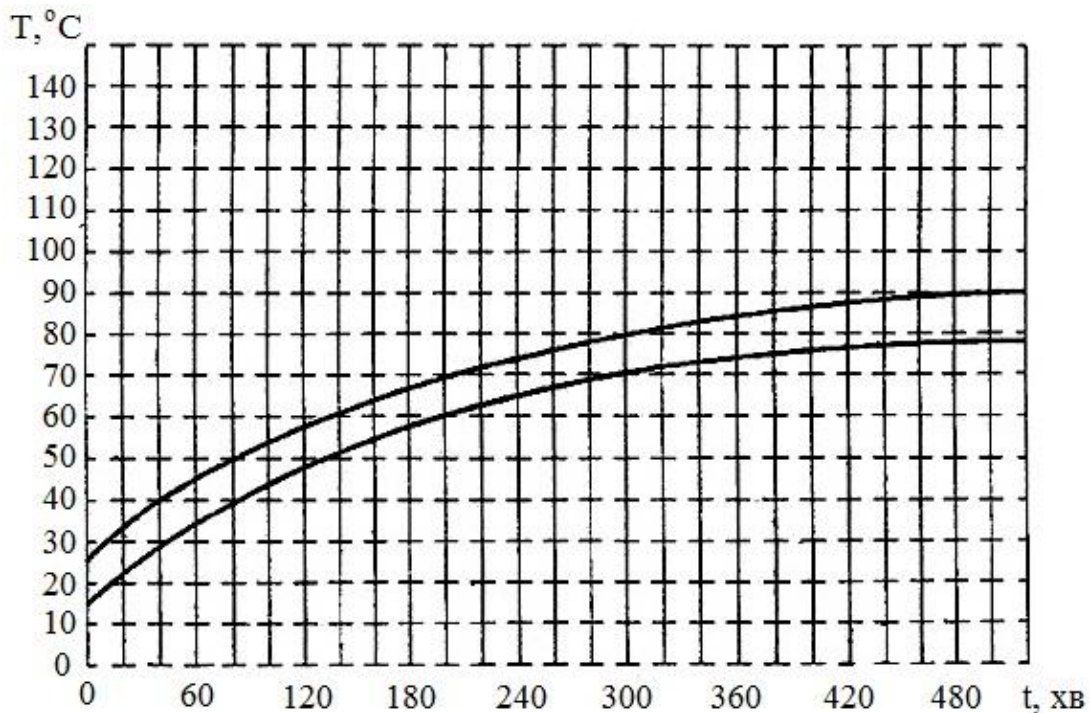


Рис. 1.14. Залежність температури від часу у тестовому осередку пожежі TF-6

Запалювання суміші здійснюють відкритим полум'ям або високовольтним іскровим розрядом. Час спрацьовування сповіщувача повинен бути не більше 510 с [8].

Залежність температури від часу під час проведення випробування тестовим осередком пожежі TF-6 приведена на рис 1.14 [14].

Недоліками при проведенні перевірки працездатності ТПС вогневими випробуваннями є:

- неможливість здійснення випробування у місці встановлення сповіщувача (на об'єкті, що охороняється);
- значний час проведення випробування;
- значення параметрів теплового впливу не нормуються і можуть варіюватися у широкому діапазоні.

Об'єктові випробування теплових пожежних сповіщувачів поділяються на три класи. Випробування першого класу зводяться до того, що в конструкцію сповіщувача вводиться додатковий, найчастіше, механічний елемент, що дозволяє імітувати вплив зовнішнього сигналу на чутливий елемент сповіщувача. При другому класі випробувань приймальна станція в автоматичному режимі (або за запитом оператора) формує електричний сигнал, що викликає спрацьовування одного або групи сповіщувачів. Випробування третього класу виконуються невеликими камерами для створення зовнішнього впливу на чутливий елемент сповіщувача в місці його встановлення, речовинами і матеріалами, що застосовуються для створення зовнішнього впливу на чутливий елемент сповіщувача. Перші два класи випробувань здійснюються без визначення характеристик сповіщувача. На практиці, частіше всього, випробування теплових пожежних сповіщувачів виконуються за допомогою третього класу.

Нормативними документами, що діють на території України, не встановлена методика для проведення об'єктових випробувань. У технічній документації деяких ТПС виробники вказують, що об'єктові випробування ТПС необхідно здійснювати феном, що не відповідає сучасним вимогам технічного обслуговування ТПС. У розділі 5.2.2.3 французького нормативного документа APSAD R7 указано не тільки, яким чином може бути перевірений ТПС, але і за допомогою якого обладнання. У Великобританському стандарті BS 5839 1:2002 Clause 45.4 прописано, що кожен ТПС повинен бути функціонально перевірений на реакцію від джерела тепла, при цьому воно не повинно мати достатній потенціал для появи полум'я, не повинно використовуватися відкрите полум'я, а повинно бути використане спеціальне обладнання для нагрівання. Існуючі способи об'єктових випробувань та обладнання для їх здійснення приведені в [15-28].

Більш розповсюджені прилади представляють собою невеликі камери з потужним направленим джерелом тепла, що збільшує температуру повітря навколо сповіщувача. При проведенні випробування пристрій підносять до сповіщувача на мінімальну відстань або так, щоб він повністю оточував сповіщувач.

Таблиця 1.8

Технічні характеристики пристрою «Теплотест-М» модель Н211

Діапазон напруги живлення, В	10,8–13,2
Час готовності до роботи до, с	120
Діапазон температур вихідного потоку повітря, що задаються, °С	50–100
Діапазон швидкості росту температури вихідного потоку, що задається, °С/хв	1–50
Діапазон швидкостей наростання повітряного потоку, °С/хв	0,2–30,0
Час безперервної роботи акумулятора (12 В, 7Ah), год	3,5
Таймер часу тестування сповіщувачів	+
Робочий діапазон температури навколишнього середовища, °С	0–50
Габаритні розміри з колпаком, мм	63×280×63
Маса, кг	0,24

До таких пристроїв відносяться «Теплотест-М» (моделі Н211 і Н101), які мають приблизно однакові технічні характеристики, що приведені в табл. 1.8. [29]. Пристрій може застосовуватись для випробування максимальних, максимально-диференційних та диференційних пожежних сповіщувачів. Він має циліндричний корпус, в якому розташовані нагрівач, електронна плата керування з термочутливим елементом та вентилятор. На верхню частину корпуса встановлено ковпак, що утворює робочу область пристрою. Зовнішній вигляд пристрою приведений на рис. 1.15.

Процес проведення випробування показано на рис. 1.16, розміщення елементів керування пристрою на рис. 1.17, а варіанти проведення випробувань на рис.1.18.



Рис. 1.15. Зовнішній вигляд пристрою «Теплотест-М»



Рис. 1.16. Проведення випробування сповіщувача ТПТ-2 пристроєм «Теплотест-М»

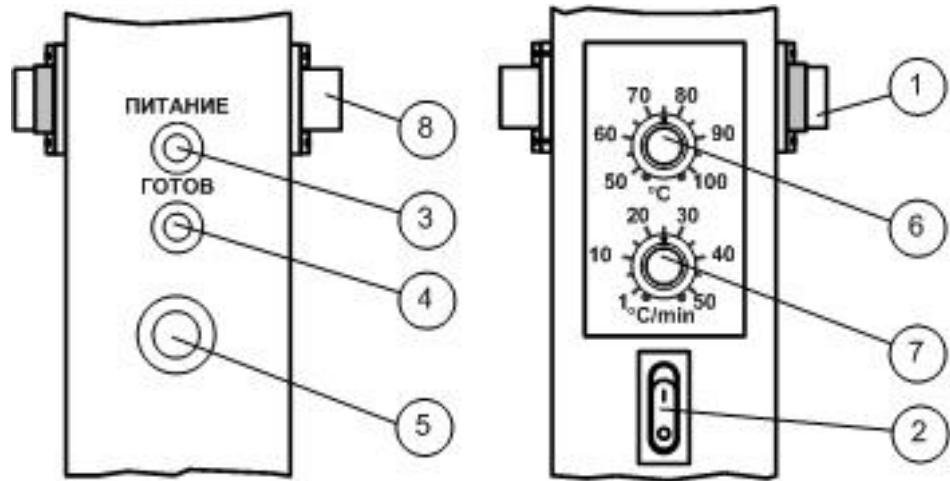


Рис. 1.17. Розміщення елементів керування пристрою: 1 – гніздо живлення; 2 – вмикач живлення; 3 – трикольоровий індикатор напруги живлення; 4 – трикольоровий індикатор готовності пристрою; 5 – кнопка керування; 6 – ручка для завдання температури; 7 – ручка для завдання швидкості зміни температури; 8 – вхід/вихід зовнішнього керування

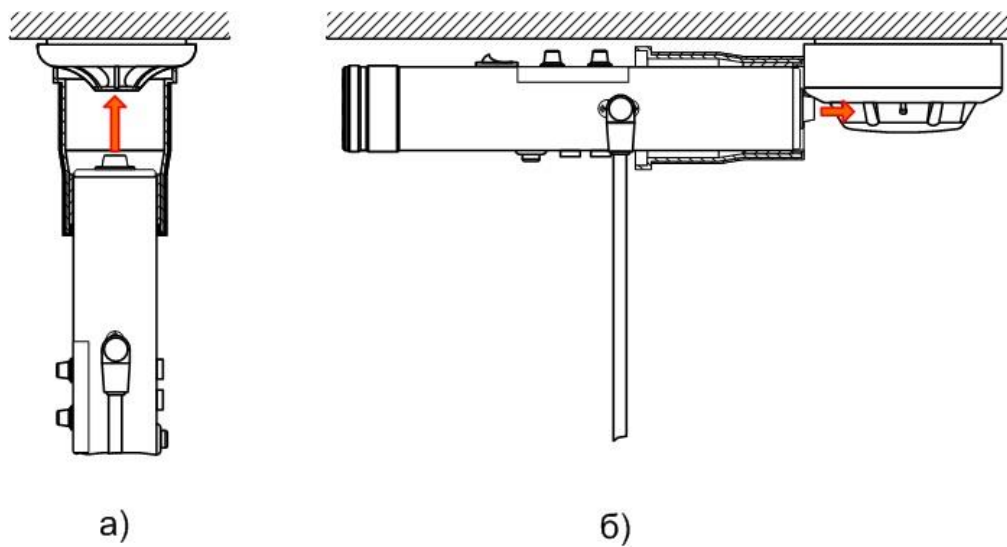


Рис. 1.18. Варіанти проведення випробувань теплових пожежних сповіщувачів пристроєм «Теплотест-М»: а) з використанням ковпака для створення обмеженої теплової області навколо чутливого елемента сповіщувача; б) з безпосередньою подачею теплового повітряного потоку на чутливий елемент сповіщувача

Середня тривалість проведення випробування для одного сповіщувача визначається за формулою

$$t_{\text{пер}}^{\text{сер}} = t_{\text{пш}} + t_{\text{виш}} + t_{\text{зп}}, \quad (1.2)$$

де $t_{\text{пш}}$ – час підготовки випробувального пристрою до роботи, $t_{\text{виш}}$ – час проведення випробування, $t_{\text{зп}}$ – час для зняття показань. Час підготовки до роботи пристрою «Теплотест-М» становить 120 с. У відповідності з ДСТУ EN 54-5:2003 при створенні теплового потоку з швидкістю зростання температури $30^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ час спрацьовування сповіщувача повинен бути у межах $20\text{ с} < t_{\text{сп}} < 100\text{ с}$ (табл.1.3), тому максимальний час проведення випробувань становить 100 с. Оскільки при проведенні випробування приладом «Теплотест-М» час спрацьовування сповіщувача не визначається, то часом зняття показань можна знехтувати. Виходячи з цього, час проведення об'єктового випробування одного пожежного сповіщувача приладом «Теплотест-М» може скласти до 220 с, що є значним часом, враховуючи те, що на великих об'єктах встановлені сотні сповіщувачів. При цьому необхідно зазначити, що середній час роботи батареї приладу становить всього 3,5 години.

Альтернативним є пристрій, який створює тепловий потік за допомогою електричної лампи розжарювання, представлений на рис. 1.19.

Такий пристрій використовується для випробувань максимальних та максимально-дифференціальних ТПС. При проведенні випробування ТПС пристроєм використовується імітація стану тривоги, щоб встановити чи буде сповіщувач реагувати. Проведення випробування відбувається ручним інструментом, який використовує кероване джерело тепла (електричну лампу розжарювання), для нагріву з контрольованою швидкістю закритої маси повітря в першому відсіку, який розташований навколо пожежного сповіщувача, що випробовується. У другому відсіку пристрою знаходиться електронна схема, яка регулює рівень температури і швидкості нагріву джерела тепла. Спрацьовування сповіщувача після

впливу нагрітим повітрям протягом заданого інтервалу часу свідчить про його працездатність [16].

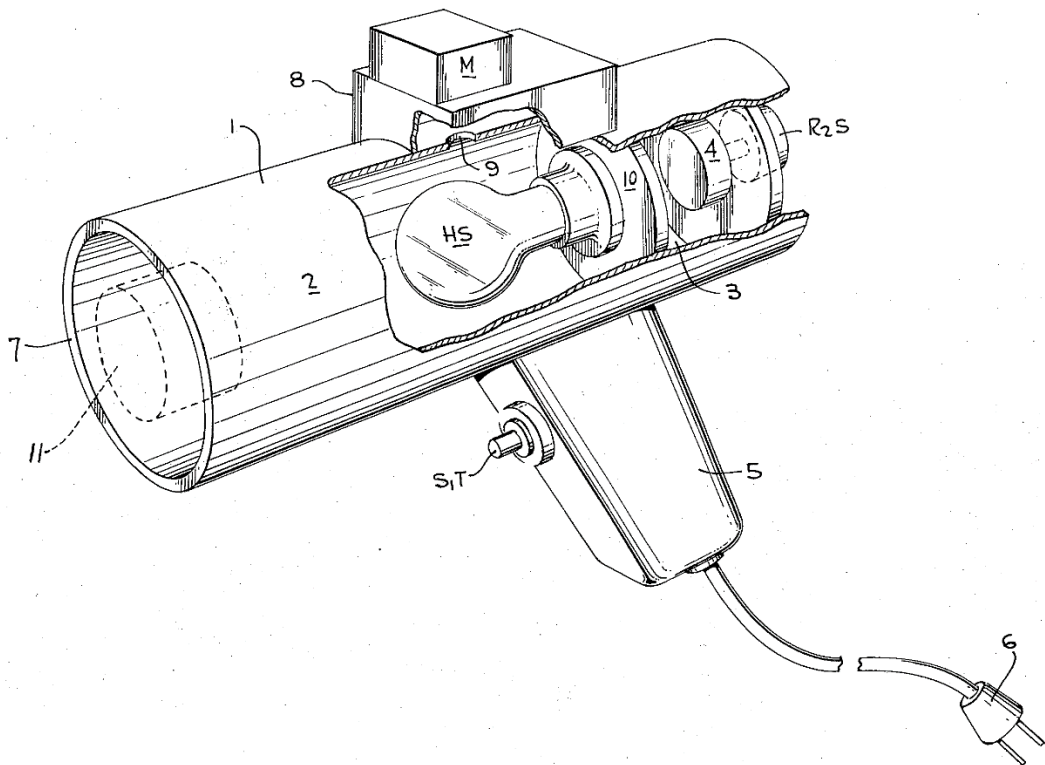


Рис. 1.19. Схема пристрою, з частковим розрізом підведеного до ТПС: 1 – корпус, 2 – перший відсік корпусу, 3 – другий відсік корпусу, 4 – електронний прилад керування, 5 – ручка, 6 – шнур живлення, 7 – торець першого відсіку, 8 – корпус другого відсіку, 9 – отвір, 10 – перегородка, HS – джерело тепла, М – вимірювач швидкості росту температури, S_1T – двопозиційний перемикач, R_2S – регулятор керування.

На рис. 1.19, зображений пристрій, корпус якого може бути виконаний з металу, або з синтетичного матеріалу з діаметром 10 см та довжиною 40 см. Перший відсік корпусу включає в себе джерело тепла у вигляді лампи розжарювання. У зображеному варіанті здійснення пристрою переважно використовують лампу розжарювання з потужністю 100 Вт. Максимальна температура, що створюється електричною лампою розжарювання, досягає 60 °С.

На рис. 1.20 зображений додатковий ланцюг, що складається з фотоелементу, батареї, перемикача, вимірювального приладу та регульованого резистора, що дозволяє оператору обирати та контролювати потрібну швидкість нарощування температури незалежно від зміни напруги в ланцюзі лампи накаливання.

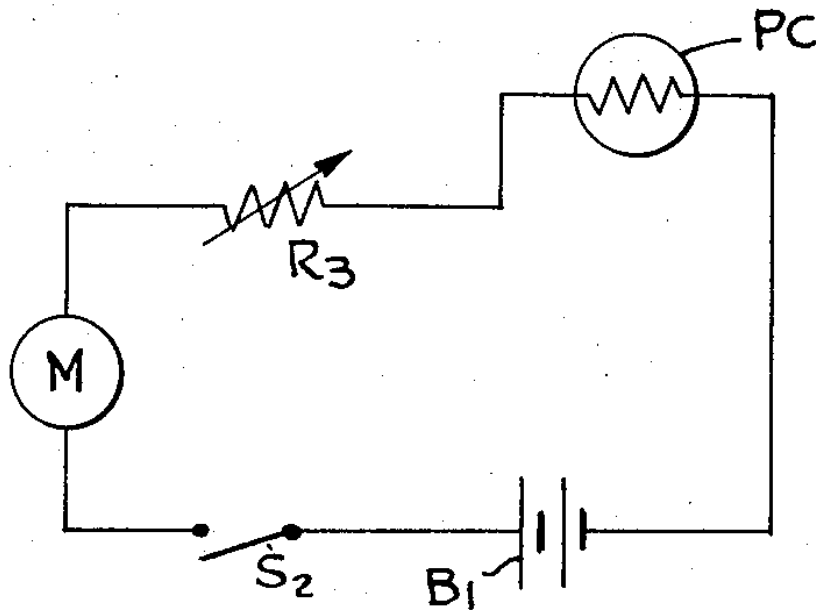


Рис. 1.20. Додатковий ланцюг, з'єднаний з джерелом живлення, для сповіщення про зміну швидкості росту температури незалежно від зміни напруги: PC – фотоелемент, B_1 – батареї, S_2 – перемикач, M – вимірювальний прилад, R – резистор.

Як показано на рис. 1.19 світлове випромінювання від лампи накаливання потрапляє на фотоелемент через отвір в корпусі, а інтенсивність одержуваного світлового випромінювання, яка являється мірою величини підвищення температури, відображається на відкаліброваному вимірювальному пристрої. Таким чином, якщо швидкість росту температури досить велика, що визначається з показників вимірювального приладу, то оператор вимикає перемикач і регулює швидкість росту температури до тих пір, поки потрібне значення не буде досягнуто.

Об'єктові випробування мають ряд недоліків:

- нормативними документами України не визначено методику проведення об'єктових випробувань, внаслідок чого, відсутнє обладнання, яке необхідно використовувати для їх проведення;
- при проведенні об'єктових випробувань перевіряється лише здатність сповіщувачів спрацьовувати при підвищенні температури навколишнього середовища, а технічні характеристики не вивчаються;
- проведення випробувань займає багато часу, а під час їх проведення можливе виникнення похибки суб'єктивного характеру спричиненої діями оператора.

Із аналізу існуючих методів випробувань ТПС, витікає, що найбільше опрацьовані методи, що ґрунтуються на визначенні їх часу спрацьовування. У діючих нормативних документах приведені методи випробувань ТПС, що зводяться до визначення їх часу та температури спрацьовування, при цьому інші динамічні характеристики сповіщувача не визначаються. У ДСТУ EN 54-5:2003 приведені нормативні значення для постійної часу сповіщувача (табл. 1.3), але не приведені методи її визначення. Визначення постійної часу ТПС дозволило б здійснювати перевірку працездатності сповіщувачів у динамічному режимі та на об'єкті, що охороняється. Незважаючи на те, що жодними нормативними документами не приведена методика визначення постійної часу ТПС, однак існує ряд методів для їх визначення [30-35].

1.3. Методи визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів

Класифікація методів визначення постійної часу ТПС представлена на рис. 1.22. По характеру теплового впливу всі методи визначення постійної часу можна поділити на два класи: з зовнішнім та внутрішнім тепловим впливом. Всі методи визначення постійної часу ТПС, що

основані на створенні зовнішнього теплового впливу, належать до стаціонарних випробувань, які проводяться у теплових камерах. По характеру зовнішнього теплового впливу можливо три варіанти його здійснення.

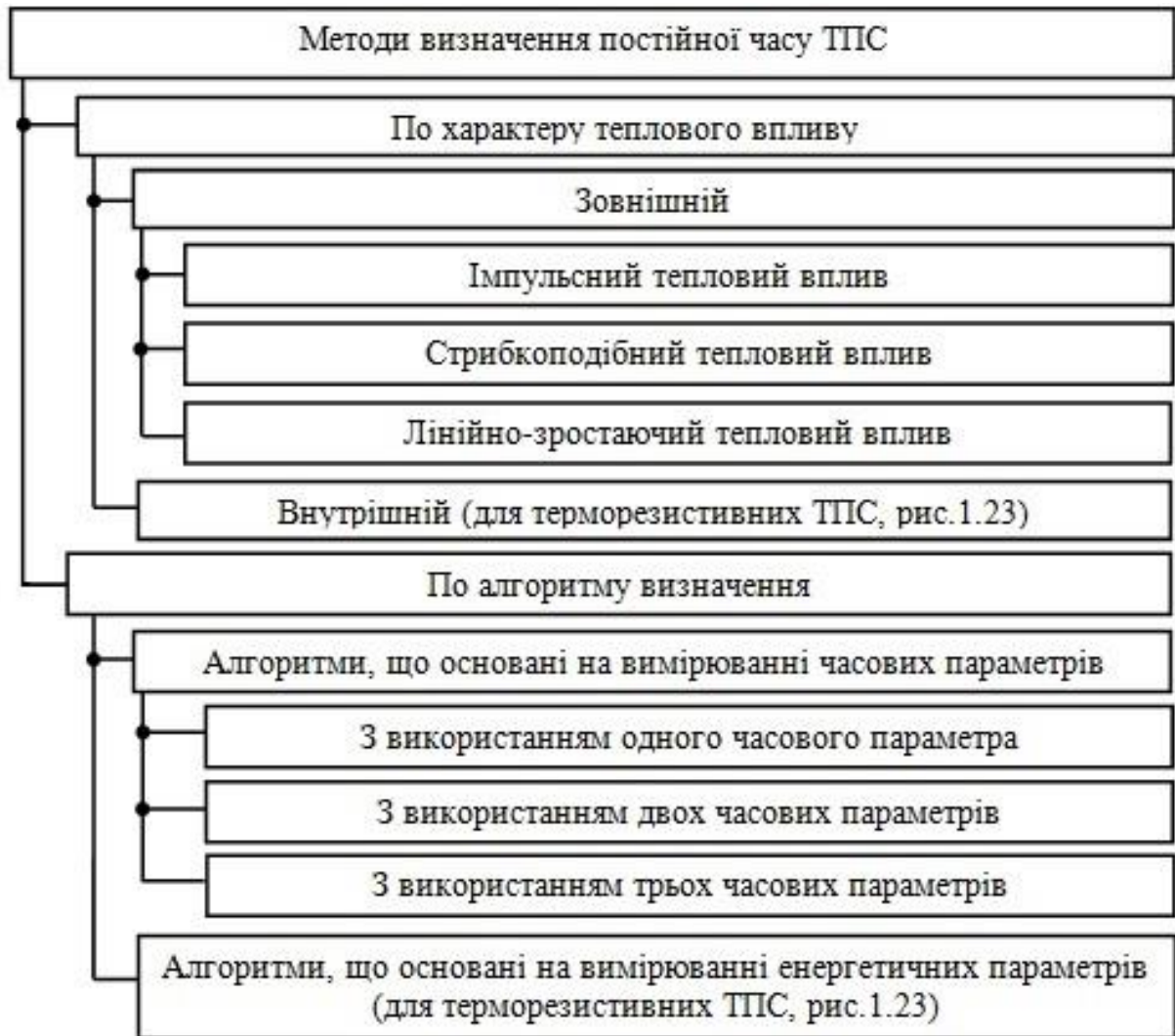


Рис. 1.22 Структурна схема класифікації методів визначення постійної часу ТПС

Перший варіант передбачає здійснення імпульсного теплового впливу на ТПС, що описується формулою

$$\theta(t) = \theta_0 [1(t) - 1(t - \tau_0)] \tag{1.3}$$

де $\theta(t)$ – зовнішній тепловий вплив у вигляді температури; θ_0 – початкова температура; $1(\cdot)$ – функція Хевісайда [36]; τ_0 – довжина імпульсу. При такому впливі постійна часу сповіщувача обчислюється за формулою

$$\tau = \left(\int_0^{\infty} dt \int_t^{\infty} u(t) dt \right) \left(\int_0^{\infty} u(t) dt \right)^{-1} - \left(\int_0^{\infty} dt \int_t^{\infty} \theta(t) dt \right) \left(\int_0^{\infty} \theta(t) dt \right)^{-1}, \quad (1.4)$$

де $u(t)$ – реакція чутливого елемента пожежного сповіщувача на $\theta(t)$.

Для здійснення другого варіанту зовнішнього теплового впливу на вхід ТПС подається сигнал у вигляді стрибкоподібної зміни температури

$$\theta(t) = \theta_0 \cdot 1(t), \quad (1.5)$$

амплітуда та довжина якого відповідно дорівнюють θ_0 та T_0 . В цьому випадку можливо декілька варіантів для формування алгоритму визначення постійної часу ТПС.

В першому варіанті до перехідної функції чутливого елемента ТПС

$$h(t) = L^{-1} [\theta_0 p^{-1} W(p)] = \theta_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (1.6)$$

застосовується операція диференціювання, внаслідок чого для моменту часу $t = t_i$ отримаємо

$$\dot{h}(t_i) = \theta_0 \tau^{-1} \exp\left(-\frac{t_i}{\tau}\right), \quad (1.7)$$

що після підстановки в (1.6) и перетворення приводить до виразу

$$\tau = [\theta_0 - h(t_i)] \dot{h}^{-1}(t_i), \quad (1.8)$$

за яким визначається величина постійної часу ТПС. Оскільки реалізація такого алгоритму обумовлює необхідність отримання інформації про величину перехідної функції (1.6) ТПС в певний момент часу t_i , а також про швидкість її зміни у той же момент часу, ймовірна поява великої похибки з боку диференціюючого пристрою.

В другому варіанті визначення величини постійної часу ТПС виконується операція інтегрування, яка є кращою у порівнянні з використанням операції диференціювання. В такому випадку постійна часу ТПС буде визначатися за формулою

$$\tau = \int_0^{\infty} (1 - x(t)) dt, \quad (1.9)$$

де

$$x(t) = u(t)\theta_0^{-1}. \quad (1.10)$$

У [9], на прикладі ТПС з терморезистивними чутливим елементом, приведені результати визначення його постійної часу за алгоритмами (1.4) та (1.9) у вигляді графіків, що отримані шляхом моделювання у програмному забезпеченні Simulink. Час визначення постійної часу за алгоритмом (1.4) складає 7 секунд, а за алгоритмом (1.9) – 2,5 секунди, що майже у три рази швидше. Схема пристрою, що здійснює визначення постійної часу ТПС за алгоритмом (1.9) є кращою у порівнянні із схемою пристрою, що визначає постійну часу за алгоритмом (1.4), оскільки в ній в чотири рази менше інтеграторів та в два рази менше дільників, що дозволяє зменшити кількість її функціональних елементів на 30 %.

Третій варіант здійснення зовнішнього теплового впливу при визначенні постійної часу ТПС запропоновано в [31, 33]. В основі цього

способу лежить використання в якості вхідного сигналу лінійно-зростаючого теплового впливу, модель якого має вигляд

$$\theta(t) = \theta_0 + bt, \quad (1.11)$$

де b – швидкість зміни температури навколишнього середовища [9].

Особливістю роботи такого пристрою є те, що час визначення постійної часу пожежного сповіщувача складає не менше $(3 \div 5)\tau$. За складністю технічної реалізації цей пристрій поступається пристрою, що визначає постійну часу за алгоритмом (1.9), оскільки кількість його функціональних елементів на більше на 36,3%.

Найбільше опрацьовані методи визначення постійної часу ТПС для сповіщувачів з терморезистивним чутливим елементом [30, 31, 33, 35]. Їх класифікація представлена на рис. 1.23 [35]. Особливістю таких методів є те, що тепловий вплив на чутливий елемент ТПС створюється шляхом пропускання через нього електричного струму. На рис.1.23 представлена інформація стосовно характеру і форми електричного струму, за рахунок якого формується тепловий вплив на терморезистивний чутливий елемент ТПС – одиночний імпульс електричного струму трикутної, синусоїдальної або прямокутної форми, періодична послідовність імпульсів електричного струму трикутної, синусоїдальної або прямокутної форми, синусоїдального або постійного електричного струму.

В залежності від параметрів, що вимірюються, методи визначення постійної часу ТПС поділяються на дві групи. Методи першої групи оснований на вимірюванні енергетичних параметрів i , в свою чергу, поділяються на чотири підгрупи, в залежності від інформаційного параметра (рис. 1.23). В загальному вигляді алгоритм визначення постійної часу ТПС, що оснований на вимірюванні його енергетичних параметрів, полягає у створенні внутрішнього теплового впливу на чутливий елемент

ТПС шляхом пропускання через нього електричного струму, вимірювання одного з цих параметрів та визначення величини постійної часу на основі отриманих вимірювань.



Рис. 1.23 Структурна схема класифікації методів визначення постійної часу ТПС з терморезистивним чутливим елементом внутрішнім тепловим впливом

В основі другої групи методів лежить використання інформації про час, за який величина вихідного сигналу сповіщувача досягне одного, двох

та трьох апріорі заданих значень. Умовами для вимірювання часових параметрів, в залежності від алгоритму, є забезпечення рівності двох пар вихідних сигналів, забезпечення різниці двох вихідних сигналів або використання відношення двох вихідних сигналів ТПС. У [35] показано, що використання двох та трьох часових параметрів вихідного сигналу теплового пожежного сповіщувача для визначення його постійної часу не має переваг в порівнянні з однопараметричним методом. При використанні двопараметричного та трьохпараметричного методу має місце надлишковість інформації, яка може бути використана для зниження випадкової складової похибки [34].

При використанні у якості тест-сигналів періодично послідовних імпульсів електричного струму або синусоїдального електричного струму для реалізації методів визначення постійної часу ТПС, що основані на вимірюванні часових параметрів вихідного сигналу, величина цього динамічного параметру визначається у вигляді [37-39]

$$\bar{\tau}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_{1i}, \quad (1.12)$$

де τ_{1i} – величина постійної часу ТПС, що визначена на проміжку одного періоду слідування імпульсів електричного струму або на проміжку половини періоду синусоїдального струму [35].

Для такого випадку забезпечується зменшення випадкової складової похибки в \sqrt{n} раз у порівнянні з випадком, коли в якості тест-сигналу використовуються одиночні імпульси електричного струму, але при цьому збільшується в n раз час визначення величини постійної часу.

Проаналізувавши методи визначення постійної часу ТПС можна зробити наступні висновки:

- методи визначення постійної часу ТПС можуть лягти в основу розроблення методів їх випробувань при яких виключається необхідність у вимірюванні часу спрацьовування сповіщувача;
- найбільше опрацьовані методи визначення постійної часу ТПС з терморезистивним чутливим елементом орієнтовані на проведення стаціонарних випробувань;
- метод, що оснований на вимірюванні одного часового параметру здійснює визначення постійної часу за мінімальний час у порівнянні з іншими методами;
- методи, що основані на вимірюванні енергетичних параметрів вихідного сигналу сповіщувача, у порівнянні з іншими методами, потребують найбільше часу, що обумовлено необхідністю проведення таких вимірювань в режимі, що встановився [40-42];
- під час здійснення приведених методів не визначаються динамічні характеристики ТПС у частотній області, що дозволило б здійснювати перевірку сповіщувачів не в статичному, а в динамічному режимі;
- методи визначення постійної часу ТПС, при яких на його чутливий елемент створюється зовнішній тепловий вплив, орієнтовані на їх реалізацію у теплових камерах, що не дає можливості здійснювати випробування сповіщувача на об'єкті, що охороняється.

1.4. Постановка задачі дослідження та особливості її рішення

Розглянемо більш досконалі системи експлуатації радіоелектронних приладів на прикладі авіаційного та ракетно-космічного обладнання, які в загальному вигляді можна представити, як показано на рис.1.24 [43-45].

Найважливішим етапом таких систем експлуатації є технічне обслуговування, яке поділяється на оперативне, періодичне, сезонне та

технічне обслуговування при зберіганні, кожне із яких передбачає ряд організаційно-технічних заходів [45].

Обсяг та періодичність технічного обслуговування визначається за результатами безперервного або періодичного контролю технічного стану кожного пристрою. Періодичність контролю технічного стану може визначатись індивідуально для кожного пристрою, на основі прогнозування його технічного стану [43]. Ознакою того, що для пристрою необхідно виконати ту, або іншу операцію технічного обслуговування вважається передвідмовний стан пристрою.



Рис. 1.24. Структурна схема експлуатації радіоелектронного обладнання

Основною задачею при проведенні технічного обслуговування таких пристроїв є запобігання відмов для забезпечення необхідного рівня надійності радіоелектронної апаратури [43-46].

Перевірка працездатності авіаційного, ракетно-космічного радіоелектронного обладнання відбувається з визначенням показників його надійності [45,47,48] до яких відносяться: ймовірність безвідмовної роботи, частота відмов, середнє напрацювання на відмову, коефіцієнт готовності та ін.

Для системи експлуатації ТПС такі характеристики не визначаються. В Україні від моменту набуття чинності державних стандартів серії ДСТУ EN-54, відповідно до яких проводять обов'язкову сертифікацію технічних засобів пожежної сигналізації, було скасовано ГОСТ 27990-88 [49], за яким встановлювали, що середнє напрацювання на відмову повинно бути не менше:

- для максимальних сповіщувачів (крім легкоплавких) – 200000 год;
- для максимальних легкоплавких – 700000 год;
- для диференціальних і максимально-диференціальних сповіщувачів – 60000 год.

А у введєній серії стандартів ДСТУ EN-54 узагалі немає будь-яких показників надійності як за окремими компонентами, так і СПС загалом. У чинному національному нормативному документі Російської Федерації з технічних засобів пожежної автоматики [8] показники надійності, які пред'являють до пожежних сповіщувачів, залишилися на колишньому, ще радянському, рівні. Так, у п. 4.2.4.1 цього стандарту говориться: «Середнє напрацювання на відмову сповіщувачів пожежних повинно бути не меншим за 60 000 годин».

З вищевикладеного можна зробити висновок, що на території України показники надійності для ТПС не регламентуються жодним нормативним документом. На території Російської Федерації середнє

напрацювання на відмову ТПС визначено у двох нормативних документах. Згідно [8], воно повинно бути не менше 60000 годин. У [49] приведені показники середнього напрацювання на відмову для різних класів ТПС, але діють вони лише для сповіщувачів, що були вироблені з 1990 по 2000 роки.

З урахуванням цих норм, ймовірність безвідмовної роботи теплового пожежного сповіщувача дорівнює 0,854. Таке значення показника ймовірності безвідмовної роботи є низьким і потребує покращення. Для порівняння коефіцієнт безвідмовності авіаційного радіоелектронного обладнання повинен бути не менше 0,999. Визначення коефіцієнтів надійності системи дає можливість робити прогнози стосовно технічного стану її елементів. На основі цієї інформації визначається періодичність проведення технічного обслуговування. Також, при необхідності, можуть визначатися окремі операції технічного обслуговування, які необхідно виконати для підтримання обладнання у працездатному стані.

Однією з відмінностей системи експлуатації ТПС від більш досконалих систем експлуатації є те, що під час технічного обслуговування визначається лише час спрацьовування сповіщувача (при використанні теплових камер також визначається температура спрацьовування), а їх динамічні характеристики не визначаються. До динамічних характеристик ТПС відноситься перехідна функція, а також частотні характеристики: амплітудно-частотна, фазово-частотна та амплітудно-фазова частотна характеристики. Визначення динамічних характеристик ТПС дозволить здійснювати їх випробування на об'єкті, що охороняється та у динамічному режимі.

Проаналізувавши систему експлуатації теплових пожежних сповіщувачів можна стверджувати, що вона має ряд недоліків:

- метою здійснення випробувань ТПС під час технічного обслуговування є перевірка факту їх спрацьовування, а не визначення його технічних характеристик;
- під час технічного обслуговування теплових пожежних сповіщувачів не відбувається визначення коефіцієнтів надійності, внаслідок чого неможливо здійснити прогнозування їх технічного стану;
- при проведенні випробувань теплових пожежних сповіщувачів їх динамічні характеристики не визначаються, а висновок про їх працездатність здійснюється на основі інформації про час їх спрацьовування (в деяких випадках температури спрацьовування);
- стаціонарні випробування ТПС проводяться у спеціальних приміщеннях та установках, тобто з їх демонтажем з об'єкта, що охороняється, а загальний час їх проведення у тепловій камері складає 36 годин;
- при проведенні випробувань теплових пожежних сповіщувачів тестовими осередками пожеж значення параметрів теплового впливу не нормуються і можуть варіюватися у широкому діапазоні;
- відсутні об'єктові методи випробувань ТПС, що здійснюються в автоматичному режимі та під час яких перевіряється технічний стан їх чутливих елементів;
- при проведенні об'єктових випробувань ТПС можлива похибка суб'єктивного характеру викликана ручними діями оператора;
- методи визначення постійної часу ТПС, при яких на його чутливий елемент створюється зовнішній тепловий вплив орієнтовані на їх реалізацію у теплових камерах, що не дає можливості здійснювати випробування сповіщувача на об'єкті, що охороняється.

Ці недоліки обумовлюють необхідність у проведенні додаткових досліджень, основною ціллю яких є удосконалення системи експлуатації ТПС шляхом розробки методів та засобів випробувань ТПС. Вирішення основної задачі дослідження потребує вирішення ряду окремих задач:

- побудувати узагальнену математичну модель теплового пожежного сповіщувача, яка характеризує теплові процеси в його чутливому елементі різної геометрії і, на основі цієї інформації побудувати регресійні моделі часної динамічної характеристики такого сповіщувача (шляхом проведення експериментальних та обчислювальних досліджень) та встановити її зв'язок з фізичними характеристиками середовища;
- розробити методи визначення перехідної функції теплових пожежних сповіщувачів при впливі на нього тест-сигналом у вигляді лінійно-зростаючої функції;
- розробити методи визначення амплітудно-частотної та фазово-частотної характеристик теплових пожежних сповіщувачів, в основі яких лежить використання їх узагальненої математичної моделі, а час їх визначення не перевищує час перехідного процесу;
- розробити методи визначення часних динамічних характеристик теплових пожежних сповіщувачів на прикладі їх постійної часу;
- розробити методи та засоби випробувань теплових пожежних сповіщувачів, які дозволять удосконалити їх систему експлуатації шляхом автоматизації процесу цих випробувань та скорочення їх часу проведення;
- оцінити ефективність удосконаленої системи експлуатації теплових пожежних сповіщувачів.

1.5. Висновки

1.5.1. Визначено, що одним з головних етапів системи експлуатації теплових пожежних сповіщувачів є їх випробування, оскільки вони проводяться після їх виготовлення, на етапі введення в експлуатацію та під час технічного обслуговування.

1.5.2. Усі методи випробувань теплових пожежних сповіщувачів поділяються на два види – стаціонарні та об'єктові, при цьому

випробування першого виду проводяться у тепловому каналі або тестовими осередками пожеж, а другого виду створенням на сповіщувач зовнішнього теплового впливу.

1.5.3. Головним недоліком стаціонарних випробувань теплових пожежних сповіщувачів у тепловому каналі є значний час їх проведення, оскільки повне випробування одного сповіщувача таким методом, згідно з регламентом, що приведено у нормативному документі EN-54, складає близько 36 годин.

1.5.4. Випробування теплових пожежних сповіщувачів тестовими осередками пожеж використовуються лише для проведення їх сертифікаційних випробувань, а їх головним недоліком є те, що значення параметрів теплового впливу не нормуються і можуть варіюватися у широкому діапазоні.

1.5.5. Нормативними документами, що діють на території України, не встановлена методика для проведення об'єктових випробувань теплових пожежних сповіщувачів, а метою їх проведення є перевірка здатності сповіщувачів спрацьовувати при підвищенні температури навколишнього середовища, а не визначення їх технічних характеристик, при цьому такі випробування проводяться у ручному режимі, внаслідок чого можлива поява похибок суб'єктивного характеру.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТЕПЛОВИХ ПОЖЕЖНИХ СПОВІЩУВАЧІВ

2.1. Узагальнена математична модель теплового пожежного сповіщувача в умовах впливу на нього стаціонарним тепловим потоком

Існуючі ТПС побудовані з використанням різних фізичних принципів дії та, відповідно, різними чутливими елементами (далі ЧЕ) (рис.1.1). Найчастіше ЧЕ ТПС мають форму прямокутної пластинки, циліндру або шару. Теплові процеси, що протікають в кожному із них можуть бути описані за допомогою диференційних рівнянь [50-52], при цьому відсутня математична модель ТПС з узагальненим ЧЕ.

Розглянемо загальний випадок, для узагальненого ЧЕ, тобто коли він може бути представлений у вигляді прямокутної пластинки, циліндру або шару. Припустимо, що на ТПС з узагальненим чутливим елементом створюється зовнішній тепловий вплив, у вигляді стаціонарного теплового потоку $q = \text{const}$. У такому випадку температура узагальненого ЧЕ ТПС $T(r,t)$ буде описуватися рівнянням [53-56]

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2\nu+1}{r} \cdot \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right] - m^2 [T(r,t) - T_0] \quad (2.1)$$

з початковими та граничними умовами

$$T(r,0) = T_0; \quad \lambda \frac{\partial T(R,t)}{\partial r} = q, \quad (2.2)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності; λ – теплопровідність матеріалу чутливого елемента; T_0 – температура чутливого елемента у початковий

момент часу; R – характерний розмір чутливого елемента; ν – параметр, що характеризує форму чутливого елемента ($\nu = -0,5$ – для пластини, $\nu = 0$ – для циліндра, $\nu = 0,5$ – для шару); m – параметр, що визначається з виразу [57]

$$m^2 = \frac{2\alpha}{c\rho R}; \quad (2.3)$$

де α – коефіцієнт теплопередачі; c, ρ – питома теплоємність та густина матеріалу чутливого елемента.

Введемо позначення

$$T(r, t) - T_0 = \theta(r, t) = M(r, t) \exp(-m^2 t), \quad (2.4)$$

внаслідок чого рівняння (2.1) та умов (2.2) трансформується до виду

$$\frac{\partial M(r, t)}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2 M(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2\nu + 1}{r} \frac{\partial M(r, t)}{\partial r} \right]; \quad (2.5)$$

$$M(r, 0) = 0; \quad \lambda \frac{\partial M(R, t)}{\partial r} = q \exp(m^2 t). \quad (2.6)$$

Для розв’язання рівняння (2.5) застосуємо до нього інтегральне перетворення

$$\bar{M}(\mu_n, t) = \int_0^R r^{\nu+1} J_\nu \left(\frac{\mu_n r}{R} \right) dr, \quad (2.7)$$

де $J_\nu\left(\frac{\mu_n r}{R}\right)$ – функція Бесселя ν -го порядку; μ_n – n -й корінь трансцендентного рівняння

$$J_{\nu+1}(\mu) = 0, \quad (2.8)$$

внаслідок чого отримаємо

$$\frac{d\bar{M}(\mu_n, t)}{dt} + a\left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2 \bar{M}(\mu_n, t) = \frac{aqR^{2\nu+1}}{\lambda\mu_n^\nu} J_\nu(\mu_n) \exp(m^2 t). \quad (2.9)$$

Після застосування до (2.9) інтегрального перетворення Лапласа, результат розв'язання отриманого диференціального рівняння можна записати наступним чином

$$\begin{aligned} \tilde{M}(\mu_n, p) &= \int_0^\infty \bar{M}(\mu_n, t) \exp(-pt) dt = \\ &= \frac{aqR^{2\nu+1}}{\lambda\mu_n^\nu} J_\nu(\mu_n) \left[(p - m^2) \left[p + a\left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2 \right] \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (2.10)$$

де p – комплексне число.

Урахувавши, що має місце [58]

$$\bar{f}_1(\mu_n, t) = L^{-1} \left[(p - m^2)^{-1} \right] = \exp(m^2 t); \quad (2.11)$$

$$\bar{f}_2(\mu_n, t) = L^{-1} \left[\left[p + a\left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2 \right]^{-1} \right] = \exp \left[-a\left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2 t \right]. \quad (2.12)$$

Тоді у відповідності до теореми Бореля о свертке [59] можна записати

$$\bar{M}(\mu_n, t) = \frac{aqR^{2v+1}}{\lambda\mu_n^v} J_v(\mu_n) \int_0^t \bar{f}_1(\mu_n, \tau) \bar{f}_2(\mu_n, t - \tau) d\tau, \quad (2.13)$$

що з урахуванням (2.4), (2.11) и (2.12) приведе до наступного результату

$$\bar{\theta}(\mu_n, t) = \frac{aqR^{2v+1} J_v(\mu_n)}{\lambda\mu_n^v \left[m^2 + a \left(\frac{\mu_n}{R} \right)^2 \right]} \left[1 - \exp \left[- \left[m^2 + a \left(\frac{\mu_n}{R} \right)^2 \right] t \right] \right], \quad (2.14)$$

де $\bar{\theta}(\mu_n, t)$ – результат застосування функції $\theta(r, t)$ інтегрального перетворення виду (2.7).

Вираз, що визначає розподілення температури у узагальненому чутливому елементі, у відповідності до формули обернення [60,61]

$$\theta(r, t) = \frac{\bar{\theta}(\mu_0, t)}{\|\Psi_0\|^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Psi_n \left(\frac{\mu_n r}{R} \right)}{\|\Psi_n\|^2} \bar{\theta}(\mu_n, t), \quad (2.15)$$

де

$$\|\Psi_0\|^2 = \frac{R^{2(v+1)}}{2(v+1)}; \quad \|\Psi_n\|^2 = \frac{R^{2(v+1)}}{2\mu_n^{2v}} J_v^2(\mu_n); \quad (2.16)$$

$$\mu_0 = 0; \quad \Psi_n \left(\frac{\mu_n r}{R} \right) = \frac{R^v}{(\mu_n r)^v} J_v \left(\frac{\mu_n r}{R} \right),$$

можна записати наступним чином

$$\theta(r,t) = \frac{2(\nu+1)\bar{\theta}(0,t)}{R^{2(\nu+1)}} + \frac{2aqR^{\nu-1}}{\lambda r^\nu} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_\nu\left(\frac{\mu_n r}{R}\right)}{\left[m^2 + a\left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2\right] J_\nu(\mu_n)} \times \quad (2.17)$$

$$\times \left[1 - \exp\left[-\left[m^2 + a\left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2\right]t\right] \right].$$

Розглянемо окремі випадки, що визначаються формою чутливого елемента.

1. Чутливий елемент – прямокутна пластина, тобто $\nu = -0,5$.

Врахуємо співвідношення [62]

$$J_{-0,5}(\mu_n) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \mu_n^{-0,5} \cos \mu_n; J_{-0,5}\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{R}{\mu_n r}\right)^{0,5} \cos \frac{\mu_n r}{R}. \quad (2.18)$$

Тоді вираз (2.17) трансформується до вигляду

$$\theta(r,t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{aq}{\lambda m^2 R} \left[1 - \exp(-m^2 t) \right] + \frac{2aq}{\lambda R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \frac{\mu_n r}{R}}{\left[m^2 + a\left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2\right] \cos \mu_n} \times \quad (2.19)$$

$$\times \left[1 - \exp\left[-\left[m^2 + a\left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2\right]t\right] \right];$$

$$J_{0,5}(\mu) = 0. \quad (2.20)$$

2. Чутливий елемент циліндр, тобто $\nu = 0$.

Вираз (2.17) приймає вигляд

$$\theta(r,t) = \frac{2aq}{\lambda m^2 R} [1 - \exp(-m^2 t)] + \frac{2aq}{\lambda R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right)}{\left[m^2 + a\left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2\right] J_0(\mu_n)} \times \quad (2.21)$$

$$\times \left[1 - \exp\left[-\left[m^2 + a\left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2\right] t\right] \right],$$

де μ_n – n -й корінь трансцендентного рівняння

$$J_1(\mu) = 0. \quad (2.22)$$

3. Чутливий елемент – шар, тобто $\nu = 0,5$.

Врахуємо співвідношення [62]

$$J_{0,5}(\mu_n) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \mu_n^{-0,5} \sin \mu_n; J_{0,5}\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{R}{\mu_n r}\right)^{0,5} \sin \frac{\mu_n r}{R}. \quad (2.23)$$

Тоді вираз (2.17) можна записати наступним чином

$$\theta(r,t) = 3\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{aq}{\lambda m^2 R} [1 - \exp(-m^2 t)] + \frac{2aq}{\lambda r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{\mu_n r}{R}}{\left[m^2 + a\left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2\right] \sin \mu_n} \times \quad (2.24)$$

$$\times \left[1 - \exp\left[-\left[m^2 + a\left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2\right] t\right] \right];$$

$$J_{1,5}(\mu) = 0. \quad (2.25)$$

Внаслідок малих розмірів чутливих елементів пожежного сповіщувача доцільно перейти від моделей (2.19), (2.21), и (2.24) до усереднених по об'єму чутливого елемента температур, що визначаються з виразу

$$\theta(t) = \omega R^{-\omega} \int_0^R r^{\omega-1} \theta(r, t) dr, \quad (2.26)$$

де ω – параметр, що визначається формою чутливого елемента ($\omega = 1$ – для пластини; $\omega = 2$ – для циліндра; $\omega = 3$ – для шару).

Застосування оператора (2.26) відповідно до (2.19), (2.21) та (2.24) приведе до того, що інтеграли від других доданків у цих рівняннях дорівнюють нулю, а усереднена по об'єму узагальненого чутливого елемента температура описується моделлю

$$\theta(t) = \frac{K_1 a q}{\lambda m^2 R} [1 - \exp(-m^2 t)], \quad (2.27)$$

де $K_1 = \sqrt{\frac{2}{\pi}}$ – для прямокутної пластини; $K_1 = 2$ – для циліндра;

$K_1 = 3\sqrt{\frac{2}{\pi}}$ – для шару.

Якщо врахувати (2.3), а також співвідношення $a = \lambda (c\rho)^{-1}$, то модель (2.27) приймає вид

$$\theta(t) = \frac{0,5K_1 q}{\alpha} \left[1 - \exp\left(-\frac{2\alpha}{c\rho R} t\right) \right], \quad (2.28)$$

де параметр α визначається з рівняння (2.18) [53]

$$\alpha = d_1 \lambda_0 \ell^{-1,0} \text{Re}^{d_2} \text{Pr}_1^{d_3} \left(\frac{\text{Pr}_1}{\text{Pr}_2} \right)^{0,25}, \quad (2.29)$$

де λ_0 – теплопровідність повітряного середовища; ℓ – довжина чутливого елемента сповіщувача; $\text{Re}, \text{Pr}_1, \text{Pr}_2$ – число Рейнольдса и число Прандтля при температурі повітряного потоку, що падає на чутливий елемент, та при температурі чутливого елемента відповідно, d_i – параметри, значення яких приведені в табл. 2.1 [63].

Таблиця 2.1

Значення параметрів d_i

Число Рейнольдса	d_1	d_2	d_3
$5 < \text{Re} < 10^3$	0,500	0,5	0,38
$10^3 < \text{Re} < 2 \cdot 10^5$	0,250	0,6	0,38
$2 \cdot 10^5 < \text{Re} < 2 \cdot 10^6$	0,023	0,8	0,37

У [64] та [65] приведено математичні моделі ТПС з ЧЕ у формі пластинки та циліндру відповідно при впливі на них тепловим потоком $q = \text{const}$, які повністю співпадають з даною моделлю. Отже математичні моделі усередненої по об'єму чутливого елемента температури, що має форму прямокутної пластини, циліндра або шару, при дії на нього стаціонарного теплового потоку, співпадають з точністю до останнього множника, а їх динамічні властивості визначаються реологічними та геометричними характеристиками матеріалу чутливого елемента, а також умовами теплообміну. У [66] показано, що зміна температури ЧЕ ТПС при впливі на нього стаціонарним тепловим потоком прямо пропорційно залежить від величини цього потоку.

Математична модель (2.28) є загальною динамічною характеристикою ЧЕ ТПС – перехідної функцією. Використовуючи інформацію про перехідну функцію ТПС, побудуємо графіки залежності температури ЧЕ ТПС від величини питомого теплового потоку та часу при стаціонарному тепловому впливі для ТПС з ЧЕ різної форми. Для цього припустимо, що ТПС з різними ЧЕ, установлені у тепловому каналі, який регламентований згідно з EN 54-5 [3] і на них створюється вплив стаціонарним тепловим потоком $q = \text{const}$ (вихідні дані про ЧЕ ТПС та характеристики системи відповідно наведені в табл.2.2 та табл.2.3). На рис. 2.1 представлені графіки цих залежностей.

Таблиця 2.2

Характеристики ЧЕ

№	Характеристики ЧЕ	Циліндр	Шар	Прямокутна пластина
1.	Густина, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	8930	8930	8930
2.	Радіус (для прямокутної пластини - товщина), мм	0,5	0,5	0,5
3.	Довжина(для шару - радіус), мм	5	0,5	5
4.	Питома теплоємність, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	381	381	381

Таблиця 2.3

Характеристики системи

Площа перерізу повітряного екрану, м^2	0,0090
Швидкість повітряного потоку, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	0,5000
Теплопровідність повітряного середовища, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	0,0257
Густина повітря, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	1,2040
Початкова температура повітря, $^\circ\text{C}$	25,0000

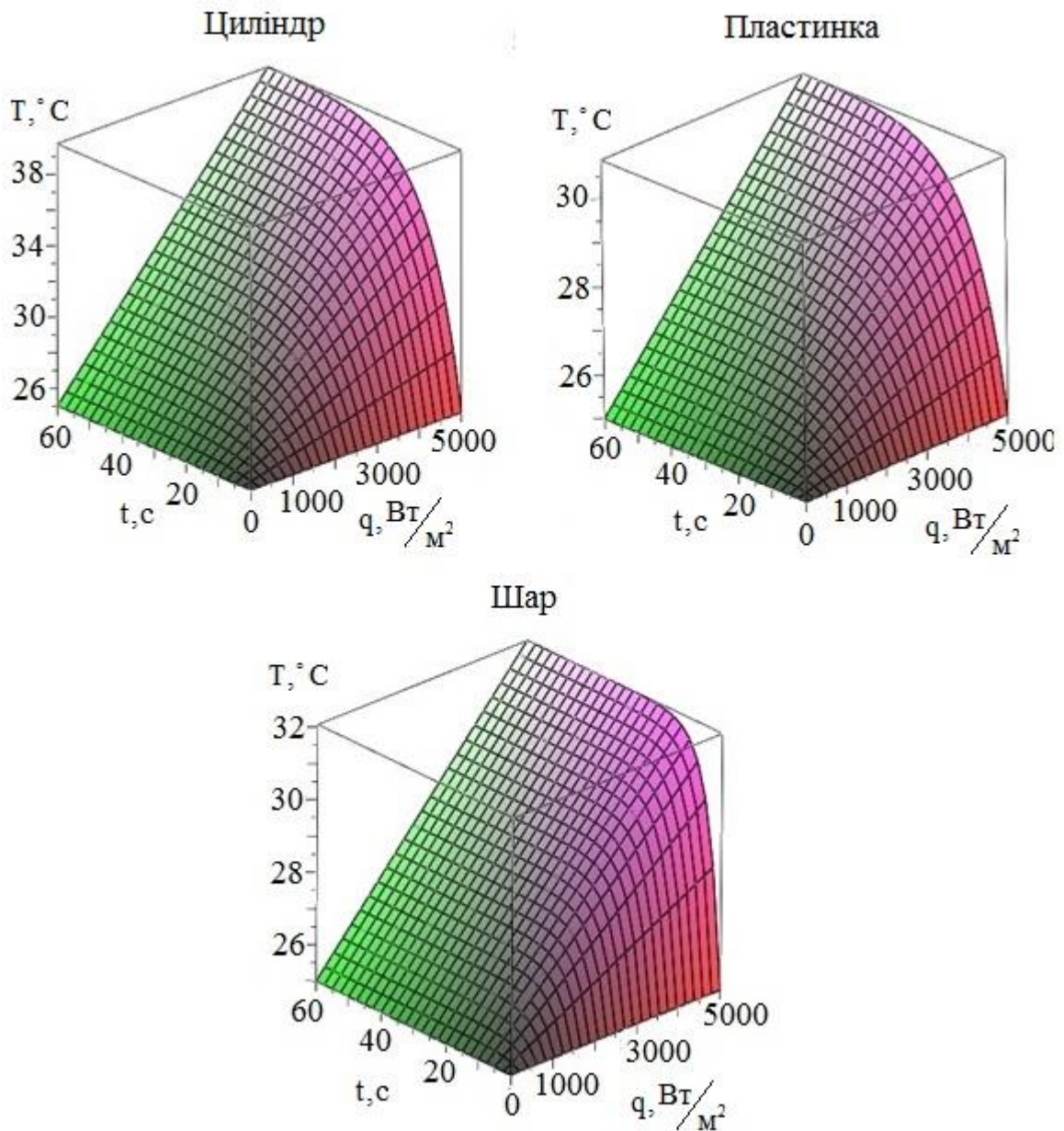


Рис.2.1. Залежність температури ЧЕ від питомого теплового потоку та часу

Із аналізу графіків на рис. 2.1 витікає, що температура ЧЕ у вигляді циліндру та пластинки при впливі на ТПС постійним тепловим потоком потужністю $5000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ різко зростає до 20 с секунди, а з 20 с по 60 с зростає плавно. За цей проміжок часу температура циліндричного ЧЕ зростає на величину, що у 2,5 рази перевищує величину зростання температури ЧЕ у вигляді пластинки та у 2,08 раз величину зростання температури ЧЕ у вигляді шару. Також необхідно зауважити, що температура ЧЕ у вигляді шару зростає з більшою швидкістю ніж

температура ТПС з іншими ЧЕ. Для такого ЧЕ температура різко зростає до 15 секунди, а після неї майже не змінюється.

Це може бути обумовлено геометричними формами ЧЕ, а також тим, що швидкість та характер зростання температури ЧЕ при впливі на нього тепловим потоком характеризується величиною постійної часу, яка визначається за формулою

$$\tau = \frac{c_p R}{2\alpha}, \quad (2.30)$$

де α – визначається з виразу (2.29), в якому число Рейнольдса та Прандтля визначаються за формулами

$$Re = \frac{\rho V d}{\eta}; \quad (2.31)$$

$$Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda}, \quad (2.32)$$

де ρ – густина повітря, η – динамічна в'язкість, V – швидкість повітряного потоку, d – діаметр умовного проходу труби, по якій рухається тепловий потік.

Як видно з моделі (2.30) постійна часу ТПС залежить від характеристик ЧЕ, середовища, а також умов проведення випробувань. За цією моделлю важко оцінити вагу кожного з факторів на величину постійної часу ТПС. У зв'язку з цим, доцільним є побудувати регресійну модель залежності величини постійної часу ТПС від значимих факторів впливу за якою можна наглядно оцінити величину впливу кожного з факторів. До цих факторів відносяться характерний розмір чутливого

елемента R , швидкість руху теплового потоку V та діаметр труби $d_{тр}$, по якій він рухається.

Для побудови регресійної моделі залежності постійної часу ТПС від факторів впливу проведемо обчислювальний експеримент. Залежність постійної часу ТПС від характерного розміру чутливого елемента R , швидкості теплового потоку V та діаметра труби $d_{тр}$, по якому він надходить, можна представити як аналітичний вираз у наступному вигляді:

$$y = f(R, V, d_{тр}). \quad (2.33)$$

Вираз (2.33) можна представити у вигляді обмеженого полінома [67]:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ijz} x_i x_j x_z, \quad (2.34)$$

де $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ijz}$ - вибіркові коефіцієнти регресії, що будуть отримані в результаті чисельного експерименту, $x_i, i = \overline{1,3}$ - кодовані змінні, що зв'язані з фізичними величинами $R, V, d_{тр}$ наступним чином

$$x_1 = \frac{R - R_0}{\delta R}; \quad x_2 = \frac{V - V_0}{\delta V}; \quad x_3 = \frac{d_{тр} - d_{тр0}}{\delta d_{тр}}, \quad (2.35)$$

де $R_0, V_0, d_{тр0}$ - значення факторів на нульовому рівні; $\delta R, \delta V, \delta d_{тр}$ - інтервали варіювання факторів, величини яких приведені в табл. 2.4.

Рівні варіювання факторів

Фактори	Кодове позначення	Нульовий рівень $x_i = 0$	Інтервал варіювання	Максимальний рівень $x_i = 1$	Мінімальний рівень $x_i = -1$
Характерний розмір ЧЕ ТПС, R, мм	x_1	0,75	0,25	1	0,5
Діаметр труби $d_{тр}$, м	x_2	0,2	0,1	0,3	0,1
Швидкість теплового потоку, V, м/с	x_3	0,8	0,2	1,0	0,6

Діапазон варіювання швидкості руху теплового потоку V та діаметру труби $d_{тр}$ були обрані з урахуванням стандартизованих значень параметрів теплового каналу, який регламентований нормативним документом EN 54-5, а діапазон варіювання характерного розміру ЧЕ ТПС з урахуванням середніх значень характерних розмірів чутливих елементів різної форми.

Для знаходження коефіцієнтів регресії використаємо методи теорії планування експерименту. Для даного експерименту модель (2.34) приймає вигляд

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + b_{31}x_3x_1 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (2.36)$$

Реалізація плану експерименту наведена в табл. 2.5 у вигляді розширеної матриці, яка дозволяє оцінити коефіцієнти регресії при взаємодіючих факторах [67].

Таблиця 2.5

Матриця планування експерименту

m	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁ x ₂	x ₃ x ₂	x ₁ x ₃	x ₁ x ₂ x ₃	y, c
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	3.97
2	1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	2.69
3	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	7.68
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	3.84
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	5.39
6	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	2.69
7	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	10.43
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	5.21
9	+1	0	0	0	0	0	0	0	4.34
10	+1	+1.4	0	0	0	0	0	0	6.37
11	+1	-1.4	0	0	0	0	0	0	2.31
12	+1	0	+1.4	0	0	0	0	0	3.16
13	+1	0	-1.4	0	0	0	0	0	8.94
14	+1	0	0	+1.4	0	0	0	0	3.62
15	+1	0	0	-1.4	0	0	0	0	5.62
$\sum_{i=1}^N x_i^2$	15	11.92	11.92	11.92	8	8	8	8	

Розрахунок коефіцієнтів регресії було проведено за формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{m=1}^{15} x_0 y_m}{\sum_{m=1}^{15} x_0^2}; \quad b_i = \frac{\sum_{m=1}^{15} x_i y_m}{\sum_{m=1}^{15} x_i^2}; \quad (2.37)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{m=1}^{15} x_i x_j y_m}{\sum_{m=1}^{15} (x_i x_j)^2}; \quad b_{ijz} = \frac{\sum_{m=1}^{15} x_i x_j x_z y_m}{\sum_{m=1}^{15} (x_i x_j x_z)^2}; \quad (2.38)$$

де $x_i x_j x_z$ – кодовані змінні, y_m – середнє значення функції відгуку відповідного випробування. Значення коефіцієнтів регресії наведені у табл. 2.6.

Значення коефіцієнтів регресії

b_0	5,084
b_1	1,574
b_2	-1,723
b_3	-0,691
b_{12}	-0,635
b_{23}	0,337
b_{31}	-0,350
b_{123}	-0,005

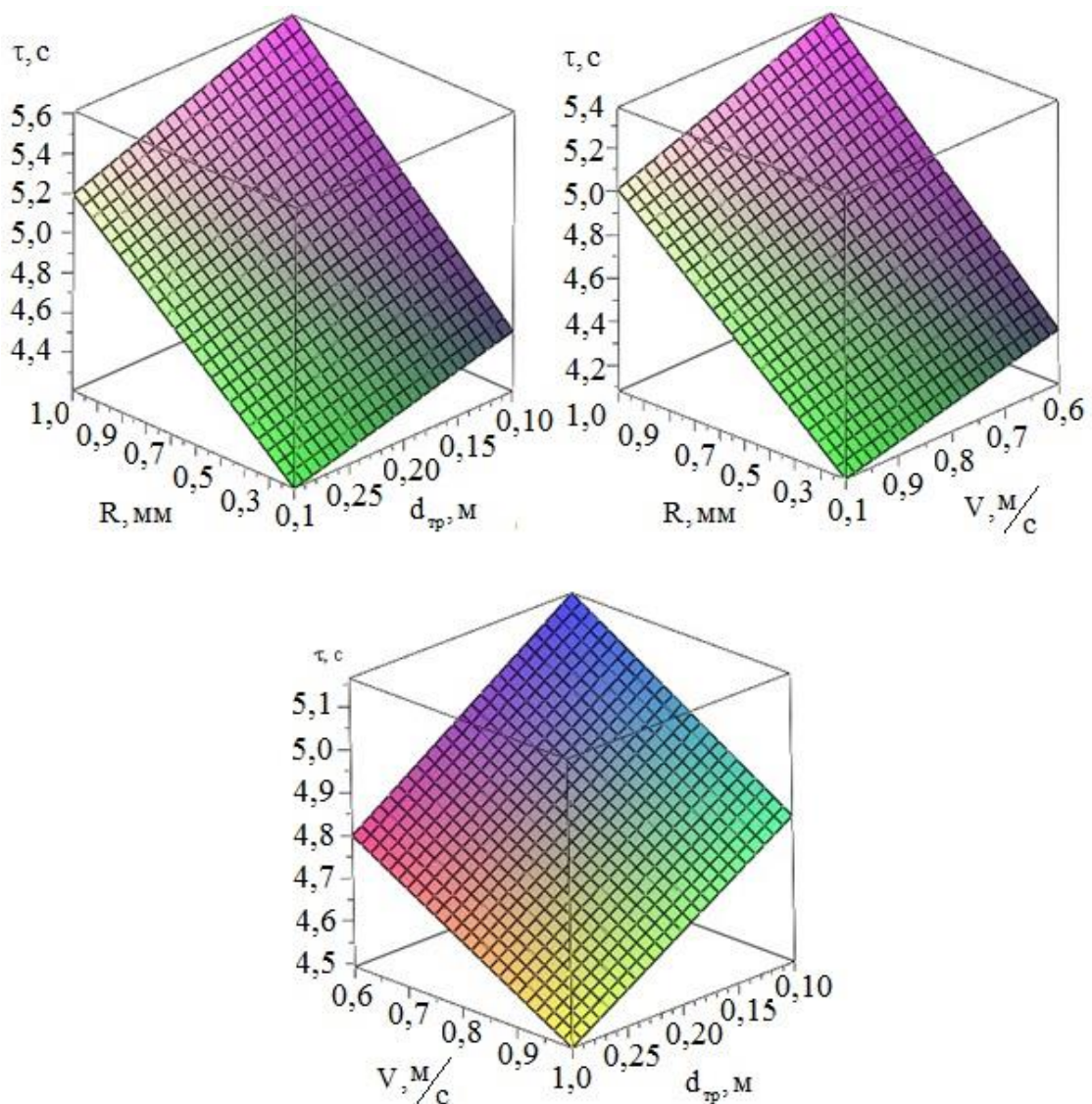


Рис.2.3. Залежність постійної часу ЧЕ ТПС від швидкості теплового потоку та характерного розміру чутливого елемента та діаметра труби відповідно до регресійної моделі

Таким чином, залежність постійної часу ТПС від швидкості теплового потоку та діаметру труби може бути представлена у вигляді наступного виразу

$$y = f(x_1, x_2, x_3) = 5,084 + 1,57 \cdot x_1 - 1,72 \cdot x_2 - 0,69 \cdot x_3 + 0,635 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,337 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,35 \cdot x_3 \cdot x_1 - 0,005 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (2.39)$$

Графіки залежності (2.39) представлені на рис.2.3. Із аналізу залежностей на рис. 2.3 витікає, що величина постійної часу в більшій мірі буде залежати від характерного розміру ЧЕ ТПС, причому прямопропорційно. За умов, що $d_{тр} = 0,3$ м, а $V = 0,8$ м/с постійна часу при зростанні характерного розміру ЧЕ R від 0,1 мм до 1 мм зросте на 0,98 с. Від швидкості теплового потоку та діаметру труби постійна часу ЧЕ ТПС залежить обернено пропорційно, але не так вагомо як від характерного розміру. Для даних інтервалів варіювання при збільшенні $d_{тр}$ в три рази величина постійної часу зменшиться лише на 0,35 с, а при збільшенні V з 0,6 м/с до 1,0 м/с зменшиться лише на 0,31 с.

2.2. Узагальнена математична модель теплового пожежного сповіщувача в умовах впливу на нього тепловою дією у вигляді стрибкоподібної зміни температури

Розглянемо випадок коли на ТПС створюється зовнішній тепловий вплив у вигляді стрибкоподібної зміни температури. Теплові процеси у узагальненому чутливому елементі ТПС при такому впливі опусуються рівнянням теплопровідності [32, 68-73], яке в загальному вигляді буде мати вигляд [74,75]

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2\nu + 1}{r} \cdot \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right], 0 \leq r \leq R \quad (2.40)$$

з початковими та граничними умовами

$$T(r, 0) = T_0; \quad \frac{\partial T(0, t)}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial T(R, t)}{\partial r} = -h[T(R, t) - T], \quad (2.41)$$

де T – температура чутливого елемента; h – відносний коефіцієнт теплообміну.

Якщо ввести позначення

$$\theta(r, t) = T(r, t) - T_0, \quad (2.42)$$

то система (2.40) ÷ (2.41) трансформується наступним чином

$$\frac{\partial \theta(r, t)}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2 \theta(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2\nu + 1}{r} \cdot \frac{\partial \theta(r, t)}{\partial r} \right], 0 \leq r \leq R \quad (2.43)$$

$$\theta(r, 0) = 0; \quad \frac{\partial \theta(0, t)}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial \theta(R, t)}{\partial r} = -h[\theta(R, t) - \theta], \quad (2.44)$$

де $\theta = T - T_0$.

Застосуємо до диференційного рівняння (2.43) узагальнене перетворення вигляду [71]

$$\bar{\theta}(\mu_n, t) = \int_0^R r^{\nu+1} J_\nu \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \theta(r, t) dr, \quad (2.45)$$

де $J_\nu(\mu)$ – функція Бесселя першого роду ν -го порядку; μ_n – корені трансцендентного рівняння

$$\frac{J_v(\mu)}{J_{v+1}(\mu)} = \frac{\mu}{hR}. \quad (2.46)$$

Застосування узагальненого інтегрального перетворення (2.45) до диференціального рівняння (2.43) з урахуванням граничних умов (2.44) приводять до рівняння

$$\frac{d\bar{\theta}(\mu_n, t)}{dt} = a \left[\theta_0 hR^{v+1} J_v(\mu_n) - \left(\frac{\mu_n}{R} \right)^2 \bar{\theta}(\mu_n, t) \right] \quad (2.47)$$

розв'язком якого є [74]

$$\theta(r, t) = 2\theta_0 hR^{v-1} \sum_{n=1}^{\infty} J_v \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \left[J_v(\mu_n) \left[(hR)^2 - 2hRv + \mu_n^2 \right] \right]^{-1} \times \quad (2.48)$$

$$\times \left[1 - \exp(-a\mu_n^2 R^{-2}t) \right].$$

Визначимо усереднені по об'єму динамічні характеристики чутливого елемента скориставшись рівнянням виду [74]

$$\theta(t) = kR^{-k} \int_0^R r^{k-1} \theta(r, t) dr, \quad (2.49)$$

де k – параметр ($k=1$ – для паралелепіпеда, $k=2$ – для циліндра, $k=3$ – для шару).

Застосувавши до (2.49) до (2.48) отримаємо перехідні функції чутливих елементів:

- прямокутної форми [74]

$$\theta(t) = \theta_0 \sum_{n=1}^{\infty} 2(hR)^2 \left[\mu_n^2 \left[(hR)^2 + hR + \mu_n^2 \right] \right]^{-1} \left[1 - \exp(-a\mu_n^2 R^{-2}t) \right]; \quad (2.50)$$

- циліндричної форми

$$\theta(t) = \theta_0 \sum_{n=1}^{\infty} 4(hR)^2 \left[\mu_n^2 \left[(hR)^2 + hR + \mu_n^2 \right] \right]^{-1} \left[1 - \exp(-a\mu_n^2 R^{-2}t) \right]; \quad (2.51)$$

- форми шару

$$\theta(t) = \theta_0 \sum_{n=1}^{\infty} 6(hR)^2 \left[\mu_n^2 \left[(hR)^2 - hR + \mu_n^2 \right] \right]^{-1} \left[1 - \exp(-a\mu_n^2 R^{-2}t) \right], \quad (2.52)$$

де μ_n — корні трансцендентних рівнянь [74].

Внаслідок малості розмірів чутливого елемента теплових пожежних сповіщувачів доцільно перейти до їх перехідної функції

$$\theta(t) = \theta_0 \sum_{n=1}^{\infty} K_{nk} \left[1 - \exp(-\tau_{nk}^{-1}t) \right], \quad (2.53)$$

де K_{nk}, τ_{nk} — n -й коефіцієнт передачі та n -а постійна часу для k -го виду терморезистивного чутливого елемента відповідно [74].

Передаточна функція усередненого по об'єму чутливого елемента теплового пожежного сповіщувача буде мати вигляд

$$W(p) = \sum_{n=1}^{\infty} K_{nk} (\tau_{nk} p + 1)^{-1}. \quad (2.54)$$

В табл. 2.7 наведено вирази для параметрів динамічних характеристик (2.53) та (2.54) узагальненого чутливого елемента, а також приведено рівняння для визначення параметрів μ_n , з урахуванням того, що

$$hR = Bi, \quad (2.55)$$

де Bi – число Біо.

Таблиця 2.7

Параметри динамічних характеристик узагальненого чутливого елемента

Вид ЧЕ	Параметри		Рівняння для визначення μ_n
	K_{nk}	τ_{nk}	
Паралелепіпед $k = 1$	$\frac{2(Bi)^2}{\mu_n^2 [(Bi)^2 + Bi + \mu_n^2]}$	$\frac{R^2}{a\mu_n^2}$	$\operatorname{ctg}\mu = \frac{\mu}{Bi}$
Циліндр $k = 2$	$\frac{4(Bi)^2}{\mu_n^2 [(Bi)^2 + \mu_n^2]}$	$\frac{R^2}{a\mu_n^2}$	$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \frac{\mu}{Bi}$
Шар $k = 3$	$\frac{6(Bi)^2}{\mu_n^2 [(Bi)^2 - Bi + \mu_n^2]}$	$\frac{R^2}{a\mu_n^2}$	$\operatorname{tg}\mu = \frac{\mu}{1 - Bi}$

Для чутливих елементів ТПС у вигляді паралелепіпеда, циліндра з похибкою не більше 1,6% та для шару з похибкою не більше 2% для критерію $Bi \leq 1,0$ достатньо обмежитися першими коренями рівняння для ЧЕ у вигляді паралелепіпеда (2.56), циліндра (2.57) та шару (2.58) [74]

$$\mu_1 = 0,22 + 1,1Bi - 0,47(Bi)^2; \quad (2.56)$$

$$\mu_1 = 0,46 + 1,45Bi - 0,65(Bi)^2; \quad (2.57)$$

$$\mu_1 = 0,57 + 1,8Bi - 0,79(Bi)^2, \quad (2.58)$$

значення яких приведені в табл. 2.8.

Вираз для постійної часу чутливого елемента ТПС можна переписати у вигляді

$$\tau_{1k} aR^{-2} = \mu_1^{-2} \quad (2.59)$$

та отримати залежності, що приведені на рис. 2.4. Проаналізувавши ці залежності можна зробити висновок, що постійна часу змінюється не більше ніж на 0,5 с для чутливих елементів у вигляді шару та циліндру при $0,45 \leq Bi \leq 1,0$, а для чутливих елементів у вигляді паралелепіпеду при $0,6 \leq Bi \leq 1,0$.

Таблиця 2.8

Значення перших коренів μ_1

Bi	Вид чутливого елемента		
	Паралелепіпед	Циліндр	Шар
0	0	0	0
0,01	0,099	0,14	0,17
0,02	0,140	0,20	0,24
0,04	0,200	0,28	0,35
0,06	0,240	0,34	0,42
0,08	0,280	0,40	0,49
0,1	0,310	0,44	0,54
0,2	0,430	0,62	0,76
0,3	0,520	0,75	0,92
0,4	0,590	0,85	1,05
0,5	0,650	0,94	1,17
0,6	0,710	1,02	1,26
0,7	0,750	1,09	1,35
0,8	0,790	1,15	1,43
0,9	0,830	1,20	1,50
1,0	0,860	1,26	1,57

На проміжку $0,1 \leq Bi \leq 1,0$ найменше значення постійної часу у ЧЕ у вигляді шару, а найбільше значення у циліндричного ЧЕ. Для мідного ЧЕ з коефіцієнтом теплопровідності $a = 1,11 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ та характерним розміром $R = 10^{-2} \text{ м}$, максимальне значення постійної часу циліндричного ЧЕ буде $\tau = 8,28 \text{ с}$, ЧЕ у формі пластинки $\tau = 2,45 \text{ с}$, а ЧЕ у формі шару $\tau = 1,59 \text{ с}$.

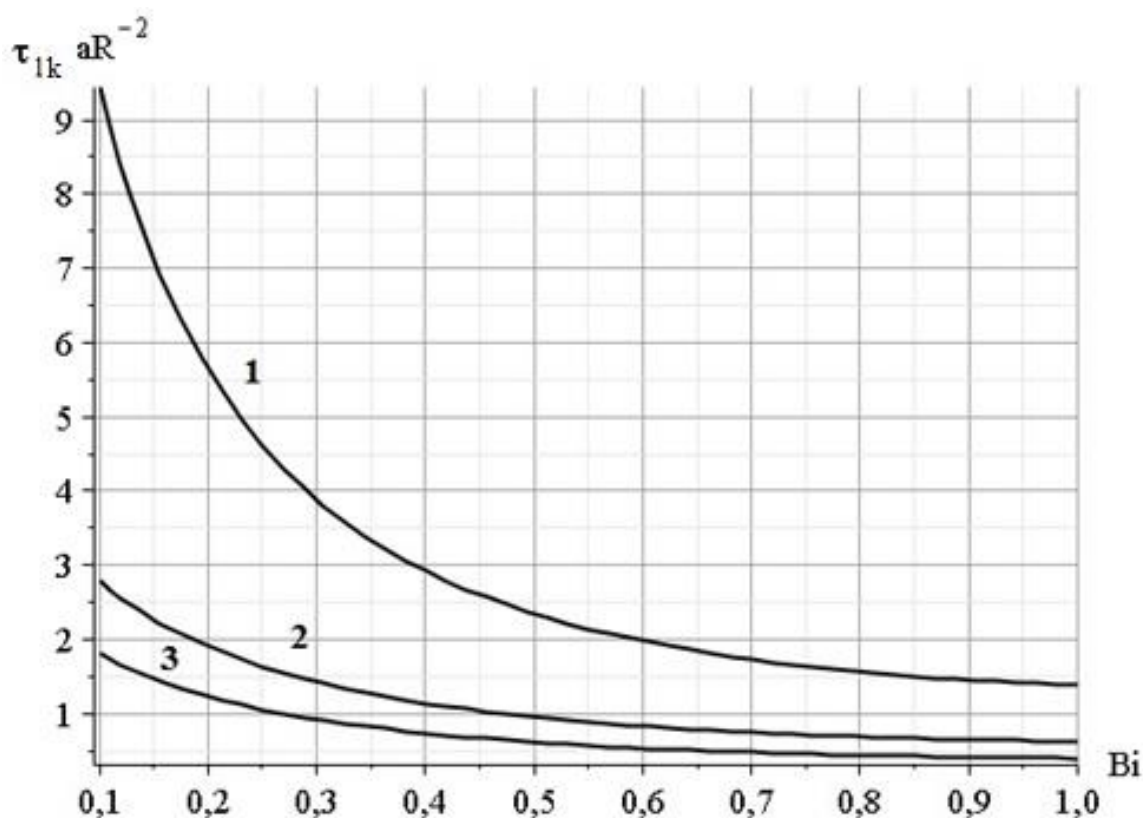


Рис. 2.4. Залежність (2.59) для чутливого елемента у вигляді: 1 – паралелепіпеда; 2 – циліндра, 3 – шару

Виходячи з виразів, що приведені у табл.2.7, були побудовані залежності коефіцієнта передачі від числа Bi , що представлені на рис. 2.5. З аналізу цих залежностей можна сказати, що для ЧЕ у вигляді паралелепіпеду, з допустимою похибкою 5 % для $0,2 \leq Bi \leq 1,0$ можна прийняти коефіцієнт передачі $K = 1$.

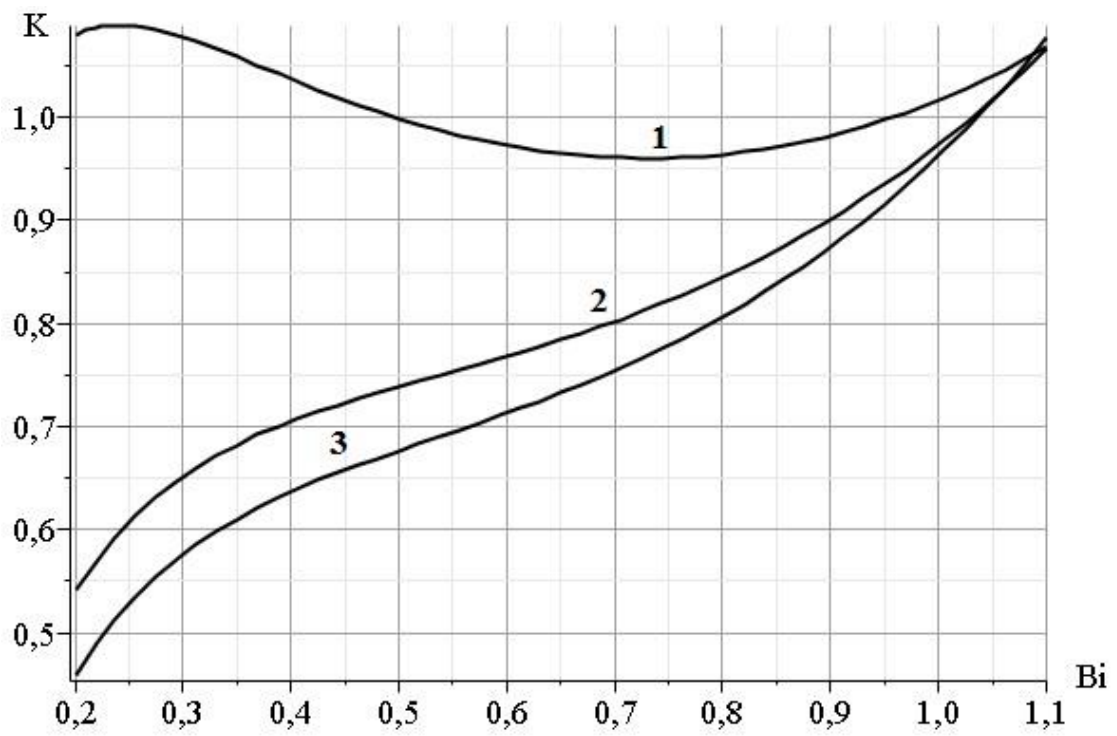


Рис. 2.5. Залежність коефіцієнта передачі від числа Біо для чутливого елемента у вигляді: 1 паралелепіпеду; 2 – циліндра; 3 – шару

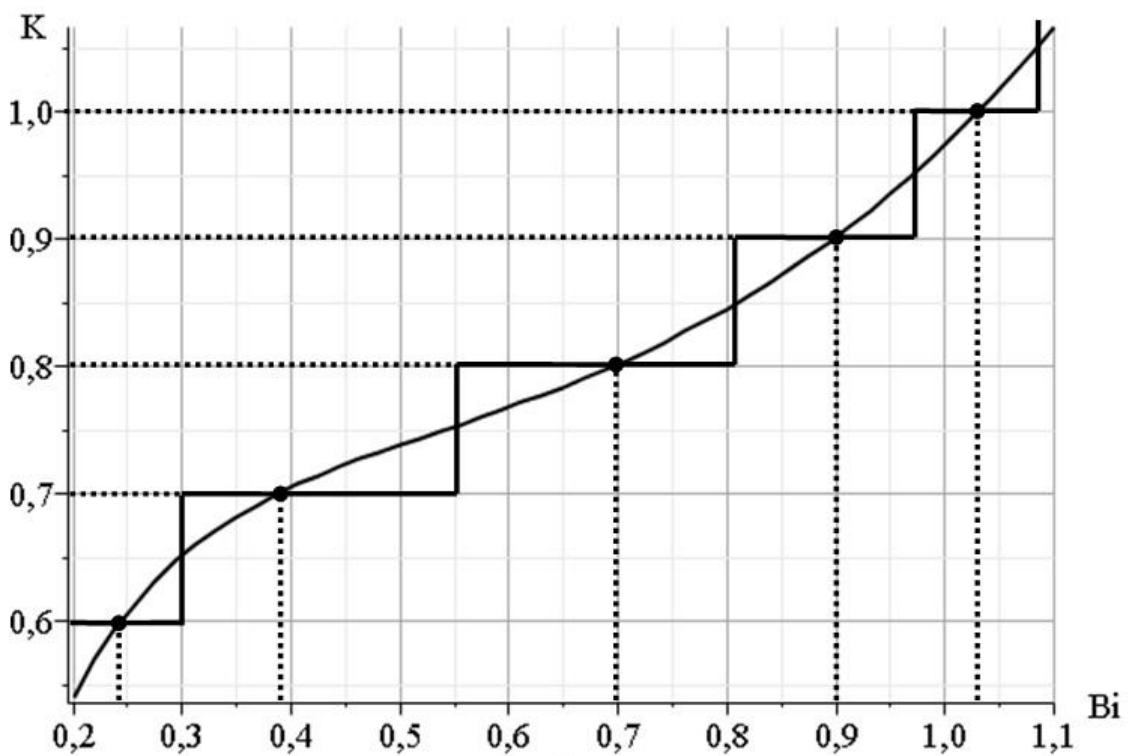


Рис. 2.6. Залежність коефіцієнта передачі від числа Біо для циліндричного чутливого елемента

Таблиця 2.9

Залежність числа Біо від коефіцієнта передачі для циліндричного ЧЕ ТПС

Значення числа Біо в межах	Коефіцієнт передачі К
$0,20 \leq Bi \leq 0,30$	0,6
$0,31 \leq Bi \leq 0,55$	0,7
$0,56 \leq Bi \leq 0,81$	0,8
$0,82 \leq Bi \leq 0,98$	0,9
$0,99 \leq Bi \leq 1,10$	1,0

Для циліндричного ЧЕ залежність коефіцієнту передачі від числа Біо була апроксимована, як показано на рис.2.6, та визначено, що для кожного із значень числа Біо, на відповідному проміжку, доцільно приймати відповідний коефіцієнт передачі, значення яких представлені в табл. 2.9.

2.3. Математична модель теплового пожежного сповіщувача з терморезистивним чутливим елементом

Математичні моделі, що приведені у п.2.1 та п.2.2 описують теплові процеси у ЧЕ ТПС при впливі на них зовнішнім тепловим потоком. Розглянемо випадок коли на ТПС створюється внутрішній тепловий вплив, що може бути реалізовано для ТПС з терморезистивним ЧЕ. Сповіщувачі з терморезистивним ЧЕ мають найменшу інерційність і є одними із найпоширеніших. Це обумовлено тим, що постійна часу терморезистивних ЧЕ ТПС має найменше значення у порівнянні з постійними часу інших ЧЕ.

Створення внутрішнього теплового потоку на терморезистивний ЧЕ ТПС можливо шляхом пропускання через нього електричного струму. Теплові процеси у терморезистивному ЧЕ ТПС, у відповідності з законом

Джоуля-Ленца, при протіканні по ньому електричного струму описується рівнянням [76]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{2\nu + 1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} \right] + f(r, t) \quad (2.60)$$

з початковими та граничними умовами

$$\theta(r, 0) = 0; \quad \frac{\partial \theta(0, t)}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial \theta(R, t)}{\partial r} = -h\theta(R, t), \quad (2.61)$$

де $f(r, t)$ – функція, що описує внутрішнє джерело теплового впливу, що обумовлено протіканням електричного струму $i(t)$:

$$f(r, t) = \frac{\rho_{уд}}{c\rho S^2} i^2(t) = Ki^2(t), \quad (2.62)$$

де $\rho_{уд}, S$ – питомий електричний опір та площа поперечного перерізу ЧЕ відповідно.

Після застосування до (2.60) інтегрального перетворення (2.45), формули обернення

$$\theta(r, t) = \frac{2}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \mu_n^2 J_{\nu} \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \bar{\theta} \left(\frac{\mu_n}{R}, t \right) \left[r^{\nu} J_{\nu}^2(\mu_n) \left[(hR)^2 - 2hR\nu + \mu_n^2 \right] \right]^{-1}, \quad (2.63)$$

а також

$$\bar{f} \left(\frac{\mu_n}{R}, t \right) = \int_0^R r^{\nu+1} J_{\nu} \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) f(r, t) dr = Ki^2(t) \frac{R^{\nu+2} J_{\nu+1}(\mu_n)}{\mu_n}, \quad (2.64)$$

отримаємо вираз, що описує розподіл температури в терморезистивному чутливому елементі, при протіканні по ньому електричного струму

$$\theta(r, t) = \frac{2Ki^2(t)hR^{v+3}}{ar^v} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_v\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{a\mu_n^2}{R^2}t\right)\right]}{\mu_n^2 J_v(\mu_n) \left[(hR)^2 - 2hRv + \mu_n^2\right]}. \quad (2.65)$$

З урахуванням $i(t) = I$, перехідна функція сповіщувачів з терморезистивними чутливими елементами різної форми приймає вигляд:

- ЧЕ у формі паралелепіпеда

$$\theta(t) = \frac{1}{R} \int_0^R \theta(r, t) dr = 2K_{nk} I^2 (hR)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\tau_n \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right)\right]}{\mu_n^2 \left[(hR)^2 + hR + \mu_n^2\right]}; \quad (2.66)$$

- ЧЕ у формі циліндра

$$\theta(t) = \frac{2}{R} \int_0^R r \theta(r, t) dr = 4K_{nk} I^2 (hR)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\tau_n \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right)\right]}{\mu_n^2 \left[(hR)^2 + \mu_n^2\right]}; \quad (2.67)$$

- ЧЕ у формі шару

$$\theta(t) = \frac{3}{R} \int_0^R r^2 \theta(r, t) dr = 6K_{nk} I^2 (hR)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\tau_n \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right)\right]}{\mu_n^2 \left[(hR)^2 - hR + \mu_n^2\right]}. \quad (2.68)$$

В табл. 2.10 наведено вирази для параметрів динамічних характеристик терморезистивного чутливого елемента у вигляді пластинки, циліндра та шару, а також рівняння для визначення параметрів μ_n .

Таблиця 2.10

Параметри динамічних характеристик терморезистивних чутливих елементів різної форми

Вид ЧЕ	Параметри		Рівняння для визначення μ_n
	K_{nk}	τ_{nk}	
Паралелепіпед $k = 1$	$\frac{(Bi)^2}{\mu_n^2 [(Bi)^2 + Bi + \mu_n^2]}$	$\frac{R^2}{a\mu_n^2}$	$\operatorname{ctg}\mu = \frac{\mu}{Bi}$
Циліндр $k = 2$	$\frac{(Bi)^2}{\mu_n^2 [(Bi)^2 + \mu_n^2]}$	$\frac{R^2}{a\mu_n^2}$	$\frac{J_v(\mu)}{J_{v+1}(\mu)} = \frac{\mu}{Bi}$
Шар $k = 3$	$\frac{(Bi)^2}{\mu_n^2 [(Bi)^2 - Bi + \mu_n^2]}$	$\frac{R^2}{a\mu_n^2}$	$\frac{\sin \mu_n}{\left(\frac{\sin \mu_n}{\mu_n}\right) - \cos \mu_n} = \frac{\mu}{Bi}$

Для математичних моделей (2.66)÷(2.68) з допустовою похибкою в 5%, при значеннях $Bi < 1,0$, можна обмежитися першими членами ряду, які визначаються виразами (2.56), (2.57), (2.58). На рис.2.7 приведені залежності коефіцієнта передачі K_{nk} ЧЕ ТПС різних форм від числа Біо для $0,1 \leq Bi \leq 1,0$.

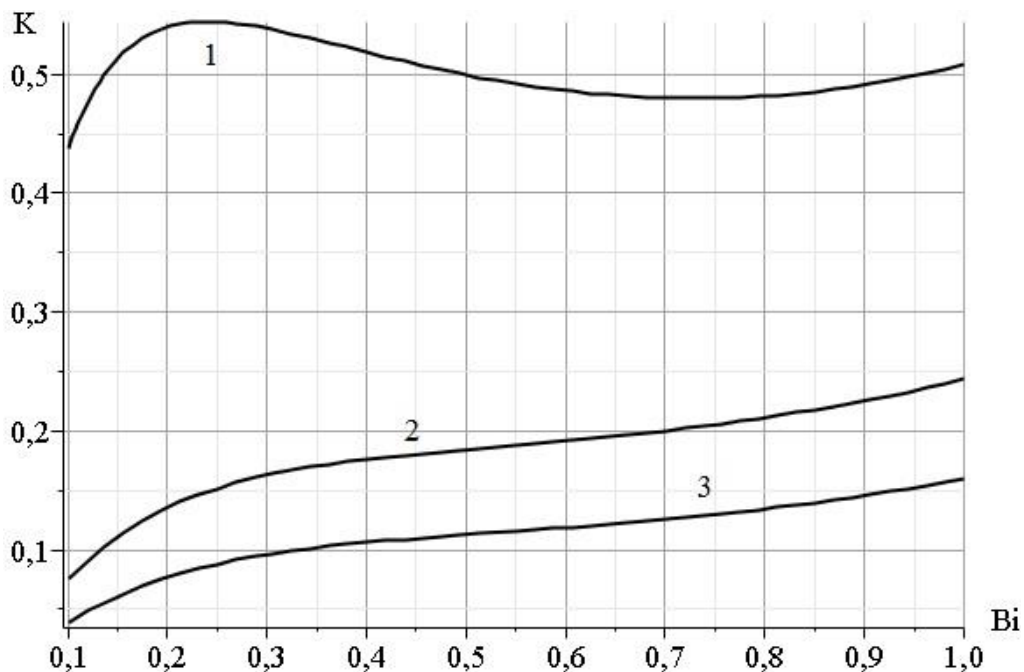


Рис. 2.7. Залежність коефіцієнта передачі від числа Біо для чутливого елемента у вигляді: 1 – паралелепіпеду; 2 – циліндра; 3 – шару

Таблиця 2.11

Залежність числа Біо від коефіцієнта передачі для терморезистивних ЧЕ ТПС різної форми

Форма ЧЕ	Значення числа Біо в межах	Коефіцієнт передачі К
Пластинка	$0,10 \leq Bi \leq 1,00$	0,5
Циліндр	$0,10 \leq Bi \leq 0,25$	0,1
	$0,25 \leq Bi \leq 1,00$	0,2
Шар	$0,10 \leq Bi \leq 1,00$	0,1

Із аналізу залежностей на рис.2.7, витікає, що для кожного числа Біо доцільно прийняти коефіцієнт передачі, як показано в табл. 2.11.

2.4 Регресійна модель теплових пожежних сповіщувачів

У п.2.1. приведено математичне описання теплових процесів у ЧЕ ТПС при зовнішньому тепловому впливі у вигляді стаціонарного теплового потоку. Теплові процеси у ЧЕ ТПС при такому впливі будуть описуватись залежністю (2.27), яка показує як температура ЧЕ залежить від величини теплового потоку. У [77] показано, як величина постійної часу ТПС залежить від характеристик ЧЕ, середовища та умов проведення випробувань при створенні на нього зовнішнього теплового впливу у вигляді стаціонарного теплового потоку, при цьому не визначено як величина теплового потоку залежить від конструктивних рішень сповіщувача.

Величина такого теплового потоку буде залежати від його температури, швидкості, теплопровідності повітряного середовища, густини повітря та температури повітря у початковий момент часу. Для вирішення інженерних задач при реалізації конструкторських рішень ТПС необхідно визначити параметри формування теплового потоку. Отримати залежності параметрів формування теплового потоку аналітичним шляхом

є достатньо важкою задачею, тому було проведено експериментальне дослідження для побудови регресійних моделей цих залежностей.

Одним із конструкторських рішень при побудові ТПС є розміщення пристрою для формування теплового потоку безпосередньо у конструкції сповіщувача. Такий пристрій може бути представлений у вигляді послідовно установлених вентилятора та нагрівального елемента. Відповідно до методу планування експерименту [78] було сплановано експеримент та проведені експериментальні випробування, для визначення параметрів формування повітряного потоку, а саме електричної напруги, що подається на вентилятор U_1 та відстані до нагрівального елемента l_1 [79]. Для таких випробувань було сконструйовано макет у вигляді труби, в якій встановлено вентилятор, як показано на рис. 2.8.

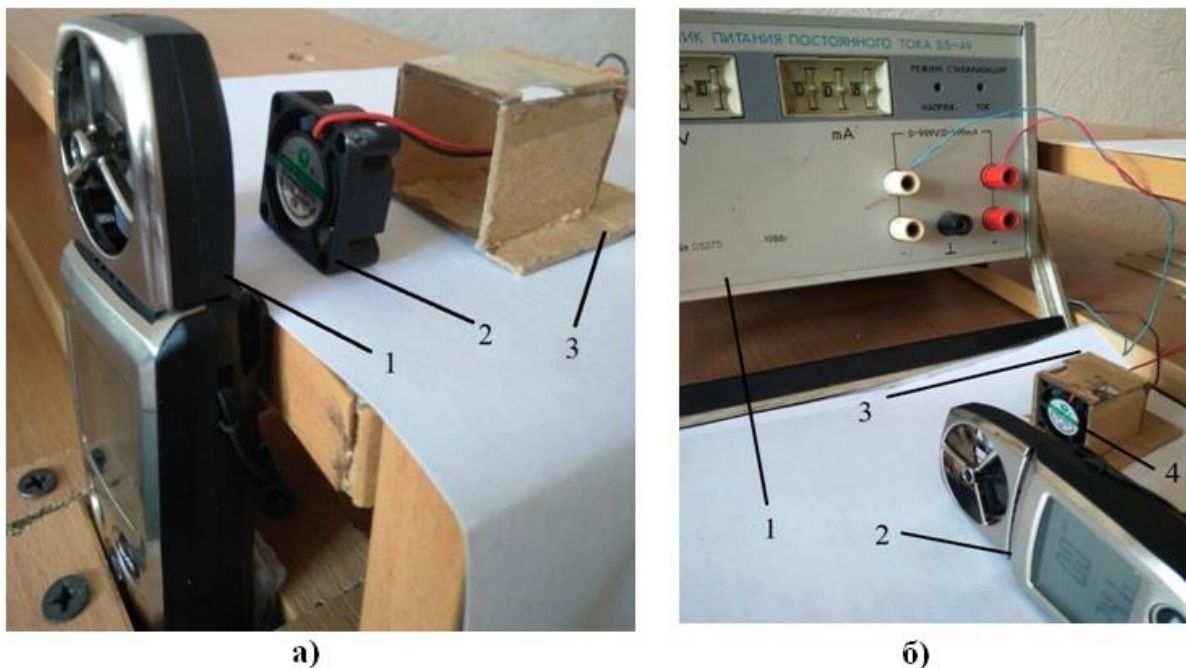


Рис. 2.8. Макет для проведення випробувань визначення швидкості повітряного потоку: а) 1 – термоанемометр, 2 – вентилятор, 3 – екран; б) 1 – джерело живлення Б5-49, 2 – термоанемометр, 3 – екран, 4 – вентилятор

В даному макеті був використаний вентилятор DC BRUSHLESS FAN технічні характеристики якого наведені у табл. 2.12.

Таблиця 2.12

Технічні характеристики вентилятора DC BRUSHLESS FAN

Габаритні розміри, мм	25x25x10
Номинальна напруга постійного струму, В	12
Номинальний струм, А	0,08
Номинальна швидкість, об/хв	12000
Продуктивність, м ³ / год	4,86
Шум, дБ	25
Маса, г	7

Труба має габаритні розміри 25x25x10 мм. На верхній частині труби були зроблені два отвори для ручок, за допомогою яких відбувається переміщення вентилятора по трубі. На верхній частині труби була нанесена вимірювальна шкала, для встановлення вентилятора на потрібній відстані.

Таблиця 2.13

Технічні характеристики термоанемометру testo 410-1

Чутливий елемент	Пластикова крильчатка
Температурний сенсор	NTC
Діапазон виміру швидкості, м/с	0,3-20,0
Діапазон виміру температури, °С	-10...+50
Точність виміру швидкості, м/с	0,1
Точність виміру температури, °С	0,1
Похибка, °С	± 0,5
Періодичність виміру, с	0,5
Габаритні розміри, мм	133x46x25
Маса, г	110

Для вимірювання швидкості повітряного потоку на виході з труби був встановлений термоанемометр марки testo 410-1, технічні характеристики якого наведені у табл.2.13. Вентилятор був під'єднаний до джерела живлення постійного струму Б5-49. Технічні характеристики джерела живлення приведені у табл. 2.14.

Таблиця 2.14

Технічні характеристики джерела живлення постійного струму Б5-49

Живлення від мережі, В	220
Вихідна напруга, В	0,1-99,0
Струм навантаження, А	0,001-0,999
Споживана потужність, Вт	400
Середній час безвідмовної роботи, год	5000
Габаритні розміри, мм	236x326x133
Маса, кг	9

Залежність швидкості повітряного потоку створеного вентилятором від поданої напруги та відстані до нагрівального елемента, може бути представлена у вигляді аналітичного виразу:

$$y_1 = f(U_1, l_1), \quad (2.69)$$

де U_1 – напруга подана на вентилятор, l_1 – відстань від вентилятора до вимірювального приладу.

Цей вираз можна представити у вигляді обмеженого полінома

$$y_1 = b_0 + \sum_{i=1}^2 b_i x_i + \sum_{i<j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^2 b_{ii} x_i^2, \quad (2.70)$$

де $b_0, b_1, b_j, b_{ij}, b_{ii}$ – вибіркові коефіцієнти регресії, що будуть отримані в результаті чисельного експерименту, $x_i, i = \overline{1,2}$ – кодовані змінні, що пов’язані з фізичними величинами U_1, l_1 наступним чином

$$x_1 = \frac{U_1 - U_0}{\delta U_1}; \quad x_2 = \frac{l_1 - l_0}{\delta l_1}, \quad (2.71)$$

де U_0, l_0 , – значення факторів на нульовому рівні; $\delta U_1, \delta l_1$ – інтервали варіювання факторів, приведені в табл. 2.15.

Отриманий емпіричним шляхом вираз вигляду (2.70) будемо вважати математичною моделлю швидкості повітряного потоку. Для знаходження коефіцієнтів регресії використаємо методи планування експерименту [80]. Для даного експерименту модель (2.70) приймає вигляд

$$y_1 = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2. \quad (2.72)$$

Таблиця 2.15

Рівні варіювання факторів

Фактори	Кодове позначення	Нульовий рівень $x_i = 0$	Інтервал варіювання	Максимальний рівень $x_i = 1$	Мінімальний рівень $x_i = -1$
Напруга, що подається на вентилятор, $U_1, В$	x_1	13,5	1,5	15	12
Відстань до вимірювального приладу, $l_1, мм$	x_2	9	6	15	3

Випробування було проведено згідно композиційного плану другого порядку. Реалізація плану експерименту наведена в табл. 2.16, у вигляді

розширеної матриці, яка дозволяє оцінити коефіцієнти регресії при взаємодіючих факторах.

Таблиця 2.16

Матриця розрахунку коефіцієнтів двофакторної моделі

z	x ₀	x ₁	x ₂	x ₁ x ₂	x ₁ ²	x ₂ ²	\bar{y}_z
1	+1	-1	-1	+1	0,22	0,22	0,3
2	+1	+1	-1	-1	0,22	0,22	0,4
3	+1	-1	+1	-1	0,22	0,22	0,3
4	+1	+1	+1	+1	0,22	0,22	0,4
5	+1	0	0	0	-0,88	-0,88	0,5
6	+1	+1,4	0	0	1,08	-0,88	0,6
7	+1	-1,4	0	0	1,08	-0,88	0,3
8	+1	0	+1,4	0	-0,88	1,08	0,4
9	+1	0	-1,4	0	-0,88	1,08	0,4
$\sum_{i=1}^N x_i^2$	9	7,92	7,92	4	4,84	4,84	

Розрахунок коефіцієнтів регресії було проведено за формулами [80]:

$$b_0 = \frac{\sum_{z=1}^9 x_0 y_z}{\sum_{z=1}^9 x_0^2}; \quad (2.73)$$

$$b_i = \frac{\sum_{z=1}^9 x_i y_z}{\sum_{z=1}^9 x_i^2}; \quad (2.74)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{z=1}^9 x_i x_j y_z}{\sum_{z=1}^9 (x_i x_j)^2}; \quad (2.75)$$

$$b_{ii} = \frac{\sum_{z=1}^9 x_i^2 y_z}{\sum_{z=1}^9 x_i^2}, \quad (2.76)$$

де $x_i x_j$ – кодовані змінні, \bar{y}_z – середнє значення функції відгуку відповідного випробування. Значення коефіцієнтів регресії наведені у табл. 2.17.

Таблиця 2.17

Значення коефіцієнтів регресії

b_0	0,40000
b_1	0,07280
b_2	0,00000
b_{12}	0,00000
b_{11}	0,02800
b_{22}	-0,01239

Було проведено оцінку значимості коефіцієнтів за критерієм Стюдента, у відповідності до якого коефіцієнт регресії b знаходиться за формулою:

$$t_{\text{поз}} = \frac{|b|}{\sigma_b} > t_{\text{кр}}, \quad (2.77)$$

де σ_b – середнє квадратичне відхилення, розраховане на основі дисперсії S_y^2 :

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{1}{Nn} S_y^2}; \quad S_y^2 = \frac{1}{N(n-1)} \sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^n (y_{ui} - \bar{y}_u)^2, \quad (2.78)$$

де n – кількість паралельних вимірів для кожного випробування; $t_{кр}$ – табличне значення розподілу Стюдента для прийнятого рівня довірчої вірогідності та відповідного числа ступенів свободи σ_b

$$f = N(n-1). \quad (2.79)$$

Результати розрахунків для перевірки значимості коефіцієнтів приведені у табл. 2.18, а значення оцінок коефіцієнтів рівняння регресії у табл. 2.19.

Таблиця 2.18

Результати розрахунків для перевірки коефіцієнтів значимості

σ_b	0,00392
S_y^2	0,00050
$t_{кр}$	2,05200
f	27,0000
n	4,0000

Таблиця 2.19

Значення оцінок коефіцієнтів рівняння регресії

Позначення оцінки коефіцієнта	Оцінка значення t	Висновок
b_0	102,04	Значимий
b_1	18,57	Значимий
b_2	0,00	Незначимий
b_{12}	0,00	Незначимий
b_{11}	7,14	Значимий
b_{22}	3,16	Значимий

Незначимі коефіцієнти були виключені з рівняння регресії. Таким чином залежність швидкості повітряного потоку від напруги, що подана на вентилятор та відстані до вимірювального приладу може бути представлена у вигляді наступного виразу

$$y_1 = f(x_1, x_2) = 0,4 + 0,075 \cdot x_1 - 0,0077 \cdot x_2 + 0,003 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,03 \cdot x_1^2 - 0,013 \cdot x_2^2, \quad (2.80)$$

де x_1, x_2 – кодовані змінні напруги, що подається на вентилятор, і відстані до нагрівального елемента відповідно.

Було проведено перевірку адекватності рівняння регресії за критерієм Фішера, у відповідності до якого рівняння вважається адекватним при виконанні наступної умови [80]:

$$F_{\text{роз}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_y^2} < F_{\text{кр}}, \quad (2.81)$$

де

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{n \sum_{z=1}^9 (\bar{y}_z - \hat{y}_z)^2}{N - M}, \quad (2.82)$$

де \hat{y}_m – прогнозоване значення відгуку функції по рівнянню регресії, M – кількість значимих коефіцієнтів.

Ступені свободи для $F_{\text{кр}}$ були розраховані за формулами:

$$f_{\text{ад}} = N - M; \quad (2.83)$$

$$f_y = N(n - 1). \quad (2.84)$$

Результати розрахунків для перевірки адекватності моделі наведені у табл. 2.20. Так як $F_{роз} < F_{кр}$, то модель регресії (2.80) вважається адекватною. Для даної моделі було побудовано графік залежності, що представлений на рис. 2.9.

Таблиця 2.20

Результати розрахунків для перевірки адекватності моделі

$F_{роз}$	1,81
$F_{кр}$	2,6
$S_{ад}^2$	0,001
S_y^2	0,00055
$f_{ад}$	5
f_y	27

Для моделі (2.80) вирішена задача параметричної оптимізації з використанням метода Філіпса. В результаті вирішення даної задачі знайдені значення змінних, при яких вентилятор створює повітряний потік з максимальною швидкістю:

$$x_1 = 1,4;$$

$$x_2 = 0.$$

У даній точці кодований параметр x_1 відповідає поданій на вентилятор напрузі 15,6 В, а кодований параметр x_2 відповідає відстані до нагрівального елемента 9 мм.

Використовуючи отримані данні, відповідно до методу планування експерименту [80], сплановано експеримент та проведені експериментальні випробування, для визначення параметрів формування теплового потоку, а саме температури, що створюється нагрівальним

елементом при подачі на нього різної за величиною електричної напруги U_2 , та відстані від нагрівального елемента l_2 .

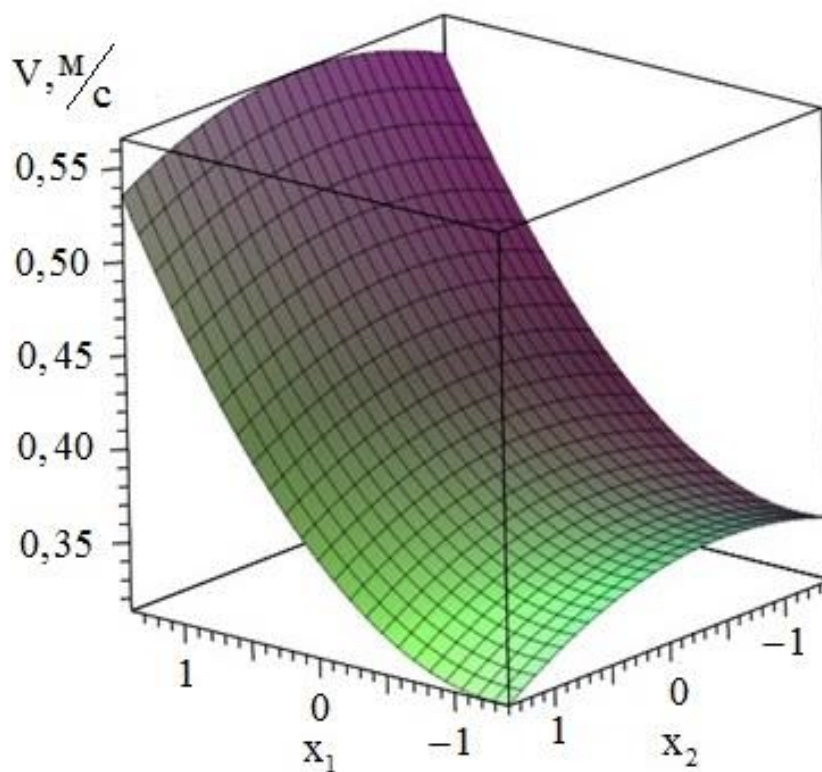


Рис. 2.9. Графік залежності швидкості повітряного потоку від поданої на вентилятор електричної напруги та відстані до нагрівального елемента

Для проведення експерименту сконструйовано макет у вигляді екрана (25x25x65) мм, в якому встановлено вентилятор DC BRUSHLESS FAN та нагрівальний елемент, що виконано з ніхромової проволочки довжиною 293 мм та діаметром 0,3 мм закріпленої на текстолітові пластини (30x10x2) мм, як показано на рис. 2.10.

Нагрівальний елемент було підключено до джерела живлення постійного електричного струму Б5-49. Вентилятор було встановлено на відстані 9 мм від нагрівального елемента та підключено до блоку живлення БП-4822-2, як показано на рис. 2.11 та рис. 2.12. В якості вимірюваних приладів для визначення електричної напруги та сили струму, що подається на нагрівальний елемент, використовувались вольтметр та

амперметр. Для вимірювання температури було використано мультиметр з термопарою.

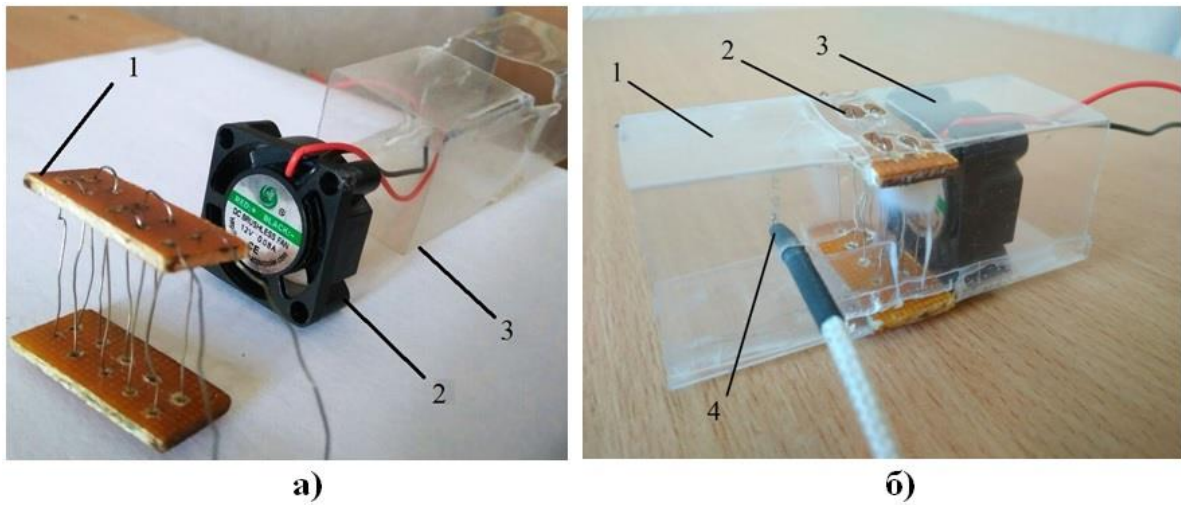


Рис. 2.10. Макет для проведення випробувань визначення температури, що створюється нагрівальним елементом: а) 1 – нагрівальний елемент, 2 – вентилятор, 3 – екран; б) загальний вид макету: 1 екран, 2 – нагрівальний елемент, 3 – вентилятор, 4 – термопара

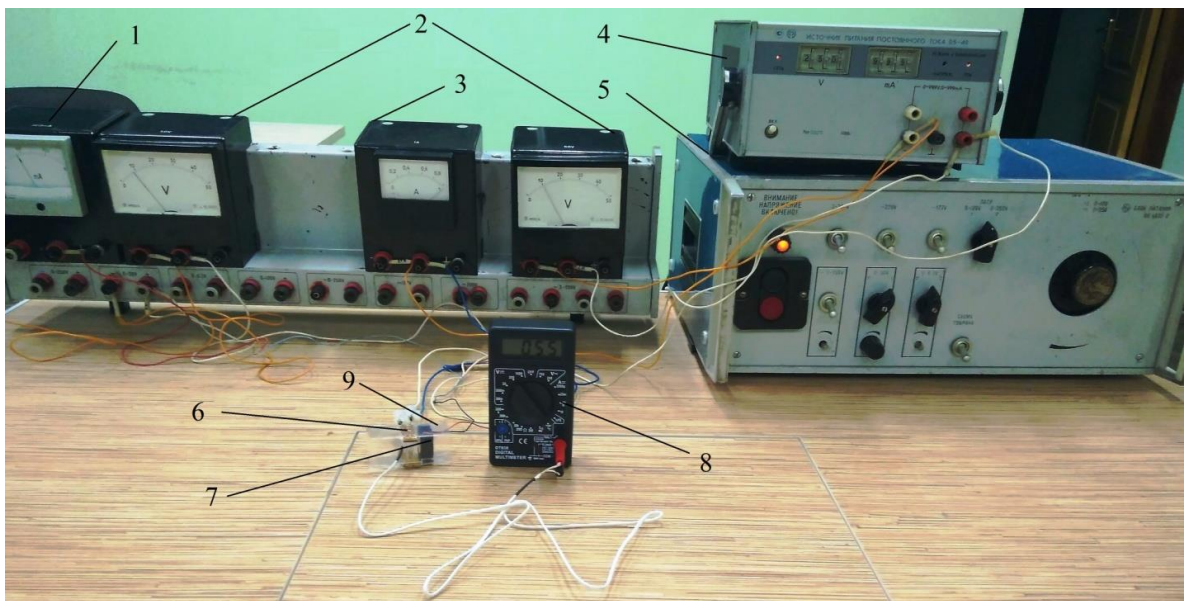


Рис. 2.11. Установка для проведення експерименту: 1 – міліамперметр, 2 – вольтметр, 3 – амперметр; 4 – джерело живлення постійного електричного струму БП-49; 5 – блок живлення БП-4822-2; 6 – нагрівальний елемент; 7 – вентилятор; 8 – мультиметр; 9 – екран

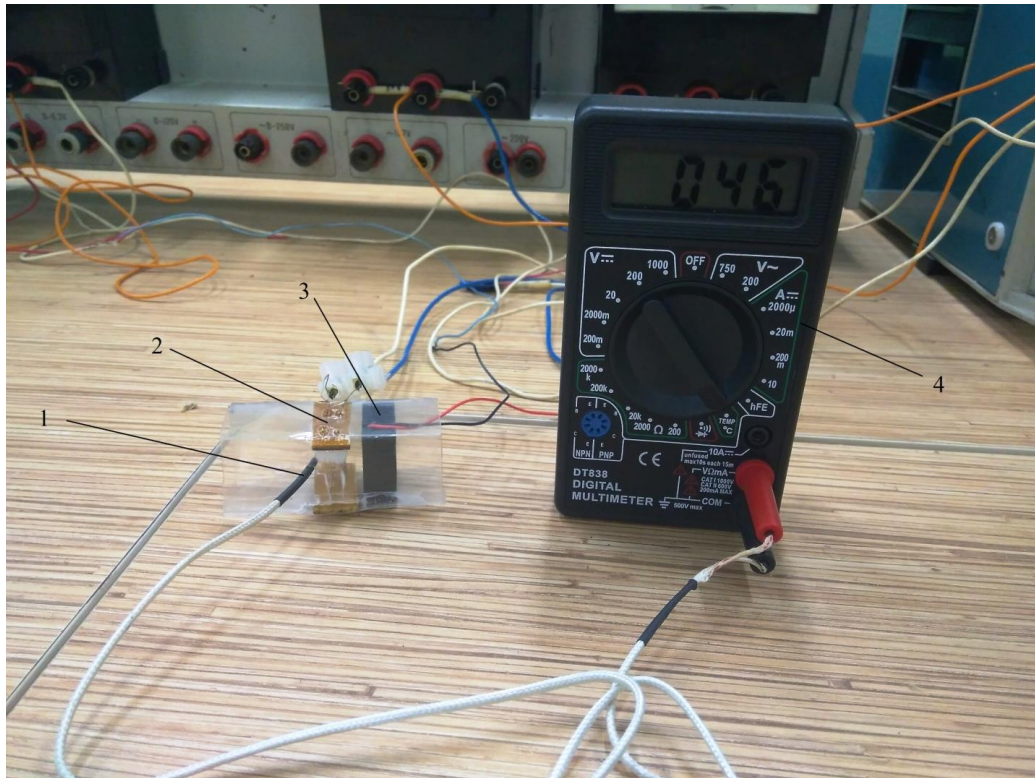


Рис. 2.12. Макет для проведення експерименту: 1 – термопара, 2 – нагрівальний елемент, 3 – вентилятор; 4 – мультиметр

Залежність температури створеної нагрівальним елементом від поданої на неї електричної напруги та відстані до вимірювального приладу можна представити вигляді:

$$y_2 = f(U_2, l_2), \quad (2.85)$$

де U_2 – напруга подана на нагрівальний елемент, l_2 – відстань від нагрівального елемента до вимірювального приладу.

Цей вираз можна представити у вигляді обмеженого полінома:

$$y_2 = b_0 + \sum_{i=1}^2 b_i x_i + \sum_{i<j} b_{ij} x_i x_j, \quad (2.86)$$

де $x_i, i = \overline{1,2}$ – кодовані змінні, що зв’язані з фізичними величинами U_2, l_2 наступним чином

$$x_{21} = \frac{U_2 - U_0}{\delta U_2}; \quad x_{22} = \frac{l_2 - l_0}{\delta l_2} \quad (2.87)$$

де U_0, l_0 , – значення факторів на нульовому рівні; $\delta U_2, \delta l_2$ – інтервали варіювання факторів, приведені в табл. 2.21.

Таблиця 2.21

Рівні варіювання факторів

Фактори	Кодове позначення	Нульовий рівень $x_i = 0$	Інтервал варіювання	Максимальний рівень $x_i = 1$	Мінімальний рівень $x_i = -1$
Напруга, що подається на нагрівальний елемент, U_2 , В	x_{21}	18,0	9,8	27,8	8,2
Відстань від нагрівального елемента до вимірювального приладу, l_2 , мм	x_{22}	9,0	5,6	14,6	3,4

Отриманий емпіричним шляхом вираз вигляду (2.86) будемо вважати математичною моделлю температури створеної нагрівальним елементом на заданій відстані. Для даного експерименту модель (2.86) приймає вигляд

$$y_2 = b_{20} + b_{21}x_{21} + b_{22}x_{22} + b_{212}x_{21}x_{22}. \quad (2.88)$$

Випробування було проведено згідно плану випробування, реалізація якого наведена в табл. 2.22, у вигляді розширеної матриці, яка дозволяє оцінити коефіцієнти регресії при взаємодіючих факторах.

Таблиця 2.22

Матриця планування експерименту для визначення температури

№	x_{20}	x_{21}	x_{22}	$x_{21}x_{22}$	$y_1, ^\circ\text{C}$	$y_2, ^\circ\text{C}$	$y_3, ^\circ\text{C}$	$y_4, ^\circ\text{C}$	$y_5, ^\circ\text{C}$	$\bar{y}, ^\circ\text{C}$
1	+1	-1	-1	+1	42,0	39,0	43,0	43,0	45,0	42,5
2	+1	+1	-1	-1	55,0	56,0	58,0	56,0	59,0	56,78
3	+1	-1	+1	-1	40,0	37,0	41,0	40,0	39,0	39,4
4	+1	+1	+1	+1	43,0	44,0	43,0	41,0	44,0	43,0

Розрахунок коефіцієнтів регресії було проведено за формулами:

$$b_{20} = \frac{\sum_{z=1}^4 x_{20} y_{2z}}{\sum_{z=1}^4 x_{20}^2}; \quad (2.89)$$

$$b_{2i} = \frac{\sum_{z=1}^4 x_{2i} y_{2z}}{\sum_{z=1}^4 x_{2i}^2}; \quad (2.90)$$

$$b_{2ij} = \frac{\sum_{z=1}^4 x_{2i} x_{2j} y_{2z}}{\sum_{z=1}^4 (x_{2i} x_{2j})^2}, \quad (2.91)$$

де $x_{2i}x_{2j}$ – кодовані змінні, y_{2z} – середнє значення функції відгуку відповідного випробування. Значення коефіцієнтів регресії наведені у табл.2.23.

Таблиця 2.23

Значення коефіцієнтів регресії

b_{20}	45,42
b_{21}	4,47
b_{22}	-4,22
b_{212}	-2,67

Була проведена оцінка значимості коефіцієнтів за критерієм Стюдента, у відповідності до якого коефіцієнт регресії b знаходиться за формулою (2.77). Результати розрахунків для перевірки значимості коефіцієнтів приведені у табл. 2.24, а значення оцінок коефіцієнтів рівняння регресії у табл. 2.25.

Таблиця 2.24

Результати розрахунків для перевірки коефіцієнтів значимості

σ_b	0,33
S_y^2	2,78
$t_{кр}$	2,11
f	16,00
n	5,00

Таблиця 2.25

Значення оцінок коефіцієнтів рівняння регресії

Позначення оцінки коефіцієнта	Оцінка значення $t_{роз}$	Висновок
b_{20}	45,42	Значимий
b_{21}	4,47	Значимий
b_{22}	-4,22	Значимий
b_{212}	-2,67	Значимий

Таким чином залежність температури створеної нагрівальним елементом від напруги, що подана на нагрівальний елемент та відстані до вимірювального приладу може бути представлена у вигляді наступного виразу

$$y_2 = f(x_{21}, x_{22}) = 45,42 + 4,47 \cdot x_{21} - 4,22 \cdot x_{22} - 2,67 \cdot x_{21} \cdot x_{22}. \quad (2.92)$$

Була проведена перевірка адекватності рівняння регресії за критерієм Фішера, у відповідності до якого рівняння вважається адекватним при виконанні наступної умови (2.81). Ступені свободи для $F_{кр}$ були розраховані за формулами (2.83) та (2.84).

Результати розрахунків для перевірки адекватності моделі наведені у табл. 2.26. Так як $F_{роз} < F_{кр}$, то модель регресії (2.92) вважається адекватною. Для даної моделі був побудований графік залежності, що представлений на рис. 2.13.

Таблиця 2.26

Результати розрахунків для перевірки адекватності моделі

$F_{роз} \cdot 10^3$	0,1790
$F_{кр}$	4,5000
$S_{ад}^2$	0,0005
S_y^2	2,7800
$f_{ад}$	1,0000
f_y	16,0000

За моделлю (2.92) можливо визначити температуру теплового потоку при заданій електричній напрузі, що подається на нагрівальний елемент та відстані до нього. Для створення теплового потоку з температурою 54 °С, яка є мінімальною температурою спрацьовування теплових пожежних сповіщувачів класу А1 [3], значення доцільно обрати

$$x_{21} = 0,6;$$

$$x_{22} = -1.$$

У даній точці кодований параметр x_{21} відповідає поданій на нагрівальний елемент електричній напрузі 23,4 В, а кодований параметр x_{22} відповідає відстані 3,4 мм.

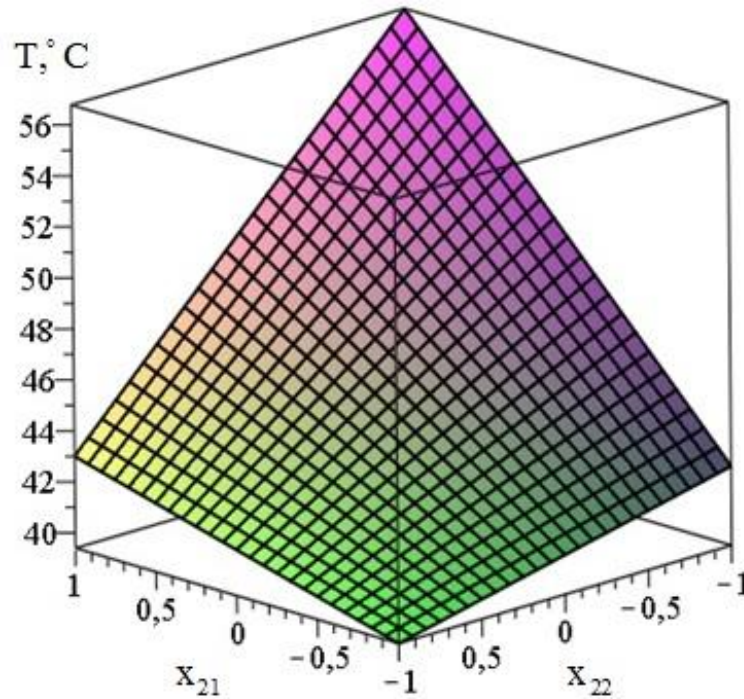


Рис. 2.13. Графік залежності температури від поданої на нагрівальний елемент напруги та відстані до вимрювального приладу

Для аналізу динамічних властивостей вентилятора і нагрівального елемента представимо цей макет у вигляді сукупності динамічних ланок, як показано на рис.2.14.

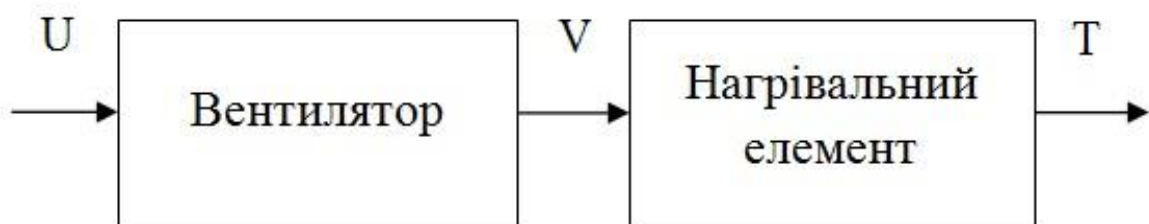


Рис. 2.14. Структурна схема сповіщувача, в якому встановлені вентилятор та нагрівальний елемент

Вентилятор та нагрівальний елемент є аперіодичними ланками. Перехідні функції вентилятора та нагрівального елемента при подачі на них вхідного сигналу у вигляді функції Хевісайда (електричної напруги) відповідно можуть бути представлені виразами [36]

$$V(t) = K_B K_o U \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_B}\right) \right); \quad (2.93)$$

$$\theta(t) = K_H U \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_H}\right) \right), \quad (2.94)$$

де K_B, K_H, K_o – відповідно коефіцієнти передачі вентилятора, нагрівального елемента та коефіцієнт перерахунку; U – електрична напруга.

Перехідна функція ЧЕ ТПС описується рівнянням

$$\theta_1(t) = K \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right). \quad (2.95)$$

Як видно з виразів (2.93)÷(2.95) інерційність вентилятора, нагрівального елемента та ЧЕ ТПС визначаються величиною їх постійних часу. Постійна часу вентилятора буде відповідати постійній часу його двигуна. Двигун вентилятора DC BRUSHLESS FUN можна порівняти з колекторними двигунами постійного електричного струму малої напруги для систем автоматики, постійна часу яких $\tau_B = 20 \cdot 10^{-3}$ с [81].

Постійна часу нагрівального елемента визначається формулою

$$\tau_H = \frac{L}{R}, \quad (2.96)$$

де R – активний електричний опір, L – індуктивність, яка витікає з формули Вілера [82-84]

$$L = \frac{(DN)^2}{45 \cdot D + 100 \cdot l}, \quad (2.97)$$

де D – діаметр намотки, l – довжина намотки, N – кількість витків.

За формулами (2.96) та (2.97), по вихідним даним, що приведені у табл.2.27, була визначена постійна часу нагрівального елемента – $\tau_H = 30 \cdot 10^{-6}$ с.

Таблиця 2.27

Вихідні дані для проведення розрахунку

Матеріал нагрівального елемента	Ніхром
Довжина намотки, мм	293,0
Діаметр намотки, мм	25,0
Діаметр ніхромової проволки, мм	0,3
Питомий опір, Ом·м	$1,1 \cdot 10^{-6}$

Постійна часу ЧЕ ТПС класу А1, згідно з EN 54-5 – $\tau \leq 20$ с [3]. Виходячи з цього, величини постійних часу нагрівального елемента та вентилятора значно менші за постійну часу ЧЕ ТПС, тому для подальших розрахунків ними можна знехтувати. Виходячи з цього, можна стверджувати, що при створенні теплового впливу на ЧЕ ТПС тепловим потоком у вигляді функції Хевісайда, за допомоги вентилятора та нагрівального елемента їх інерційними властивостями можна знехтувати.

2.5. Висновки

2.5.1 Розроблені математичні моделі теплових пожежних сповіщувачів з чутливими елементами у формі пластини, циліндра та шару, при впливі на них зовнішнім стаціонарним тепловим потоком потоком, а також їх узагальнену модель.

2.5.2. Побудовано регресійну модель залежності величини постійної часу від характерного розміру чутливого елемента, швидкості повітряного потоку та діаметру труби, по якій він рухається.

2.5.3. Розроблені усереднені по об'єму чутливого елементу теплових пожежних сповіщувачів математичні моделі, що описують процеси в ньому, при зовнішньому тепловому впливі, які представлені у вигляді перехідних та передаточних функцій.

2.5.4. Визначено, що для значень критерію Біо на проміжку $0,2 \leq Bi \leq 1,0$, з похибкою, що не перевищує 5%, коефіцієнт передачі теплових пожежних сповіщувачів з чутливим елементом у вигляді паралелепіпеду можна прийняти $K=1$, а також визначені коефіцієнти передачі сповіщувачів з циліндричним чутливим елементом для різних значень критерію Біо на цьому ж проміжку.

2.5.5. Розроблені усереднені по об'єму терморезистивного чутливого елементу теплових пожежних сповіщувачів математичні моделі, що описують процеси в ньому, при внутрішньому тепловому впливі, які представлені у вигляді перехідних та передаточних функцій.

2.5.6. Побудовано регресійну модель залежності температури теплового потоку від поданої на нагрівальний елемент електричної напруги та відстані до чутливого елемента теплового пожежного сповіщувача, для випадку коли тепловий вплив на чутливий елемент створюється у корпусі сповіщувача за допомогою нагрівального елемента та мікрорезистивного елемента.

РОЗДІЛ 3

ЗАГАЛЬНІ ТА ЧАСНІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВИХ ПОЖЕЖНИХ СПОВІЩУВАЧІВ ТА МЕТОДИ ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ

3.1. Динамічні характеристики та передаточна функція теплових пожежних сповіщувачів

У нормативних документах України [3], Росії [8], США [85], Великобританії [86], Франції [87] та Німеччини [88], пропонується здійснювати випробування ТПС шляхом визначення його часу спрацьовування. Для цього сповіщувач розміщують у тепловій камері, створюють на його ЧЕ вхідний вплив, який еквівалентний впливу при надзвичайній ситуації, та вимірюють час, за який датчик перейде до режиму «Тривога», та порівнюють цей час з нормативним. Такий метод випробувань ТПС не надає повну інформацію про стан сповіщувача, оскільки під час таких випробувань не визначаються його загальні динамічні характеристики, які можуть у повній мірі описати його динамічні властивості.

Динамічні характеристики ТПС класифікуються, як показано на рис. 3.1.

Часові динамічні характеристики служать для оцінки динамічних властивостей ТПС у часовій області, а частотні показують здатність ЧЕ ТПС пропускати гармонічні сигнали різної частоти.

Усі динамічні характеристики можуть бути описані його передаточною функцією

$$W(p) = \frac{\theta(p)}{Q(p)}, \quad (3.1)$$

де $\theta(p)$ – зображення по Лапласу перехідної функції ТПС, що описує зміну

температури його ЧЕ при створенні на нього теплового впливу, $Q(p)$ – зображення по Лапласу функції теплового впливу, що впливає на ЧЕ ТПС.

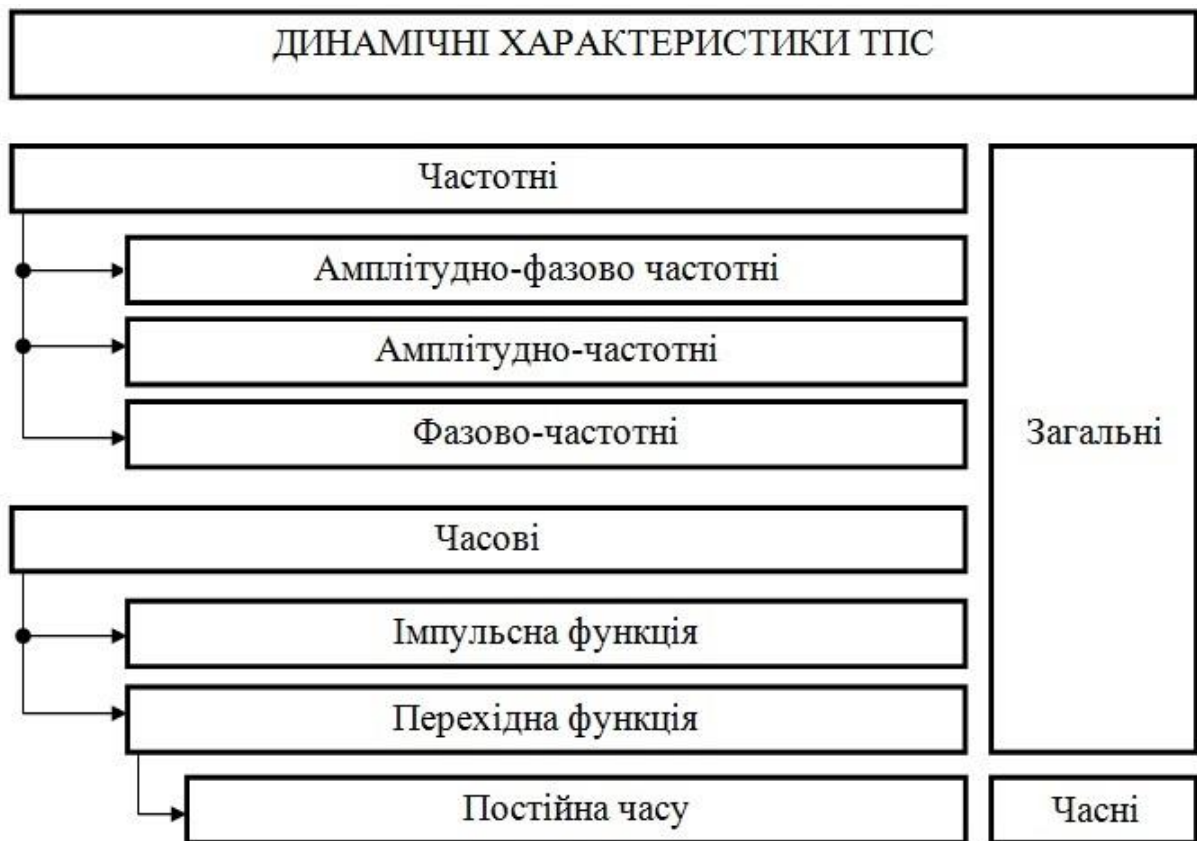


Рис.3.1. Класифікація динамічних характеристик ТПС

Передаточна функція ТПС може бути отримана аналітично. Для цього необхідно врахувати, що вхідний вплив на сповіщувач створюється у вигляді одиночної функції, а його зображення по Лапласу описується як

$$Q(p) = L[1(t)] = \frac{B}{p}, \quad (3.2)$$

де B – параметр, що описує величину вхідного впливу. Тоді зображення перехідної функції ТПС описується виразом

$$Q(p) = L[\theta(t)] = \int_0^{\infty} \theta(t) \cdot e^{-pt} dt. \quad (3.3)$$

Використовуючи співвідношення (3.1), з урахуванням виразів (3.2) та (3.3) отримаємо вираз для передаточної функції ТПС

$$W(p) = p\theta(p) \cdot B^{-1}. \quad (3.4)$$

Математичні моделі, що були отримані у другому розділі, є перехідними функціями ТПС при впливі на нього тепловим впливом різного роду. Модель (2.28) є перехідною функцією ТПС при впливі на нього стаціонарним тепловим потоком $q = \text{const}$. Передаточна функція такого сповіщувача, згідно з (3.4), буде описуватись у вигляді

$$W(p) = \frac{K_{\pi}}{(\tau p + 1)}, \quad (3.5)$$

де K_{π} – коефіцієнт передачі, що визначається формулою

$$K_{\pi} = \frac{0,5Kq}{\alpha}, \quad (3.6)$$

де K – визначається відповідно до форми чутливого елемента(п. 2.1)

Використовуючи вираз (3.5), були отримані вирази для передаточних функцій ТПС з різною формою ЧЕ при впливі на нього стаціонарним тепловим потоком, що представлені в табл. 3.1.

Математична модель (2.53) є перехідною функцією ТПС при впливі на нього стрибкоподібною зміною температури. Передаточна функція такого сповіщувача в загальному вигляді описується виразом (2.54), а її параметри наведені в табл. 2.7. Виходячи з цього, були отримані вирази

для передаточних функцій ТПС з різною формою ЧЕ при впливі на них стрибкоподібною зміною температури, що представлені в табл. 3.2.

Таблиця 3.1

Передаточні функції ТПС при зовнішньому тепловому впливі
стаціонарним тепловим потоком

Форма ЧЕ	Передаточна функція ТПС
Зовнішній вплив стаціонарним тепловим потоком $q = \text{const}$	
Прямокутна пластинка	$\frac{0,39 \cdot q}{0,50 \cdot c_p R_p + \alpha}$
Циліндр	$\frac{q}{0,50 \cdot c_p R_p + \alpha}$
Шар	$\frac{1,19 \cdot q}{0,50 \cdot c_p R_p + \alpha}$

Таблиця 3.2

Передаточні функції ТПС з різною формою ЧЕ при зовнішньому
тепловому впливі у вигляді стрибкоподібної зміни температури

Форма ЧЕ	Передаточна функція ТПС
Прямокутна пластинка	$\frac{2 \cdot aBi^2}{(Bi^2 + Bi + \mu_1^2)(R^2 p + a\mu_1^2)}$
Циліндр	$\frac{4 \cdot aBi^2}{(Bi^2 + \mu_1^2)(R^2 p + a\mu_1^2)}$
Шар	$\frac{6 \cdot aBi^2}{(Bi^2 - Bi + \mu_1^2)(R^2 p + a\mu_1^2)}$

Для кожного значення числа Bi було визначено значення перших коренів трансцендентного рівнянь μ_1 , що приведені у табл. 2.8, які можуть використовуватись для визначення передаточної функції сповіщувача.

Математичні моделі (2.66)÷(2.68) представляють собою перехідні функції ТПС з терморезистивним чутливим елементом при впливі на них внутрішнього теплового впливу у вигляді електричного струму, що

описується виразом (2.62). За виразом (3.1) була визначена передаточна функція такого сповіщувача, яка описується виразом

$$W(p) = \frac{K_n \tau}{(\tau p + 1)}, \quad (3.7)$$

де K_n та τ визначаються виразами приведеними у табл. 2.10.

За виразом (3.7) були визначені передаточні функції ТПС з різними формами чутливих елементів при впливі на них внутрішнім тепловим впливом у вигляді електричного струму, що приведені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Передаточні функції ТПС з різною формою терморезистивного ЧЕ при внутрішньому тепловому впливі

Форма ЧЕ	Передаточна функція ТПС
Прямокутна пластинка	$\frac{2 \cdot Bi^2 R^2}{\mu_1^2 (Bi^2 + Bi + \mu_1^2) (R^2 p + a\mu_1^2)}$
Циліндр	$\frac{4 \cdot Bi^2 R^2}{\mu_1^2 (Bi^2 + \mu_1^2) (R^2 p + a\mu_1^2)}$
Шар	$\frac{6 \cdot Bi^2 R^2}{\mu_1^2 (Bi^2 - Bi + \mu_1^2) (R^2 p + a\mu_1^2)}$

Значення перших коренів трансцендентних рівнянь μ_1 , відповідно до значень числа Bi , приведені у табл. 2.8.

Інформація про передаточну функцію сповіщувача відкриває можливості для визначення його динамічних характеристик. Знаючи передаточну функцію сповіщувача та зображення його вхідного сигналу, можна визначити реакцію сповіщувача на такий сигнал у вигляді функції часу. Також на основі інформації про передаточну функцію ТПС можна визначити його частотні характеристики.

3.2. **Перехідна функція теплових пожежних сповіщувачів та методи її визначення**

Існуючі методи визначення перехідних функцій ТПС можна поділити на два види: аналітичні та експериментальні. Аналітичні методи, в свою чергу, також підрозділяються на два види. Перший вид полягає у вирішенні диференціальних рівнянь Фур'є (2.1) та (2.40) при створенні на ЧЕ ТПС теплового впливу у вигляді функції Хевісайда, величина якого відома. Другий вид методів визначення перехідної функції ТПС оснований на інформації про його передаточну функцію. В такому випадку перехідна функція сповіщувача буде визначатися виразом

$$\theta(t) = L^{-1}\left(W(p) \cdot \frac{1}{p}\right). \quad (3.8)$$

Далі в роботі будуть розглядатися експериментальні методи визначення перехідної функції ТПС. Експериментальне визначення перехідної функції ТПС здійснюється шляхом створення тест-впливу на сповіщувач у вигляді функції Хевісайда та визначення його реакції на такий вплив шляхом реєстрації його вихідного сигналу. Недоліком цього методу є те, що неможливо створити тепловий вплив строго у вигляді функції Хевісайда. Також при визначенні перехідної функції швидкодіючих ТПС виникають похибки, що обумовлені інерційністю теплових процесів. Тому було запропоновано метод визначення перехідної функції ТПС, при якому тепловий вплив на сповіщувач створюється у вигляді лінійної-зростаючої функції. Таке рішення усуває недоліки класичного методу, а також дозволяє здійснювати визначення перехідної функції ТПС у існуючій тепловій камері, яка регламентована нормативним документом EN 54-5 [3].

Запропонований метод полягає у наступному. Температура у середині теплової камери змінюється за лінійним законом

$$T(t) = b \cdot t, \quad (3.9)$$

де b – швидкість зростання температури у робочому об'ємі теплової камери; t – час.

Вихідний сигнал теплового пожежного сповіщувача при такому впливі $\theta_1(t)$ буде змінюватись так, як це показано на рис. 3.2 [89].

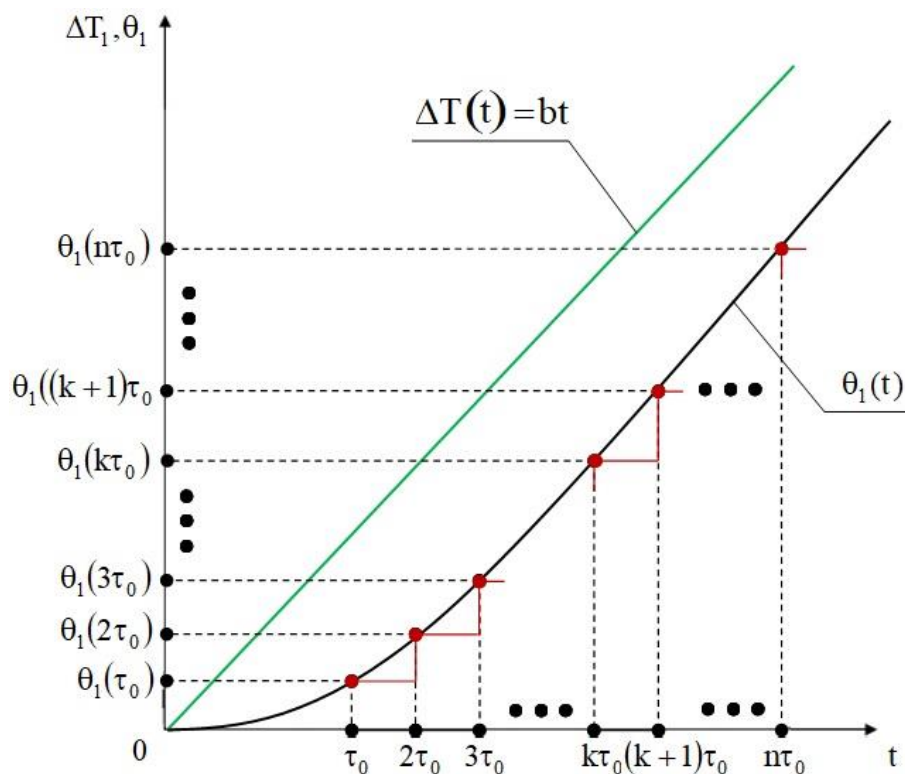


Рис. 3.2. Залежності температури від часу в тепловій камері $T(t)$ та чутливого елемента сповіщувача $\theta_1(t)$

Вираз для цього сигналу має вигляд [90]

$$\theta_1(t) = L^{-1}[W(p)\Delta T(p)] = L^{-1}[W(p)bp^{-2}] \quad (3.10)$$

Враховуючи те, що передаточна функція теплового пожежного сповіщувача для даного випадку приймає вигляд

$$W(p) = (\tau p + 1)^{-1}, \quad (3.11)$$

то для $\theta_1(t)$ згідно із (3.11) буде мати місце

$$\theta_1(t) = b \left[t - \tau \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \right] = b[t - \tau\theta_0(t)], \quad (3.12)$$

де $\theta_0(t)$ – одинична перехідна функція теплового пожежного сповіщувача.

Для $\theta_0(t)$ має місце співвідношення

$$\theta_0(t) = L^{-1}[W(p)p^{-1}] = L^{-1}[(\tau p + 1)p^{-1}] = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (3.13)$$

Із (3.13), для одиничної перехідної функції $\theta_0(t)$ витікає залежність

$$\tau\theta_0(t) = H(t) = t - b^{-1}\theta_1(t), \quad (3.14)$$

де $H(t)$ – перехідна функція теплового пожежного сповіщувача, яка відрізняється від одиничної перехідної функції $\theta_0(t)$ масштабом.

Якщо в моменти часу, що відстоять друг від друга на однаковий апріорі заданий інтервал, який дорівнює τ_0 , здійснювати вимір перевищення вихідного сигналу відносно його значення в попередній момент часу, тобто

$$\Delta\theta_{1k} = \theta_1(k\tau_0) - \theta_1((k-1)\tau_0), \quad k = \overline{1, n}, \quad (3.15)$$

то для вихідного сигналу $\theta_1(t)$ можна записати

$$\theta_1(t) = \sum_{k=1}^n \Delta\theta_{lk} \cdot l(k\tau_0), \quad (3.16)$$

де $l(k\tau_0)$ – функція Хевісайда.

Із урахуванням (3.16) вираз (3.14) трансформується наступним чином

$$H(t) = t - b^{-1} \sum_{k=1}^n \Delta\theta_{lk} \cdot l(k\tau_0). \quad (3.17)$$

Вибір величини n – кількості вимірів вихідного сигналу теплового пожежного сповіщувача здійснюється за умов (3.15) та

$$n\tau_0 = t_c, \quad (3.18)$$

де t_c – час спрацьовування сповіщувача.

Виходячи з того, що величина τ_0 визначається відповідно до теореми Котельнікова

$$\tau_0 = \frac{1}{2f_m}, \quad (3.19)$$

де f_m – максимальна величина частоти спектру функції $\theta_1(t)$, то при об'єднанні виразів (3.18) та (3.19) одержуємо вираз для параметра n

$$n = 2f_m t_c. \quad (3.20)$$

У цьому виразі величина параметра t_c обирається в залежності від величини швидкості зростання температури у робочому об'ємі теплової камери та нормується діючим стандартом. Наприклад, для країн в яких діючим нормативним документом є EN 54-5, для сповіщувачів класу А1 при $a=0,5$ °C/c максимальний час спрацьовування складає 100 с.

Величина f_m обирається з урахуванням спектральної щільності теплового впливу. На рис. 3.3 показані температурні режими пожеж в будинках та спорудах різного призначення [91].

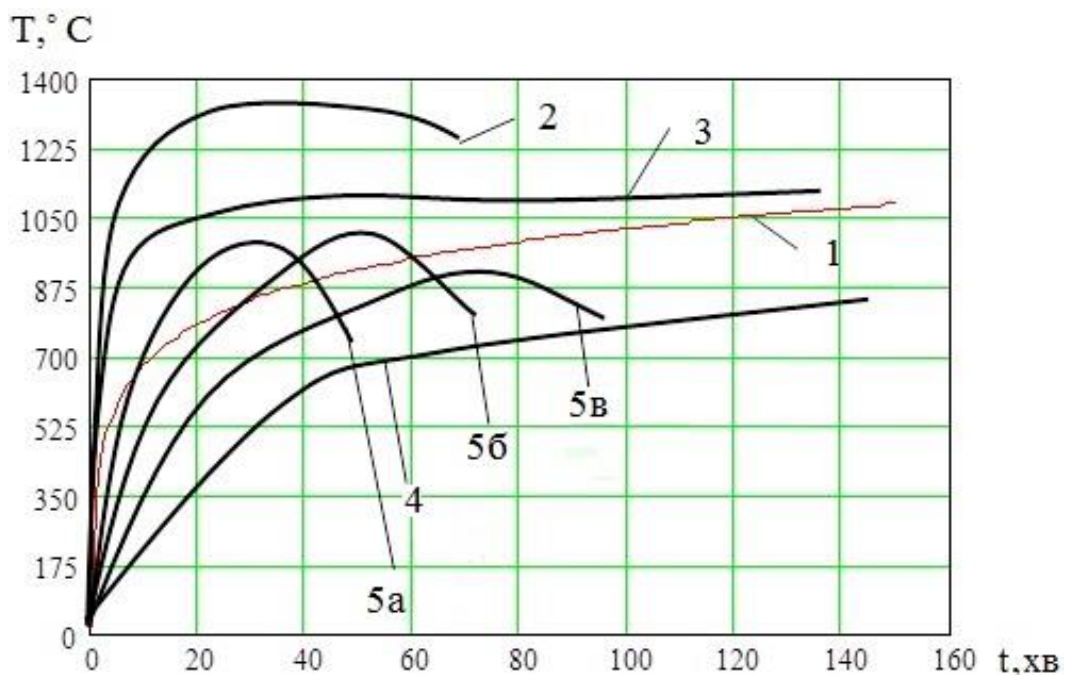


Рис. 3.3. Температурні режими пожежі в приміщеннях будинків та споруд різного призначення: 1 – стандартна температурна крива пожежі; 2 – для пожеж у тунелях; 3 – для пожеж у спорудах нафтопереробної та хімічної промисловості; 4 – для пожеж у підвалах; 5а – для пожеж у жилих приміщеннях з площею відкритих проємів 2 м^2 ; 5б – для пожеж у жилих приміщеннях з площею відкритих проємів $1,5 \text{ м}^2$; 5в – для пожеж у жилих приміщеннях з площею відкритих проємів 1 м^2

На початковому етапі розвитку пожежі температура буде різко зростати за лінійним законом, як показано на рис. 3.4. На цьому відрізку

часу тепловий вплив на сповіщувач можна розглянути у вигляді імпульсу форми прямокутного трикутника, як показано на рис. 3.5.

Комплексна спектральна щільність такого імпульсу описується за формулою

$$S(j\omega) = \frac{T_c}{\omega t_{ci}} \left((1 + j\omega t_{ci}) \cdot e^{-j\omega t_{ci}} - 1 \right), \quad (3.21)$$

де T_c – температура спрацьовування сповіщувача, t_{ci} – час досягнення температури спрацьовування.

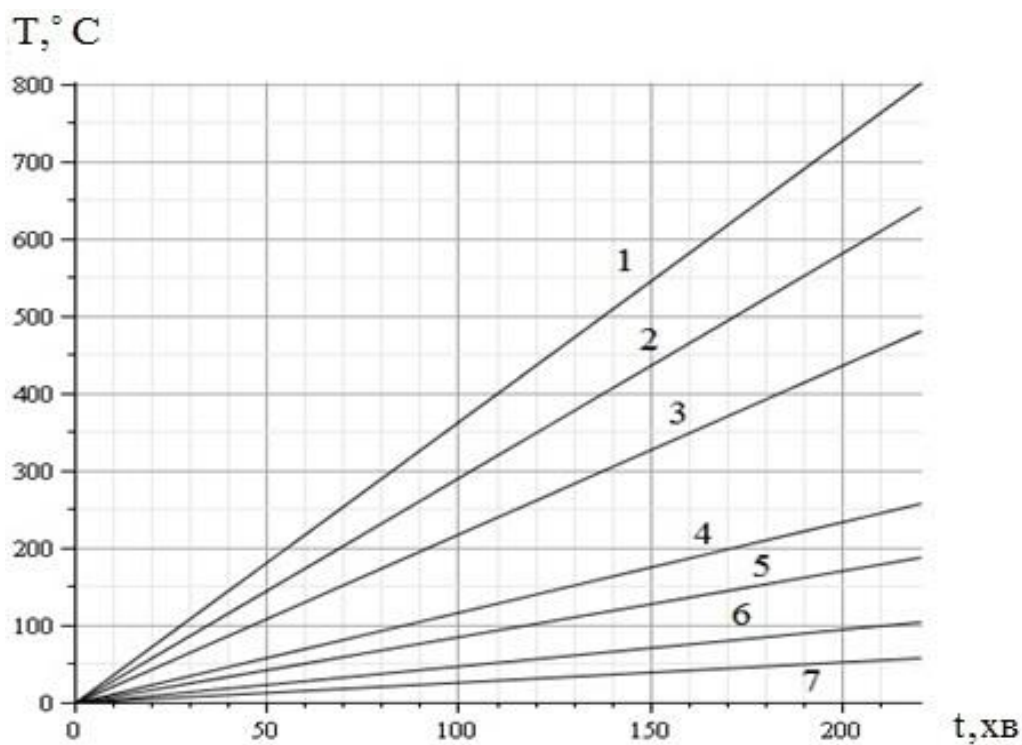


Рис. 3.4. Температурні режими пожежі в приміщеннях будинків та споруд різного призначення у момент її розвитку: 1 – для пожеж у тунелях; 2 – для пожеж у спорудах нафтопереробної та хімічної промисловості; 3 – стандартна температурна крива пожежі; 4 – для пожеж у жилих приміщеннях з площею відкритих проємів 2 м^2 ; 5 – для пожеж у жилих приміщеннях з площею відкритих проємів $1,5 \text{ м}^2$; 6 – для пожеж у жилих приміщеннях з площею відкритих проємів 1 м^2 ; 7 – для пожеж у підвалах

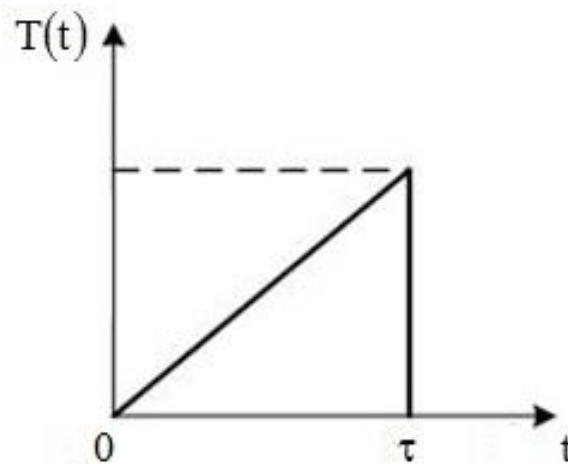


Рис.3.5. Імпульс теплового впливу у вигляді прямокутного трикутника

Якщо представити $e^{-j\omega t_{ci}}$ у тригонометричній формі, то вираз (3.21) приймає вигляд

$$\begin{aligned}
 S(j\omega) &= \frac{T_c}{\omega t_{ci}} ((\cos \omega t_{ci} - j \sin \omega t_{ci})(1 + j\omega t_{ci}) - 1) = \\
 &= \frac{T_c}{\omega t_{ci}} (\cos \omega t_{ci} + \omega t_{ci} \sin \omega t_{ci} - 1 - j(\sin \omega t_{ci} - \omega t_{ci} \cos \omega t_{ci})).
 \end{aligned}
 \tag{3.22}$$

Тоді спектральна щільність буде описуватися формулою

$$S(\omega) = \frac{T_c}{\omega t_{ci}} \sqrt{(\cos \omega t_{ci} + \omega t_{ci} \sin \omega t_{ci} - 1)^2 + (\sin \omega t_{ci} - \omega t_{ci} \cos \omega t_{ci})^2}. \tag{3.23}$$

На рис. 3.6 представлені спектральні щільності температурних режимів пожеж, що приведені на рис. 3.3. Для них, на рівні 5% від максимальної щільності, було визначено максимальну частоту спектральної характеристики за формулою

$$f_m = \frac{\omega_m}{2\pi}. \tag{3.24}$$

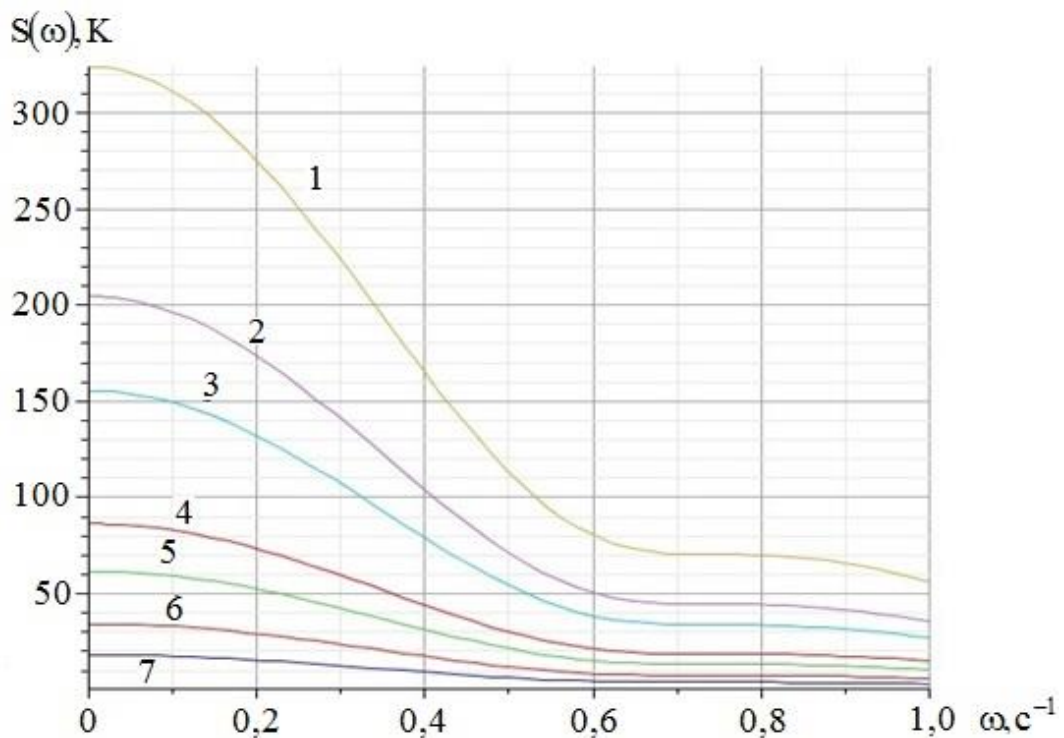


Рис.3.6. Спектральна щільність температурних режимів пожеж: 1 – для пожеж у тунелях; 2 – для пожеж у спорудах нафтопереробної та хімічної промисловості; 3 – стандартна температурна крива пожежі; 4 – для пожеж у жилих приміщеннях з площею відкритих проємів 2 м^2 ; 5 – для пожеж у жилих приміщеннях з площею відкритих проємів $1,5 \text{ м}^2$; 6 – для пожеж у жилих приміщеннях з площею відкритих проємів 1 м^2 ; 7 – для пожеж у підвалах

Графіки максимальної частоти спектральної характеристики температурних режимів пожежі, що приведено на рис. 3.7. Виходячи із аналізу графіків, що представлений на рис. 3.7, можна зробити висновок, що максимальну частоту спектральної характеристики слід обрати $f_m = 0,54$.

Таким чином, алгоритм визначення перехідної функції ТПС здійснюється наступним чином:

- установка сповіщувача у робочому об'ємі теплової камери;
- створення на сповіщувач лінійно-зростаючого теплового впливу, швидкість зміни якого обирається у відповідності з діючим нормативним документом;

- вимірювання в кожний з моментів часу, що відстають один від одного на заданий інтервал, перевищення величини вихідного сигналу сповіщувача відносно попереднього моменту часу;
- визначення перехідної функції сповіщувача за формулою (3.17).

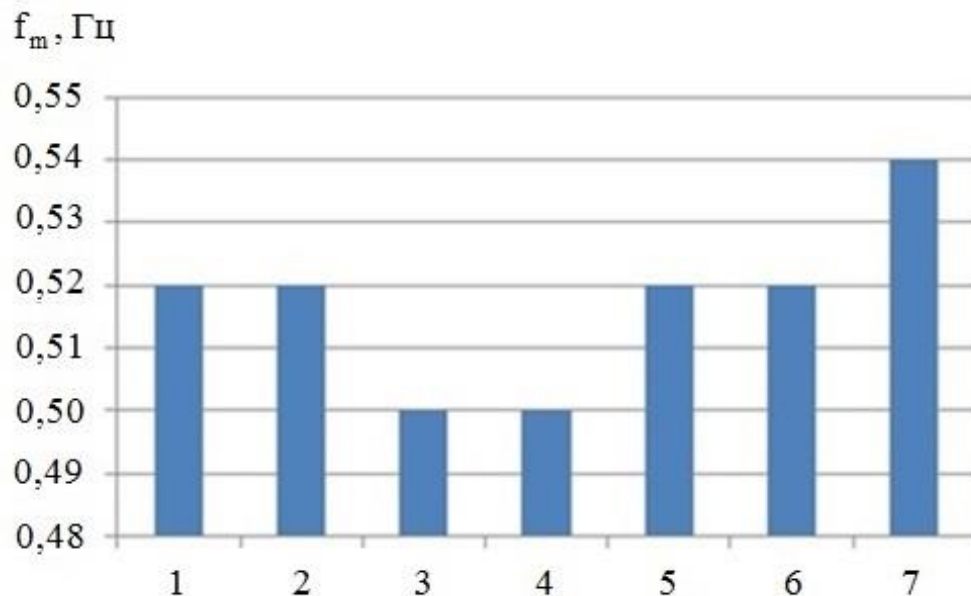


Рис.3.7. Величина максимальної частоти спектральної характеристики для різних температурних режимів пожеж, що представлені на рис. 20

Однак, кінцеве рішення щодо вибору інтервалу дискретності τ_0 повинно бути прийняте з урахуванням точного критерію. На рис.3.8 наведені графіки перехідної функції ТПС класу А1 з постійною часу $\tau=20$ с (EN 54-5), що були визначені за формулою (3.17) при різних інтервалах дискретності [92]. Зразкова перехідна функція сповіщувача, визначається виразом

$$\theta(t) = K \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right), \quad (3.25)$$

де K – коефіцієнт (в розглянутому прикладі $K=20$).

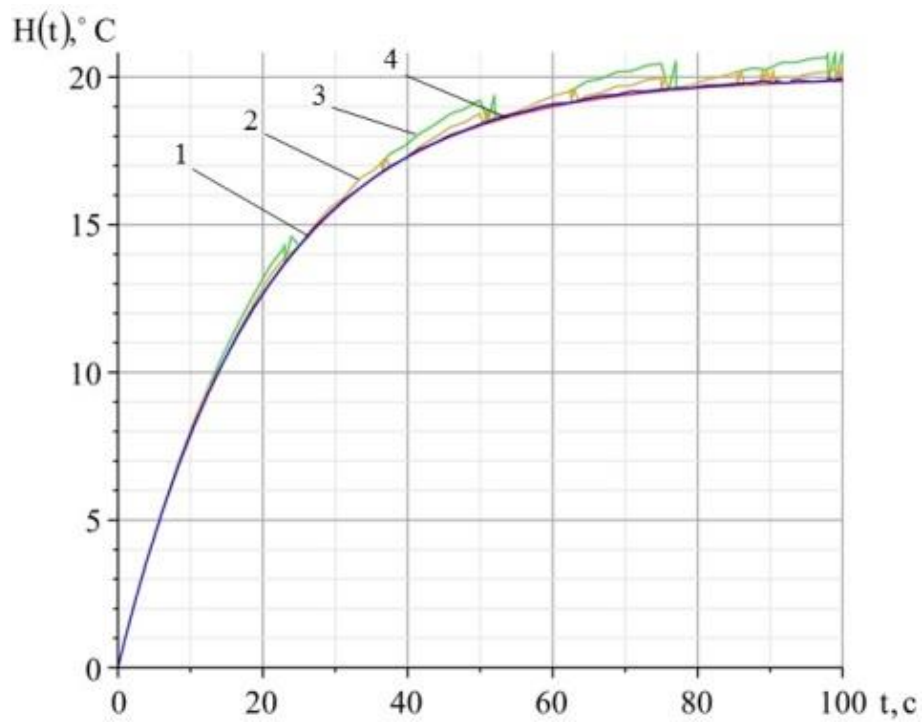


Рис. 3.8. Перехідні функції теплового пожежного сповісвача с постійною часу $\tau=20$ с, що визначені при різних інтервалах дискретності: 1 – $\tau_0=0,1$ с; 2 – $\tau_0=0,5$ с; 3 – $\tau_0=1,0$ с; 4 – зразкова перехідна функція сповісвача

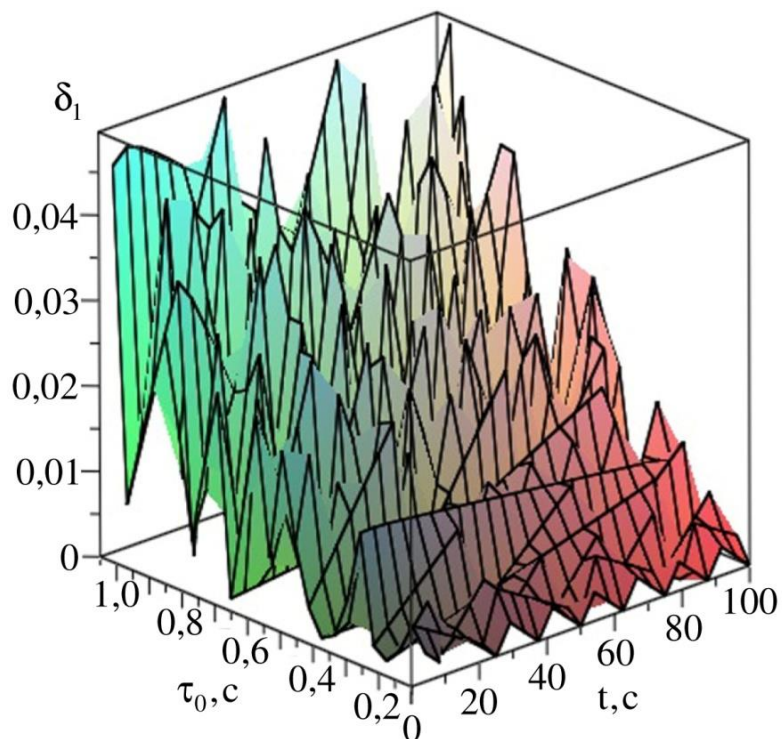


Рис. 3.9. Залежність величини похибки від інтервалу дискретності для перехідної функції ТПС з постійною часу $\tau=20$ с

Похибка при визначенні перехідної функції сповіщувача визначається виразом

$$\delta_1 = \left| 1 - \frac{H(t)}{\theta(t)} \right|. \quad (3.26)$$

На рис. 3.9 приведена графічна залежність для похибки δ_1 при визначенні перехідної функції ТПС з постійною часу $\tau = 20$ с від інтервалу дискретності.

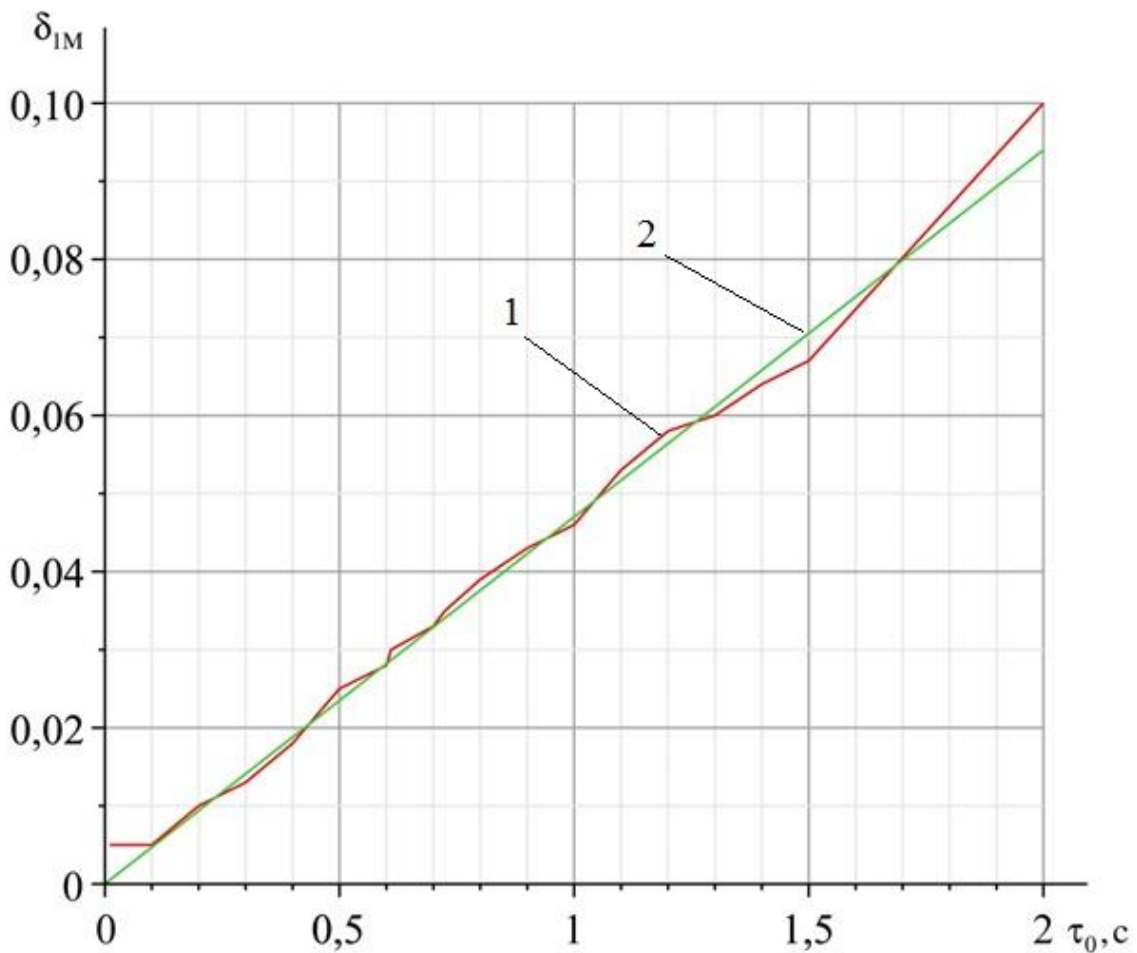


Рис. 3.10. Залежність величини похибки від інтервалу дискретності для перехідної функції ТПС з постійною часу $\tau = 20$ с: 1 – графік залежності максимальної величини похибки при визначенні перехідної функції ТПС від величини інтервалу дискретності; 2 – апроксимація цієї залежності

На рис. 3.10 представлена залежність максимальної величини похибки δ_{1M} при визначенні перехідної функції ТПС від величини інтервалу дискретності і апроксимація цієї залежності, що описується виразом

$$\delta_{1M} = 0,047 \cdot \tau_0. \quad (3.27)$$

Із аналізу залежностей, що представлені на рис. 3.9, витікає, що для перехідної функції ТПС з постійною часу $\tau = 20$ с з похибкою, що не перевищує 5 %, необхідно використовувати інтервал дискретності $\tau_0 \leq 1,05$ с.

3.3. Частотні характеристики теплових пожежних сповіщувачів та методи їх визначення

3.3.1. Аналітичні методи визначення частотних характеристик теплових пожежних сповіщувачів

Інформація про динамічні характеристики ТПС у частотній області дозволить проводити випробування сповіщувачів без їх спрацьовування. Також на основі цієї інформації можна визначати інші характеристики сповіщувача, зокрема постійну часу.

До частотних характеристик ТПС відносяться амплітудно-фазова частотна, амплітудно-частотна та фазово-частотна характеристики сповіщувача, які визначаються на основі значень амплітуди та фази усталених коливань вихідного сигналу сповіщувача при подачі на його вхід гармонічного сигналу.

Методи визначення частотних характеристик ТПС поділяються на аналітичні та експериментальні. Аналітичні методи визначення частотних характеристик сповіщувача здійснюється на основі інформації про його

передаточну функцію. Амплітудно-фазова частотна функція $W(j\omega)$ може бути отримана із передаточної функції сповіщувача $W(p)$ шляхом заміни аргументу p на аргумент $j\omega$. Для випадку коли на сповіщувач створюється зовнішній тепловий вплив, його передаточна функція описується рівнянням (3.5), тоді вираз для амплітудно-фазової частотної характеристики приймає вигляд

$$W(j\omega) = W(p)|_{p=j\omega}, \quad (3.28)$$

де j – уявна одиниця, ω – кругова частота.

Амплітудно-фазова частотна характеристика пов'язана з амплітудно-частотною та фазово-частотною характеристикою наступним чином

$$W(j\omega) = N(\omega) + jM(\omega) = A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}, \quad (3.29)$$

де $A(\omega)$ та $\varphi(\omega)$ – відповідно амплітудно-частотна та фазово-частотна характеристики ТПС, а $N(\omega)$, $M(\omega)$ – дійсна та уявна складові амплітудно-фазової частотної характеристики, що визначаються виразами

$$N(\omega) = \frac{K_{\Pi}}{1 + \omega^2 \tau^2}; \quad (3.30)$$

$$M(\omega) = \frac{K_{\Pi} \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}. \quad (3.31)$$

Амплітудно-частотна характеристика сповіщувача є залежністю відношення амплітуди його вихідного гармонічного сигналу до амплітуди його вхідного гармонічного сигналу від частоти [36]. Виходячи з виразу

(3.29), а також з урахуванням виразів (3.30), (3.31) витікає, що амплітудно-частотна характеристика ТПС описується виразом

$$A(\omega) = \text{mod } W(j\omega) = [N^2(\omega) + M^2(\omega)]^{0.5} = \frac{K_{II}}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}. \quad (3.32)$$

Фазово-частотною характеристикою сповіщувача є залежність різниці фаз між вихідним та вхідним гармонічними сигналами від частоти, яка виходячи з (3.29) описується виразом

$$\varphi(\omega) = \text{arc } W(j\omega) = \text{arctg} \frac{M(\omega)}{N(\omega)} = -\text{arctg} \omega \tau \quad (3.33)$$

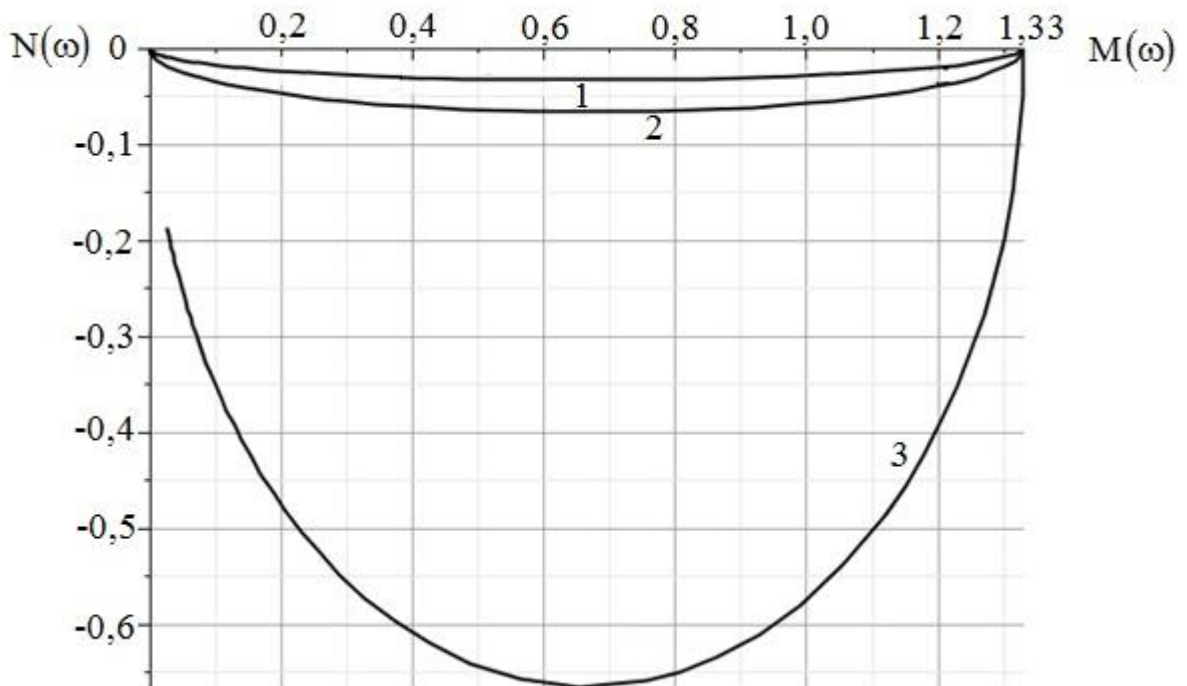


Рис. 3.11. Амплітудно-фазові частотні характеристики ТПС з постійною часу: 1 – 1 с; 2 – 10 с, 3 – 20 с

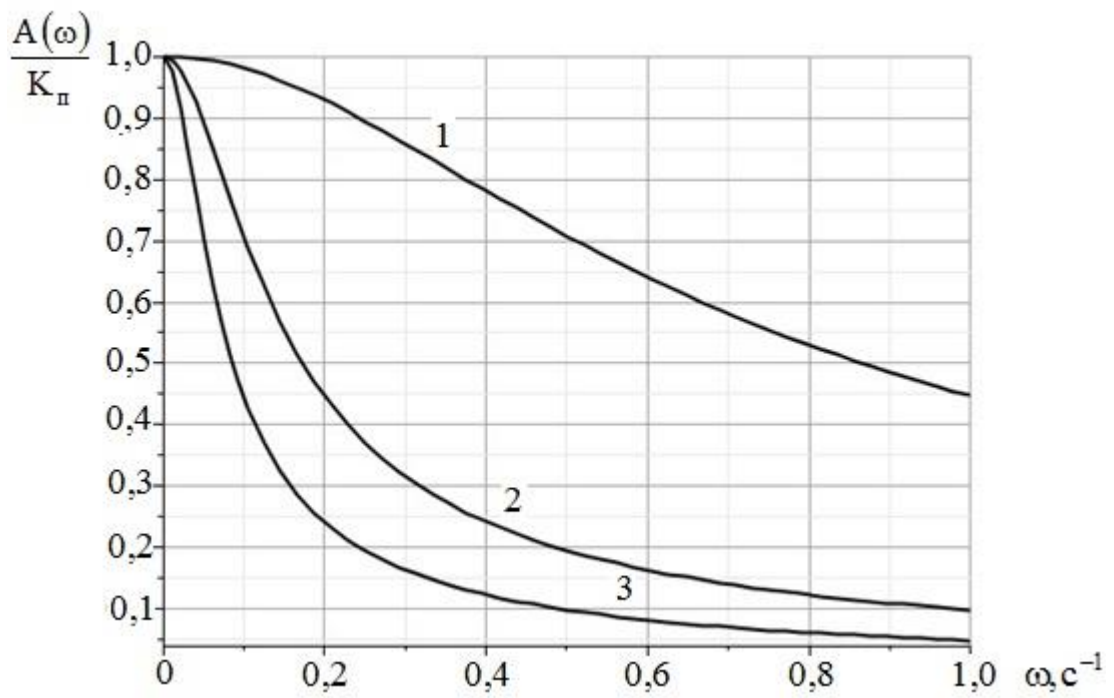


Рис. 3.12. Амплітудно-частотні характеристики ТПС з постійною часу: 1 – 1 с; 2 – 10 с, 3 – 20 с

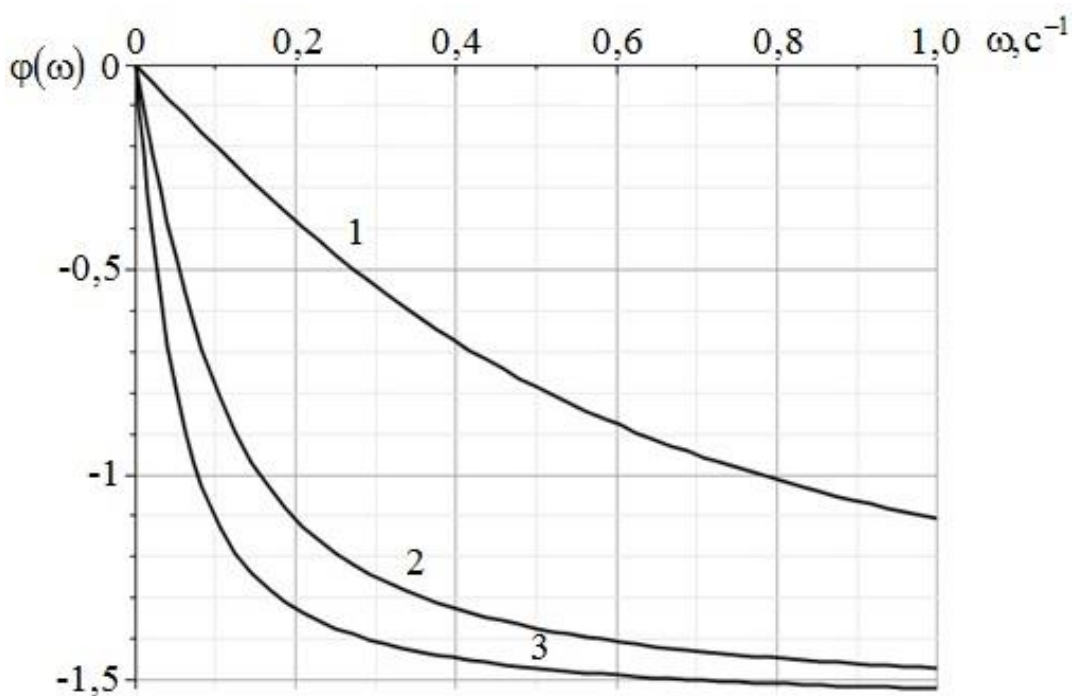


Рис. 3.13. Фазово-частотні характеристики ТПС з постійною часу: 1 – 1 с; 2 – 10 с, 3 – 20 с

Вирази (3.29), (3.32) та (3.33) відповідно є узагальненими моделями амплітудно-фазово частотної, амплітудно-частотної та фазово-частотної характеристик ТПС. На рис.3.11-3.13 представлені графіки цих характеристик.

3.3.2. Експериментальні методи визначення частотних характеристик теплових пожежних сповіщувачів

Класичний експериментальний метод визначення частотних характеристик полягає у наступному:

- формування гармонічного сигналу на сповіщувач;
- вимірюванні амплітуди вихідного сигналу на кожній частоті;
- знаходженні залежності відношення амплітуди вихідного сигналу до амплітуди вхідного сигналу від частоти;
- вимірюванні різниці фаз на кожній частоті;
- побудова амплітудно-частотної, фазово-частотної та амплітудно-фазової частотної характеристик.

Недоліком такого методу є значний час його проведення. Розглянемо на прикладі визначення амплітудно-частотної характеристики. Вимірювання амплітуди вихідного сигналу проводиться у усталеному режимі, тобто час вимірювання одного значення амплітуди вихідного сигналу складе $(3 \div 5)\tau$. Такі вимірювання здійснюються на кожній з n частот, де n приблизно дорівнює 50-60. Тобто загальний час визначення частотних характеристик складає $(3 \div 5)n\tau$ (аналогічно і для фазово-частотної характеристики).

У [93] запропоновано метод визначення частотних характеристик сповіщувача, що усуває недоліки класичного методу. У цьому методі визначення частотних характеристик ТПС здійснюється на основі інформації про його перехідну функцію. Вираз (3.17) є перехідною функцією ТПС при впливі на нього тепловим потоком у вигляді лінійно-

зростаючого теплового потоку. Такій перехідній функції буде відповідати еквівалентний тепловий вплив у вигляді перепаду температур $T_1 - T_0$ [94]

$$\Delta T(t) = (T_1 - T_0) \cdot 1(t), \quad (3.34)$$

причому

$$T_1 - T_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} \theta(t). \quad (3.35)$$

Функція $\theta(t)$ апроксимується виразом

$$\theta(t) = \sum_{k=0}^n \Delta \theta_k \cdot 1(t - (k + 0,5)\tau_0). \quad (3.36)$$

Графічна інтерпретація такої апроксимації пояснюється на рис.3.14

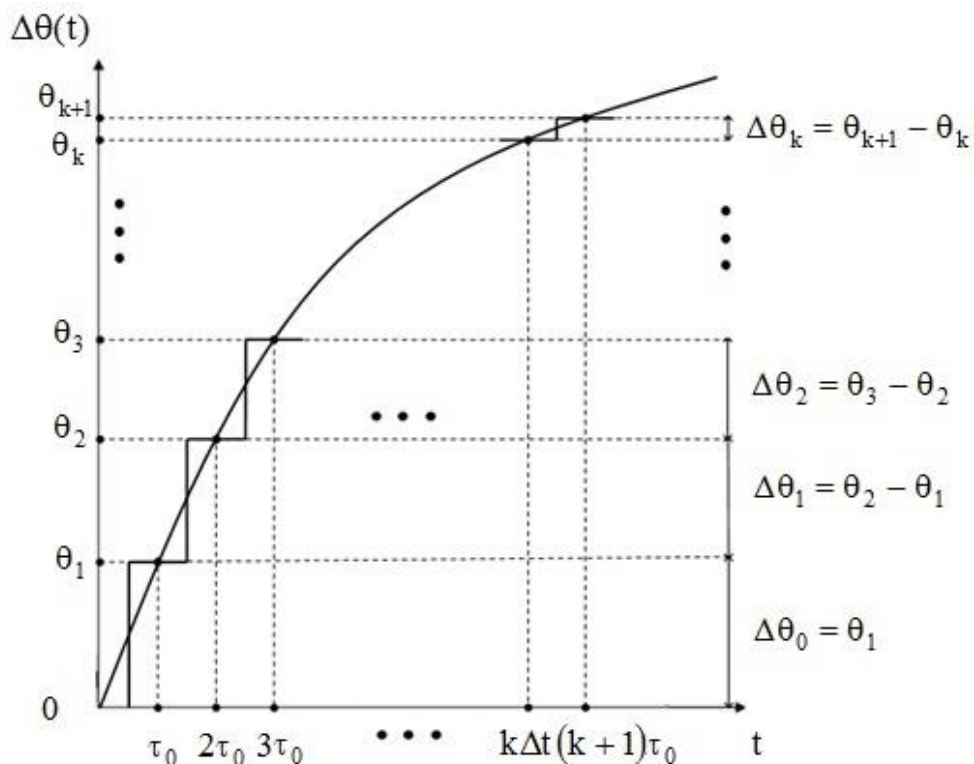


Рис. 3.14. Залежність температури чутливого елемента від часу при стрибкоподібній зміні температури зовнішнього середовища

Застосувавши до (3.36) інтегральне перетворення Лапласа, отримаємо

$$\Delta\theta(p) = \int_0^{\infty} \Delta\theta(t) \exp(-pt) dt = p^{-1} \sum_{k=0}^n \Delta\theta_k \cdot \exp[-p(k + 0,5)\tau_0] \quad (3.37)$$

Для даного випадку рівняння (3.1) трансформується наступним чином

$$W(p) = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta T(p)}, \quad (3.38)$$

де $\Delta T(p)$ – зображення по Лапласу від функції, яка описує тепловий вплив на чутливий елемент пожежного сповіщувача, що описується рівнянням

$$\Delta T(p) = (T_1 - T_0)p^{-1}. \quad (3.39)$$

З урахуванням (3.36) та (3.39) вираз для передаточної функції можна записати як

$$W(p) = (T_1 - T_0)^{-1} \sum_{k=0}^n \Delta\theta_k \cdot \exp[-p(k + 0,5)\tau_0] \quad (3.40)$$

Виходячи з (3.40), амплітудно-фазова частотна характеристика теплового пожежного сповіщувача буде описуватись виразом

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= W(p)|_{p=j\omega} = (T_1 - T_0)^{-1} \sum_{k=0}^n \Delta\theta_k \cdot \exp[-j\omega(k + 0,5)\tau_0] = \\ &= (T_1 - T_0)^{-1} \sum_{k=0}^n \Delta\theta_k [\cos[\omega(k + 0,5)\tau_0] - j\sin[\omega(k + 0,5)\tau_0]]. \end{aligned} \quad (3.41)$$

Внаслідок того, що амплітудно-частотна характеристика $A(\omega)$ та фазово-частотна характеристика $\varphi(\omega)$ теплового сповіщувача пов'язані із амплітудно-фазовою частотною характеристикою $W(j\omega)$, відповідно як показано у (3.32) та (3.33), то можна записати вирази для їх визначення

$$A(\omega) = (T_1 - T_0)^{-1} \left[\left(\sum_{k=0}^n \Delta\theta_k \cdot \cos[\omega(k + 0,5)\tau_0] \right)^2 + \left(\sum_{k=0}^n \Delta\theta_k \cdot \sin[\omega(k + 0,5)\tau_0] \right)^2 \right]^{0,5} ; \quad (3.42)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{\sum_{k=0}^n \Delta\theta_k \cdot \sin[\omega(k + 0,5)\tau_0]}{\sum_{k=0}^n \Delta\theta_k \cdot \cos[\omega(k + 0,5)\tau_0]} . \quad (3.43)$$

Виходячи з цього, вимірюючи в кожний з моментів часу, які відстоять один від одного на інтервал τ_0 , що визначають за теоремою Котельнікова, а також з урахуванням рекомендацій, приведених в п. 3.2 величину зростання температури $\Delta\theta_k$ ЧЕ ТПС відносно попереднього моменту часу та використання виразів (3.42) та (3.43), забезпечують визначення частотних характеристик ТПС, значення яких можуть бути використані для контролю їх технічного стану.

Для оцінки похибки при визначенні частотних характеристик теплових пожежних сповіщувачів було розглянуто сповіщувачі, з постійними часу $\tau = (5; 10; 20)$ с. Температура середовища θ , в якому вони знаходились, стрибкоподібно змінювалась з 25°C до 54°C .

За формулами (3.42) та (3.43) були визначені амплітудно-частотні та фазово-частотні характеристики сповіщувачів при інтервалах дискретності $\tau_0 = (0,15; 1; 2;)$ с. Графіки амплітудно-частотних та фазово-частотних характеристик сповіщувача з постійною часу $\tau = 20$ с для різних інтервалів

дискретності представлені відповідно на рис. 3.15 та рис. 3.16. Ці частотні характеристики порівнювались із зразковими частотними характеристиками $A_0(\omega)$ та $\varphi_0(\omega)$, вирази для яких мають вигляд:

$$A_0(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}; \quad (3.44)$$

$$\varphi_0(\omega) = -\arctg \omega \tau \quad (3.45)$$

На основі отриманих результатів було розраховано похибку при визначенні динамічних характеристик у частотній області. Залежності похибки при визначенні амплітудно-частотних характеристик та фазово-частотних характеристик від величини постійної часу сповіщувача та інтервалу дискретності представлені відповідно на рис. 3.17 та рис. 3.18.

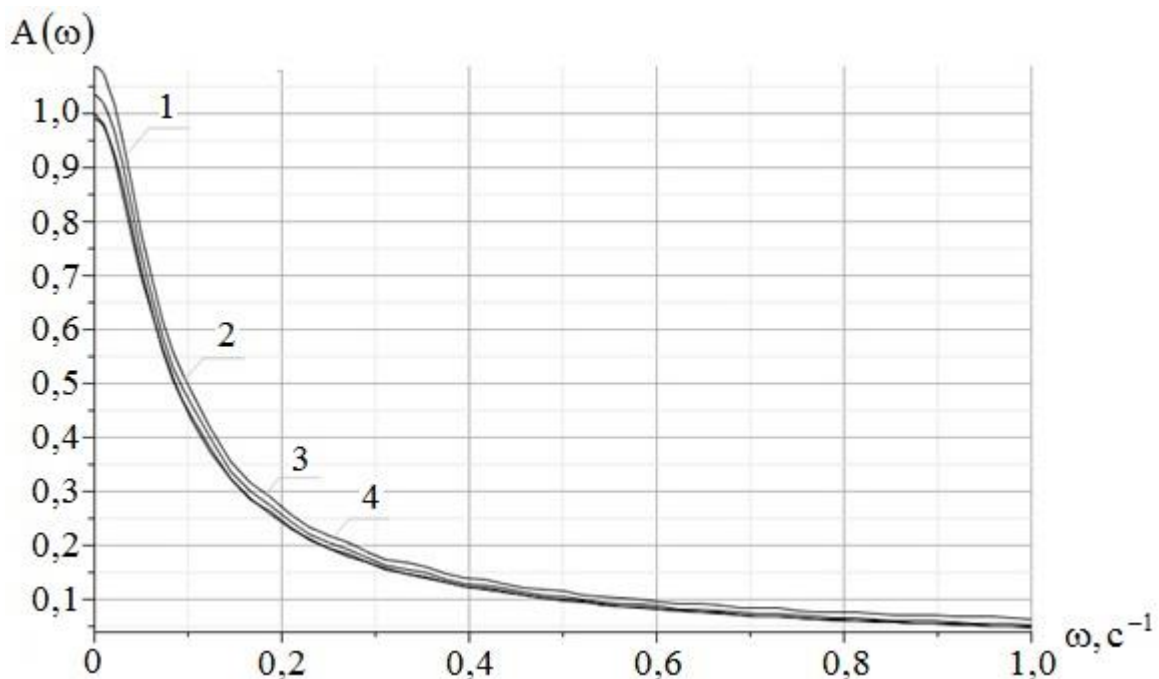


Рис. 3.15. Графіки амплітудно-частотних характеристик сповіщувача з постійною часу 20 с при різних інтервалах дискретності τ_0 : 1 – $\tau_0=2$ с; 2 – $\tau_0=1$ с; 3 – $\tau_0=0,15$ с; 4 – зразкова амплітудно-частотна характеристика для $\tau = 20$ с

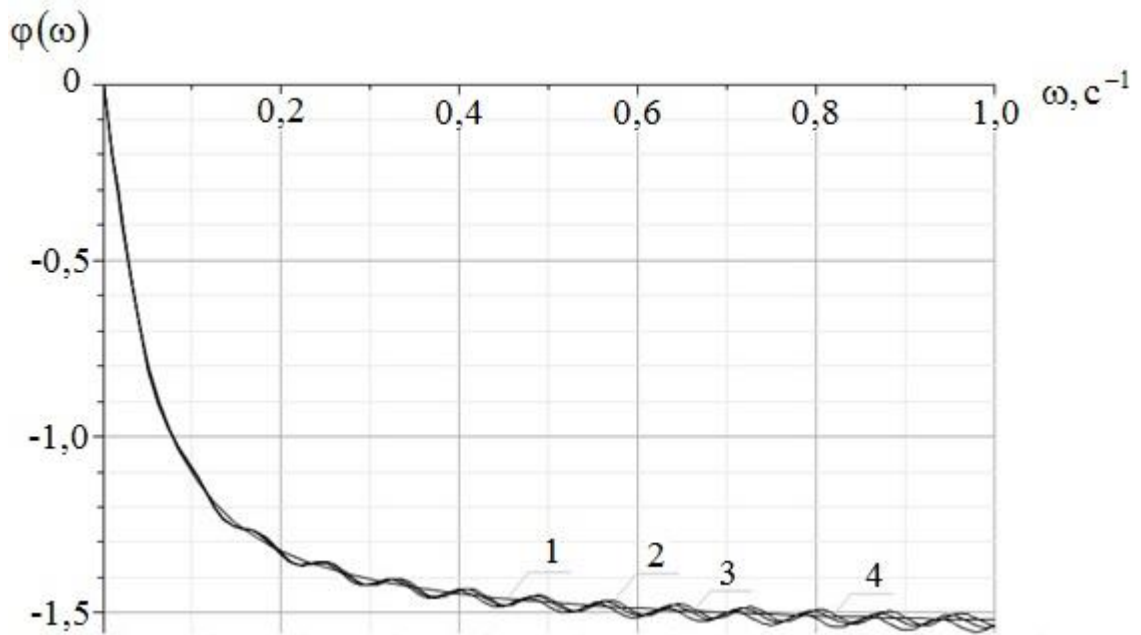


Рис. 3.16. Графіки фазово-частотних характеристик сповіщувача з постійною часу 20 с при різних інтервалах дискретності τ_0 : 1 – зразкова фазово-частотна характеристика для $\tau = 5$ с; 2 – $\tau_0 = 2$ с; 3 – $\tau_0 = 1$ с; 4 – $\tau_0 = 0,15$ с

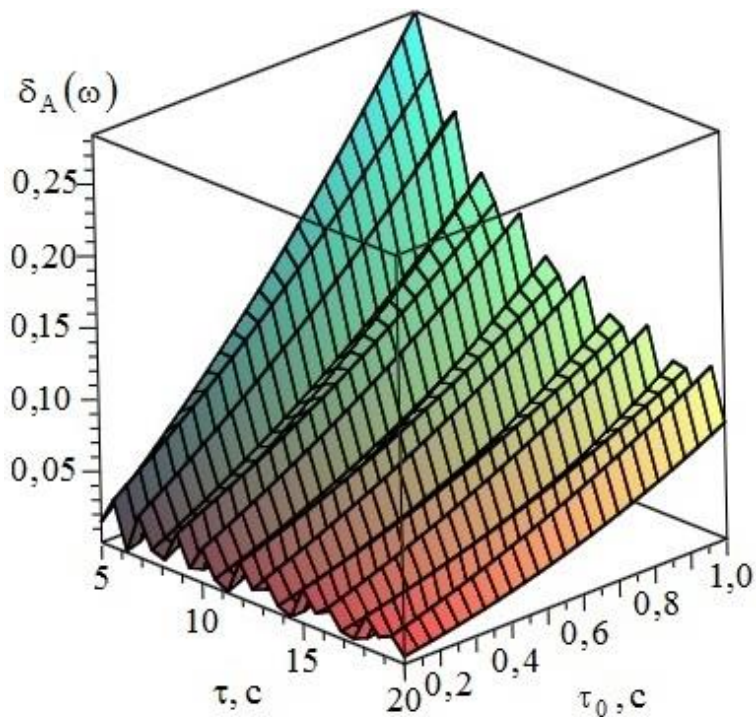


Рис. 3.17. Залежність похибки визначення амплітудно-частотних характеристик сповіщувача від його постійної часу та інтервалу виміру температури

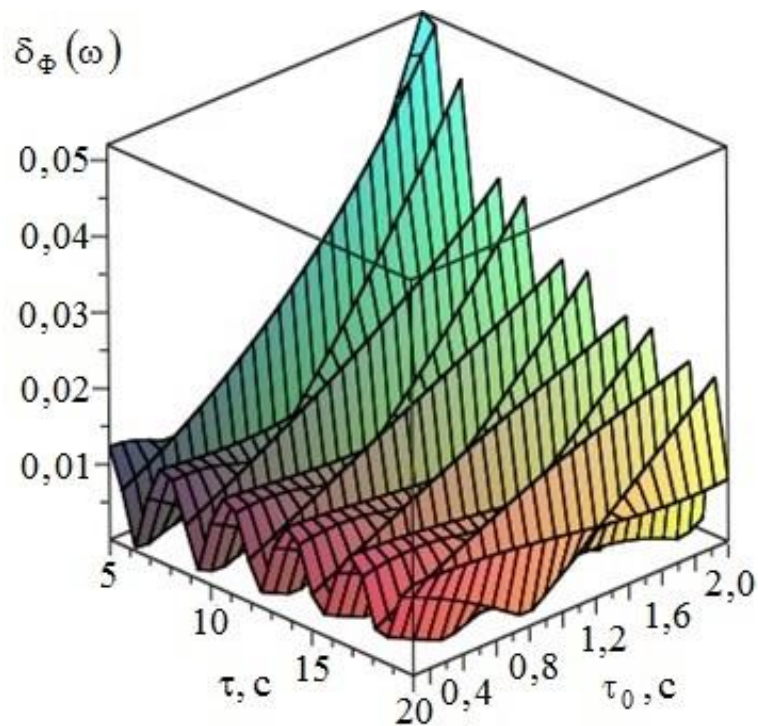


Рис. 3.18. Залежність похибки визначення фазово-частотних характеристик сповіщувача від його постійної часу та інтервалу виміру температури

Враховуючи те, що допустиме значення похибки не повинно перевищувати 5% [3], визначимо межі параметрів при визначенні амплітудно-фазових характеристик теплових пожежних сповіщувачів. Максимальна похибка при визначенні амплітудно-частотних характеристик теплових пожежних сповіщувачів при інтервалі дискретності $\tau_0 = 1$ с для сповіщувачів з постійною часу $\tau = (5; 10; 20)$ с відповідно буде складати 28,4%, 17,1% та 8,2% (рис. 3.16). Так як похибка не повинна перевищувати 5%, то для сповіщувачів з постійною часу $\tau = 5$ с доцільним буде обрати інтервал дискретності $\tau_0 \leq 0,24$ с, для сповіщувача з постійною часу $\tau = 10$ с інтервал дискретності повинен бути $\tau_0 \leq 0,30$ с, а для сповіщувача з постійною часу 20 с – $\tau_0 \leq 0,73$ с.

Максимальна похибка при визначенні фазово-частотних характеристик теплових пожежних сповіщувачів при інтервалі дискретності $\tau_0 = 2$ с для сповіщувачів з постійною часу $\tau = (5; 10; 20)$ с відповідно буде складати 5,2%, 3,3% та 1,2% (рис. 3.17), тому для

сповіщувачів з постійною часу $\tau=(10; 20)$ с доцільним буде обрати інтервал дискретності $\tau_0 \leq 2$ с, а для сповіщувача з постійною часу $\tau=5$ с – $\tau_0 \leq 1,97$ с [94].

Слід зауважити, що такий підхід не ураховує інерційні властивості приладу, що створює тепловий вплив. Метод, що усуває цей недолік наведено в [95]. На відміну від першого методу, тепловий вплив на ЧЕ ТПС буде описуватися виразом

$$\Delta T(p) = (T_1 - T_0) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right], \quad (3.46)$$

де τ_1 – постійна часу приладу, що формує тест-вплив на чутливий елемент теплового пожежного сповіщувача.

Тоді для $\Delta T(p)$ згідно з (3.46) можна записати

$$\Delta T(p) = (T_1 - T_0) \cdot [p(\tau_1 p + 1)]^{-1}. \quad (3.47)$$

Після об'єднання (3.37), (3.38) та (3.47) отримаємо вираз для передаточної функції

$$\begin{aligned} W(p) \Big|_{p=j\omega} = W(j\omega) &= (T_1 - T_0)^{-1} (1 + j\omega \tau_1) \sum_{k=0}^n \Delta \theta_k \times \\ &\times \exp[-j\omega(k + 0,5)\tau_0] = (T_1 - T_0)^{-1} (1 + j\omega \tau_1) \times \\ &\times \sum_{k=0}^n \Delta \theta_k [\cos[\omega(k + 0,5)\tau_0] - j \sin[\omega(k + 0,5)\tau_0]]. \end{aligned} \quad (3.48)$$

Постійна часу приладу τ_1 , що створює тепловий вплив на чутливий елемент теплового пожежного сповіщувача, визначається з виразу

$$\tau_1 = t_{ct} m^{-1}, \quad (3.49)$$

де t_{ct} – час досягнення температури ЧЕ ТПС сталого значення, m – число, причому $m \geq 4,0$. Якщо $m \geq 4,0$, то величина методичної похибки при визначенні параметра не перевищує 2%.

Виходячи з (3.32), (3.33), (3.48) та (3.49), динамічні характеристики теплового пожежного сповіщувача описуються виразами

$$A(\omega) = (T_1 - T_0)^{-1} \left[1 + (\omega t_{ct} m^{-1})^2 \right]^{0,5} \left[\left(\sum_{k=0}^n \Delta\theta_k \cdot \cos[\omega(k + 0,5)\tau_0] \right)^2 + \left(\sum_{k=0}^n \Delta\theta_k \cdot \sin[\omega(k + 0,5)\tau_0] \right)^2 \right]^{0,5}; \quad (3.50)$$

$$\begin{aligned} \varphi(\omega) &= \arctg(\omega t_{ct} m^{-1}) - \arctg \left[\left[\sum_{k=0}^n \Delta\theta_k \cdot \sin[\omega(k + 0,5)\tau_0] \right] \times \right. \\ &\times \left. \left[\sum_{k=0}^n \Delta\theta_k \cdot \cos[\omega(k + 0,5)\tau_0] \right]^{-1} \right] = \\ &= -\arctg \left[\left[\sum_{k=0}^n \Delta\theta_k [m \sin[\omega(k + 0,5)\tau_0]] - \right. \right. \\ &- \omega t_{ct} \cos[\omega(k + 0,5)\tau_0] \left. \right] \cdot \left[\sum_{k=0}^n \Delta\theta_k \cdot [m \cos[\omega(k + 0,5)\tau_0] + \right. \\ &\left. \left. + \omega t_{ct} \sin[\omega(k + 0,5)\tau_0] \right]^{-1} \right] \end{aligned} \quad (3.51)$$

За формулами (3.50) та (3.51) було визначено амплітудно-частотні та фазово-частотні характеристики сповіщувачів, постійна часу яких $\tau \in [5; 10; 20]$ с при інтервалах дискретності $\tau_0 = (0,15; 1; 2;)$ с. Графіки амплітудно-частотних та фазово-частотних характеристик сповіщувача з постійною часу $\tau = 20$ с для інтервалу дискретності $\tau_0 = 2$ с при різних постійних часу приладу τ_1 , що формує тест-вплив, представлені відповідно на рис. 3.19 та рис. 3.20.

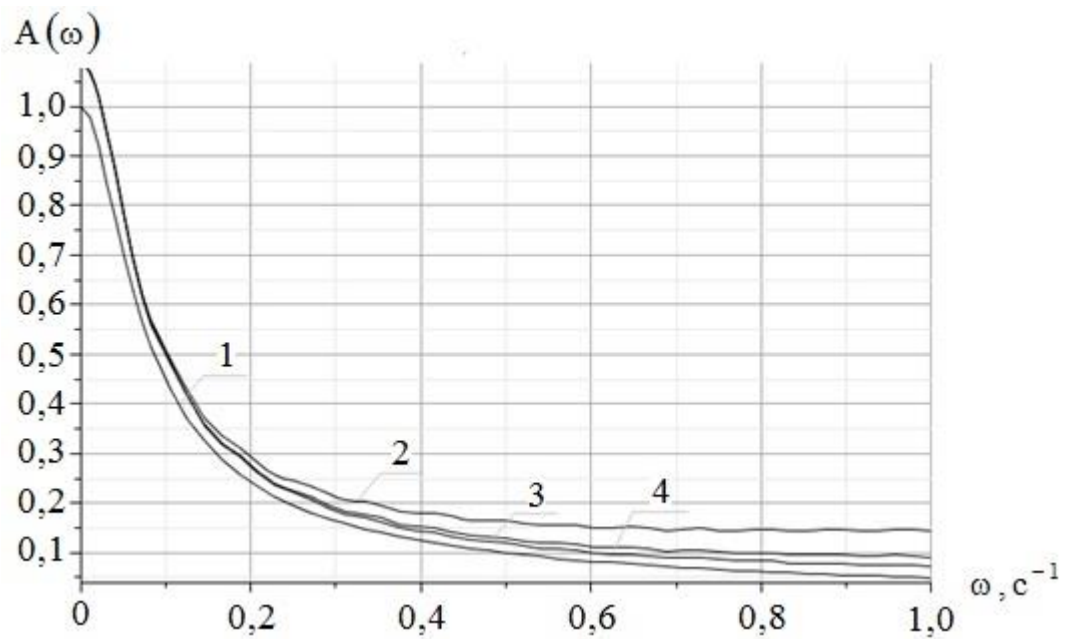


Рис. 3.19. Графіки амплітудно-частотних характеристик сповіщувача з постійною часу $\tau=20$ с при інтервалі вимірювання температури $\tau_0 =2$ с при постійній часу приладу, що формує тест-вплив: 1 – зразкова амплітудно-частотна характеристика, 2 – $\tau_1=2$ с; 3 – $\tau_1=1$ с; 4 – $\tau_1=0.5$ с

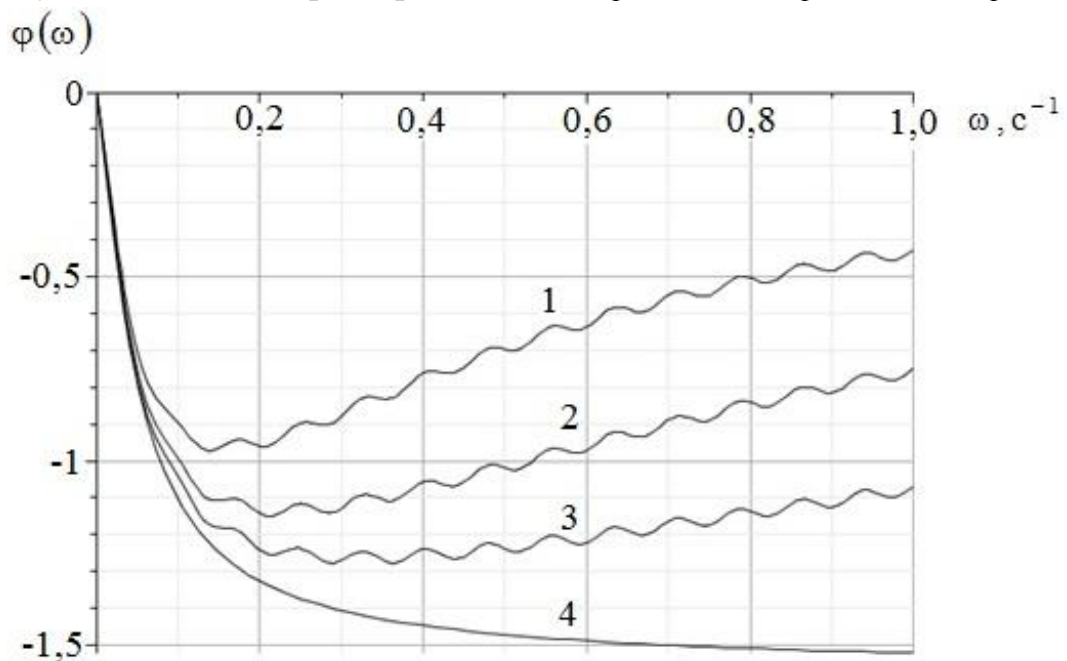


Рис. 3.20. Графіки фазово-частотних характеристик сповіщувача з постійною часу $\tau=20$ с при інтервалі вимірювання температури $\tau_0 =2$ с, якщо постійна часу приладу, що формує тепловий вплив : 1 – $\tau_1=2$ с; 2 – $\tau_1=1$ с; 3 – $\tau_1=0,5$ с; 4 – зразкова амплітудно-частотна характеристика для $\tau=20$ с

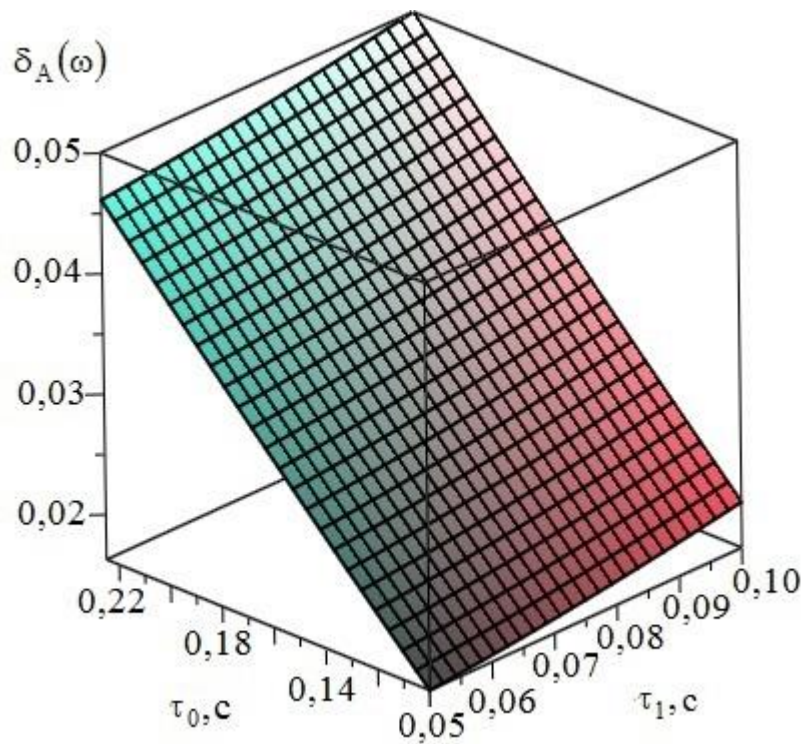


Рис. 3.21. Залежність похибки визначення амплітудно-частотних характеристик сповіщувача від постійної часу приладу τ_1 , що формує тест-вплив та інтервалу дискретності τ_0 для теплового сповіщувача з постійною часу $\tau=5$ с

На основі отриманих результатів було розраховано похибку при визначенні динамічних характеристик сповіщувача у частотній області з урахуванням інерційних властивостей пристрою, що створює тепловий вплив. Залежність похибок при визначенні амплітудно-частотних характеристик від інтервалу дискретності τ_0 та постійної часу приладу τ_1 , що формує тепловий вплив представлена на рис. 3.21-3.23.

Для сповіщувача з постійною часу $\tau=5$ с доцільно обрати інтервал дискретності $\tau_0=0,225$ с та постійну часу приладу, що формує тест-вплив, $\tau_1=0,1$ с, для сповіщувача з постійною часу $\tau=10$ с – інтервал дискретності $\tau_0=0,26$ с та постійну часу приладу, що формує тест-вплив, $\tau_1=0,1$ с, а для сповіщувача з постійною часу $\tau=20$ с – інтервал дискретності $\tau_0=0,68$ с та постійну часу приладу, що формує тест-вплив, $\tau_1=0,1$ с [96].

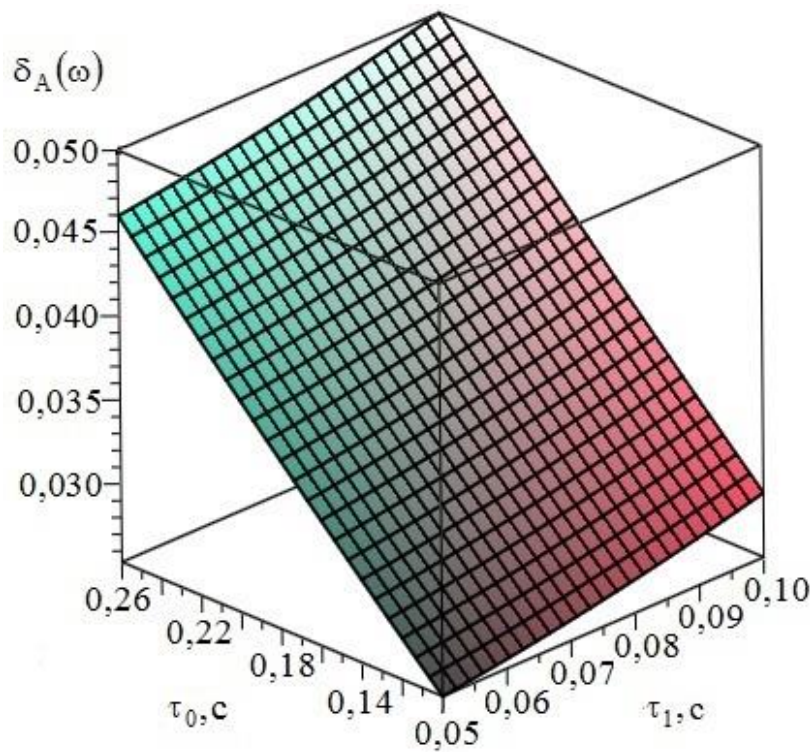


Рис. 3.22. Залежність похибки визначення амплітудно-частотних характеристик сповіщувача від постійної часу приладу τ_1 , що формує тест-вплив та інтервалу дискретності τ_0 для теплового сповіщувача з постійною часу $\tau=10$ с

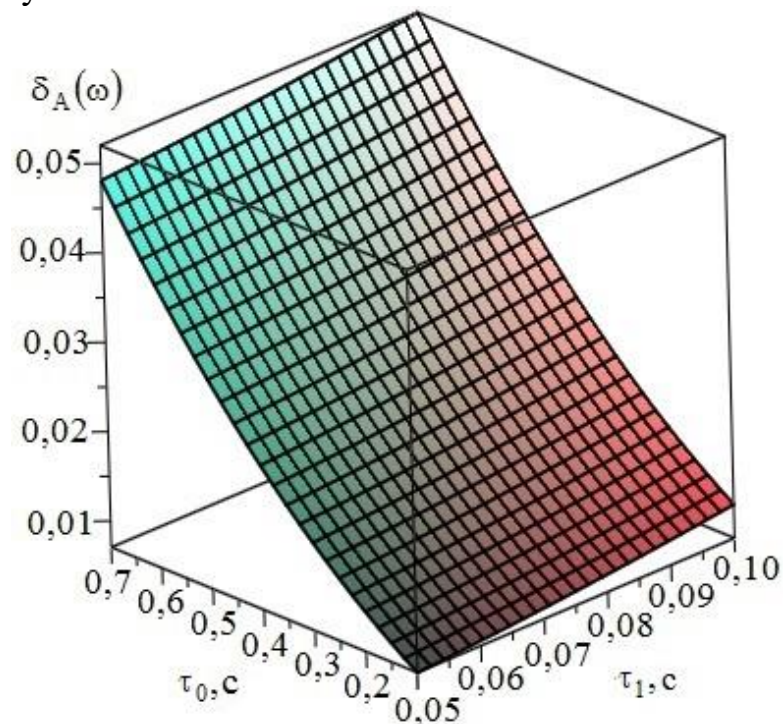


Рис. 3.23. Залежність похибки визначення амплітудно-частотних характеристик сповіщувача від постійної часу приладу τ_1 , що формує тест-вплив та інтервалу дискретності τ_0 для теплового сповіщувача з постійною часу: $\tau=20$ с

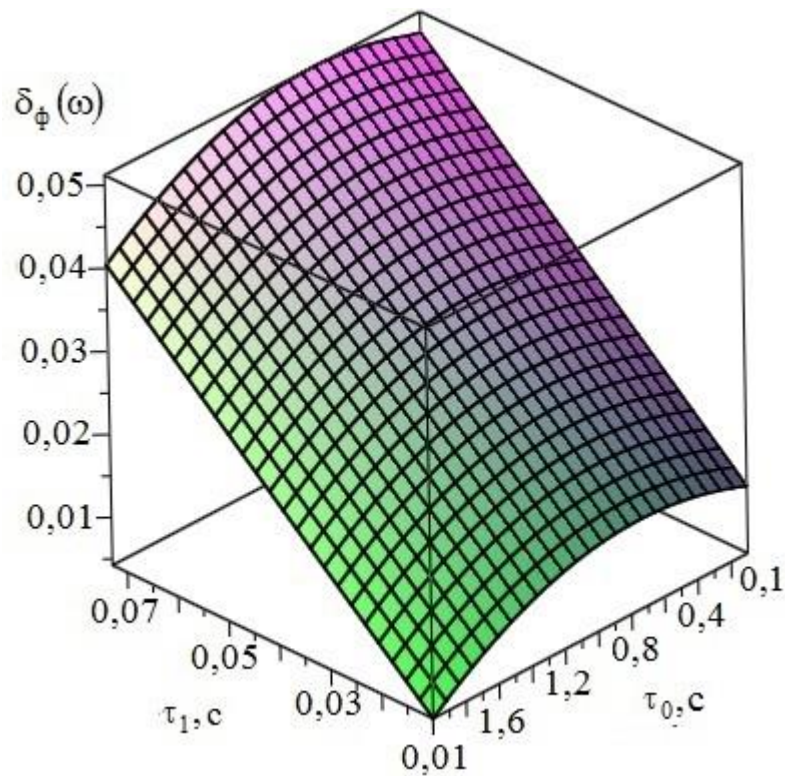


Рис. 3.24. Залежність похибки визначення фазово-частотних характеристик сповіщувача від постійної часу приладу, що створює тепловий вплив τ_1 та інтервалу виміру температури τ_0 для теплового сповіщувача с постійною часу $\tau=20$ с

Графіки залежностей похибки при визначенні фазово-частотних характеристик сповіщувача від інтервалу дискретності τ_0 та постійної часу приладу τ_1 , що формує тепловий вплив, майже співпадають. На рис. 3.24 представлена така залежність для ТПС із постійною часу $\tau=20$ с.

Аналіз залежностей, що представлені на рис. 3.24, показує, що похибка при визначенні фазово-частотних характеристик сповіщувача буде слабо залежати від інтервалу дискретності τ_0 та більшою мірою буде визначатися величиною постійної часу приладу τ_1 , що формує тест-вплив.

Для того, щоб величина похибки не перевищувала 5 %, доцільно обрати інтервал дискретності $\tau_0=2$ с та постійну часу приладу, що формує тест-вплив, $\tau_1=0,073$ с.

3.4. Методи визначення часної динамічної характеристик теплових пожежних сповіщувачів

3.4.1. Визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів при зміні температури впливу на нього за квадратичним законом

До часних динамічних характеристик ТПС, як показано на рис. 3.1., відноситься їх постійна часу [36]. Методи визначення постійної часу ТПС поділяються на аналітичні та експериментальні. Аналітичний метод полягає у знаходженні постійної часу ТПС на основі інформації про його перехідну функцію. Експериментальні методи визначення динамічних характеристик ТПС наведені у [30-35]. Існуючі методи визначення постійної часу ТПС не регламентовані жодним нормативним документом і не визначаються при перевірці їх працездатності, а теплові камери для проведення їх випробувань, не використовуються у повній мірі. У зв'язку з цим були розроблені методи визначення постійної часу ТПС, що можуть бути реалізовані як у існуючих камерах так і безпосередньо на об'єкті.

Припустимо, що температуру теплового впливу на чутливий елемент теплового пожежного сповіщувача змінюють за квадратичним, що зростає у часі, законом [97]

$$T(t) = b \cdot t^2. \quad (3.52)$$

Тоді температура чутливого елемента сповіщувача визначається виразом

$$\theta(t) = L^{-1} \left[W(p) \cdot L \cdot [b \cdot t^2] \right], \quad (3.53)$$

де передаточна функція описується виразом (3.11).

Із (3.53) з урахуванням (3.52) та (3.11)

$$\theta(t) = L^{-1} \left[(\tau p + 1)^{-1} \cdot L \cdot [b \cdot t^2] \right] = 2b \left[0,5t^2 - \tau t + \tau^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \right]. \quad (3.54)$$

Після закінчення перехідних процесів має місце

$$\theta(t) = 2b(0,5t^2 - \tau t + \tau^2) \quad (3.55)$$

Із (3.55) витікає, що для $\theta_i = \text{const}$ буде мати місце

$$t_i = \tau \left[1 + \left(\frac{\theta_i}{b\tau^2} - 1 \right)^{0,5} \right]. \quad (3.56)$$

Якщо прийняти, що

$$\theta_i = \theta_0 + (i - 1)k; \quad i = 1, 2, 3, \quad (3.57)$$

де θ_0 – початкове значення температури чутливого елемента; k – різниця між сусідніми рівнями температури або різниця між значеннями температури, при яких здійснюється вимір часу t_i , то можна записати

$$\theta_3 - \theta_2 = \theta_2 - \theta_1, \quad (3.58)$$

що з урахуванням (3.57) трансформується до виразу

$$0,5t_1^2 - t_2^2 - 0,5t_3^2 = \tau(t_1 - 2t_2 + t_3). \quad (3.59)$$

Із (3.57) витікає вираз для визначення величини постійної часу теплового пожежного сповіщувача

$$\tau = 0,5 \cdot \frac{t_1^2 - 2t_2^2 + t_3^2}{t_1 - 2t_2 + t_3}. \quad (3.60)$$

Виходячи з цього, зміна температури теплового впливу на чутливий елемент теплового пожежного сповіщувача згідно з (3.52), а також вимірювання часу досягнення температури чутливого елемента сповіщувача значень, які визначають відповідно до (3.57) дозволяють визначати постійну часу сповіщувача за формулою (3.60).

3.4.2. Визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів при зміні температури впливу за лінійним законом

Інший спосіб визначення постійної часу ТПС наведено у [98]. Припустимо, що тепловий вплив на сповіщувач змінюється за лінійним законом, тоді в режимі, що встановився, вихідний сигнал чутливого елемента описується виразом

$$Z = Kb(t - \tau). \quad (3.61)$$

Для ЧЕ ТПС формуються опорні сигнали Z_1 та Z_2 , один з яких більше другого в n разів, тобто

$$Z_2 = nZ_1 \quad (3.62)$$

Величину вихідного сигналу ЧЕ ТПС контролюють та при досягненні їм значень Z_1 та Z_2 вимірюють час досягнення значень опорних сигналів t_1 та t_2 . Тоді з урахуванням (3.61) можна записати

$$Z_1 = Kb(t_1 - \tau); \quad Z_2 = Kb(t_2 - \tau), \quad (3.63)$$

що дає можливість представити вираз для визначення постійної часу теплового пожежного сповіщувача наступним чином

$$\tau = t_1 - \frac{Z_1}{Kb} = t_2 - \frac{Z_2}{Kb}. \quad (3.64)$$

З виразу (3.64) витікає, що

$$\tau = 0,5 \left[t_2 + t_1 - (Z_2 + Z_1)(Z_2 - Z_1)^{-1}(t_2 - t_1) \right] \quad (3.65)$$

Якщо ввести позначення

$$m = (n + 1)(n - 1), \quad (3.66)$$

а також урахувати (3.62), то вираз (3.65) для визначення постійної часу теплового сповіщувача буде мати наступний вигляд

$$\tau = 0,5 \left[(m + 1)t_1 - (m - 1)t_2 \right] \quad (3.67)$$

Таким чином використання виразу (3.67) для визначення величини постійної часу τ не потребує виміру температури теплового впливу на ЧЕ ТПС, при цьому забезпечується інваріантність стосовно величини коефіцієнта передачі теплового пожежного сповіщувача.

Кожен із двох приведених методів визначення постійної часу ТПС має свої переваги. Обидва способи дозволяють проводити визначення величини постійної часу сповіщувача без його спрацьовування. Другий спосіб дозволяє здійснювати визначення величини постійної часу не

вимірюючи температуру вхідного впливу на сповіщувач, а також незалежно від його коефіцієнта передачі.

3.4.3. Визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів з терморезистивним чутливим елементом

Існуючі ТПС побудовані з використанням різних фізичних принципів дії та, відповідно, різними чутливими елементами. Одним з видів ТПС є сповіщувачі з терморезистивним чутливим елементом, фізичний принцип побудови яких відкриває можливості для визначення їх динамічних характеристик, зокрема постійної часу. Методи визначення постійної часу ТПС з терморезистивним ЧЕ є найбільш опрацьованими і можуть бути реалізовані як під час проведення стаціонарних випробувань, так і на об'єкті, що охороняється. Однак реалізація існуючих методів визначення постійної часу ТПС потребує використання додаткових генераторів формування одиночних імпульсів електричного струму [99].

Для усунення цього недоліку було розроблено метод визначення постійної часу ТПС з терморезистивним ЧЕ, який полягає в наступному. Припустимо, що через терморезистивний ЧЕ ТПС пропускають постійний по величині електричний струм I . Тоді теплові процеси в такому ЧЕ будуть описуватись рівнянням [100]

$$a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{2\nu + 1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + KI^2 = 0, \quad (3.68)$$

з початковими та граничними умовами

$$\frac{\partial \theta(0)}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial \theta(R)}{\partial r} = -h\theta(R). \quad (3.69)$$

Застосувавши до (3.68) узагальнене перетворення виду (2.45), з урахуванням (3.69) та (2.46) отримаємо

$$\bar{\theta} = KI^2 \tau_n \frac{hR^{v+3}}{\mu_n^2} J_v(\mu_n), \quad (3.70)$$

де $\tau_n = a^{-1} \left(\frac{R}{\mu_n} \right)^2$ – n-а постійна часу терморезистивного ЧЕ ТПС.

Використовуючи формулу обернення [59], отримаємо

$$\theta(r) = 2KI^2 hR \left(\frac{R}{r} \right)^v \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\tau_n J_v \left(\frac{\mu_n r}{R} \right)}{J_v(\mu_n) \cdot [(hR)^2 - 2hRv + \mu_n^2]}. \quad (3.71)$$

Вираз (3.71) описує розподілення температури по об'єму терморезистивного ЧЕ ТПС при протіканні по ньому постійного за величиною електричного струму I, а усереднена по об'єму ЧЕ температура визначається виразом

$$\theta = mR^{-m} \int_0^R r^{m-1} \theta(r) dr. \quad (3.72)$$

Для випадку коли, ЧЕ має форму циліндра $v=0$, $m=2$. Тоді вираз (3.71), з урахуванням (3.72), трансформується наступним чином

$$\theta = \frac{2}{R^2} \int_0^R r \theta(r) dr = 4KI^2 (hR)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\tau_n}{\mu_n^2 [(hR)^2 + \mu_n^2]}. \quad (3.73)$$

З похибкою, що не перевищує 1,6% [70], можна обмежитись першим членом ряду. Першим коренем трансцендентного рівняння в (2.46) буде вираз (2.57).

В такому випадку, вираз (3.73) приймає вигляд

$$\theta = KI^2 \tau \frac{4(hR)^2}{\mu_1^2 [(hR)^2 + \mu_1^2]}, \quad (3.74)$$

$$\text{де } \tau = a^{-1} \left(\frac{R}{\mu_1} \right)^2.$$

При $hR \rightarrow 1,0$ вираз (3.74) приймає вигляд

$$\theta = KI^2 \tau, \quad (3.75)$$

з якого витікає вираз для постійної часу

$$\tau = \frac{\theta}{KI^2}. \quad (3.76)$$

Таким чином, пропускання через терморезистивний ЧЕ ТПС постійного по величині електричного струму, вимірювання його вихідного сигналу, в режимі, що встановився, та використання виразу (3.76) дозволить здійснювати визначення постійної часу сповіщувача без використання додаткових генераторів електричного струму.

Однак при реалізації цього методу на результат вимірювань може впливати інфранизькочастотна завада, яка має теплове походження. Для ослаблення її дії було розроблено метод визначення постійної часу ТПС з терморезистивним чутливим елементом, який полягає у наступному.

Припустимо, що через терморезистивний ЧЕ ТПС пропускають електричний струм синусоїдальної форми [101]

$$i(t) = I_m \sin \omega_0 t, \quad (3.77)$$

де I_m, ω_0 – амплітуда та частота, величини яких апріорі задані. При цьому величини ω_0 вибирається так, що

$$2\omega_0 = Q, \quad (3.78)$$

де Q – максимальна частота спектральної щільності інфранизькочастотної завади, яка має теплове походження, обумовлене тепловим впливом навколишнього середовища.

Вихідний сигнал ТПС з терморезистивним ЧЕ, згідно з законом Джоуля-Ленца, буде описуватись як

$$i^2(t) = I_m^2 \sin^2 \omega_0 t = 0,5 I_m^2 (1 - \cos 2\omega_0 t). \quad (3.79)$$

Тоді вихідний сигнал можна описати виразом

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \theta_0 - \theta_m \cos[2\omega_0 t + \varphi(2\omega_0)] = \\ &= \theta_0 - 0,5 A(2\omega_0) I_m^2 \cos[2\omega_0 t + \varphi(2\omega_0)], \end{aligned} \quad (3.80)$$

де θ_0 – постійна складова вихідного сигналу; θ_m – амплітуда вихідного сигналу; $\varphi(2\omega_0)$ – фазового частотна характеристика пожежного сповіщувача на частоті $2\omega_0$; $A(2\omega_0)$ – амплітудно-частотна характеристика пожежного сповіщувача на частоті $2\omega_0$.

Амплітуду вимірюють θ_m . Із (3.80) витікає, що

$$\theta_m = 0,5A(2\omega_0)I_m. \quad (3.81)$$

Внаслідок того, що для ТПС із терморезистивним ЧЕ має місце

$$A(2\omega_0) = K_{\pi}\tau(1 + 4\omega_0^2\tau^2)^{-0,5}, \quad (3.82)$$

де K_{π} – коефіцієнт передачі.

Після об'єднання виразів (3.81) та (3.82) постійна час ТПС з терморезистивним ЧЕ буде визначатися із виразу

$$\tau = \left[\left(\frac{KI_m^2}{2\theta_m} \right)^2 - 4\omega_0^2 \right]^{-0,5}. \quad (3.83)$$

Оскільки амплітуда вихідного сигналу θ_m вимірюється на частоті $2\omega_0$, яка перевищує максимальну частоту спектральної щільності інфранизькочастотної завади Q , то дія цієї завади не буде впливати на результат визначення величини постійної часу.

3.5. Висновки

3.5.1. Динамічні властивості теплового пожежного сповіщувача повністю визначаються його передаточною функцією.

3.5.2. Отримані усереднені по об'єму чутливого елемента теплового пожежного сповіщувача математичні моделі, що описують теплові процеси в ньому, при зовнішньому тепловому впливі у вигляді стаціонарного теплового потоку, стрибкоподібної зміни температури та, для сповіщувачів з терморезистивним чутливим елементом, при внутрішньому тепловому впливі електричним струмом, що представлені у вигляді передаточних функцій.

3.5.3. Отримано математичне описання реакції чутливого елемента теплового пожежного сповіщувача на зовнішню теплову дію лінійно-зростаючою температурою, яка представлена у вигляді перехідної та передаточної функцій.

3.5.4. Показано, що для методу визначення частотних характеристик для сповіщувачів з постійною часу $\tau=(5;10;20)$ с, при інтервалі дискретності $\tau_0=2$ с похибка не перевищує 5 %, тому для сповіщувачів з постійною часу $\tau=(10; 20)$ с доцільно обрати інтервал дискретності $\tau_0=2$ с, а для сповіщувача з постійною часу $\tau=5$ с – $\tau_0=1,97$ с.

3.5.5. Показано, що при визначенні амплітудно-частотних характеристик з урахуванням інерційних властивостей приладу, що формує тепловий вплив на тепловий пожежний сповіщувач, постійна часу приладу, що формує тест-вплив повинна дорівнювати $\tau_0=0,1$ с, а інтервали дискретності для сповіщувача з постійною часу: $\tau=5$ с повинні бути – $\tau_0=0,225$ с, для сповіщувачів з $\tau=10$ с – $\tau_0=0,26$ с, а для сповіщувачів з $\tau=20$ с – $\tau_0=0,68$ с.

3.5.6. При визначенні фазово-частотних характеристик теплових пожежних сповіщувачів, з допустимим значенням похибки – 5 %, доцільно обрати інтервал дискретності $\tau_0=2$ с та постійну часу приладу, що формує тест-вплив, $\tau_0=0,09$ с.

3.5.7. Показано, що при реальних пожежах на початковому етапі температура середовища буде різко зростати за лінійним законом, тому при визначенні частотних характеристик теплових пожежних сповіщувачів інтервал дискретності повинен бути $\tau_0 < 1$ с.

3.5.8. Отримано математичне описання реакції терморезистивних чутливих елементів теплових пожежних сповіщувачів на теплову дію постійного та синусоїдального електричного струму, а також вирази їх постійних часу.

РОЗДІЛ 4

МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ ТЕПЛОВИХ ПОЖЕЖНИХ СПОВІЩУВАЧІВ, ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ, ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО ВИКОРИСТАННЮ

4.1. Методи випробувань теплових пожежних сповіщувачів, оснований на використанні його перехідної функції

Випробування ТПС є важливим етапом їх системи експлуатації. У п.3.1 показано, що випробування ТПС у країнах Європи та США здійснюється шляхом визначення його часу спрацьовування та порівняння цієї величини з нормативною. Існує метод випробувань теплових пожежних сповіщувачів, що оснований на вимірі часу досягнення температури ЧЕ ТПС фіксованих значень [102] та метод, оснований на вимірі температури ЧЕ ТПС у фіксовані моменти часу [103], але при їх реалізації динамічні характеристики сповіщувачів не визначаються, що є недоліком цих методів. Інформація про динамічні характеристики ТПС може бути використана для розробки методів їх випробувань.

Однією з загальних динамічних характеристик ТПС є його перехідна функція. Використовувати інформацію про перехідну функцію сповіщувача для проведення його випробувань можна двома методами. Перший передбачає порівняння визначеної перехідної функції за алгоритмом, що приведений у п.3.2, з перехідною функцією, яка була визначена у лабораторних умовах на заводі виробнику, у моменти часу, що визначаються за теоремою Котельникова. Другий передбачає використання інформації про перехідну функцію сповіщувача для визначення інших його характеристик, зокрема частотних характеристик, постійної часу та часу спрацьовування. На основі першого методу був розроблений метод випробувань ТПС [104], який полягає у наступному: ТПС розміщують у робочому об'ємі теплової камери, в якій температура зростає з постійною швидкістю, згідно з виразом (3.9) і забезпечують

постійну масову витрату повітря. Одночасно із зміною температури в тепловій камері формують модельний сигнал у вигляді [105]

$$M(t) = b \left[t - \tau \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \right] \quad (4.1)$$

і вимірюють вихідний сигнал $\theta(t)$ ТПС в дискретні моменти часу t_i , які відстають один від одного на однаковий інтервал.

Результати вимірів $\theta(t_i)$ порівнюють з модельним сигналом в ті ж моменти часу, тобто із $M(t_i)$. Якщо величини різниць між вихідними сигналами $\theta(t_i)$ та модельними сигналами $M(t_i)$ не перевищують апріорі заданого малого числа ξ , то можна стверджувати, що ТПС працездатний.

Для визначення результатів випробування ТПС можна використовувати критерій, який має вигляд

$$|\theta(t_i) - M(t_i)| \leq \xi; \quad i = \overline{1, n}. \quad (4.2)$$

Модельний сигнал $M(t)$ визначається виразом

$$M(t) = L^{-1}[W(p)\theta(p)], \quad (4.3)$$

Внаслідок того, що

$$W(p) = (\tau p + 1)^{-1}; \quad \theta(p) = b p^{-2}, \quad (4.4)$$

то для модельного сигналу $M(t)$ має місце вираз

$$M(t) = L^{-1} \left[b p^{-2} (\tau p + 1)^{-1} \right] = b \left[t - \tau \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \right]. \quad (4.5)$$

Моделльний сигнал (4.5) є зразковою реакцією чутливого елемента сповіщувача при дії на нього лінійно-зростаючою температурою у вигляді (3.9).

Перевагою такого методу випробувань ТПС є те, що він здійснюється у динамічному режимі та під час їх проведення визначається перехідна функція, а висновок про результат випробування робиться не по допустовому принципу «спрацював – не спрацював», а з урахуванням його динамічних властивостей. Також перевагою такого методу є універсальність, оскільки він може бути застосований для випробувань ТПС будь-якого типу.

4.2. Методи випробувань теплових пожежних сповіщувачів, оснований на використанні його частотних характеристик

Випробування ТПС, згідно з [3,85-88], виконується без визначення їх частотних характеристик, а у технічній документації сповіщувачів відсутня інформація про їх нормативні значення. Тобто частотні характеристики ТПС під час їх експлуатації не визначаються, що є недоліком системи експлуатації ТПС, оскільки інформація про них відкриває можливості для розробки методів випробувань ТПС.

Інформацію про частотні характеристики ТПС можна використовувати двома методами. Перший полягає у визначенні частотних характеристик ТПС та порівняння їх з нормативними, що визначенні у лабораторних умовах на заводі виробнику. Якщо похибка при порівнянні цих характеристик не перевищує 5% (п.5.1.4 EN 54-5), то сповіщувач вважається справним. Недоліком класичного методу визначення частотних характеристик ТПС є значний час проведення випробування, що складає

$(3 \div 5)n$, де n – кількість вимірів. Цей недолік було усунуто у методі визначення частотних характеристик ТПС на основі використання інформації про його перехідну функцію, що приведений в п.3.2.2. Другий метод полягає у використанні інформації про частотні характеристики ТПС для визначення інших його характеристик, наприклад постійної часу. В свою чергу, інформація про постійну часу ТПС відкриває можливості для розробки методів випробувань сповіщувачів, один з яких запропоновано у п.4.2.1.

4.2.1. Метод випробувань теплових пожежних сповіщувачів, оснований на використанні його амплітудно-частотної характеристики

Сформуємо послідовно у часі два теплових потоки, що надходять на чутливий елемент теплового пожежного сповіщувача, а величини цих теплових потоків будемо змінювати за гармонічним законом із різними апріорі заданими частотами ω_1 та ω_2 . Амплітуди цих теплових потоків є однаковими, тобто $q_{1m} = q_{2m} = q_m$ [106].

Внаслідок того, що амплітудно-частотна характеристика теплового пожежного сповіщувача має вираз [107]

$$A(\omega) = \frac{U_m(\omega)}{q_m} = K(1 + \omega^2 \tau^2)^{-1}, \quad (4.6)$$

де U_m – амплітуда вихідного гармонічного сигналу сповіщувача; ω – кругова частота, то для частот ω_1 та ω_2 буде мати місце

$$A^2(\omega_1)(1 + \omega_1^2 \tau^2) = K^2 = A^2(\omega_2)(1 + \omega_2^2 \tau^2), \quad (4.7)$$

Із (4.7) витікає вираз для постійної часу теплового пожежного сповіщувача

$$\tau = \frac{1}{\omega_1} \left[\left[\left[\frac{A(\omega_2)}{A(\omega_1)} \right]^2 - 1 \right] \left[1 - \left[\frac{A(\omega_2)}{A(\omega_1)} \right]^2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \right]^{-1} \right]^{0.5}. \quad (4.8)$$

Якщо врахувати співвідношення між амплітудами U_{1m} та $q_m = \text{const}$, яке має вигляд (4.6), то вираз (4.8) трансформується наступним чином

$$\tau = \frac{1}{\omega_1} \left[\left[\left(\frac{U_{2m}}{U_{1m}} \right)^2 - 1 \right] \left[1 - \left(\frac{U_{2m}}{U_{1m}} \right)^2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \right]^{-1} \right]^{0.5}. \quad (4.9)$$

Вимірявши амплітуди вихідного сигналу теплового пожежного сповіщувача U_{1m} та U_{2m} , відповідно на частотах ω_1 та ω_2 , результат контролю можна визначити за допомогою критерію

$$\tau \leq \tau_0, \quad (4.10)$$

де τ визначається виразом (4.9), а τ_0 є нормована величина постійної часу теплових пожежних сповіщувачів, яка визначається згідно [3].

Таким чином, метод випробувань ТПС, оснований на визначенні амплітудно-частотної характеристики полягає у наступному:

- послідовне у часі формування двох теплових потоків на чутливий елемент теплового пожежного сповіщувача, величини яких змінюються за гармонічним законом із різними частотами та із однаковими амплітудами;

- вимірювання амплітуд вихідних сигналів теплового пожежного сповіщувача на цих частотах;
- визначення постійної часу ТПС за виразом (4.9) та порівняння цього значення з нормативною величиною.

Реалізація цього методу передбачає вимірювання амплітуди вихідного сигналу ЧЕ лише на двох частотах, що значно скорочує час випробування, який становить $(6 \div 10)\tau$, що в $0,5n$ раз менше метода випробувань ТПС приведенного у п.4.2.

4.2.2. Метод випробувань теплових пожежних сповіщувачів, оснований на використанні його фазово-частотної характеристики

У [108], на прикладі ТПС з терморезистивним елементом, показано, як інформація про фазово-частотну характеристику сповіщувача може бути використана для проведення його випробувань. Однією з особливостей сповіщувачів такого типу є те, що згідно з законом Джоуля-Ленца тепловий вплив на їх ЧЕ можна створити пропусканням через нього електричного струму.

Припустимо, що через терморезистивний ЧЕ ТПС пропускають електричний струм, величина якого змінюється у часі по гармонічному закону із фіксованою частотою ω_0 ,

$$i(t) = I \sin \frac{\omega_0 t}{2}, \quad (4.11)$$

де I – амплітуда електричного струму.

Згідно з законом Джоуля-Ленца тепла дія електричного струму на терморезистивний чутливий елемент теплового пожежного сповіщувача визначається квадратом виразу (4.11) [108], тобто

$$i^2(t) = I^2 \sin^2 \omega_0 t = \frac{I^2}{2} (1 - \cos 2\omega_0 t). \quad (4.12)$$

Динамічні властивості такого пожежного сповіщувача визначаються передаточною функцією, яка має вигляд

$$W(p) = K\tau(\tau p + 1)^{-1}. \quad (4.13)$$

Реакція ТПС із терморезистивним чутливим елементом на теплову дію електричного струму у вигляді (4.11) має вигляд

$$\theta(t) = L^{-1}[W(p)i^2(p)], \quad (4.14)$$

де $i^2(p)$ – зображення по Лапласу від функції (4.12).

В режимі, що встановився, для перемінної складової $\theta(t)$ має місце

$$\begin{aligned} \theta_0(t) &= \frac{K\tau I^2}{2} \cdot \frac{\cos 2\omega_0 t + 2\omega_0 \tau \sin 2\omega_0 t}{1 + 4\omega_0^2 \tau^2} = \\ &= \frac{K\tau I^2}{2(1 + 4\omega_0^2 \tau^2)} \cos(2\omega_0 t - \arctg 2\omega_0 \tau). \end{aligned} \quad (4.15)$$

Із виразів (4.12) та (4.13) витікає, що фазовий зсув між вихідним сигналом терморезистивного чутливого елемента ТПС (вираз (4.15)) і квадратом величини електричного струму (вираз (4.12)) на частоті, яка дорівнює подвоєному значенню фіксованої частоти ω_0 , описується наступним чином

$$\varphi(2\omega_0) = -\arctg 2\omega_0 \tau. \quad (4.16)$$

Вимір величини $\varphi(2\omega_0)$ дозволяє визначити величину постійної часу

$$\tau = -\frac{\operatorname{tg}\varphi(2\omega_0)}{2\omega_0}. \quad (4.17)$$

Результат тестування теплових пожежних сповіщувачів визначається за допомогою нерівності

$$-\frac{\operatorname{tg}\varphi(2\omega_0)}{2\omega_0} \leq \tau_0, \quad (4.18)$$

де τ_0 – нормована величина постійної часу теплових пожежних сповіщувачів, що визначена у [3].

Таким чином, алгоритм методу випробувань ТПС, оснований на визначенні його фазово-частотної характеристики зводиться до наступного:

- формування теплового впливу на терморезистивний ЧЕ ТПС електричного струму, величина якого змінюється за гармонічним у часі законом при апріорі фіксованій частоті;
- зведення цієї величини у квадрат і вимір фазового зсуву $\varphi(2\omega_0)$;
- визначення постійної часу за виразом (4.17) та її порівняння з нормативною.

Перевагою цього методу випробувань ТПС є те, що вони здійснюються із урахуванням динамічних властивостей сповіщувача, а час їх здійснення складає $(3 \div 5)\tau$.

Найкращим з цих методів випробувань ТПС є метод, оснований на визначенні частотних характеристик сповіщувача на основі інформації про його перехідну функцію, який наведено у п. 3.2.2. Цей метод визначення

частотних характеристик може бути використаний для випробувань сповіщувачів шляхом порівняння визначених характеристик з нормативними, причому сповіщувач вважається справним, якщо виконуються нерівності

$$\left| \frac{A(\omega) - A_0(\omega)}{A_0(\omega)} \right| \leq 0,05; \quad (4.19)$$

$$\left| \frac{\varphi(\omega) - \varphi_0(\omega)}{\varphi_0(\omega)} \right| \leq 0,05, \quad (4.20)$$

де $A(\omega)$ та $\varphi(\omega)$ визначені амплітудно-частотна та фазово-частотна характеристики ТПС відповідно, а $A_0(\omega)$ та $\varphi_0(\omega)$ визначаються відповідно виразами (3.44) та (3.45).

4.3. Методи випробувань теплових пожежних сповіщувачів, оснований на визначенні його постійної часу

У п. 2.1 приведено математичне забезпечення ТПС при створенні на нього зовнішнього теплового впливу у вигляді стаціонарного теплового потоку, яке може бути використане для розробки методу випробувань ТПС.

Для випадку, коли на ЧЕ ТПС формують постійний за величиною тепловий потік $q = \text{const}$, температура чутливого елемента $\theta(r, t)$ буде описуватись рівнянням (2.1) з початковими та граничними умовами (2.2), розв'язком якого є рівняння (2.17). Об'єднання виразів (2.3), (2.17), (2.26) приводять до виразу (2.28), який є перехідною функцією ТПС при впливі на нього таким тепловим потоком. Тоді в режимі, що встановився має місце [109]

$$\theta(\infty) = \frac{0,5K_1q}{\alpha}. \quad (4.21)$$

Постійна часу τ чутливого елемента ТПС при такому впливі, що витікає з (2.28), визначається виразом

$$\tau = \frac{c\rho R}{2\alpha}, \quad (4.22)$$

а з урахуванням (4.21) цей вираз приймає вигляд

$$\tau = \frac{c\rho R}{K_1q}. \quad (4.23)$$

Величину теплового потоку, що надходить на чутливий елемент ТПС, а також температуру чутливого елемента вимірюють.

В такому випадку контроль технічного стану сповіщувача можна здійснювати шляхом проведення експериментальних випробувань, вимірювання величини теплового потоку в усталеному режимі та температури чутливого елемента, а висновок про результат контролю визначати критерієм.

$$\frac{c\rho R}{K_1q} \leq \tau_0, \quad (4.24)$$

де τ_0 – нормована постійна часу ТПС, що визначається з табл. 1.4.

Таким чином алгоритм методу випробувань ТПС зводиться до наступного:

- на ТПС створюється тепловий вплив стаціонарним тепловим потоком;

- вимірюється величина цього теплового потоку;
- вимірюється температура ЧЕ ТПС в усталеному режимі;
- визначається постійна часу ТПС за виразом (4.23) та порівнюється з нормативною постійною часу (виконання критерію (4.24) свідчить про справність сповіщувача);

Такий метод випробувань ТПС є універсальним і може використовуватися, як для проведення об'єктових, так і стаціонарних випробувань та передбачає формування як зовнішнього, так і внутрішнього теплового впливу.

У п.3.4 приведені методи визначення постійної часу ТПС, які також можуть використовуватися для випробувань сповіщувачів. Для цього необхідно визначити постійну часу за методами, що представлені у п.3.4.1, п.3.4.2 або п.3.4.3 та порівняти отримане значення з нормативним.

Методи випробувань ТПС, що приведені у п.3.4.1, п.3.4.2 та п.4.2 є універсальними, оскільки можуть використовуватися для випробувань усіх видів сповіщувачів, а також як для стаціонарних так і для об'єктових випробувань. Метод випробувань ТПС, що приведений у п.4.2 є найскладнішим, оскільки потребує вимірювання вхідного теплового потоку. Недоліком методу випробувань ТПС, що приведений у п.3.4.3, є те що, він може бути застосований лише для перевірки сповіщувачів з терморезистивним ЧЕ, а перевагою є можливість проведення випробування на об'єкті та у автоматичному режимі.

4.4. Методи випробувань теплових пожежних сповіщувачів, оснований на визначенні його часу спрацьовування

Існуючі методи випробувань ТПС оснований на визначенні їх часу спрацьовування поділяються на стаціонарні і об'єктові. Недоліком стаціонарних методів є значний час їх проведення, оскільки випробування проводяться у спеціальних камерах, для чого сповіщувачі необхідно

демонтувати з місця установки. Недоліками об'єктових методів випробувань ТПС є їх проведення у ручному режимі, при якому можлива поява суб'єктивних похибок, викликаних діями оператора, а також значний час проведення випробувань. Для усунення цих недоліків, на прикладі ТПС з терморезистивним ЧЕ, був розроблений метод випробувань сповіщувачів, який полягає у наступному.

Через терморезистивний ЧЕ ТПС пропускають постійний по величині електричний струм I . Тоді теплові процеси в такому ЧЕ будуть описуватись рівнянням [110]

$$a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + KI^2 = 0, \quad (4.25)$$

де $\theta = T - T_0$ – перевищення температури T чутливого елемента відносно початкового значення T_0 , з початковими та граничними умовами

$$\theta(r,0) = 0; \quad \frac{\partial \theta(0,t)}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial \theta(R,t)}{\partial r} = -h\theta(R,t), \quad (4.26)$$

де h – відносний коефіцієнт теплообміну.

За умов (4.25) диференціальне рівняння (4.26) при малих значеннях числа Біо має розв'язок

$$\theta = KI^2 a^{-1} \left(\frac{R}{\mu_1} \right) = KI^2 \tau, \quad (4.27)$$

де μ_1 – перший корінь трансцендентного рівняння

$$\mu J_1(\mu) - \text{Bi} J_0(\mu) = 0. \quad (4.28)$$

Величина перевищення температури терморезистивного чутливого елемента, яка описується виразом (4.27) вимірюється.

Згідно з графіком, що представлений на рис. 4.1, має місце

$$t_c = t_1 + \tau = \frac{T_c - T_0}{b} + \tau. \quad (4.29)$$

З урахуванням залежності (4.27) вираз (4.29) приймає вигляд

$$t_c = \frac{T_c - T_0}{b} + \frac{\theta}{KI^2}. \quad (4.30)$$

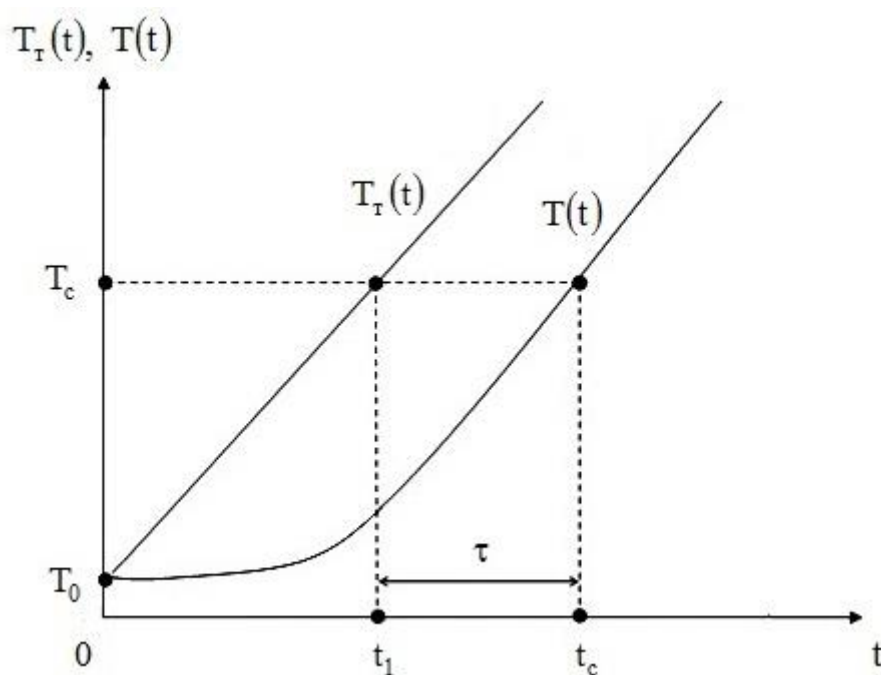


Рис. 4.1. Залежності температури у тепловій камері $T_T(t)$ та температури чутливого елемента $T(t)$

За допомогою цього виразу можна визначити час спрацювання теплового пожежного сповіщувача з терморезистивним чутливим елементом та порівняти його з нормативним. Величини T_c , T_0 , та b вибирають апріорі згідно з [3], значення яких дорівнює: $T_0 = 25^\circ\text{C}$;

$T_c = (54 \div 160)^\circ \text{C}$; $b = (0,017 \div 0,5)^\circ \text{C}/\text{C}$. Недоліком такого методу випробувань ТПС є низька точність визначення часу спрацьовування. Цей недолік було усунуто у методі, що приведений у [111].

Припустимо, що через терморезистивний ЧЕ ТПС пропускають імпульс електричного струму у вигляді чверті косинусоїди (залежність 1 на рис. 4.2), який описується виразом

$$i(t) = I \cos \frac{\pi t}{2t_0} [1(t) - 1(t - t_0)], \quad (4.31)$$

де I, t_0 – амплітуда та тривалість імпульсу електричного струму відповідно.

Згідно з законом Джоуля-Ленца тепловий ЧЕ ТПС реагує на такий тепловий вплив наступним чином (залежність 2 на рис 4.2)

$$i^2(t) = 0,5I^2 \left[\left(1 + \cos \frac{\pi t}{2t_0} \right) 1(t) - \left(1 - \cos \frac{\pi(t - t_0)}{2t_0} \right) 1(t - t_0) \right]. \quad (4.32)$$

Реакція такого ЧЕ на теплову дію електричного струму буде мати вигляд

$$\theta^2(t) = 0,5KI^2\tau L^{-1} \left[2p^2 + \left(\frac{\pi}{t_0} \right)^2 [1 - \exp(-pt_0)] \left[p \left[p^2 + \left(\frac{\pi}{t_0} \right)^2 \right] (\tau p + 1)^{-1} \right] \right]. \quad (4.33)$$

Для інтервалу часу, на якому

$$\frac{\partial \theta(t)}{\partial t} < 0, \quad (4.34)$$

згідно із (4.33) має місце

$$\theta^2(t) = 0,5KI^2\tau \left[1 \left[t_0^2 + (\pi\tau)^2 \right]^{-1} \left[t_0^2 \cos \frac{\pi t}{t_0} + \pi t_0 \tau \sin \frac{\pi t}{t_0} \right] \right], \quad (4.35)$$

що показано на рис. 4.2.

В момент часу $t = 0,5t_0$, в який вимірюють реакцію терморезистивного ЧЕ ТПС, вираз (4.35) трансформується до вигляду

$$\theta(0,5t_0) = 0,5KI^2\tau \left[1 + \pi t_0 \tau \left[t_0^2 + (\pi\tau)^2 \right]^{-1} \right]. \quad (4.36)$$

В момент часу $t = 0,75t_0$, в який також вимірюють реакцію терморезистивного чутливого елемента пожежного сповіщувача, вираз (4.35) трансформується до вигляду

$$\theta(0,75t_0) = 0,5KI^2\tau \left[1 - 0,7(t_0^2 - \pi t_0 \tau) \left[t_0^2 + (\pi\tau)^2 \right]^{-1} \right]. \quad (4.37)$$

Відношення результату першого виміру реакції терморезистивного ЧЕ ТПС на теплову дію електричного струму до результату другого виміру є відношення (4.36) до (4.37), тобто

$$\frac{\theta(0,5t_0)}{\theta(0,75t_0)} = \frac{t_0^2 + (\pi\tau)^2 + \pi t_0 \tau}{t_0^2 + (\pi\tau)^2 - 0,7(t_0^2 - \pi t_0 \tau)} = \alpha. \quad (4.38)$$

Час спрацьовування ТПС визначається за допомогою виразу

$$t_c = (T_c - T_0)b^{-1} + \tau. \quad (4.39)$$

Із (4.38) витікає алгебраїчне рівняння

$$\pi^2(\alpha - 1)\tau^2 + \pi t_0(0,7\alpha - 1)\tau + t_0^2(0,3\alpha - 1) = 0, \quad (4.40)$$

одним з коренів рівняння є

$$\tau = t_0 \left[2\pi(\alpha - 1)^{-1} \right] \left[1 - 0,7\alpha + (3,8\alpha - 0,7\alpha^2 - 3)^{0,5} \right] \quad (4.41)$$

З урахуванням (4.41) вираз (4.39) приймає вигляд

$$t_c = (T_c - T_0)b^{-1} + t_0 \left[2\pi(\alpha - 1)^{-1} \right] \left[1 - 0,7\alpha + (3,8\alpha - 0,7\alpha^2 - 3)^{0,5} \right] \quad (4.42)$$

який використовується для визначення часу спрацьовування ТПС із терморезистивним ЧЕ.

За умов, що вимір реакції терморезистивного ЧЕ ТПС здійснюється із похибкою Δ , можна записати

$$\begin{aligned} \frac{\theta(0,5t_0) + \Delta}{\theta(0,75t_0) + \Delta} &= \frac{\theta(0,5t_0) \left[1 + \Delta[\theta(0,5t_0)]^{-1} \right]}{\theta(0,75t_0) \left[1 + \Delta[\theta(0,75t_0)]^{-1} \right]} \approx \\ &\approx \frac{\theta(0,5t_0)}{\theta(0,75t_0)} \left[1 + \frac{\Delta}{\theta(0,5t_0)} \right] \left[1 - \frac{\Delta}{\theta(0,75t_0)} \right] \approx \\ &\approx \frac{\theta(0,5t_0)}{\theta(0,75t_0)} \left[1 + \frac{\Delta}{\theta(0,5t_0)} - \frac{\Delta}{\theta(0,75t_0)} \right]. \end{aligned} \quad (4.43)$$

Із (4.43) витікає, що наявність абсолютної похибки Δ обумовлює появу складової в загальній похибці визначення часу спрацьовування ТПС, відносна величина якої визначається виразом

$$\delta_1 = \Delta \left[[\theta(0,5t_0)]^{-1} - [\theta(0,75t_0)]^{-1} \right] \quad (4.44)$$

Згідно з кресленням для $t = 0,5t_0$ і для $t = 0,75t_0$ відповідно має місце $\theta(0,5t_0) = 1,11\text{KI}^2$, $\theta(0,75t_0) = 0,67\text{KI}^2$. Вираз (4.44) з урахуванням цих величин приймає вигляд

$$\delta_1 = \frac{0,58\Delta}{\text{KI}^2}. \quad (4.45)$$

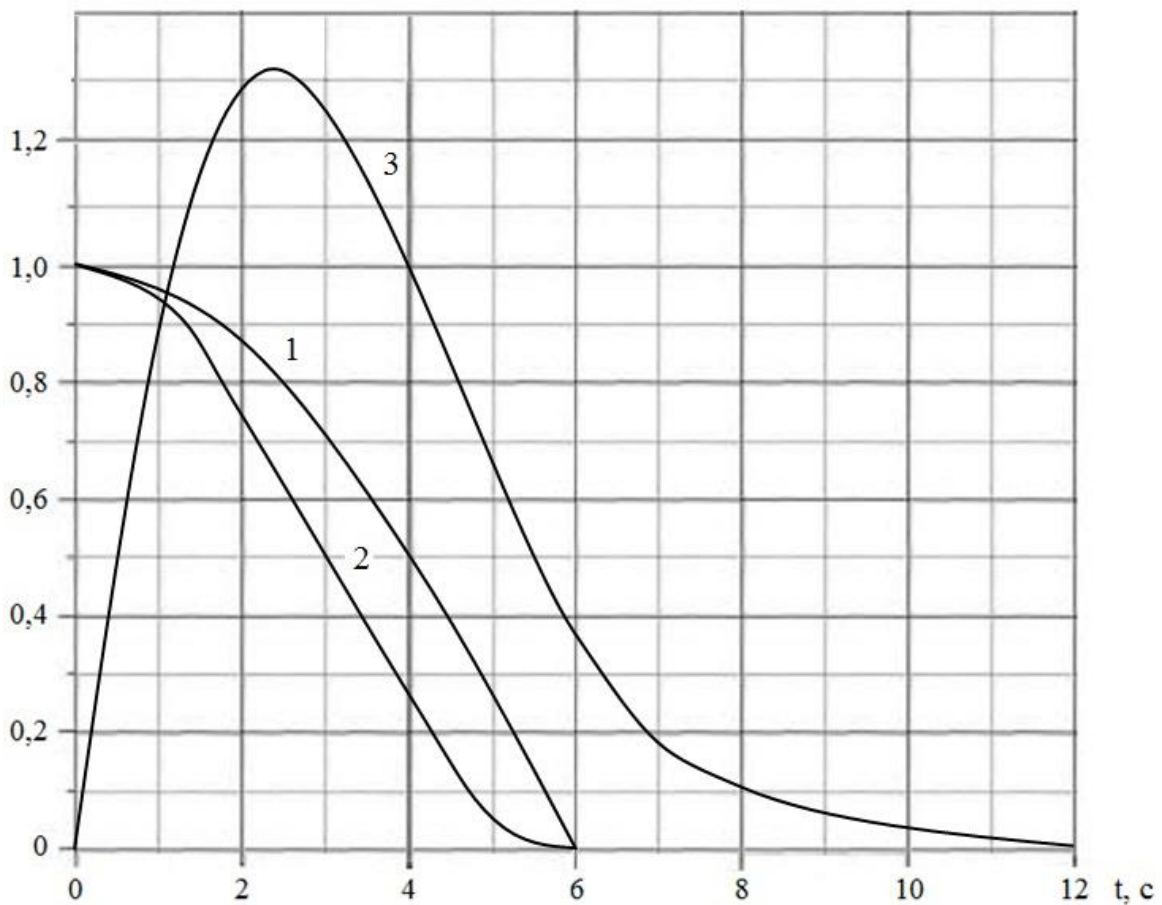


Рис. 4.2. 1 – залежність $i(t)\Gamma^{-1}$ (при $t_0 = 6$ с; $\tau = 1,5$ с); 2 – залежність $[2i(t)\Gamma^{-1}]^2$; 3 – залежність $2\theta(t)(\text{KI}^2\tau)^{-1}$

Для способу, що приведений у [110], має місце похибка

$$\delta_1 = \frac{\Delta}{\theta} = \frac{\Delta}{KI^2\tau} = \frac{0,67\Delta}{KI^2} \quad (4.46)$$

Порівнявши вирази (4.45) та (4.46) можна сказати, що похибка при реалізації другого методу визначення часу спрацьовування ТПС з терморезистивним ЧЕ зменшується на 15,5 % [112].

4.5. Пристрої для проведення випробувань теплових пожежних сповіщувачів

Пристрої для випробувань ТПС можна поділити на два класи. До першого класу пристроїв можна віднести пристрої, що використовуються для проведення випробувань сповіщувачів. Наприклад теплові камери, які регламентовані нормативними документами, а також інші пристрої, що використовуються для створення зовнішнього теплового впливу на сповіщувачі, що наведені у п.1.2. До другого класу відносяться безпосередньо ТПС, конструктивне виконання яких, дозволяє здійснювати їх випробування у автоматичному режимі. Усі розроблені пристрої для випробувань ТПС, що представлені далі, відносяться до пристроїв другого класу, оскільки вони дозволяють проводити випробування сповіщувачів безпосередньо на об'єкті у автоматичному режимі, що скорочує час випробувань та виключає можливість появи суб'єктивних похибок.

4.5.1. Універсальний тепловий пожежний сповіщувач з функцією самоконтролю

Технічною реалізацією метода випробувань ТПС при впливі на його чутливий елемент внутрішнім тепловим впливом, що наведено в п. 4.3 є

сповіщувач, схема якого наведена на рис. 4.3, де: 1 – корпус; 2 – мікровентилятор; 3 – електричний нагрівач; 4 – повітряний екран; 5 – проріз; 6 – плата; 7 – вимірювально-перетворюючий блок; 8 – чутливий елемент; 9 – кришка. Проріз в повітряному екрані виконано у формі, що подібна профілю чутливого елемента. [113].

У п. 2.1. приведено математичне забезпечення для такого сповіщувача, а також визначені параметри формування теплового потоку, який створюється у його конструкції.

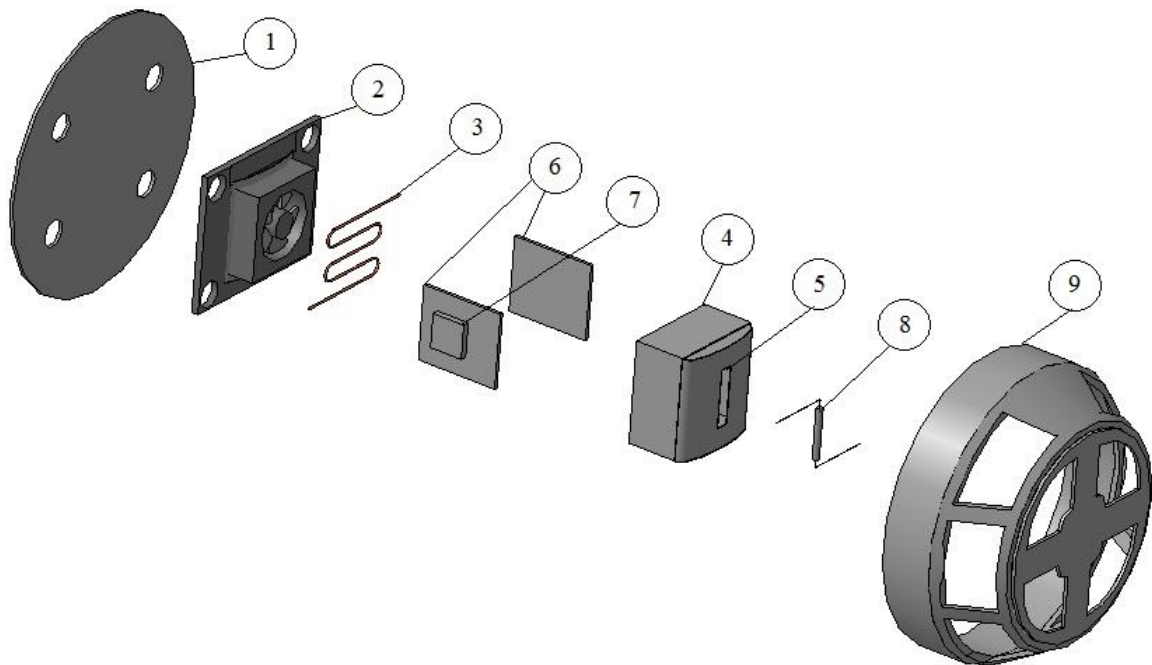


Рис. 4.3. Схема теплового пожежного сповіщувача

В штатному режимі, тобто в режимі виявлення пожежі, мікровентилятор та електричний нагрівач знеструмлені. При перевищенні температури навколишнього середовища величини температури спрацьовування від чутливого елемента до вимірювально-перетворюючого блока надається відповідна інформація, внаслідок чого цей блок видає інформацію про пожежу.

В режимі здійснення самоконтролю, який задається від приймально-контрольного приладу, на мікровентилятор і на електричний нагрівач подається електрична напруга. Нагріте повітря через проріз повітряного екрану поступає на чутливий елемент, який спільно із вимірювально-перетворюючим блоком видає інформацію про перевищення температури спрацювання.

Наявність повітряного екрану, в якому виконано проріз у формі, що подібна профілю чутливого елемента, дозволяє направляти на чутливий елемент весь нагрітий повітряний потік.

Електричний нагрівач може бути виконано із використанням дроту із константану або ніхрому, а в якості мікровентилятора може бути використано мікровентилятор типу МС 25100V2-A99, маса якого 7,5 г; потужність – 0.43 Вт і габарити – (25x25x10) мм.

При такій технічній реалізації, випробування теплового пожежного сповіщувача за місцем його розташування можуть здійснюватися без використання зовнішніх джерел тепла і в автоматичному режимі, внаслідок чого повністю виключаються операції, що здійснюються в ручному режимі. Такий метод випробувань ТПС є універсальним і може застосовуватись для сповіщувачів з будь-яким чутливим елементом. Також перевагою такого методу є те, що випробування сповіщувачів може здійснюватися без їх спрацювання. Виходячи з (2.28), знаючи умови проведення випробування, а також величину теплового потоку створеного нагрівальним елементом і вентилятором, можна визначити величину постійної часу сповіщувача, порівняння якої з нормативним значенням буде свідчити про працездатність сповіщувача. В зв'язку з цим суттєво скорочується час проведення випробування ТПС. У п. 1.4 приведено, що час проведення об'єктового випробування одного пожежного сповіщувача складає 5 хв 30 сек. Для приведеного методу випробування попередня підготовка приладу не потребується, тому час проведення випробування скорочується на мінімум на 2 хв, що скорочує час проведення контролю на

36 %. Також проведення контролю технічного стану здійснюється з пульту керування, що виключає необхідність ручних дій оператора, пов'язаних з цим суб'єктивних похибок, а також скорочує час, який необхідний оператору для переміщення при проведенні випробувань сповіщувачів у різних приміщеннях та на різних поверхах. До того ж за допомогою приведеного методу можливо здійснювати одночасну перевірку багатьох сповіщувачів.

4.5.2. Теплові пожежні сповіщувачі з терморезистивним чутливим елементом

Існує ТПС з терморезистивним ЧЕ, що здійснює контроль його технічного стану безперервно у часі, тим самим підвищуючи достовірність виявлення пожежі [114], однак при цьому випробування такого сповіщувача не може відбутися без підвищення температури навколишнього середовища. Для усунення цього недоліку були розроблені ТПС, що здатні проводити випробування у автоматичному режимі незалежно від температури навколишнього середовища.

Використовуючи математичні моделі, що приведені у п. 2.3. можна визначити величину постійної часу ТПС з терморезистивним чутливим елементом, порівняння якої з нормативною величиною буде свідчити про працездатність сповіщувача. Для реалізації такого методу випробувань ТПС з терморезистивним ЧЕ було розроблено схему сповіщувача, який здатен створювати теплову дію на ЧЕ шляхом пропускання через нього електричного струму [115]. Усі сповіщувачі, що представлені у цьому розділі здійснюють перевірку їх працездатності за допомогою методів, що ґрунтуються на законі Джоуля-Ленца.

На рис.4.4 представлена структурна схема технічної реалізації сповіщувача, де: 1 – джерело електричного струму, що формує електричний струм, який змінюється у часі пропорційно квадратному

кореню; 2 – дільник електричної напруги, 3, 7 – комутатори; 4 – терморезистивний чутливий елемент; 5, 6 – компаратори; 8 – генератор імпульсів; 9-11, 23 – тригери; 12,13 – елементи НІ; 14, 15 – елементи І; 16, 17 – дільники імпульсів; 18, 19 – двійкові лічильники; 20 – суматор за модулем два; 21 – демультимплексор; 22 – елемент АБО; y_1, y_2 – сигнали управління; U – електрична напруга [115].

Сповіщувач працює у двох режимах: виявлення пожежі та контролю його технічного стану. В першому режимі на джерело електричного струму не подається електрична напруга, оскільки вихід комутатора 3 відключено від чутливого елемента, а вихід комутатора 7 підключено до шини «вихід». Внаслідок такої комутації терморезистивний чутливий елемент реагує на зміну температури навколишнього середовища.

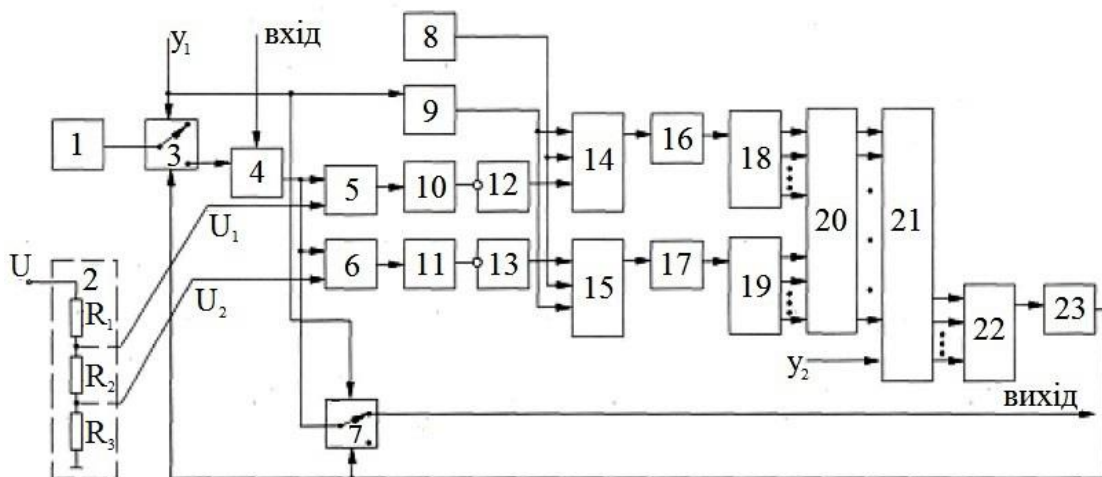


Рис. 4.4. Структурна схема теплового пожежного сповіщувача

У режимі контролю технічного стану від джерела електричного струму до чутливого елемента через комутатор подається електричний струм, при цьому вихід чутливого елемента відключається від шини «вихід».

Джерело електричного струму формує сигнал у вигляді (4.11), а реакція чутливого елемента на такий вплив буде описуватись виразом (4.12). Для спрощення запису введемо позначення $I^2 \sin^2 \omega_0 = b$.

Сигнал з виходу чутливого елемента надходить на входи компараторів 5,6 на другі виходи яких від дільника електричної напруги подаються відповідно сигнали U_1 та U_2 , що знаходяться у співвідношенні

$$U_2 = \alpha U_1, \quad (4.47)$$

де $\alpha > 1$.

По команді y_1 тригер 9 дозволяє проходження електричних імпульсів від генератора через елементи І 14, 15 та дільники імпульсів 16, 17 до двійкових лічильників 18, 19 та до суматора за модулем два, внаслідок чого на його виходах формується різниця кодів у вигляді двійкових чисел, що записуються в двійкових лічильниках 18, 19. При виборі коефіцієнтів розподілу дільників імпульсів 16 та 17 відповідно таких, що дорівнюють $\alpha(\alpha - 1)^{-1}$ та $\alpha - 1$, а в двійкові лічильники 18 та 19 будуть сформовані коди чисел, що пропорційні величинам

$$\alpha(\alpha - 1)^{-1} t_1; \quad \alpha(\alpha - 1)^{-1} t_2, \quad (4.48)$$

де t_1, t_2 – моменти часу, в які вихідний сигнал чутливого елемента дорівнює відповідно величинам U_1 та U_2 .

За допомогою компараторів 5, 6 та тригерів 10, 11 формуються параметри t_1 та t_2 . В ці моменти часу на виходах елементів НІ пропадають сигнали управління і, як наслідок, припиняється подача електричних імпульсів від генератора через елементи І.

В режимі, що встановився, компаратори 5, 6 подають сигнали на тригери 10 та 11 в моменти часу t_1 та t_2 , які визначаються із співвідношень

$$U_1 = b(t_1 - \tau); \quad U_2 = b(t_2 - \tau); \quad (4.49)$$

Із (4.49) витікає співвідношення

$$\tau = t_1 - U_1 b^{-1} = t_2 - U_2 b^{-1}. \quad (4.50)$$

Виходячи з (4.50) параметр можна представити у вигляді

$$b = (U_2 - U_1)(t_2 - t_1)^{-1}, \quad (4.51)$$

тоді після об'єднання (4.47), (4.50) та (4.51) постійна часу буде

$$\begin{aligned} \tau &= 0,5 \left[t_1 - U_1 (U_2 - U_1)^{-1} (t_2 - t_1) + t_2 - U_2 (U_2 - U_1)^{-1} (t_2 - t_1) \right] = \\ &= \alpha (\alpha - 1)^{-1} t_1 - (\alpha - 1)^{-1} t_2 \end{aligned} \quad (4.52)$$

з якого витікають співвідношення для (4.48).

Таким чином після моменту часу $t = t_1$ на виході двійкового лічильника 18 буде сформовано код числа, який несе інформацію стосовно першої складової (4.52), а на виході двійкового лічильника 19 – код числа, який несе інформацію стосовно другої складової (4.52).

По команді на адресні виходи демультимплексора з виходів суматора 21 за модулем два надходить двійковий код, який несе інформацію стосовно величини постійної часу τ і якщо її величина не перевищує

нормативного значення, то сповіщувач переходить у штатний режим роботи.

Перевагами такого технічного рішення є те, що сповіщувач може функціонувати у двох режимах, а режим контролю технічного стану здійснюється у автоматичному режимі та не залежить від температури навколишнього середовища.

Одним з недоліків існуючих ТПС з терморезистивним ЧЕ, які здатні здійснювати перевірку працездатності у автоматичному режимі є залежність достовірності результатів перевірки від величини адитивної похибки в вихідному сигналі ЧЕ. Для усунення цього недоліку, було розроблено ТПС [116], структурна схема якого приведена на рис. 4.5, де: 1 – терморезистивний ЧЕ; 2 – аналого-цифровий перетворювач; 3 – джерело електричного струму; 4 – ключ; 5 – мікропроцесор; 6, 8 – квадратори; 7 – інтегратор; 9 – суматор; 10 – синхронний детектор.

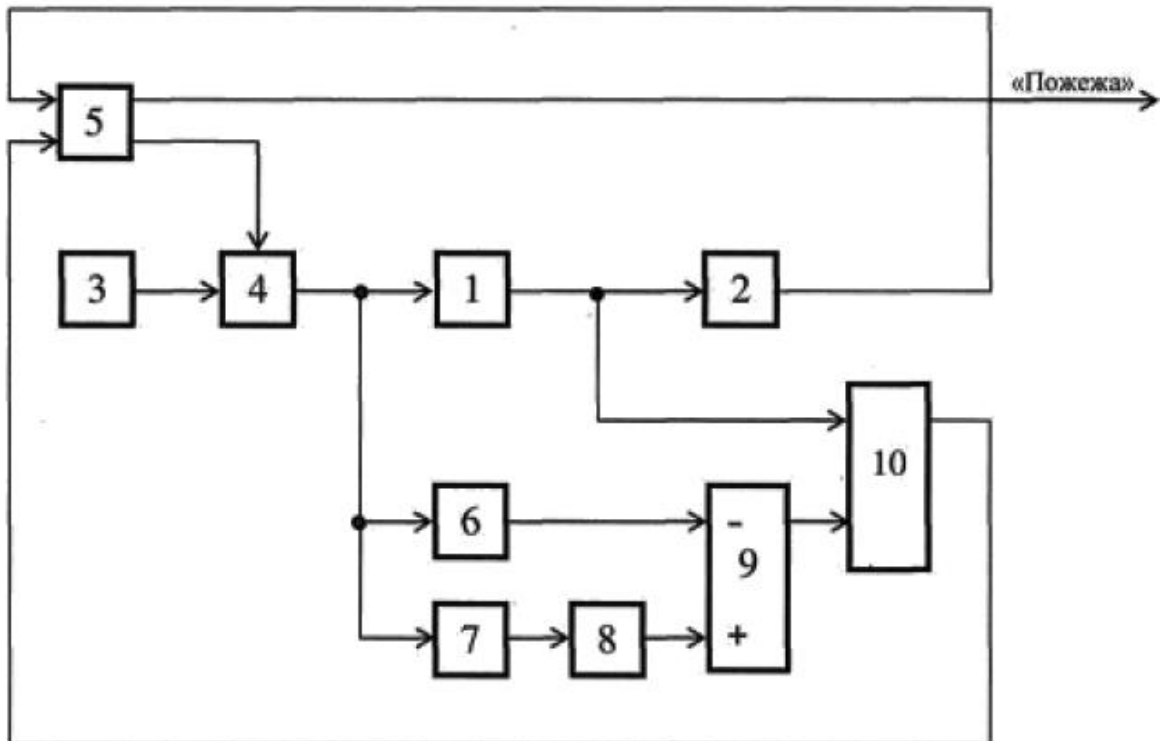


Рис. 4.5. Структурна схема теплового пожежного сповіщувача

Принцип роботи такого ТПС полягає у наступному. У штатному режимі функціонування джерело електричного струму за допомогою ключа відключено від терморезистивного ЧЕ. При наявності небезпечного чинника пожежі, величина якого перевищує допустиме значення, інформація від ЧЕ через аналого-цифровий перетворювач надходить до мікропроцесору, який формує команду пожежа.

В режимі контролю технічного стану джерело електричного струму по команді від мікропроцесора через ключ підключається до терморезистивного ЧЕ. На виході джерела електричного струму має місце сигнал вигляду (4.11). Теплова дія електричного струму згідно із законом Джоуля-Ленца буде визначатись виразом (4.12), а його температура описуватися виразом (4.14). Із урахуванням (4.12) та (4.14) в режимі, що встановився, для $\theta(t)$ має місце

$$\theta(t) = \theta = \frac{K\tau I^2}{2} \left[1 - \frac{\cos\omega t + \omega\tau \sin\omega t}{1 + \omega^2\tau^2} \right]. \quad (4.53)$$

Сигнал у вигляді (4.53), подається до першого входу синхронного детектора. На входи квадратора 6 та інтегратора через ключ від джерела електричного струму надходить сигнал, який є пропорційним величині

$$k_1 \sin \frac{\omega t}{2}. \quad (4.54)$$

де k_1 – коефіцієнт пропорційності.

До входу квадратора 8 поступає сигнал, пропорційний

$$\cos \frac{\omega t}{2}, \quad (4.55)$$

На виходах квадраторів 6 та 8 відповідно буде мати місце

$$\begin{aligned} k_{11} \sin^2 \frac{\omega t}{2}; \\ k_{12} \cos^2 \frac{\omega t}{2}. \end{aligned} \quad (4.56)$$

Якщо $k_1 = k_2 = A$, що забезпечується у вхідних ланках суматора, то

$$A \left(\cos^2 \frac{\omega t}{2} - \sin^2 \frac{\omega t}{2} \right) = A \cos \omega t, \quad (4.57)$$

і цей сигнал надходить на другий вхід синхронного детектора.

Вихідний сигнал синхронного детектора має опис

$$\chi = \frac{AK\tau I^2}{2} \int_0^{2\pi} \left[1 - \frac{\cos \omega t + \omega t \sin \omega t}{1 + \omega^2 \tau^2} \right] \cos \omega t dt = -\frac{AK\tau I^2}{4(1 + \omega^2 \tau^2)}. \quad (4.58)$$

Інформація стосовно сигналу (4.58) надходить до мікропроцесора, де здійснюється порівняння із апріорі заданою величиною, по результатах чого приймається рішення стосовно працездатності пристрою для виявлення пожежі.

Якщо корисний сигнал (4.53) буде супроводжуватись адитивною складовою похибки Δ , тобто буде мати місце

$$\theta(t) = \theta + \Delta, \quad (4.59)$$

то вихідний сигнал синхронного детектора (4.59) буде мати вигляд

$$\chi_1 = -\frac{AK\tau I^2}{4(1 + \omega^2 \tau^2)} + B\Delta \int_0^{2\pi} \cos \omega t dt, \quad (4.60)$$

де B – коефіцієнт пропорційності.

Внаслідок того, що друга складова цього виразу дорівнює нулю, то вихідний сигнал синхронного детектора є інваріантним стосовно адитивної складової похибки терморезистивного чутливого елемента.

Таким чином технічна реалізація такого сповіщувача дозволяє забезпечити його інваріантність для виявлення пожежі стосовно адитивної складової похибки, внаслідок чого підвищується достовірність перевірки його працездатності.

Недоліком такої технічної реалізації є структурна надлишковість, яка може бути усунена шляхом заміни двох квадраторів та суматора на подвоювач частоти, що встановлено між інтегратором і другим входом синхронного детектора, як показано на рис. 4.6, де 1 – терморезистивний чутливий елемент, 2 – аналого-цифровий перетворювач, 3 – джерело електричного струму, 4 – ключ, 5 – мікропроцесор, 6 – інтегратор, 7 – подвоювач частоти, 8 – синхронний детектор [117].

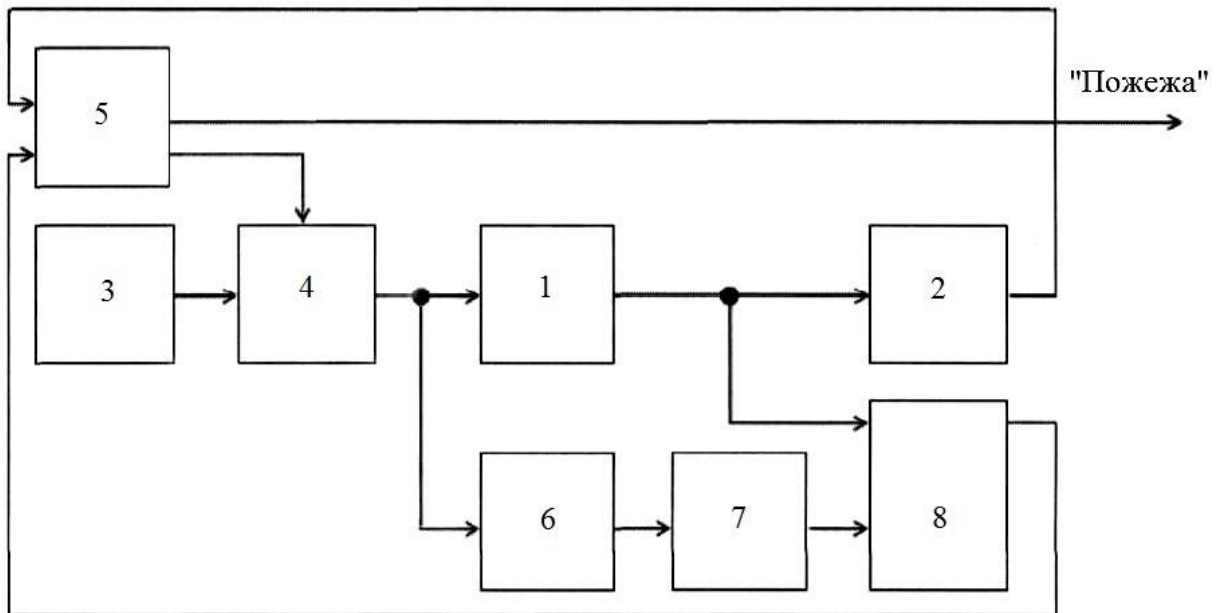


Рис. 4.6. Структурна схема теплового пожежного сповіщувача

В режимі виявлення пожежі пристрій працює аналогічно до пристрою, що зображено на рис.4.5. В режимі контролю технічного стану мікропроцесор дає команду на джерело електричного струму, яке через ключ підключається до чутливого елемента, внаслідок чого на його вході має місце сигнал вигляду (4.11). Реакція чутливого елемента на такий вплив буде описуватись (4.12), а його температура описуватися виразом (4.14).

До першого входу синхронного детектора подається сигнал вигляду

$$\theta_1 = \frac{K\tau I^2}{2} \left[1 - \frac{\cos\omega t + \omega\tau \sin\omega t}{1 + \omega^2\tau^2} \right], \quad (4.61)$$

а на другий вхід сигнал подається через інтегратор та подвоювач частоти і має вигляд

$$\theta_2 = A \cos \omega t, \quad (4.62)$$

де A – коефіцієнт передачі інтегратора та подвоювача частоти.

На виході з синхронного детектора буде мати місце сигнал

$$\begin{aligned} \theta &= 0,5AK\tau I^2 \int_0^{2\pi} \left(1 - (\cos\omega t + \omega\tau \sin\omega t)(1 + \omega^2\tau^2)^{-1} \right) \cos\omega t dt = \\ &= -0,25AK\tau I^2 (1 + \omega^2\tau^2)^{-1}. \end{aligned} \quad (4.63)$$

Цей сигнал надходить на мікропроцесор, де перевіряється виконання умови

$$|\theta - \theta_0| \leq \xi, \quad (4.64)$$

де θ_0 – апріорі задана величина, ξ – мале число. На основі цього порівняння робиться висновок про відповідність сповіщувача вимогам нормативних документів. Якщо умова (4.64) виконується, то мікропроцесор переводить сповіщувач у перший режим функціонування.

Одним із варіантів конструктивних рішень ТПС є сповіщувачі з двома терморезистивними ЧЕ. Недоліком таких сповіщувачів є те, що не можливо здійснити випробування таких сповіщувачів безпосередньо на об'єкті у автоматичному режимі. Для усунення цього недоліку було розроблено сповіщувач, який представлений на рис. 4.7, на якій зображені: 1, 2 – терморезистивні чутливі елементи 3, 4, 15, 16 – суматори; 5, 6, 11, 13, 14 – електронні ключі; 7, 8 – порогові пристрої; 9 – пристрій формування інформації про пожежу; 10 – джерело електричного току; 12 – пристрій управління; 17 – елемент АБО; 18 – обчислювальний пристрій [118].

Тепловий пожежний сповіщувач працює наступним чином. В режимі виявлення пожежі пристрій управління подає сигнали на входи управління електронних ключів 11, 5 та 6, внаслідок чого виходи електронного ключа 11, а також другі виходи електронних ключів 5, 6 будуть відключені відповідно від суматорів 3,4 та електронних ключів 13, 14. Сигнали з виходів терморезистивних чутливих елементів 1 та 2, що несуть інформацію про температуру $T(t)$, через електронні ключі 5 та 6 поступають відповідно на порогові пристрої 7 та 8, за сигналами яких пристрій формування інформації про пожежу 9 виробляє сигнал «пожежа».

В режимі здійснення контролю технічного стану ТПС за сигналом від пристрою управління 12 вихід електронного ключа 11 підключається до другого входу суматора 3, виходи електронних ключів 5 та 6 підключаються відповідно до виходів електронних ключів 13 та 14, а їх перші виходи підключаються відповідно до входу, що підсумовує, і до входу, що віднімає, суматора 15. Внаслідок такої комутації в режимі, що

встановився, на вході, що підсумовує, суматора 15 буде мати місце сигнал, який несе інформацію від чутливого елемента 1 стосовно суми температури $T(t)$ та температури θ_1 , яка обумовлена нагрівом терморезистивного чутливого елемента 1 за рахунок електричного току I , що протікає по ньому від джерела електричного току 10.

Складова температури θ_1 , що згідно з має вигляд

$$\theta_1 = KI^2\tau_1. \quad (4.65)$$

На вході, що віднімає, суматора 15 буде мати місце сигнал, який несе інформацію стосовно температури $T(t)$, яка поступає від терморезистивного чутливого елемента 2 через суматор 4 і електронні ключі 6 та 14. Вихідний сигнал суматора буде нести інформацію відповідно до (4.65), яка через елемент АБО 17 поступає до пристрою, що обчислює, 18, де визначається величина постійної часу τ_1 .

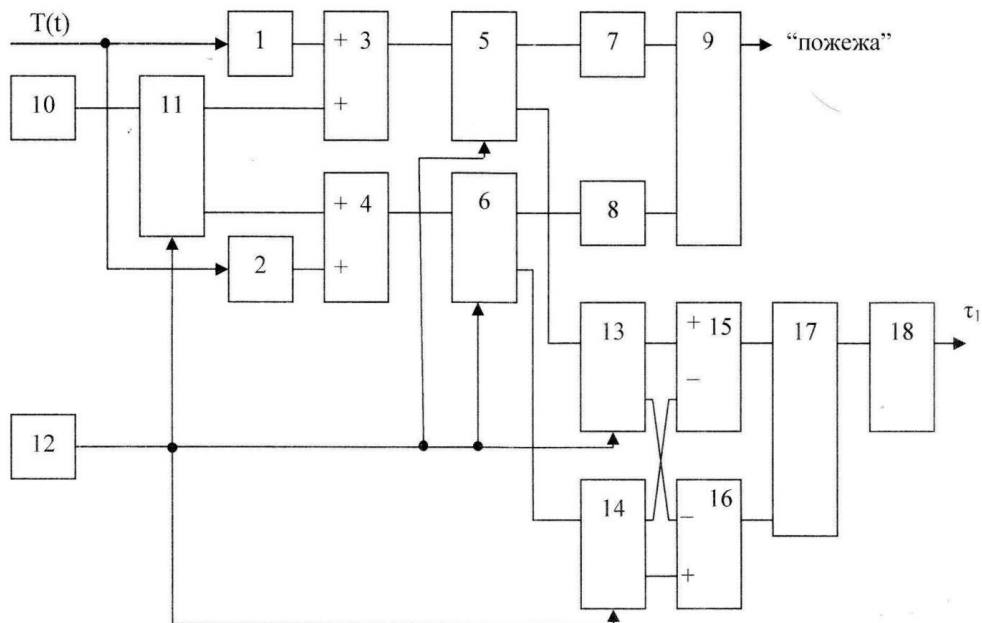


Рис. 4.7. Структурна схема теплового пожежного сповісвача

Після завершення цієї процедури пристрій управління 12 відключає вихід електронного ключа 11 від входу суматора 3 і підключає джерело електричного току 10 до входу суматора 4. Внаслідок такої комутації в режимі, що встановився, на вході, що підсумовує, суматора 16 буде мати місце сигнал, який несе інформацію стосовно $T(t) + \theta_2$, де

$$\theta_2 = KI^2\tau_2, \quad (4.66)$$

τ_2 – постійна часу терморезистивного чутливого елемента 2.

Складова θ_2 обумовлена нагрівом терморезистивного чутливого елемента 2 електричним током I , що протікає по ньому від джерела електричного току 10. На вході, що віднімає, суматора 16 буде мати місце сигнал, який несе інформацію стосовно температури $T(t)$, яка поступає від терморезистивного чутливого елемента 1 через суматор 3 і електронні ключі 5 та 13. Вихідний сигнал суматора 16 несе інформацію відповідно до (4.66), яка через 17 поступає до пристрою, що обчислює 18, де визначається величина постійної часу τ_2 .

Таким чином розроблений ТПС [118], у автоматичному режимі може здійснювати визначення постійних часу обох ЧЕ. На основі порівняння визначених значень величин постійних часу з нормативними робиться висновок про працездатність сповіщувача

Усі технічні реалізації, що приведені у п. 4.5.2 дозволяють здійснювати випробування ТПС з терморезистивним ЧЕ у місці їх встановлення та в автоматичному режимі, шляхом визначення постійних часу їх чутливих елементів та порівняння цих значень з нормативними. Порівнявши ці сповіщувачі, можна зробити висновок, що сповіщувач, структурна схема якого представлена на рис. 4.4, має найскладніше конструктивне виконання, а найпростіше сповіщувач, що представлений на рис. 4.6. Найдовше випробування здійснює сповіщувач з двома

терморезистивними елементами, що обумовлено вимірюванням вихідних сигналів кожного з них та обчисленням їх постійних часу, які порівнюються з нормативними.

Порівнявши методи випробувань ТПС, можна зробити висновок, що найкращим, з точки зору місця проведення випробування є методи, що приведені у п. 4.2.2, які оснований на визначенні його постійної часу та п. 4.4, які оснований на визначенні його часу спрацьовування, оскільки використання даних методів дозволяє здійснювати контроль технічного стану ТПС безпосередньо на об'єкті. При цьому перевірка працездатності ТПС здійснюється повністю в автоматичному режимі, що скорочує час проведення випробування та зменшує трудомісткість процесу контролю.

Методи випробувань, що приведені в п. 4.1, п.4.2.1 та п. 4.3 є більш універсальними і підійдуть для сповіщувачів будь-якого типу. Метод, щоведений у п.4.3, може бути застосований, як для проведення об'єктових, так і для стаціонарних випробувань. Також до переваг цього методу можна віднести те, що контролювати технічний стан сповіщувача можна у штатному режимі функціонування.

Метод випробувань, щоведений в п. 4.2.1 визначає постійну часу сповіщувача на основі інформації про його амплітудно-частотну характеристику. Перевагою над методом приведеним в п. 4.3 є те, що при його використанні не виникає необхідність у вимірюванні теплового потоку, створеного на сповіщувач.

Усі пристрої, що приведені у цьому розділі дозволяють проводити випробування сповіщувачів безпосередньо на об'єкті та у автоматичному режимі. Технічне рішення, що приведене в п. 4.5.1 є універсальним і може бути реалізоване, для сповіщувачів з будь-якими чутливими елементами.

За часом проведення випробування перевагу мають сповіщувачі з терморезистивним ЧЕ, що представлені на рис. 4.5. та рис.4.6. Це обумовлено тим, що в основу цих пристроїв покладено метод випробувань,

що оснований на законі Джоуля-Ленца, простим математичним забезпеченням і конструктивним виконанням.

4.6. Оцінка ефективності методів випробувань теплових пожежних сповіщувачів

Основними недоліками існуючих методів випробувань ТПС є великий час проведення випробування та незручність їх проведення. Запропоновані методи направлені та усунення цих недоліків, як для об'єктових так і для стаціонарних випробувань.

Для порівняння існуючих методів з запропонованими були використані стаціонарні методи, які приведені у нормативних документах [3, 8], а саме вогневі випробування типу TF-1, TF-5 і TF-6 та випробування у тепловому каналі, опис і технічні характеристики яких приведені у розділі 1. Перші два класи об'єктових випробувань здійснюються без визначення параметрів ЧЕ ТПС і є менш достовірними. Усі запропоновані об'єктові методи випробувань ТПС здійснюються з перевіркою його чутливого елемента, тому їх порівняння було виконано із існуючим методом об'єктових випробувань третього класу. Найбільш поширеним методом випробувань ТПС третього класу є метод, що полягає у створенні на сповіщувач зовнішнього теплового потоку та вимірювання його часу спрацьовування. «Теплотест-М» є одним із приладів, що використовується в Україні і, за допомогою якого, проводяться випробування ТПС таким методом, тому цей прилад було обрано для порівняння із запропонованими методами випробувань ТПС.

Для порівняння існуючих та запропонованих методів була складена табл. 4.1, у якій показано основні відмінності даних методів.

Таблиця 4.1

Порівняння існуючих і розроблених методів випробувань теплових пожежних сповіщувачів

	Умовне позначення	Метод випробування	Тип ЧЕ, що може бути перевірений	Можливість проведення випробування у автоматичному режимі	Можливість проведення випробування у штатному режимі	Параметр або характеристика сповіщувача, що визначається при перевірці	Час проведення випробування одного сповіщувача до с	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Стационарні								
Існуючі	A1	Вогневі випробування типу TF-1(Європейський стандарт EN 54-9:1982 [119])	Без обмежень	-	-	Час спрацьовування	370	демонтажу ТПС з місця установки та установка після проведення випробування; перевезення ТПС до випробувального приміщення та в іншому напрямку; підготовка тестових осередків пожежі; установка ТПС у приміщенні; охолодження приміщення до визначеної температури після проведення випробування.
	A2	Вогневі випробування типу TF-5 (Європейський стандарт EN 54-9:1982 [119])	Без обмежень	-	-	Час спрацьовування	240	
	A3	Вогневі випробування типу TF-(Європейський стандарт EN 54-9:1982 [119])	Без обмежень	-	-	Час спрацьовування	510	

Продовження таблиці 4.1

	1	2	3	4	5	6	7	8
Існуючі	B	Тепловий канал (Європейський стандарт EN 54-5: 2000 [3])	Без обмежень	-	-	Час спрацьовування	960	демонткування ТПС з місця установки та установка після проведення випробування; перевезення ТПС до теплового каналу та в іншому напрямку; установка ТПС корпусі теплового каналу та його демонткування після проведення випробування.
Запропоновані	C	Визначення перехідної функції ТПС і порівняння її з нормативною (п.3.2.1,) [90]	Без обмежень	-	-	Перехідна функція	105	демонткування ТПС з місця установки та установка після проведення випробування; перевезення ТПС до теплового каналу та в іншому напрямку; установка ТПС корпусі теплового каналу та його демонткування після проведення випробування.
	C1	Метод, оснований на порівнянні перехідної функції сповіщувача з модельним сигналом (п.4.1) [104]	Без обмежень	-	-	Перехідна функція	105	
	D	Метод, оснований на використанні амплітудно-частотної характеристики ТПС (п. 4.2.1) [106]	Без обмежень	-	-	Постійна часу	120	
	E	Метод, оснований на визначенні частотних характеристик ТПС (п. 3.2.2, п.4.2.2) [93, 95]	Без обмежень	-	-	АЧХ та ФЧХ	60	

Об'єктові								
	1	2	3	4	5	6	7	8
Існуючі	F	Визначення часу спрацьовування ТПС при впливі на нього зовнішнім тепловим потоком, на прикладі приладу «Теплотест-М» (п.1.2) [29]	Без обмежень	-	-	Час спрацьовування	110	підготовка приладу до роботи; зняття показань; переміщення для проведення випробування у різних приміщеннях.
	G	Визначення постійної часу ТПС при впливі на нього тепловим потоком, сформованим в його конструкції (п. 4.3, п. 4.5.1) [102,113]	Без обмежень	+	+	Постійна часу	60	дії оператора для запуску режиму контролю технічного стану ТПС.
Запропоновані	H	Метод, що оснований на визначенні фазово-частотної характеристики ТПС(п. 4.2.2) [108]	Терморезистивний	+	+	Постійна часу	60	дії оператора для запуску режиму контролю технічного стану ТПС.
	I	Метод, що оснований на законі Джоуля-Ленца, при пропусканні через ЧЕ ТПС постійного електричного струму (п.4.2) [110]	Терморезистивний	+	+	Час спрацьовування	60	дії оператора для запуску режиму контролю технічного стану ТПС.
	J	Метод, що оснований на законі Джоуля-Ленца, при пропусканні через ЧЕ ТПС електричного струму у вигляді чверті косинусоїди (п.4.2) [111]	Терморезистивний	+	+	Час спрацьовування	60	дії оператора для запуску режиму контролю технічного стану ТПС.

Під часом проведення випробування одного сповіщувача, мається час, що потрібен для проведення випробувань сповіщувачів класу А1. Час, який потрібен для встановлення усталеного режиму визначався з урахуванням того, що він дорівнює 3 величинам постійної часу сповіщувача. За час проведення випробування у тепловому каналі був прийнятий час проведення випробування по визначенню часу спрацьовування сповіщувача від температури 25 °С, оскільки сертифікаційні випробування теплових пожежних сповіщувачів за регламентом, що приведений у табл.1.5, проводяться близько 36 годин.

На графіку, що приведений на рис. 4.8, показано тривалість проведення випробування одного ТПС різними методами де: А1, А2, А3, В, С, С1, D, E, F, G, H, I, J – умовні позначення методів випробувань ТПС, що приведені в табл. 4.1.

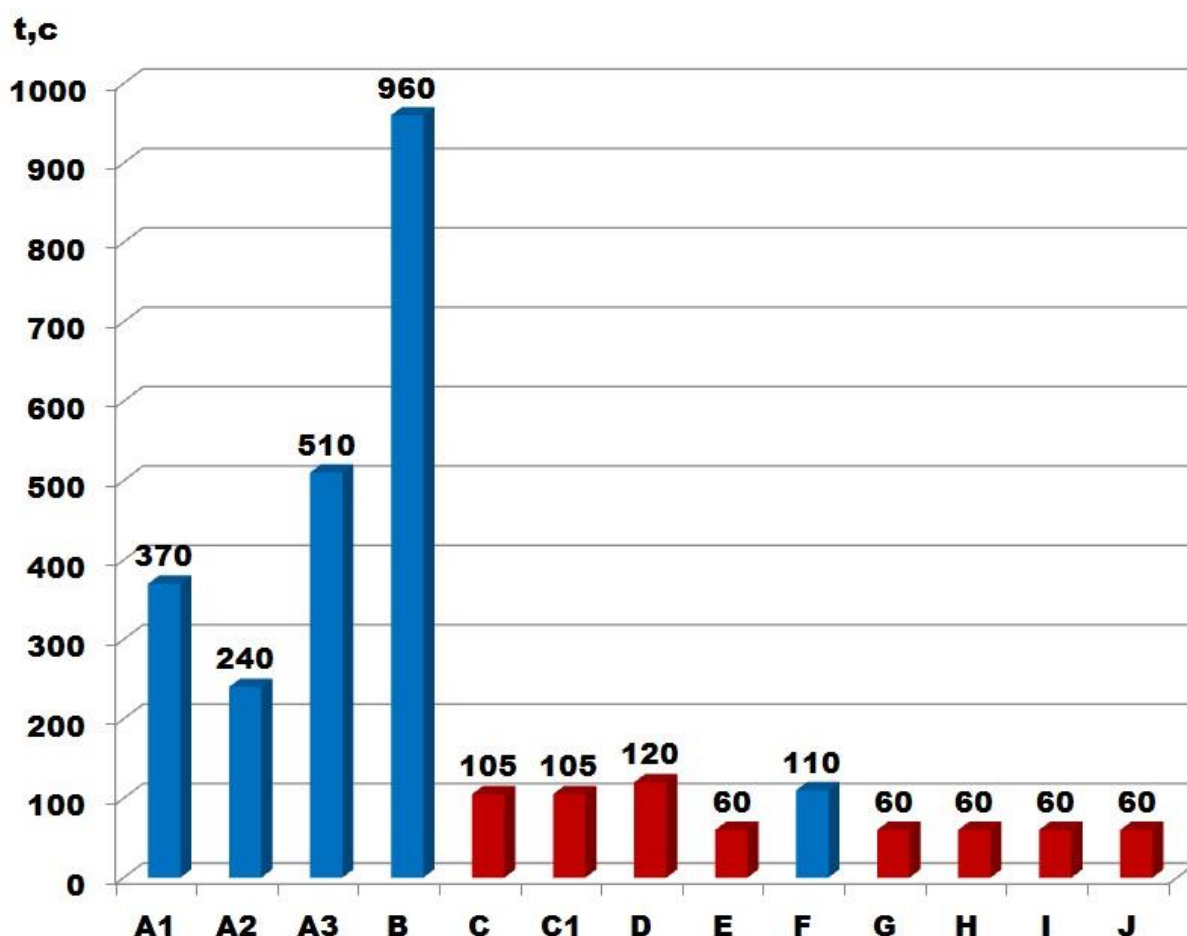


Рис. 4.8. Час, що потребується для проведення випробування одного ТПС

Для порівняння існуючих методів випробувань ТПС із запропонованими було введено критерій ефективності $K_{\text{еф}}$ та критерій трудомісткості $K_{\text{ТР}}$, які визначаються за формулами

$$K_{\text{еф}} = \frac{t_{\text{пер}}^{\text{існ}}}{t_{\text{пер}}^{\text{зап}}}; \quad K_{\text{ТР}} = \frac{t_{\text{пер}}^{\text{існ}} + t_{\text{дод}}^{\text{існ}}}{t_{\text{пер}}^{\text{зап}} + t_{\text{дод}}^{\text{зап}}}, \quad (4.52)$$

де $t_{\text{пер}}^{\text{існ}}$ – час проведення випробування одного ТПС існуючим методом, $t_{\text{пер}}^{\text{зап}}$ – час проведення випробування одного ТПС запропонованим методом, $t_{\text{дод}}^{\text{існ}}$ – додатковий час, необхідний для організації проведення випробування існуючим методом, а $t_{\text{дод}}^{\text{зап}}$ – додатковий час, необхідний для організації проведення випробування запропонованим методом. Критерій ефективності показує у скільки разів час випробування одного ТПС запропонованим методом менше за час випробування існуючим методом.

Порівняння методів випробувань ТПС були проведені окремо для стаціонарних та для об'єктових методів. Як існуючі стаціонарні методи були використані метод випробування ТПС у тепловому каналі [3], оскільки для проведення випробування ТПС запропонованими методами також повинна використовуватися спеціальна тепла камера, та вогневі випробування типу ТП-5 [119], оскільки час його проведення найменший у порівнянні з іншими вогневими випробуваннями.

Для порівняння існуючих стаціонарних методів із запропонованими методами С, С1, D, E, була побудована діаграма їх коефіцієнтів ефективності, яка приведена на рис. 4.9.

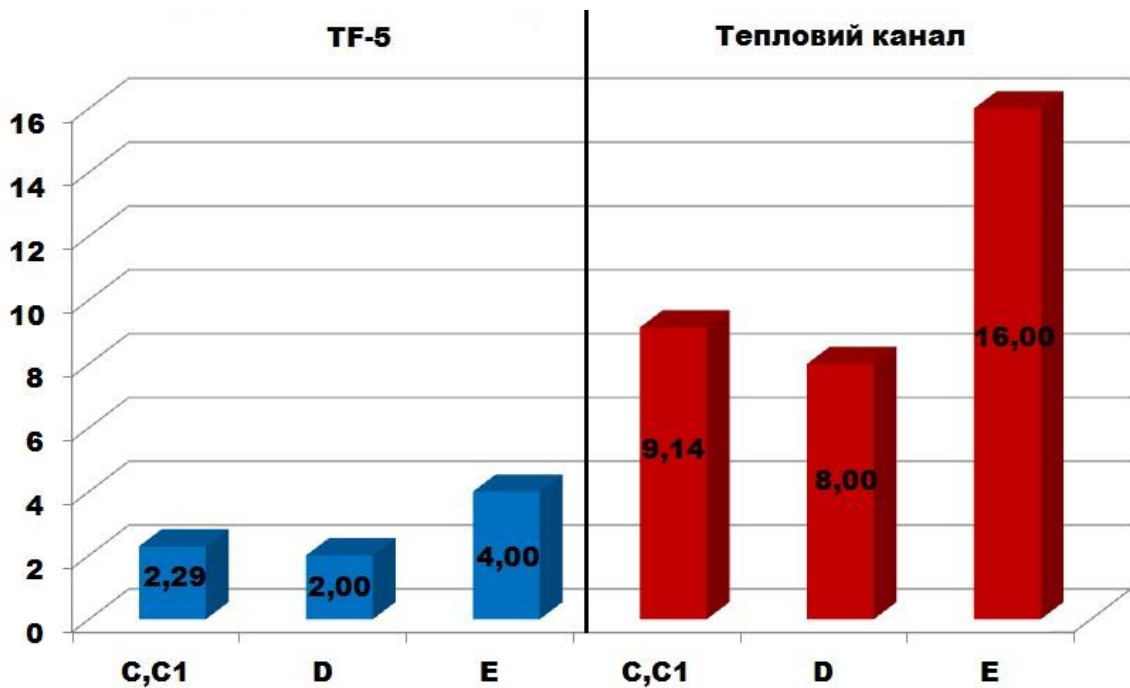


Рис. 4.8. Критерій ефективності запропонованих стаціонарних випробувань у порівнянні з існуючими (C,C1, D, E – умовне позначення методів приведених у табл.4.1)

Як видно з цих графіків, запропоновані методи мінімум у два рази зменшують час проведення випробувань сповіщувачів. У табл. 4.1 показано, що додатковий час, який потрібен для організації проведення випробувань запропонованих стаціонарних методів C, C1, D та E, такий же як і у метода B, тому коефіцієнт трудомісткості приймаємо за $K_{TP} = 1$.

Для методу A2 час для організації випробування буде більше ніж у методів C, C1, D та E, що пов'язано з підготовкою тестових осередків пожежі, що для вогневого випробування TF-5, становить приблизно 300 секунд. Цей час є дуже незначним у порівнянні з часом, що потрібен на демонтування та транспортування сповіщувачів. З урахуванням цього, коефіцієнт трудомісткості між методом A2 та методами C, C1, D, E, для випробування одного ТПС, можна прийняти за одиницю, але із збільшенням кількості випробувань цей коефіцієнт зростає.

На рис. 4.9 показані коефіцієнти ефективності та трудомісткості запропонованих об'єктових методів перевірки працездатності ТПС у порівнянні з існуючим методом F (табл. 4.1).

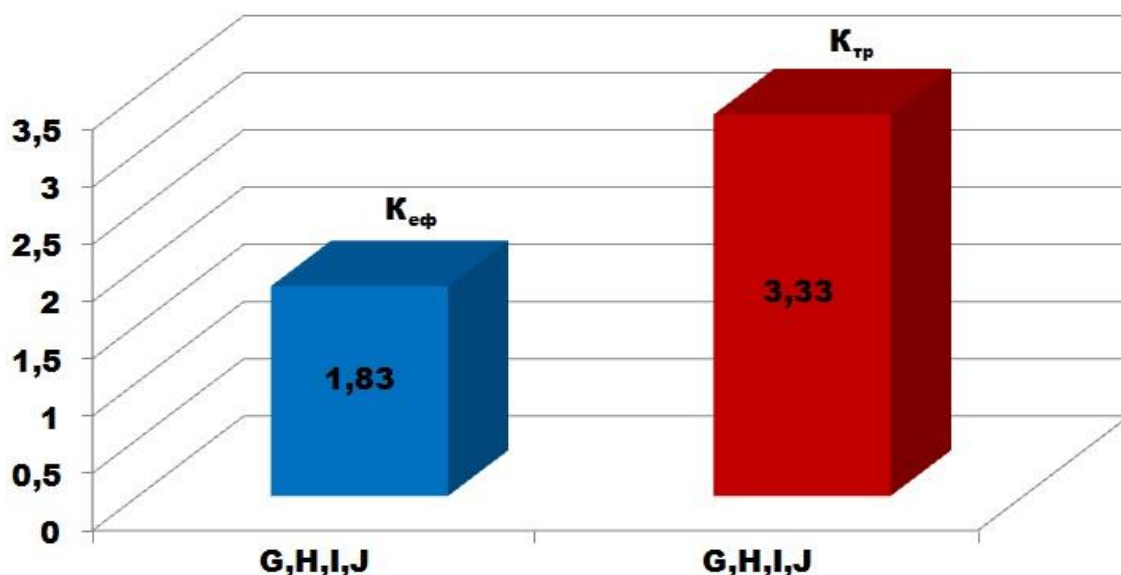


Рис. 4.9. Коефіцієнти ефективності та трудомісткості запропонованих методів G, H, I, J порівняно з методом F (табл. 4.1)

Оскільки час проведення випробувань ТПС методами G, H, I, J (табл.4.7) однаковий, то і коефіцієнт ефективності порівняно із методом F також буде однаковим та дорівнює 1,83, що значно скорочує час проведення випробувань.

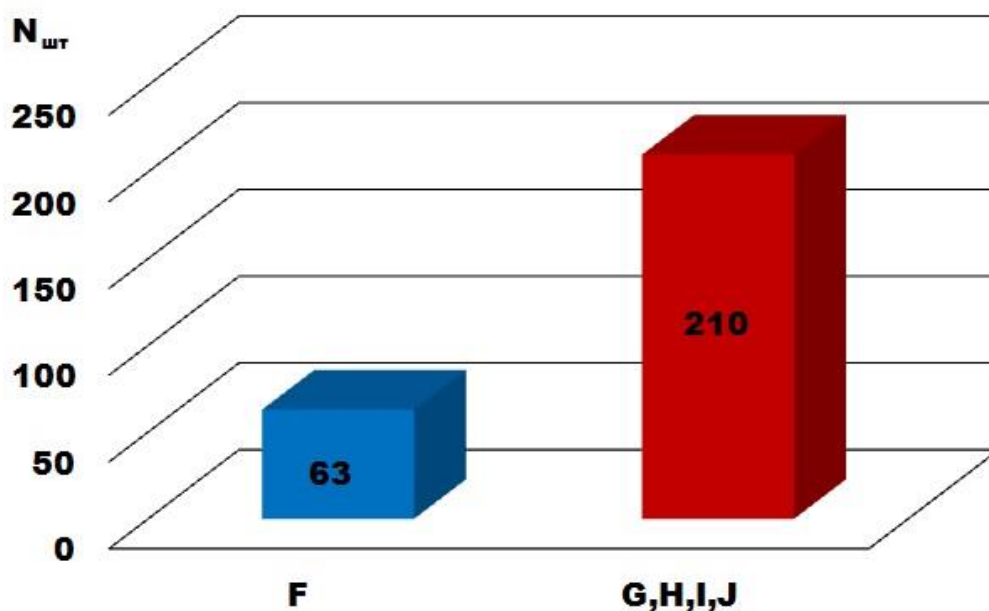


Рис. 4.10. Кількість ТПС, що може бути перевірена за визначений час об'єктовими методами випробувань ТПС

Критерії трудомісткості були визначені із урахуванням того, що для існуючого методу F додатковий час, що необхідний для проведення

випробувань, входить підготовка приладу до роботи та переміщення оператора для проведення випробувань сповіщувачів у різних приміщеннях та на різних поверхах. Виходячи з цього було припущено, що час проведення випробування одного сповіщувача може збільшитись до 200 секунд. Для запропонованих методів G, H, I, J (табл.4.7) до додаткового часу, необхідного для організації випробування входять лише дії оператора по запуску режиму випробування з пульта керування, тобто фактично додаткового часу не потребується.

Враховуючи те, що середній час роботи акумулятора існуючого приладу «Теплотест-М» дорівнює 3,5 години, було розраховано кількість сповіщувачів, що може бути перевірена за цей час існуючим методом F, та запропонованими методами G, H, I, J, що відображено на рис. 4.10.

4.7. Рекомендації, щодо проведення випробувань теплових пожежних сповіщувачів

Запропоновані методи випробувань ТПС за місцем здійснення випробувань поділяються на два типи: стаціонарні та об'єктові. Незалежно від типу методу, існують загальні положення, які повинні виконуватись під час проведення випробувань ТПС.

1. Перед початком проведення випробувань ТПС, сповіщувач що піддається випробуванню, повинен бути стабілізований за нормальних атмосферних умов, які згідно з [6] є такими:

- температура середовища (15-35) °С ;
- відносна вологість повітря (25-75) %;
- атмосферний тиск (86-106) кПа.

2. Під час проведення випробувань ТПС, він повинен бути підключений відповідно до схеми підключення, як показано у паспорті сповіщувача.

3. Характеристики устаткування електроживлення, до якого підключено ТПС, повинні відповідати характеристикам визначеним його виробником та приведені у супровідній документації.

4. Допустимі відхилення параметрів випробувань на впливання довкілля повинні відповідати наданим у базових стандартах для випробування [6]. Якщо вимога і методика випробування не визначає допустимі відхилення чи межі відхилення, тоді межі відхилення повинні дорівнювати 5 % [3].

Для методів випробувань ТПС, що запропоновані у роботі було розроблено проект інструкції по їх використанню, який приведений у табл. 4.2 та табл. 4.3.

Таблиця 4.2

Методи випробувань ТПС

№ з/п	Методи випробувань ТПС, що оснований на визначенні	№ пункту, в якому приводиться метод
1.	Перехідної функції ТПС	
1.1	Визначення перехідної функції та порівняння її з нормативною	п.3.2 [90]
1.2	Визначення перехідної функції та порівняння її з модельним сигналом	п.4.1 [104]
2.	Частотних характеристик	
2.1	Визначення частотних характеристик та порівняння їх з нормативними	п. 3.2.2 [93,95]
2.2	Вимірювання амплітуди вихідного сигналу чутливого елемента та визначення його постійної часу	п.4.2.1 [106]
2.3	Визначення постійної часу шляхом, виміру фазового зсуву між вихідним сигналом ЧЕ ТПС і квадратом величини вхідного впливу та визначення його постійної часу	п.4.2.2 [108]
3.	Постійної часу	
3.1	Визначення постійної часу ТПС при створенні на нього теплового потоку сформованого у корпусі сповіщувача	п.4.3 [102,113]
3.2	Визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів при зміні температури впливу на нього за квадратичним законом та порівняння її з нормативною	п. 3.4.1 [97]

3.3	Визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів при зміні температури впливу за лінійним законом та порівняння її з нормативною	п. 3.4.2 [98]
3.4	Визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів з терморезистивним чутливим елементом та порівняння її з нормативною	п. 3.4.3 [101]
4	Часу спрацьовування	
4.1	Визначення часу спрацьовування ТПС при пропусканні через його ЧЕ постійного по величині електричного струму	п.4.4 [110]
4.2	Визначення часу спрацьовування ТПС при пропусканні через його ЧЕ електричного струму у вигляді косинусоїди	п.4.4 [111]

У відповідності з табл. 4.2, були складені рекомендації до кожного методу випробувань ТПС, що представлені у табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Рекомендації, щодо проведення випробувань ТПС

1.1. Визначення перехідної функції сповіщувача та порівняння її з нормативною (п.1.1 табл. 4.2)	
Вид ЧЕ	Без обмежень
Технічне обладнання	Тепловий канал, технічні характеристики якого приведені у табл.1.6 п. 1.2 [3]
Методика проведення випробування	ТПС необхідно розмістити у робочому об'ємі теплової камери, після чого збільшувати в ній температуру з постійною швидкістю. В кожний з моментів часу, що відстоять один від одного на однаковий апіорі заданий інтервал, що визначається за формулою (3.19) п. 3.2, вимірювати перевищення вихідного сигналу відносно його значення в попередній момент часу. Визначити перехідну функцію ТПС за формулою (3.17) п. 3.2 і порівняти її з нормативною.
Вимоги	Перехідна функція повинна відрізнятися від нормативної не більше ніж на 5 %.
1.2. Визначення перехідної функції сповіщувача та порівняння її з модельною (п.1.2 табл. 4.2)	
Вид ЧЕ	Без обмежень
Технічне обладнання	Тепловий канал, технічні характеристики якого приведені у табл.1.6 п. 1.2 [3], який повинен бути обладнаний пристроєм для формування модельного сигналу та пристроєм порівняння.

Методика проведення випробування	ТПС необхідно розмістити у робочому об'ємі теплової камери, після чого збільшувати в ній температуру з постійною швидкістю. Визначити реакцію сповіщувача на цей вплив. Додатково одночасно із збільшенням температури в робочому об'ємі теплової камері сформувати модельний сигнал. В дискретні моменти часу, які відстоять один від одного на однакові інтервали, здійснити вимірювання вихідного сигналу ТПС і порівняти їх з величинами модельного сигналу в ці ж моменти часу.
Вимоги	Перехідна функція повинна відрізнятися від модельної не більше ніж на 5 %.
2.1. Визначення частотних характеристик та порівняння їх з нормативними (п.2 табл. 4.2)	
Вид ЧЕ	Без обмежень
Технічне обладнання	Тепловий канал, технічні характеристики якого приведені у табл.1.6 п. 1.2 [3], який обладнано додатковим відсіком для ТПС.
Методика проведення випробування	ТПС необхідно розмістити додатковому відсіку теплового каналу, який ізольований від його робочого об'єму. Збільшити температуру у робочому об'ємі теплової каналу до встановленого значення. Після встановлення усталеного режиму, необхідно швидко ввести ТПС до робочого об'єму теплового каналу, що здійснюється за допомогою відкривання додаткового відсіку, переміщення ТПС у робочий об'єм каналу та закривання відсіку. Після цього, в кожний із моментів часу, які відстоять один від одного на однакову величину здійснити вимірювання величини зростання температури ЧЕ ТПС відносно попереднього моменту часу. Виміряти час досягнення температури теплового впливу на ЧЕ ТПС сталого значення. Визначити частотні характеристики сповіщувача формулами (3.50), (3.51) п. 3.2.2. Порівняти отримані частотні характеристики з нормативними.
Вимоги	Частотні характеристики повинні відрізнятися від нормативних не більше ніж на 5 %.
2.2. Визначення постійної часу ТПС шляхом вимірювання амплітуди вихідного сигналу ЧЕ та порівняння її з нормативною (п.3.1 табл. 4.2)	
Вид ЧЕ	Без обмежень
Технічне обладнання	Теплова камера або пристрій, що здатні створювати теплові потоки, величини яких змінюються за гармонічним законом.

Методика проведення випробування	На ТПС послідовно у часі сформувати два теплові потоки, що надходять на його ЧЕ. Величини цих потоків необхідно змінювати за гармонічним законом із різними апріорі заданими частотами та із однаковими амплітудами. Виміряти амплітуди вихідних сигналів ТПС на цих частотах. Визначити постійну часу ТПС за формулою (4.9), а результат контролю технічного стану за критерієм (4.10).
Вимоги	Нормована величина постійної часу теплових пожежних сповіщувачів визначається з табл.1.4 і дорівнює для сповіщувачів класу А1 – ≤ 20 с, для ТПС інших класів – ≤ 60 с.
2.3. Визначення постійної часу шляхом, виміру фазового зсуву між вихідним сигналом ЧЕ ТПС і квадратом величини вхідного впливу (п.3.3 табл. 4.2)	
Вид ЧЕ	Терморезистивний
Технічне обладнання	Додаткового обладнання не потребується
Методика проведення випробування	При запуску режиму контролю технічного стану ТПС, через його чутливий елемент пропускається електричний струм, що змінюється за гармонічним законом з фіксованою частотою. Величина цього струму зводиться у квадрат і вимірюється фазовий зсув між вихідним сигналом ЧЕ ТПС і квадратом величини електричного струму, на частоті яка дорівнює подвоєному значенню апріорі фіксованої частоти. Визначається постійна часу ТПС за формулою (4.17), а результат контролю технічного стану сповіщувача визначається за формулою (4.18).
Вимоги	Нормована величина постійної часу теплових пожежних сповіщувачів визначається з табл.1.4 і дорівнює для сповіщувачів класу А1 – ≤ 20 с, для ТПС інших класів – ≤ 60 с.
3.1. Визначення постійної часу ТПС при створенні на нього теплового потоку сформованого у корпусі сповіщувача (п.3.1 табл.4.2)	
Вид ЧЕ	Без обмежень
Технічне обладнання	Додаткового обладнання не потребується
Методика проведення випробування	При запуску режиму перевірки працездатності ТПС на його ЧЕ формується постійний по величині тепловий потік. В режимі, що встановився, вимірюється величина цього теплового потоку і температура ЧЕ ТПС. Визначається величина постійної часу ЧЕ ТПС за формулою (4.23). Результат контролю технічного стану ТПС визначається критерієм (4.24).

Вимоги	Нормована величина постійної часу теплових пожежних сповіщувачів визначається з табл.1.4 і дорівнює для сповіщувачів класу А1 – ≤ 20 с, для ТПС інших класів – ≤ 60 с.
Примітка	Параметри формування теплового потоку створеного в конструкції сповіщувача можна визначити із графіка представленого на рис. 2.13. Наприклад для створення на ЧЕ ТПС теплового потоку з температурою 54°C на нагрівальний елемент, виконаний з ніхрому товщиною 0,3 мм та довжиною 293 мм, потрібно подати напругу 23,4 В, а відстань від нього до чутливого елемента повинна становити 3,4 мм.
3.2. Визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів при зміні температури впливу на нього за квадратичним законом та порівняння її з нормативною (п.3.2 табл. 4.2)	
Вид ЧЕ	Без обмежень
Технічне обладнання	Тепловий канал, що може здійснювати підвищення температури за квадратичним законом.
Методика проведення випробування	ТПС необхідно розмістити у робочому об'ємі теплової камери, після чого збільшувати в ній температуру за квадратичним законом. Виміряти час досягнення температури ЧЕ значень, що визначається з виразу (3.57). Визначити величину постійної часу ТПС за виразом (3.60). Результат перевірки визначається з порівняння визначеної та нормованої величини постійної часу (визначена величина постійної часу повинна бути не більше нормативної).
Вимоги	Нормована величина постійної часу теплових пожежних сповіщувачів визначається з табл.1.4 і дорівнює для сповіщувачів класу А1 – ≤ 20 с, для ТПС інших класів – ≤ 60 с.
3.3. Визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів при зміні температури впливу за лінійним законом та порівняння її з нормативною (п.3.3 табл. 4.2)	
Вид ЧЕ	Без обмежень
Технічне обладнання	Тепловий канал, технічні характеристики якого приведені у табл.1.6 п. 1.2 [3].
Методика проведення випробування	ТПС необхідно розмістити у робочому об'ємі теплової камери, після чого збільшувати в ній температуру за лінійним законом. Вимірювати час досягнення температури ЧЕ ТПС значень, що дорівнюють значенням двох опорних сигналів, один з яких в n раз більше другого. Визначити постійну час ТПС за виразом (3.67). Результат перевірки визначається з порівняння визначеної та нормованої величини постійної часу (визначена величина постійної часу повинна бути не більше нормативної).

Вимоги	Нормована величина постійної часу теплових пожежних сповіщувачів визначається з табл.1.4 і дорівнює для сповіщувачів класу А1 – ≤ 20 с, для ТПС інших класів – ≤ 60 с.
3.4. Визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів з терморезистивним чутливим елементом та порівняння її з нормативною (п.3.4 табл. 4.2)	
Вид ЧЕ	Терморезистивний
Технічне обладнання	Додаткового обладнання не потребується
Методика проведення випробування	<p>1. При запуску режиму перевірки працездатності ТПС, через його чутливий елемент пропускається постійний за величиною електричний струм. Вимірюється вихідний сигнал ЧЕ ТПС в режимі, що встановився. Визначається величина постійної часу ТПС за виразом (3.76).</p> <p>2. При запуску режиму перевірки працездатності ТПС, через його чутливий елемент пропускається електричний струм синусоїдальної форми. Вимірюється амплітуда вихідного сигналу ЧЕ ТПС. Визначається величина постійної часу ТПС за виразом (3.83).</p>
Вимоги	Нормована величина постійної часу теплових пожежних сповіщувачів визначається з табл.1.4 і дорівнює для сповіщувачів класу А1 – ≤ 20 с, для ТПС інших класів – ≤ 60 с.
4.1. Визначення часу спрацьовування ТПС при пропусканні через його ЧЕ постійного по величині електричного струму (п.4.1. табл. 4.2)	
Вид ЧЕ	Терморезистивний
Технічне обладнання	Додаткового обладнання не потребується
Методика проведення випробування	При запуску режиму перевірки працездатності ТПС, через його чутливий елемент пропускається постійний за величиною електричний струм. Згідно з законом Джоуля-Ленца, при такому впливі його температура буде зростати. В режимі, що встановився, вимірюється перевищення температури ЧЕ відносно початкового значення. За формулою (4.30) визначається час спрацьовування ТПС. Результат контролю технічного стану визначається з порівняння визначеного часу спрацьовування ТПС з нормативними межами.
Вимоги	Величина часу спрацьовування повинна бути не менше нижньої межі спрацьовування і не більше верхньої межі спрацьовування. Межі часу спрацьовування теплових пожежних сповіщувачів визначаються з табл.1.3.

4.2. Визначення часу спрацьовування ТПС при пропусканні через його ЧЕ електричного струму у вигляді чверті косинусоїди (п.4.2 табл. 4.2)	
Вид ЧЕ	Терморезистивний
Технічне обладнання	Додаткового обладнання не потребується
Методика проведення випробування	При запуску режиму контролю технічного стану ТПС, через його чутливий елемент пропускається імпульс електричного струму, який має форму чверті косинусоїди. В моменти часу, що дорівнюють половині тривалості імпульсу та трьом чвертям його тривалості, вимірюється реакція ЧЕ ТПС на теплову дію електричного струму. Визначається співвідношення результату першого виміру до другого. Визначається величина часу спрацьовування ТПС за формулою (4.42). Результат контролю технічного стану визначається з порівняння визначеного часу спрацьовування ТПС з нормативними межами.
Вимоги	Величина часу спрацьовування повинна бути не менше нижньої межі спрацьовування і не більше верхньої межі спрацьовування. Межі часу спрацьовування теплових пожежних сповіщувачів визначаються з табл.1.3.

Слід зауважити, що методи випробувань ТПС, що приведені у нормативних документах полягають у визначенні часу спрацьовування сповіщувача та порівнянні його з нормативним значенням. При проведенні випробувань ТПС такими методами не визначаються інші динамічні характеристики сповіщувача. Запропоновані методи визначають такі динамічні характеристики як: перехідна функція, постійна часу, амплітудно-фазова частотна, амплітудно-частотна та фазово-частотна характеристики, інформація про кожен з яких дає можливість робити висновок про його працездатність.

У [6] приведені вимоги, щодо періодичності здійснення випробувань ТПС, а саме:

- один раз у квартал здійснювати випробування одного ТПС у кожній зоні;
- один раз у рік здійснювати випробування усіх ТПС.

Такі періоди здійснення випробувань ТПС ніяк не обґрунтовані, тому визначимо необхідні інтервали часу між проведеннями перевірок.

Ймовірність того, що при використанні ТПС для визначення небезпечних чинників пожежі він буде знаходитися у працездатному стані визначається виразом [120]

$$K_r = 1 - \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} (t_p - \tau) \omega(\tau) d\tau, \quad (4.67)$$

де t_p – період проведення контролю технічного стану ТПС, а $\omega(\tau)$ – щільність розподілення напрацювання ТПС на відмову.

В тому випадку, коли потік відмов є простішим, має місце [121]

$$\omega(\tau) = \lambda \exp(-\lambda\tau), \quad (4.68)$$

де λ – інтенсивність потоку відмов.

З урахуванням (4.68) вираз (4.67) перетворюється до виду

$$K_r = \frac{1}{\lambda t_p} [1 - \exp(-\lambda t_p)] \quad (4.69)$$

Це рівняння належить до класу трансцендентних рівнянь, внаслідок чого проблематично вирішити його аналітичними методами. Для вирішення рівняння (4.69) можна скористатися графічним методом. Для цього введемо до розгляду функції $q_1(t)$ і $q_2(t)$

$$q_1(t) = \lambda t; \quad q_2(t) = K_r^{-1} [1 - \exp(-\lambda t)]. \quad (4.70)$$

Точка перетину цих функцій буде вирішенням рівняння (4.69) при фіксованих параметрах λ та K_r , які для теплових пожежних сповіщувачів

відповідно дорівнюють $\frac{1}{6 \cdot 10^4}$ та 0,9. Вирішення трансцендентного рівняння

для таких фіксованих параметрів представлено на рис. 4.11

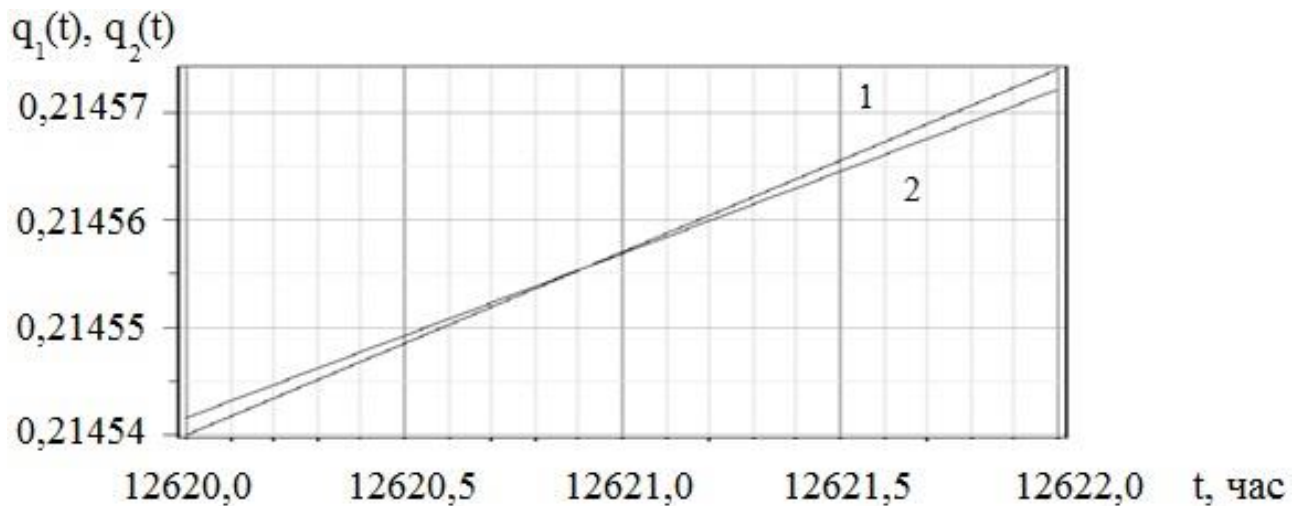


Рис.4.11 До вирішення трансцендентного рівняння (4.69): 1 – $q_1(t)$; 2 – $q_2(t)$

Виходячи з рис. 4.11, $t = 12.62059 \cdot 10^3$ год., тобто період здійснення контролю технічного стану для теплових пожежних сповіщувачів складає 1,44 роки. Внаслідок того, що $\lambda t_p < 1,0$ можна скористатися розкладенням експоненціальної функції (4.69) у степеневий ряд з послідовним обмеженням його складових

$$\exp(-\lambda t_p) = 1 - \lambda t_p + \frac{(\lambda t_p)^2}{2}. \quad (4.71)$$

Після підстановки (4.70) до (4.69) отримаємо

$$K_r = 1 - \frac{\lambda t_p}{2}, \quad (4.72)$$

звідки витікає, що період проведення регламентних робіт буде описуватися виразом

$$t_p = \frac{2(1 - K_r)}{\lambda}. \quad (4.73)$$

Період проведення випробувань ТПС, що визначався за допомогою виразу (4.73), для тих самих значень параметрів λ та K_r , дорівнює $12,0 \cdot 10^3$ год, тобто величина методичної похибки, у порівнянні з графічним методом не перевищує 5,0 %.

Виходячи з цього, рекомендована періодичність здійснення контролю технічного стану теплових пожежних сповіщувачів 1,44 роки

4.8. Висновки

4.8.1. Запропоновано методи випробувань теплових пожежних сповіщувачів, які роблять висновок про його працездатність на основі інформації про його перехідну функцію, частотні характеристики, постійну часу та часу спрацьовування.

4.8.2. Приведено структурні схеми пристроїв, що можуть бути застосовані для реалізації методів випробувань теплових пожежних сповіщувачів та надані рекомендації по їх використанню.

4.8.3. Показано, що для стаціонарних методів випробувань теплових пожежних сповіщувачів доцільно використовувати методи, що основані на визначенні перехідної функції сповіщувачів, оскільки вони дозволяють проводити випробування сповіщувачів у існуючих теплових камерах і зменшити час їх проведення у порівнянні з випробуванням тестовим осередком пожежі TF-5 у 2,29 раз, а у порівнянні з випробуваннями у тепловому каналі у 9,14 разів.

4.6.4. Усі запропоновані об'єктові методи випробувань теплових пожежних сповіщувачів здійснюються без застосування додаткового обладнання та у автоматичному режимі, що дозволяє виключити появу похибки суб'єктивного характеру спричинену діями оператора.

4.6.5. Алгоритми обчислення величини постійної часу теплових пожежних сповіщувачів з терморезистивним чутливим елементом стосовно методів, основаних на законі Джоуля-Ленца, є простішими у порівнянні з методом, при якому на чутливий елемент сповіщувача створюється тепловий вплив сформований у конструкції сповіщувача.

4.6.6. Показано, що за часом проведення випробувань теплових пожежних сповіщувачів перевагу слід віддати об'єктовим методам, що основані на законі Джоуля-Ленца, які дозволяють проводити випробування сповіщувачів у 1,83 рази швидше за існуючі методи.

4.6.7. За зручністю проведення випробувань перевагу слід віддати об'єктовому методу, що оснований на визначенні постійної часу при формуванні на чутливий елемент сповіщувача теплового потоку сформованого у його конструкції, який є універсальним для будь-яких чутливих елементів, здійснюється в місці установки сповіщувача та у автоматичному режимі.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішена актуальна наукова задача по підвищенню ефективності системи експлуатації теплових пожежних сповіщувачів шляхом удосконалення методів і засобів їх випробувань, основаних на використанні їх динамічних властивостей.

1. Побудовано узагальнену математичну модель теплового пожежного сповіщувача, що описує теплові процеси у його чутливому елементі, який може бути представлений у вигляді прямокутної пластинки, циліндра або шару, що дозволило отримати вираз для передаточної функції такого сповіщувача.

2. Проведені експериментальні та обчислювальні дослідження, за результатами яких побудовані регресійні моделі для постійної часу теплового пожежного сповіщувача та встановлено, що її величина в більшій мірі буде залежати від характерного розміру його чутливого елемента, причому прямо пропорційно (за умов, що діаметр труби, по якій рухається тепловий потік, $d_{тр} = 0,3$ м, а його швидкість руху $V = 0,8$ м/с постійна часу при зростанні характерного розміру чутливого елемента R від 0,1 мм до 1 мм зросте на 0,98 с) та в меншій мірі від швидкості теплового потоку та діаметру труби, причому обернено пропорційно (при збільшенні $d_{тр}$ в три рази величина постійної часу зменшиться лише на 0,35 с, а при збільшенні V з 0,6 м/с до 1,0 м/с зменшиться лише на 0,31 с).

3. Розроблено метод визначення перехідної функції теплового пожежного сповіщувача при впливі на нього тепловим потоком у вигляді лінійно-зростаючої функції, який може бути реалізовано для проведення випробувань сповіщувачів у тепловому каналі, що регламентований діючим стандартом EN-54, внаслідок чого забезпечується зменшення часу їх проведення у 9,1 разів у порівнянні з методом, що визначений цим стандартом.

4. Розроблено методи визначення амплітудно-частотної та фазово-частотної характеристик теплових пожежних сповіщувачів, що основані на

використанні інформації про їх перехідну функцію. Час визначення частотних характеристик цим методом не перевищує (60-80) с, що у (50-60) разів швидше відносно класичного методу. Розроблений метод визначення частотних характеристик теплових пожежних сповіщувачів може бути використаний для проведення їх випробувань, які полягають у порівнянні визначених характеристик із зразковими, а також для визначення його часних динамічних характеристик.

5. Розроблено метод визначення постійної часу теплового пожежного сповіщувача, оснований на використанні інформації про його амплітудно-частотну характеристику, що може бути реалізовано при проведенні його випробувань в існуючих теплових камерах та дозволить зменшити час їх проведення у 8 разів.

6. На прикладі теплових пожежних сповіщувачів з терморезистивним чутливим елементом розроблено метод визначення його постійної часу, що оснований на використанні інформації про їх фазово-частотну характеристику, який може бути застосований для проведення об'єктових випробувань та дозволить зменшити час їх проведення у 1,8 разів.

7. Розроблено методи визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів при створенні на їх чутливий елемент тест-впливу у вигляді температури, що змінюється за квадратичним або лінійно-зростаючими законами. Перевагою таких методів є універсальність, оскільки вони можуть застосовуватись як для проведення стаціонарних, так і для об'єктових випробувань теплових пожежних сповіщувачів з будь-яким чутливим елементом.

8. Розроблено методи та засоби випробувань теплових пожежних сповіщувачів, які основані на використанні інформації про їх перехідну функцію, амплітудно-частотні та фазово-частотні характеристики, постійну часу та час спрацьовування. Розроблені методи дозволяють проводити випробування теплових пожежних сповіщувачів у автоматичному режимі безпосередньо на об'єкті, що зменшує час їх проведення та виключає

можливість появи суб'єктивних похибок. Запропоновані засоби для випробувань теплових пожежних сповіщувачів представлені у вигляді структурних схем.

9. Визначено, що періодичність проведення випробувань теплових пожежних сповіщувачів, яка установлена діючим нормативним документом, не є обґрунтованою. У зв'язку з цим, була розрахована рекомендована періодичність проведення випробувань теплових пожежних сповіщувачів, яка складає 1,44 роки.

10. Усі запропоновані методи та засоби дозволили підвищити ефективність системи експлуатації теплових пожежних сповіщувачів шляхом скорочення часу їх проведення (щонайменше у 1,8 разів у порівнянні з існуючими методами), автоматизації процесу (що виключає можливість появи суб'єктивних похибок) та проведення випробувань безпосередньо на об'єкті, який охороняється. При цьому, висновок про результат випробування такими методами здійснюється на основі оцінок його динамічних характеристик.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 2276:2006. Видання. Система стандартів безпеки праці. Пожежна техніка. Терміни та визначення основних понять. Київ, 2007. 44 с.
2. ДБН В.2.5-56:2014. Видання. Системи протипожежного захисту. Київ, 2015. 127 с.
3. ДСТУ EN 54-5:2003. Видання. Системи пожежної сигналізації. Частина 5. Сповіщувачі пожежні теплові точкові. (EN 54-5: 2000, IDT). Київ, 2004. 162 с.
4. Баканов В. В. Особливості вибору, застосування та побудови теплових пожежних сповіщувачів Частина 2. Проблеми застосування // Пожежна безпека. 2011. № 8. С. 30.
5. ГОСТ 25866-83. Издание. Эксплуатация техники. Термины и определения. Москва, 1983. 6 с.
6. ДСТУ-Н CEN/TS 54-14:2009. Видання. Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 14. Настанови щодо побудови, проектування, монтування, введення в експлуатацію, експлуатування і технічного обслуговування. (CEN/TS 54-14:2004, IDT). Київ, 2009. 68 с.
7. Воробйов О. І. Проектування, монтаж, технічне обслуговування установок пожежної сигналізації. Львів, 2003. 138 с.
8. ГОСТ Р 53325-2012. Издание. Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования и методы испытаний. Москва, 2012. 270 с.
9. Гвоздь В.М.. Терморезистивные тепловые пожарные извещатели с улучшенными характеристиками и методы их температурных испытаний: дис. ... канд. техн. наук: Черкасси, 2005. 181 с.
10. Камера для испытаний пожарных извещателей: пат. 2168214 Российская Федерация. №99118326/09; заявл. 20.08.1999; опубл. 27.05.2001.

11. Стенд для испытаний тепловых пожарных извещателей: пат. 2110843 Российская Федерация. № 93055158/09; заявл. 03.12.93; опубл. 10.05.98.
12. Неплохов И. Г. Двухдиапазонные дымовые пожарные извещатели // Системы безопасности. 2008. № 3. С. 186-190.
13. Неплохов И.Г. Что придет на смену дымовым пожарным извещателям // Алгоритм Безопасности. 2007. № 4. С. 44-47.
14. ГОСТ Р 50898-96. Издание. Извещатели пожарные. Огневые испытания. Москва, 1996. 17 с.
15. Heat detector tester: пат. 8353625 B1 USA. № 13/251,919; заявл. 03.10.11; опубл. 15.01.13. 9 с.
16. Method and apparatus for checking fire detectors: пат. 3802249 A USA. № 318,357; заявл. 26.12.72; опубл. 09.04.74. 6 с.
17. Method and apparatus for testing heat detectors: пат. 6015230 A USA. № 08/365,933; заявл. 01.10.97; опубл. 18.01.00. 9 с.
18. Sensor test circuit of an alarm system: пат. 4518952 A USA. № 06/527,465; заявл. 29.08.83; опубл. 21.05.85. 5 с.
19. Testing a Fire Detector Sensor: пат. 7609154 B2 USA. № 11/587,461; заявл. 29.04.05; опубл. 27.10.09. 7 с.
20. Self diagnostic heat detector: пат. 2206969 A1 Canada. № 2206969; заявл. 04.06.97; опубл. 04.12.98. 17 с.
21. Testing detectors: пат. 8689602 B2 USA. № 11/663,904. заявл. 27.10.05; опубл. 08.04.14. 7 с.
22. Thermal detector testing device: пат. 8454228 B2 USA. № 12/399,327; заявл. 06.03.09; опубл. 04.06.13. 9 с.
23. Complex tester for heat and smoke fire-sensing apparatus: пат. 20100259376 A1 USA. № 12/825,847; заявл. 29.06.10; опубл. 14.10.10. 7 с.
24. Method and apparatus for testing heat detectors: пат. 5611620 A USA. № 08/365,933; заявл. 29.12.94; опубл. 18.03.97. 6 с.

25. Device for testing heat detectors, smoke detectors and smoke alarms: пат. 2083990 A1 Canada. № 12/825,847; заявл. 29.06.10; опубл. 14.10.10.

26. Method Laser thermal testing method and system for use with a fire alarm system: пат. 4859075 A USA. № 07/167,651; заявл. 14.03.88; опубл. 22.08.89. 4 с.

27. Thermal detector testing device: пат. 8454228 B2 USA. № 12/399,327; заявл. 06.03.09; опубл. 04.06.13. 9 с.

28. Testing a Fire Detector Sensor: пат. 7609154 B2 USA. № 11/587,461; заявл. 29.04.05; опубл. 27.10.09. 7 с.

29. Тестовые приборы для проверки работоспособности тепловых пожарных извещателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elfor.ck.ua/produkt/h211#теплотест-м-модель-h211>. – Дата доступа: 21.06.2018.

30. Костенко О. Л., Гвоздь В. М., Абрамов Ю. А. Способ определения динамического параметра пожарного извещателя // Проблемы пожарной безопасности. 2003. Вып. 13. С. 71-74.

31. Гвоздь В. М., Костенко О. Л., Корниенко Р. В. Определение динамического параметра теплового пожарного извещателя // Матер. VI НПК «Пожарная безопасность». 2003. С. 248-250.

32. Абрамов Ю. А., Гвоздь В. М. Терморезистивные тепловые пожарные извещатели с улучшенными характеристиками и методы их температурных испытаний. Харьков, 2005. 121 с.

33. Гвоздь В. М., Костенко О. Л. Идентификация динамических характеристик тепловых пожарных извещателей // Тези доповідей НПК «Профілактика надзвичайних ситуацій». 2004. С. 61-62.

34. Безуглов О. Е. Методы определения временных характеристик тепловых пожарных извещателей при автономных испытаниях: дис. ... канд. техн. наук : Харьков, 2010. 158 с.

35. Коврегин В. В. Температурные объектовые испытания тепловых пожарных извещателей с терморезистивным чувствительным элементом: дис. ... канд. техн. наук: Харьков, 2008. 174 с.
36. Абрамов, Ю. А. Основы пожарной автоматики. Харьков, 1993. 288 с.
37. Косарев Е. Л. Методы обработки экспериментальных данных. Москва, 2003. 255 с.
38. Дворяшкин Б. В. Погрешности измерений и их оценки. Москва, 1992. 73 с.
39. Орнатский П. П. Основы информационно-измерительной техники. Киев, 1976. 560 с.
40. Полищук Е. С. Измерительные преобразователи. Киев, 1981. 296 с.
41. Мартяшин А. И., Шахов Э. К., Шляндин В. М. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения. Москва, 1996. 392 с.
42. Ковалевская В. В., Машенков В. М. Энергетические измерительные преобразователи. Москва, 1989. 267 с.
43. В.С. Новиков, Техническая эксплуатация авиационного радиоэлектронного оборудования. Москва, 1987. 275 с.
44. Байлов В.В. Плаксиенко В.С. Эксплуатация и сервис радиоэлектронных систем. Таганрог, 2002. 90 с.
45. Воробьев В. Г., Константинов В. Д., Денис В. Г. Техническая эксплуатация авиационного оборудования. Москва, 1990. 296 с.
46. Берганов И. Р., Гордиенко В. Н. Крухмалев В. В. Проектирование и техническая эксплуатация систем передачи. Москва, 1989. 272 с.
47. Чинючин Ю. М., Полякова И. Ф. Основы технической эксплуатации и ремонта авиационной техники. Часть I: учебное пособие. Москва, 2004. 81 с.
48. Чинючин Ю. М., Полякова И. Ф. Основы технической эксплуатации и ремонта авиационной техники. Часть II: учебное пособие. Москва, 2006. 73 с.

49. ГОСТ 27990-88. Издание. Средства охранной, пожарной и охранно-пожарной сигнализации. Общие технические требования. Москва, 1990. 432 с.
50. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Москва, 1967. 594 с.
51. Темников А. В., Девяткин А. Б. Современные численные методы решения задач теплопроводности. Самара, 1993. 94 с.
52. Куренный Е. В. Математическая модель чувствительного элемента теплового пожарного извещателя на основе терморезистивного эффекта // тезисы докладов IV НПК «Пожежна безпека». 2003, С. 286-288.
53. Луканин В. Н., Шатров М. Г., Камфер Г. М. Теплотехника: учебное пособие. Москва, 2002. 651 с.
54. Жуковский В. С. Термодинамика. Москва, 1983. 304 с.
55. Нащекин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача. Москва, 1981. 470 с.
56. Новиков И. И. Термодинамика. Москва, 1984. 593 с.
57. Абрамов Ю. А., Кальченко Я. Ю. Математическое обеспечение тестирования тепловых пожарных извещателей // Проблемы пожарной безопасности. 2015. Вып. 40. С. 5-11.
58. Виноградов И. М. Математическая энциклопедия. Харьков, 1993. 288 с.
59. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Москва, 1968. 720 с.
60. Абрамов, Ю. А., Иохвидович Н. Ю., Червяков П. С. Операционное исчисление. Харьков, 1993. 36 с.
61. Карташов Э. М. Метод интегральных преобразований в аналитической теории теплопроводности твердых тел // Известия РАН. 1993. Вып. 2. С. 99-127.
62. Абрамов Ю. А., Кальченко Я. Ю. Математическое обеспечение автономного метода объектовых испытаний тепловых пожарных извещателей // Проблемы пожарной безопасности. 2015. Вып. 38. С. 3-8.

63. Рябова І. Б., Сайчук І. В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі: навч. посіб. Харків, 2002. 332 с.
64. Kalchenko Y. Y., Abramov Y. A. Models of primary information sensors of emergency effects mitigation systems // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2015. Вип. 22. С. 65-69.
65. Abramov Y. A., Kalchenko Y. Y. Mathematical models for object tests of thermal fire detectors // Проблемы пожарной безопасности. 2016. Вып. 39. С. 3-8.
66. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. Москва, 1977. 237 с.
67. Егоров А. Е., Азаров Г. Н., Коваль А. В. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента. Харьков, 1986. 552 с.
68. Драйздел Д. Введение в динамику пожаров. Пер. с англ. Москва, 1990. 421 с.
69. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. Москва, 1975. 483 с.
70. Абрамов Ю. А., Куринный Е. В. Точечные тепловые пожарные извещатели максимального типа. Харьков, 2005. 129 с.
71. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. Киев, 2001. 550 с.
72. Голосков Д. П. Уравнения математической физики. Решение задач в системе Maple. Санкт-Петербург, 2004. 539 с.
73. Соболев С. Л. Уравнения математической физики. Москва, 1988. 334 с.
74. Абрамов Ю. А., Садковой В. П. Обобщенные модели чувствительных элементов датчиков первичной информации // Науковий вісник будівництва. 2006. Вип. 35. С. 290-294.
75. Садковой В. П., Абрамов Ю. А. Теоретические основы автоматического тушения пожаров класса В распыленной водой. Харьков, 2010. 267 с.

76. Абрамов Ю. А., Тищенко Е. А., Борисова А. С. Обобщенные математические модели терморезистивных чувствительных элементов пожарных извещателей при внутреннем тепловом воздействии // Чрезвычайные ситуации: Образование и наука. 2014. Т9. Вып. 1. С. 9-16.

77. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. А. Математичні моделі теплових пожежних сповіщувачів // Проблемы пожарной безопасности. 2018. Вып. 43. С. 58-63.

78. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента. Москва, 1969. 159 с.

79. Абрамов Ю. А., Кальченко Я. Ю. Визначення параметрів формування теплового потоку при проведенні об'єктових випробувань теплових пожежних сповіщувачів // Проблемы пожарной безопасности. 2017. Вып. 41. С. 3-9.

80. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. Москва, 1965. 340 с.

81. Копылов И. П., Клоков Б. К. Справочник по электрическим машинам. Москва, 1989. 688 с.

82. Wheeler, H. Fundamental limitations of small antennas // Proceedings of the IRE. 1947. Issue.12. P. 1479-1484.

83. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Ленинград, 1986. 488 с.

84. Немцов М. В., Шамаев Ю. М. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. Москва, 1981. 136 с.

85. NFPA 72. National Fire Alarm and Signaling Code. URL: <https://www.nfpa.org/Assets/files/AboutTheCodes/72/72-13ROPDraft.pdf> (Дата звернення: 12.12.2018).

86. BS 5839-1:2017. Fire detection and fire alarm systems for buildings. Code of practice for design, installation, commissioning and maintenance of systems in non-domestic premises. URL: <http://www.nioec.com/Training/%D8%B7%D8%B1%D8%A7%D8%AD%D9%8A>

[%20%D8%B3%D9%8A%D8%B3%D8%AA%D9%85%20%D9%87%D8%A7%D9%8A%20%D8%A7%D8%B9%D9%84%D8%A7%D9%85%20%D8%AD%D8%B1%D9%8A%D9%82/BS5389-1.pdf](#) (Дата звернення: 12.12.2018).

87. Rule APSAD R7. Automatic Fire Detection. CNPP Editions, 2007.113 с.

88. DIN 14675:2003-11. Fire detection and fire alarm systems – Part 1: Design and operation. Benth Verlag GmbH, 2018. 80 с.

89. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. А. Випробування теплових пожежних сповіщувачів // Проблемы пожарной безопасности. 2019. Вып. 45. С. 60-64.

90. Спосіб випробувань теплових пожежних сповіщувачів: пат 125948 Україна. № u 201800548; заявл. 19.01.2018; опубл. 25.05.2018, Бюл. № 10. 4 с.

91. Поздеев С. В. Развитие научных основ определения пределов огнестойкости несущих железобетонных конструкций: дис. ... докт. техн. наук. Черкассы, 2012. 365 с.

92. Abramov Yu., Kalchenko Y., Liashevskaya O. Determination of dynamic characteristics of heat fire detectors // Eureka: Physics and Engineering. 2019. №3. URL: <http://eu-jr.eu/engineering/article/view/898>.

93. Спосіб визначення динамічних характеристик теплових пожежних сповіщувачів: пат. №111447 Україна. № u 201604945; заявл. 04.05.2016; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 21. 4 с.

94. Абрамов Ю. А., Кальченко Я. Ю. Выбор периода дискретизации при определении динамических характеристик тепловых пожарных извещателей // Вестник университета гражданской защиты Беларуси. 2019. Т.3. № 1. URL: <https://journals.ucp.by/index.php/jcp/article/view/168>.

95. Спосіб визначення динамічних характеристик теплових пожежних сповіщувачів: пат. №118847 Україна. № u 201702866; заявл. 27.03.2017; опубл. 28.08.2017, Бюл. № 16. 6 с.

96. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. А. Ідентифікація параметрів при визначенні динамічних характеристик теплових пожежних сповіщувачів // Проблемы пожарной безопасности. 2017. Вып. 42. С. 41-51.

97. Спосіб визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів: пат. №110086 Україна. № а 201413822; заявл. 23.12.2014; опубл. 10.11.2017, Бюл. № 21. 3 с.

98. Спосіб визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів: пат. №116932 Україна. № а 201607780; заявл. 14.07.2016; опубл. 25.05.2018, Бюл. № 10. 3 с.

99. Абрамов Ю. А., Коврегин В. В., Садковой В. П. Температурные объектовые испытания тепловых пожарных извещателей с терморезистивным чувствительным элементом. Харьков, 2009. 115 с.

100. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. А. Идентификация динамического параметра пожарных извещателей с терморезистивным чувствительным // Проблемы пожарной безопасности. 2015. Вып. 37. С. 71-74.

101. Спосіб визначення постійної часу теплового пожежного сповіщувача з терморезистивним чутливим елементом: пат. №126609 Україна. № у 201801076; заявл. 05.02.2018; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12. 2 с.

102. Спосіб випробувань теплових пожежних сповіщувачів: пат. 114947 Україна. № у 201610468; заявл. 17.10.2016 ; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 16. 2 с.

103. Спосіб тестування теплових пожежних сповіщувачів: пат. 109863 Україна. № у 201602817; заявл. 21.03.2016 ; опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17. 3 с.

104. Спосіб контролю технічного стану теплових пожежних сповіщувачів: пат. 126312 Україна. № у 2018 01080; заявл. 05.02.2018 ; опубл. 11.06.2018, Бюл. № 11.

105. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю.О. Алгоритми контролю технічного стану датчиків первинної інформації системи ослаблення наслідків надзвичайних ситуацій // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2018. Вип. 27. С. 39-46.

106. Спосіб контролю теплових пожежних сповіщувачів: пат. 128949 Україна. № у 2018 05107; заявл. 08.05.2018; опубл. 10.10.2018, Бюл. № 19.

107. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. О. Способи контролю технічного стану теплових пожежних сповіщувачів // Проблеми пожежної безпеки. 2018. Вып. 44. С. 44-48.

108. Спосіб тестування теплових пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом: пат. 113824 Україна. № u 2016 09584; заявл. 16.09.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3.

109. Спосіб контролю технічного стану теплових пожежних сповіщувачів пат. 114979 Україна. № u 201610794; заявл. 27.10.2016; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6.

110. Спосіб визначення часу спрацьовування теплових пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом: пат. 110590 Україна. № а 2015 01322; заявл. 10.07.2015; опубл. 12.01.2016, Бюл. №1.

111. Спосіб визначення часу спрацьовування теплових пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом: пат. 115933 Україна. № а 201604947; заявл. 26.12.2016; опубл. 10.01.2018, Бюл. №1.

112. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. О. Способи визначення часу спрацьовування теплових пожежних сповіщувачів // Проблеми пожежної безпеки. 2019. Вып. 46. С. 65-70.

113. Тепловий пожежний сповіщувач: пат. 111924 Україна. № u201505720; заявл. 10.06.2015; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.

114. Пристрій для реєстрації пожежі: пат. 109671 Україна. № u201603129; заявл. 28.03.2016; опубл. 25.08.2016, Бюл. № 16. 5 с.

115. Пристрій для виявлення пожежі: пат. 119158 Україна. № u201703726; заявл. 18.04.2017; опубл. 11.09.2017, Бюл. № 17.

116. Пристрій для виявлення пожежі: пат. 114948 Україна. – № u201610470; заявл. 17.10.2016 ; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6.

117. Пристрій для виявлення пожежі: пат. 120533 Україна. № u201704007; заявл. 24.04.2017; опубл. 10.11.2017, Бюл. №21.

118. Тепловий пожежний сповіщувач: пат. 110189 Україна. № u201503033; заявл. 01.04.2015; опубл. 25.11.2015, Бюл. № 22.

119. EN 54-9:1982. Components of automatic fire detection systems. Methods of test of sensitivity to fire. 1996. 14 с.

120. Абрамов Ю. А., Кальченко Я. Ю. Выбор метода определения периода проведения регламентных работ датчиков систем ослабления последствий чрезвычайных ситуаций // Проблемы надзвичайних ситуацій. 2015. Вип. 21. С. 3-6.

121. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. Москва, 1970. 270 с.

ДОДАТКИ

Копія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Приватного підприємства «НПП
Спецпожтехніка»

підпис, печать В. В. СТРИЛЕЦЬ

"22" січня 2019 р.

АКТ

про використання наукових результатів, отриманих
у дисертаційній роботі Кальченка Я.Ю., на ПП «НПП «СПЕЦПОЖТЕХНІКА»

Комісія у складі: консультанта ПП «НПП «СПЕЦПОЖТЕХНІКА»,
д.т.н., доцента Росохи Сергій Володимировича (голова комісії), директора
лабораторії Ткачова Андрія Федоровича, фахівця Гіля В'ячеслава Федоровича
склала даний акт, про те, що наукові результати, отримані в дисертаційній
роботі Кальченка Я.Ю., а саме:

– метод випробувань теплових пожежних сповіщувачів, у
відповідності з патентами України №111924 та №114979, що полягає у
визначенні сталої часу при впливі на чутливий елемент зовнішнім тепловим
потокком, виключно в об'ємі конструкції сповіщувача;

– рекомендації з проведення випробувань теплових пожежних
сповіщувачів,

використані на ПП «НПП «СПЕЦПОЖТЕХНІКА» при проведенні
стендових випробувань теплових пожежних сповіщувачів.

Використання результатів дисертаційних досліджень Кальченка Я.Ю
дозволило забезпечити повну автоматизацію процесу випробувань теплових

пожежних сповіщувачів, що дозволило зменшити час їх проведення у 1,8 рази у порівнянні з існуючими методами об'єктових випробувань, що полягають у визначенні часу спрацьовування сповіщувача при створенні на нього зовнішнього теплового впливу.

Голова комісії

Консультант ПП «НПП

«Спецпожтехніка»

підпис

С.В. Росоха

Член комісії

Директор лабораторії

«НПП «Спецпожтехніка»

підпис

А.Ф. Ткачов

Член комісії

фахівець

«НПП «Спецпожтехніка»

підпис

В.Ф. Гіля

Копія вірна

Учений секретар НУЦЗУ

Андрій ПОБІДАШ

Копія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Черкаського міськрайонного
відділу

Управління ДСНС України
у Черкаській області

підпис, печать Андрій ХИЖНЯК

"15" січня 2019 р.

АКТ

про використання наукових результатів, отриманих
у дисертаційній роботі Кальченка Я.Ю.

Комісія у складі: заступника начальника Черкаського міськрайонного відділу Управління ДСНС України у Черкаській області Шкабрата Ю.О. та головного інспектора Черкаського міськрайонного відділу Управління ДСНС України у Черкаській області Ярошенка О.Ю. склала даний акт про те, що наукові результати отримані в дисертаційній роботі Кальченка Я.Ю., а саме:

- метод випробувань теплових пожежних сповіщувачів, що полягає у визначенні його перехідної функції та порівнянні її з нормативною;
- рекомендації по проведенню випробувань теплових пожежних сповіщувачів, використані при проведенні стаціонарних випробувань дослідного зразка теплового пожежного сповіщувача.

Використання методу випробувань теплових пожежних сповіщувачів, що полягає у визначенні його перехідної функції та порівнянні з нормативною, дозволило зменшити час їх проведення у порівнянні з методом випробувань у тепловому каналі майже на два порядки. Це обумовлено тим, що згідно з нормативними документом EN-54, визначення часу спрацьовування теплових пожежних сповіщувачів складається з таких етапів:

– визначення нормальної температури спрацьовування (при створенні теплової дії на сповіщувач температурою, що зростає зі швидкостями 0,0167 °C/c; 0,05 °C/c; 0,083 °C/c; 0,167 °C/c; 0,33 °C/c; 0,5 °C/c у двох положеннях), що приблизно складає 1,18 год;

– визначення часу спрацьовування сповіщувача від 25 °C (при створенні теплової дії на сповіщувач температурою, що зростає зі швидкістю 0,05 °C/c та 0,33 °C/c), що приблизно складає 0,26 год;

– визначення часу спрацьовування сповіщувача від високої температури довкілля (при створенні теплової дії на сповіщувач температурою, що зростає зі швидкістю 0,05 °C/c та 0,33 °C/c), що приблизно складає 0,26 год.

Проведення випробувань теплових пожежних сповіщувачів запропонованим методом дорівнює часу перехідного процесу, тобто 3-5 величинам їх постійної часу (для сповіщувачів класу А1 постійна часу дорівнює 20 с).

Голова комісії

підпис

Юрій ШКАБРАТ

Член комісії

підпис

Олександр ЯРОВЕНКО

Копія вірна
Учений секретар НУЦЗУ

Андрій ПОБІДАШ

Список опублікованих праць за темою дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

1. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. А. Математичні моделі теплових пожежних сповіщувачів // Проблемы пожарной безопасности. 2018. Вып. 43. С. 58-63.

2. Абрамов Ю. А., Кальченко Я. Ю. Визначення параметрів формування теплового потоку при проведенні об'єктових випробувань теплових пожежних сповіщувачів // Проблемы пожарной безопасности. 2017. Вып. 41. С. 3-9.

3. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. А. Випробування теплових пожежних сповіщувачів // Проблемы пожарной безопасности. 2019. Вып. 45. С. 60-64.

4. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. А. Ідентифікація параметрів при визначенні динамічних характеристик теплових пожежних сповіщувачів // Проблемы пожарной безопасности. 2017. Вып. 42. С. 41-51.

5. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю.О. Алгоритми контролю технічного стану датчиків первинної інформації системи ослаблення наслідків надзвичайних ситуацій // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2018. Вип. 27. С. 39-46.

6. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. О. Способи контролю технічного стану теплових пожежних сповіщувачів // Проблемы пожарной безопасности. 2018. Вип. 44. С. 44-48.

7. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. О. Способи визначення часу спрацьовування теплових пожежних сповіщувачів // Проблемы пожарной безопасности. 2019. Вип. 46. С. 65-70.

Статті у наукових фахових виданнях України:

8. Абрамов Ю. А., Кальченко Я. Ю. Математическое обеспечение тестирования тепловых пожарных извещателей // Проблемы пожарной безопасности. 2015. Вып. 40. С. 5-11.

9. Абрамов Ю. А., Кальченко Я. Ю. Математическое обеспечение автономного метода об'єктовых испытаний тепловых пожарных извещателей // Проблемы пожарной безопасности. 2015. Вып. 38. С. 3-8.

10. Kalchenko Y. Y., Abramov Y. A. Models of primary information sensors of emergency effects mitigation systems // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2015. Вип. 22. С. 65-69.

11. Abramov Y. A., Kalchenko Y.Y. Mathematical models for object tests of thermal fire detectors // Проблемы пожарной безопасности. 2016. Вып. 39. С. 3-8.

12. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. А. Идентификация динамического параметра пожарных извещателей с терморезистивным чувствительным // Проблемы пожарной безопасности. 2015. Вып. 37. С. 71-74.

13. Абрамов Ю. А., Кальченко Я. Ю. Выбор метода определения периода проведения регламентных работ датчиков систем ослабления последствий чрезвычайных ситуаций // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2015. Вип. 21. С. 3-6.

Стаття у науковому періодичному виданні інших держав з напрямку, з якого підготовлено дисертацію:

14. Абрамов Ю. А., Кальченко Я. Ю. Выбор периода дискретизации при определении динамических характеристик тепловых пожарных извещателей // Вестник университета гражданской защиты Беларуси. 2019. Т.3. № 1. URL: <https://journals.ucp.by/index.php/jcp/article/view/168>.

Стаття у науковому журналі країни Євросоюзу, що входить до бази даних Scopus:

15. Abramov Yu., Kalchenko Y., Liashevskaya O. Determination of dynamic characteristics of heat fire detectors // Eureka: Physics and Engineering. 2019. №3. URL: <http://eu-jr.eu/engineering/article/view/898>.

Патенти:

16. Спосіб випробувань теплових пожежних сповіщувачів: пат 125948 Україна. № у 201800548; заявл. 19.01.2018; опубл. 25.05.2018, Бюл. № 10. 4 с.

17. Спосіб визначення динамічних характеристик теплових пожежних сповіщувачів: пат. №111447 Україна. № у 201604945; заявл. 04.05.2016; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 21. 4 с.

18. Спосіб визначення динамічних характеристик теплових пожежних сповіщувачів: пат. №118847 Україна. № у 201702866; заявл. 27.03.2017; опубл. 28.08.2017, Бюл. № 16. 6 с.

19. Спосіб визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів: пат. №110086 Україна. № а 201413822; заявл. 23.12.2014; опубл. 10.11.2017, Бюл. № 21. 3 с.

20. Спосіб визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів: пат. №116932 Україна. № а 201607780; заявл. 14.07.2016; опубл. 25.05.2018, Бюл. № 10. 3 с.

21. Спосіб визначення постійної часу теплового пожежного сповіщувача з терморезистивним чутливим елементом: пат. №126609 Україна. № у 201801076; заявл. 05.02.2018; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12. 2 с.

22. Спосіб випробувань теплових пожежних сповіщувачів: пат. 114947 Україна. № у 201610468; заявл. 17.10.2016 ; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 16. 2 с.

23. Спосіб тестування теплових пожежних сповіщувачів: пат. 109863 Україна. № у 201602817; заявл. 21.03.2016 ; опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17. 3 с.

24. Спосіб контролю технічного стану теплових пожежних сповіщувачів: пат. 126312 Україна. № u 201801080; заявл. 05.02.2018 ; опубл. 11.06.2018, Бюл. № 11.

25. Спосіб контролю теплових пожежних сповіщувачів: пат. 128949 Україна. № u 2018 05107; заявл. 08.05.2018; опубл. 10.10.2018, Бюл. № 19.

26. Спосіб тестування теплових пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом: пат. 113824 Україна. № u 201609584; заявл. 16.09.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3.

27. Спосіб контролю технічного стану теплових пожежних сповіщувачів пат. 114979 Україна. № u 201610794; заявл. 27.10.2016; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6.

28. Спосіб визначення часу спрацьовування теплових пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом: пат. 110590 Україна. № а 2015 01322; заявл. 10.07.2015; опубл. 12.01.2016, Бюл. №1.

29. Спосіб визначення часу спрацьовування теплових пожежних сповіщувачів із терморезистивним чутливим елементом: пат. 115933 Україна. № а 201604947; заявл. 26.12.2016; опубл. 10.01.2018, Бюл. №1.

30. Тепловий пожежний сповіщувач: пат. 111924 Україна. № u201505720; заявл. 10.06.2015; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.

31. Пристрій для реєстрації пожежі: пат. 109671 Україна. № u201603129; заявл. 28.03.2016; опубл. 25.08.2016, Бюл. № 16. 5 с.

32. Пристрій для виявлення пожежі: пат. 119158 Україна. № u201703726; заявл. 18.04.2017; опубл. 11.09.2017, Бюл. № 17.

33. Пристрій для виявлення пожежі: пат. 114948 Україна. – № u201610470; заявл. 17.10.2016 ; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6.

34. Пристрій для виявлення пожежі: пат. 120533 Україна. № u201704007; заявл. 24.04.2017; опубл. 10.11.2017, Бюл. №21.

35. Тепловий пожежний сповіщувач: пат. 110189 Україна. № u201503033; заявл. 01.04.2015; опубл. 25.11.2015, Бюл. № 22.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

36. Абрамов Ю. О., Кальченко Я. Ю. Аналіз системи експлуатації теплових пожежних сповіщувачів // Матеріали VIII Міжнародної НПК «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». Черкаси, 2017. С. 107-108.

37. Абрамов Ю. А., Кальченко Я. Ю. Математическая модель воздушного потока при тестировании тепловых пожарных извещателей // Материалы НПК «Проблемы гражданской защиты: управление, предупреждение, аварийно-спасательные и специальные работы». Кокшетау, 2017. С.4-5.

38. Абрамов Ю. О., Кальченко Я. Ю. Математичне забезпечення об'єктових випробувань теплових пожежних сповіщувачів // Матеріали 19 Всеукраїнської НПК «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку». Київ, 2017. С. 13.

39. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. О. Визначення динамічних характеристик теплових пожежних сповіщувачів у частотній області // Тези доповідей Всеукраїнської НПК «Пожежна безпека: проблеми та перспективи». Харків, 2018. С. 210-211.

40. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. О. Динамическая погрешность при формировании тест-воздействия на тепловой пожарный извещатель // Тези доповідей Всеукраїнської НПК «Пожежна безпека: проблеми та перспективи». Харків, 2018. С. 219-220.

41. Кальченко Я. Ю., Абрамов Ю. О., Вибір інтервалу дискретності при визначенні динамічних характеристик теплових пожежних сповіщувачів // Матеріали VIII Міжнародної НПК «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». Черкаси, 2019. С. 5-7.