

Олександр БОРИСОВ, канд. техн. наук, проф.,

Борис ЛУПИНА, канд. техн. наук,

Сергій ОСІНОВ, канд. техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
м. Київ, Україна, e-mail: b.lupyna@kpi.ua, s.osinov-me@iitl.kpi.ua

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ І РЕЄСТРАЦІЇ АВАРІЙНИХ СТАНІВ ІНКУБАТОРІВ КЛІТИННИХ КУЛЬТУР ТА ЄМНОСТЕЙ ДЬЮАРА

Анотація. Розроблено восьмиканальну автоматизовану систему моніторингу температури робочого об'єму інкубаторів клітинних культур та контролю критично низького рівня рідкого азоту в ємності Дьюара, визначено основні функції такої системи, оптимальне розміщення первинних перетворювачів в робочих зонах. Виконано реалізацію, монтаж і апробацію системи з використанням каналів бездротового мобільного зв'язку для надсилання аварійних СМС-повідомлень на телефонні номери. Функціональність та інформативність системи забезпечує уникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з можливою втратою біологічних матеріалів у виробничих біологічних процесах ембріологічної лабораторії внаслідок критичних відхилень від запрограмованих температурних режимів в інкубаторах і ємностях для тривалого зберігання матеріалу.

Ключові слова: моніторинг температури, інкубатор клітинних культур, ємність Дьюара.

Актуальність дослідження. Для чіткого дотримання умов короткострокового інкубування та наступного довготривалого зберігання біологічних матеріалів в Україні традиційно використовують комерційно доступне обладнання від провідних світових виробників, яке програмно реалізує потрібні значення температури і вмісту окремих компонент (вуглекислого газу, кисню, водяної пари) в газовій суміші робочого об'єму, та ємності Дьюара. Надійність його експлуатації потребує додаткового незалежного контролю за згаданими параметрами газової суміші в інкубаторах та за критичним рівнем рідкого азоту в ємностях Дьюара кріосховищ. Подібний моніторинг, як правило, в кожній клініці носить індивідуальні ознаки та вимагає конкретизованого інженерного підходу.

В поточних умовах воєнного стану в Україні, що супроводжується частими не санкціонованими відключеннями електропостачання та ускладненими логістичними ланцюгами, загроза втрати біологічного матеріалу критично зростає. Тому умови зберігання біологічних матеріалів наразі потребують особливої уваги, можливо - також перегляду державних норм і вимог до технічного оснащення відповідних медичних закладів.

Це стимулює вітчизняні дослідження і інженерні розробки в напрямку реалізації інформаційних технологій превентивного характеру, до яких відносять системи моніторингу і оповіщення оператора про аварійні стани лабораторного обладнання, бажано – з реалізацією систем на первинних перетворювачах, апаратних та програмних засобах автоматизації, пропонувані українськими виробниками, з мінімальним використанням імпортованих приладів і комплектуючих.

Мета дослідження. Метою роботи є розробка і реалізація інтегрованої системи комплексного автоматизованого моніторингу температури в інкубаторах та реєстрації критично низького рівня рідкого азоту в ємностях для зберігання матеріалів в ембріологічній лабораторії клініки репродуктивної медицини з можливістю дистанційного бездротового оповіщення оператора про аварійні стани.

Основні матеріали досліджень. Аналіз науково-технічних публікацій останнього періоду надає можливість встановлення актуальних принципів побудови сучасних інформаційних систем в біомедичній галузі. Переважну більшість подібних автоматизованих термометричних систем реалізовано на основі запрограмованих контролерів з використанням платинових терморезисторних первинних перетворювачів Pt100 чи Pt1000 як найбільш надійних і прецизійних. Прикладом може бути система, представлена в [1], функціональність

якої виглядає, на наш погляд, дещо перебільшеною. В [2] розглянуто випадки втрати ембріонів в медичних закладах США та оцінено роль суб'єктивного фактору в такому результаті; як визнають автори цієї роботи, роль названого фактору залишається значною. В [3] наведено часові залежності втрат рідкого азоту в повнофункціональних ємностях Дьюара та після навмисної розгерметизації їх вакуумних теплоізолюючих контурів. В [4] система безперервної реєстрації рівня рідкого азоту має аналоговий характер та світлодіодну індикацію поточного стану, точність вимірювання рівня складає ± 10 мм, момент виходу за межі визначеного рівня супроводжується подачею звукового сигналу аварії.

Важливою перевагою є те, що в системі реалізовано принцип безперервності спостереження; однак очевидним недоліком функціональності є локальність оповіщення в просторі і часі, яку вкрай бажано інтегрувати до системи вищого рівня. Зазначимо, що наведена в роботі точність вимірювання рівня рідкого азоту розглядається як достатня, а наявність бездротового інтерфейсу між первинним перетворювачем і контролером відповідає сучасним принципам створення інформаційного середовища. Ще одним важливим принципом є завадостійкість системи; цей аспект розглянуто в роботах [5, 6]. Для синтезу системи реєстрації рівня рідкого холодоносія авторами цих робіт запропоновано оригінальне конструктивне рішення первинних сенсорів.

Таким чином, локальність системи оповіщення, не типовість первинних сенсорів - все це, скоріше, потрібно розглядати як певні обмеження на шляху до широкого впровадження підходів технології інтернету речей (ІОТ). Серед аналогів подібних систем вітчизняного виробництва варто зазначити систему контролю кріосховищ моделі СКК-1 від НВК «ОТЕЛ», м. Харків, призначену для цілодобового моніторингу температури та рівня холодоносія (рідкий азот, вуглекислота) в 2-х кріосховищах біологічних матеріалів типу ХБ-0,5 з одночасним архівуванням інформації і можливістю передачі її в персональний комп'ютер [7].

Шляхи зменшення ризиків видаються очевидними: довготривалий незалежний моніторинг поточного стану систем автоматизованого регулювання з метою своєчасного виявлення критичних відхилень температури в названих системах і контроль втрат рідкого азоту в ємностях Дьюара. Реалізація такої автоматизованої системи моніторингу потребує визначення переліку вимірюваних параметрів і критичних функцій системи та допустимої похибки вимірювання за кожним з каналів. В нашій роботі систему моніторингу реалізовано за традиційними підходами; акцент у виборі комплектуючих нами зроблено на продукції вітчизняного виробника засобів автоматизації – НВФ «РЕГМІК». Додаткові зручності такого вибору полягають в можливості придбання всієї лінійки технічних засобів від одного

виробника, включаючи первинні перетворювачі на потрібні діапазони, контролер і програмне забезпечення для конфігурації системи з функцією оперативного дистанційного оповіщення про настання аварійних станів.

В цій роботі нами реалізовано систему на основі вимірювача - індикатора аварійних станів з функцією GSM – логера виробництва НВФ «РЕГМІК», призначеного для роботи з перетворювачами температури, які мають вихідний інтерфейс RS485 (протокол ModBus RTU). Лінійка вимірювачів-індикаторів, в залежності від моделі, забезпечує відображення на власному рідкокристалічному індикаторі виміряних значень за 4, 8, 16, або 32 каналами; нами вибрано 8-канальний варіант індикатора моделі І8Л (рис. 1).

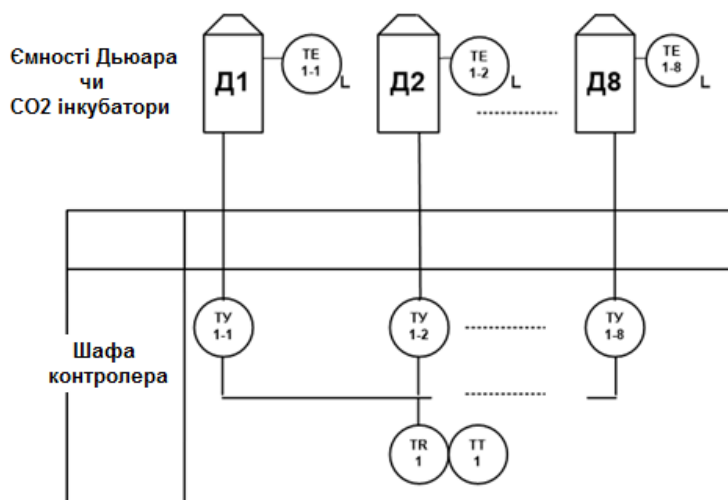


Рис. 1. Схема модуля системи моніторингу. Ланцюг передачі вимірювального сигналу: TE → TUY → TR [TT] → SMS. Д1...Д8 – робочі камери інкубаторів клітинних культур із матеріалом чи ємності Дьюара для довготривалого зберігання

Основні режими роботи вимірювача – індикатора наступні:

- індикація температури, вимірної первинними перетворювачами з вихідним інтерфейсом RS485; кількість вимірюваних каналів – до 8;
- збереження в незалежну пам'ять вимірних значень температури із програмно заданою періодичністю та з прив'язкою за часом (8 каналний прилад може зберігати у внутрішній пам'яті – 59 500 значень);
- формування сигналу «Аварія» при виході контрольованого параметра за допустимі межі;
- відправка аварійного СМС повідомлення при вказані телефонні номери (до 4 номерів);
- телефонний виклик абонента при виникненні аварійної ситуації;
- вбудований цифровий годинник реального часу.

Контролер І8Л також дозволяє виконати обмін даними з персональним комп'ютером (ПК), включаючи налагодження внутрішніх параметрів по інтерфейсу USB; можливість відправки статусних СМС по запиту Користувача; передачу даних на FTP сервер за допомогою GPRS з'єднання; включення вихідного пристрою при аварії; управління вихідним пристроєм по СМС. Живлення контролера реалізується від джерела постійної напруги номіналом 24 В. Режим роботи «Конфігурація з ПК» використовується для налагодження системи з ПК через інтерфейс USB; використовується програмне забезпечення від виробника «SSD v4.4». В цьому режимі можна зчитувати незалежну пам'ять приладу з протоколом подій, змінювати параметри приладу, номери вимірювальних каналів, телефонні номери абонентів, виконувати настройки для з'єднання з FTP-сервером, тощо.

Враховуючи наведене, нами запропоновано схему автоматизації моніторингу температури, функціональність якої відповідає типовим вимогам ембріологічної лабораторії; її наведено на рис. 1. Система моніторингу сформовано за модульним принципом; до складу модуля входять:

- до восьми терморезисторних первинних перетворювачів Pt100, діапазон вимірювання температури від -200 до $+100$ °С;
- відповідна кількість вторинних перетворювачів ПІУ-СТСП-3-Pt100 з інтерфейсом RS485;
- один восьмиканальний контролер з інтерфейсом RS485-І8Л;
- блок живлення 12-24-БПЗ-25 з функцією безперебійного живлення.

Розроблена система реалізує незалежний моніторинг температури по кожному з восьми вхідних каналів зі сповіщенням персоналу про аварійні стани за фактом виходу вимірної температури за межі запрограмованого оператором діапазону і наступного надсилання текстового повідомлення на номери мобільних телефонів; одночасно система реєструє дату та час аварійної події. Загальний вигляд частини змонтованої в лабораторії системи наведено на рис. 2, а.



а



б

Рис. 2. Загальний вигляд системи моніторингу, змонтованої в лабораторії, та покази індикатора поточного стану температури в емностях Дьюара, вимірювальні канали № 3 і № 4

Важливо коректним чином змонтувати первинний перетворювач на елементах конструкції в робочому об'ємі інкубатора чи на одному із занурюваних кронштейнів для довготривалого зберігання матеріалу в рідкому азоті. Зниження рівня рідкого азоту в ємності Дьюара реєструється за фактом підвищення температури каналу за межі запрограмованого оператором порогу. Можливість візуального спостереження за поточною температурою дозволяє оператору превентивно запобігти реалізації аварійного стану (рис. 2, б). Контролер з'єднується бездротовим GPRS-каналом з FTP-сервером та із заданою оператором періодичністю архіває дані в енергонезалежній пам'яті в текстовий файл.

Розрядність індикації И8Л – три десяткових знаки, що задовольняє потреби користувача. Моніторинг температури робочої камери інкубатора дозволяє індикацію десяткової долі градуса і відповідно калібрування вимірювального каналу з можливістю внесення корекції в покази з роздільною здатністю (+/-) 0,1 °C; моніторинг температури внутрішнього об'єму ємності Дьюара дозволяє індикацію одиниць градуса і відповідно калібрування вимірювального каналу з можливістю внесення корекції в покази (+/-) 1,0 °C. У якості вторинного еталону при калібрування розробленої системи нами використано вимірювач температури KEITHLEY 2701 ETHERNET MULTIMETER, сертифікат калібрування від ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ» UA/24/210908/4361; відхилення на показах еталону 37,00 °C складає 0,01 °C з розширеною невизначеністю 0,03 °C; відхилення на показах еталону мінус 90,00 °C складає мінус 0,26 °C з розширеною невизначеністю 0,03 °C.

Аварійний стан технологічного режиму довготривалої кріоконсервації виникає за умови зменшення рівня рідкого азоту; при цьому система надсилає текстове СМС-повідомлення у форматі <Назва медичного закладу> <Рівень азоту> <Номер каналу-посудини Дьюара>. При отриманні подібного повідомлення персоналу необхідно терміново вжити належні заходи щодо усунення аварії; на практиці це вимагає додавання рідкого азоту у відповідну кріоемність, після чого контролер автоматично завершує передачу аварійного повідомлення, сповіщує абонентів про повернення до робочого стану поточного моніторингу.

Висновки

Функціональність та інформативність синтезованої восьмиканальної автоматизованої системи забезпечує уникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з можливою втратою біологічних матеріалів у виробничих біологічних процесах ембріологічної лабораторії. Це реалізується внаслідок своєчасного виявлення критичних відхилень від належних температурних режимів в інкубаторах і визначення критично низького рівня рідкого азоту в ємності Дьюара для тривалого зберігання матеріалу в кріосховищах. В роботі визначено основні функції такої системи, оптимальне розміщення первинних перетворювачів в робочих зонах. Виконано реалізацію, монтаж і апробацію описаної системи з використанням каналів бездротового мобільного зв'язку для надсилання аварійних повідомлень на телефонні номери користувачів. Система моніторингу температури може бути рекомендованою для широкого використання за функціональним призначенням у відповідних біомедичних закладах.

Література

1. Использование системы сигнализации уровня жидкого азота для оптимизации условий хранения биологического материала в низкотемпературном банке. <https://cutt.ly/NB0iBhp> [Електронний ресурс]: [Інтернет-портал]. – Електронні дані. Режим доступу: www.ukr.net (дата звернення 20.10.2022).

2. Best practices and policies for handling and monitoring liquid nitrogen containers containing human reproductive specimens. https://www.researchgate.net/publication/341742440_Best_practices_and_policies_for_handling_and_monitoring_liquid_nitrogen_containers_containing_human_reproductive_specimens [Електронний ресурс]: [Інтернет-портал]. – Електронні дані. Режим доступу: www.ukr.net (дата звернення 20.10.2022).

3. Kimball O. Pomeroy, Michael L. Reed, Brian LoManto, Stanley G. Harris, W. Brent Hazelrigg, Dawn A. Kelk. Cryostorage tank failures: temperature and volume loss over time after induced failure by removal of insulative vacuum. 2019; November. Journal of Assisted Reproduction and Genetics 36(666):1-8. DOI: 10.1007/s10815-019-01597-5.

4. ASTON, Pa. New Wireless Temperature Sensor with RTD Probe for Monitoring Liquid Nitrogen Tanks Helps to Ensure the Safety of Sensitive Biological Materials, November 7, 2019. <https://www.sensaphone.com/news/2019/11/> [Електронний ресурс]: [Інтернет-портал]. – Електронні дані. Режим доступу: www.ukr.net (дата звернення 17.12.2021).

5. Simple liquid level monitor using copper wire as a sensor. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011227587900348#!> [Електронний ресурс]: [Інтернет-портал]. – Електронні дані. Режим доступу: www.ukr.net (дата звернення 17.10.2022).

6. Simple and reliable liquid nitrogen refill system. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011227588901075> [Електронний ресурс]: [Інтернет-портал]. – Електронні дані. Режим доступу: www.ukr.net (дата звернення 20.10.2022).-

7. <https://otel.prom.ua/ua/p575393-sistema-kontrolya-kriohranilisch.html>