

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ І КОНТРОЛЮ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОЛІЗНИХ УСТАНОВОК З ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ НА АЕС УКРАЇНИ

Отримано 07 трав. 2025 р.; рекомендовано до публікації 22 вер. 2025 р.
Доступно онлайн 30 вер. 2025 р.

Кромпляс Б. А.¹, Зайцев Є. О.², Левицький А. С.³

Автор для кореспонденції: Зайцев Євген,
e-mail: zaitsev@i.ua

¹ канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0001-7164-8056>

² д-р. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0003-3303-471X>

³ д-р. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-0146-9498>

^{1, 2, 3} Інститут електродинаміки НАН України,
м. Київ, Україна

¹ Інститут відновлюваної енергетики НАН
України, м. Київ, Україна

² ЦІАТЗМОАЕ НАН України НАН України,
м. Київ, Україна.

У статті показано, що водень завдяки своїм унікальним теплотехнічним властивостям є ефективним охолоджувачем потужних турбогенераторів на АЕС, що забезпечує підвищення їх надійності та енергоефективності, вимагаючи водночас постійного контролю втрат і безперебійного постачання за допомогою електролізних установок. Показано, що для забезпечення безперервної подачі водню використовуються електролізні установки, які через високу пожежо- та вибухонебезпеку потребують постійного моніторингу та жорсткого контролю експлуатаційних параметрів. Відсутність таких систем на більшості енергогенеруючих об'єктів України створює ризики для безпечної експлуатації обладнання. З метою підвищення надійності та безпеки роботи запропоновано структуру автоматизованої системи моніторингу і контролю. До її складу входять підсистема виявлення витоків водню та підсистема контролю положення вентилів, реалізовані на основі серійних промислових модулів з цифровим інтерфейсом, що забезпечують гнучке конфігурування СМК для різних типів ЕУ без втручання в їх штатну інфраструктуру. Запропоновано архітектуру підсистеми контролю положення вентилів та виявлення витоків водню на основі інтелектуалізованих концентраторів, бездротових засобів взаємодії та спеціалізованих сенсорів, з урахуванням вибухозахищеності та вимог до чутливості в умовах експлуатації електролізних установок на АЕС. Обґрунтовано доцільність застосування високочутливих ємнісних MEMC-сенсорів концентрації водню, які мають низьке енергоспоживання, високу вибухозахищеність і реалізуються у вигляді інтегральних мікросхем, що забезпечує підвищення надійності, вибухозахищеності та сприяє безпечному використанню водню в інших сферах безвуглецевої енергетики.

Ключові слова: водень, безпека, сенсори, контроль водню, промисловість, система.

SYSTEM FOR MONITORING AND CONTROL OF OPERATING PARAMETERS OF ELECTROLYSIS UNITS FOR THE PRODUCTION OF PINK HYDROGEN AT NPPS OF UKRAINE

Received May. 07, 2025; accepted Sept. 22, 2025
Available online Sept. 30, 2025

Kromplyas B.¹, Zaitsev I.², Levytskyi A.³

Author for correspondence: Zaitsev Ievgen,
e-mail: zaitsev@i.ua

¹ Cand. of Tech. Science
<https://orcid.org/0000-0002-0146-9498>

² Dr. of Tech. Science
<https://orcid.org/0000-0003-3303-471X>

³ Dr. of Tech. Science
<https://orcid.org/0000-0002-0146-9498>

^{1, 2, 3} Institute of Electrodynamics of the NAS of
Ukraine, Kyiv, Ukraine

¹ Institute of Renewable Energy of the National
Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² CIATSNPFM of the National Academy of
Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

In the paper highlights that hydrogen is critical importance for energy, due to its unique thermal properties. This gas high effective cooler for powerful turbogenerators at nuclear power plants, which ensures their increased reliability and energy efficiency, while requiring constant control of losses and uninterrupted supply using electrolysis plants. Showing that electrolysis plants are used to ensure continuous

hydrogen supply, which, due to their high fire and explosion safety, require constant monitoring and strict control of operating parameters. The absence of such systems at most power generating facilities in Ukraine creates risks for the safe operation of equipment. In order to increase the reliability and safety of operation, the structure of an automated monitoring and control system is proposed, which includes a hydrogen leak detection subsystem and a valve position control subsystem, implemented on the basis of serial industrial modules with a digital interface, which provide flexible configuration of the QMS for different types of ES without interfering with their standard infrastructure. The architecture of the valve position control subsystem and hydrogen leak detection based on intelligent concentrators, wireless means of interaction and specialized sensors is proposed, taking into account explosion protection and sensitivity requirements in the operating conditions of electrolysis units at nuclear power plants. The feasibility of using highly sensitive capacitive MEMS hydrogen concentration sensors, which have low power consumption, high explosion protection and can be implemented in the form of integrated circuits, is substantiated, which will ensure increased reliability, explosion protection and contribute to the safe expansion of the use of hydrogen in other areas of carbonfree energy.

Keywords: hydrogen, safety, sensors, hydrogen control, industry, system.

Використані скорочення та позначення

ААС – адаптер аналогових сигналів

АДС – адаптер дискретних сигналів

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

АЕС – атомна електростанція

ЕУ – електролізерна установка

СМК – системи моніторингу і контролю

КВП – контрольно-вимірювальні прилади

ГЩУ – головний щит управління

СЛ – сигнальні лінії

ШСІ – шини системного інтерфейсу

ПКПВ – підсистема контролю положення вентилів

ПВЛВ – підсистема локального виявлення витоків

СПВ – сенсори положення вентилів;

КСПВ – концентратори сенсорів положення вентилів

МВВ – монітор встановлення вентилів

КСПВ – концентратори сенсорів положення вентилів

Вступ і постановка завдання. Водень є важливим промисловим газом, який широко застосовується на енергогенеруючих об'єктах, зокрема для охолодження потужних турбогенераторів, особливо на АЕС. Завдяки високій теплопровідності, низькій густині та високій теплоємності, водень ефективно відводить тепло від обмоток генератора, зниженню втрат на тертя та вібрацію, що позитивно впливає на тривалість експлуатації, підвищує ефективність та надійність роботи генераторів [1,2,3]. Так, наприклад, для охолодження генератора енергоблоку з реактором типу ВВЕР-1000 використовується понад 140 м³ водню. При цьому допускаються втрати до 1% об'єму на добу. Це означає, що щоденні втрати водню можуть досягати 1,4 м³, що вимагає постійного контролю та поповнення газу для забезпечення ефективної роботи системи охолодження. Для забезпечення потреб енергогенеруючих підприємств України, зокрема атомних електростанцій, у водні експлуатуються електролізні установки виробництва компанії «Хіменерго» [4]. Номенклатура та технічні характеристики основних типів таких установок узагальнені в табл. 1 [5-7].

Електролізерні установки (ЕУ) класифікуються як об'єкти з підвищеним рівнем пожежо- та вибухонебезпеки, що зумовлює необхідність забезпечення постійного моніторингу та жорсткого контролю їхніх експлуатаційних параметрів. Перелік технологічних параметрів, які слід контролювати неперервно, згідно з [8, 9] містить більше 15 позицій.

Крім того, періодичному контролю (один раз в робочий день) підлягають такі параметри [9]:

1. Стан (відкрито – закрито) основних технологічних вентилів ЕУ.
2. Наявність відповідного рівня води в гідрозатворі.
3. Чистота водню в системі (методом хімічного аналізу проби в хімічній лабораторії).
4. Чистота кисню (аналогічно п. 3).

При цьому до 80 % всіх операцій контролю виконує оператор установки, якому доводиться перебувати в приміщенні саме електролізної, що належить до категорії об'єктів з підвищеною вибухо- та пожежонебезпекою. У табл. 2 наведено перелік регламентованих методів та засобів визначення аварійних режимів для установок типу СЕУ, розглянутих у табл. 1 [9].

Аналіз експлуатованих електролізних установок типу СЕУ (табл. 1), розміщених на енергогенеруючих підприємствах України, зокрема на АЕС, засвідчив відсутність в них систем автоматизованого безперервного моніторингу експлуатаційних параметрів. Унаслідок цього суттєво знижується можливість оперативного виявлення відхилень від нормального технологічного режиму, зокрема на ранніх стадіях розвитку аварійних ситуацій або технічних несправностей. Це своєю чергою ускладнює забезпечення належного рівня технологічної безпеки під час роботи електролізних установок.

Таблиця 1. Технічні характеристики електролізних установок

Table 1. Technical specifications of electrolysis units

	СЭУ-4М	СЭУ-20	СЭУ-40	СЭУ-10х2	ФВ-250М	ФВ-500М	БЭУ-125	БЭУ-250
Сила струму, що підводиться до електролізера, А	330	1000	1000	1000	7800-8200	7800-8200	1000	1000
Напруга на електролізері, В	72	100	200	50	180,4	365	205	205
Робочий тиск, кгс/см ²	10	10	10	10	0,1	0,1	10	10
Робоча температура, °С	80±5	85±5	85±5	85±5	85±5	80±5	85±5	85±5
Чистота газів, %:								
водню	99,0	99,7	99,7	99,7	99,5	99,5	99,7	99,7*
кисню	98,0	99,5	99,5	99,5	98,5	98,5	99,5	99,5
Продуктивність,								
м ³ /год водню	4	20,5	41	10	260	536	125	250
м ³ /год кисню	2	10,25	20,5	5	130	268	62,5	125
Габаритні розміри, мм								
довжина	1700	2400	4100	1650	7950	13500	10700	15800
ширина	610	1060	1060	1000	3640	3660	8300	8300
висота	830	1780	1780	1646	6540	6540	6640	6640
Маса електролізера, кг	1290	4720	7435	3590	59420	101360		
Ємність за електролітом, м ³							6	11

*Маса двох електролізерів з комплектуючим технологічним обладнанням

З огляду на підвищену пожежо- та вибухонебезпеку водню подібні обмеження у використанні систем контролю створюють додаткові ризики для безпечної експлуатації не лише самих ЕУ, а й енергогенеруючих об'єктів у цілому. Важливо зазначити, що втрати водню можуть бути спричинені незначними витокami через ущільнення або з'єднання в системі. Тому забезпечення постійного моніторингу та технічного обслуговування є критично важливим для своєчасного реагування на нештатні ситуації та попередження аварій.

Враховуючи те, що всі діючі в Україні ЕУ потужністю від 4 м³/год є російського виробництва, і модернізація цього штатного обладнання наразі є неможливою, необхідно розглядати альтернативні варіанти для забезпечення безпеки експлуатації ЕУ на АЕС. Одним із можливих способів контролю за експлуатаційними характеристиками ЕУ може бути створення та впровадження системи моніторингу і контролю (СМК) експлуатаційних параметрів ЕУ, розробка якої базується на таких принципах:

1. СМК вводиться як додаткова апаратура до штатного обладнання ЕУ без модернізації та зміни алгоритмів функціонування ЕУ.
2. Допускається паралельне під'єднання апаратури СМК до штатних сигнальних та вимірювальних каналів ЕУ без погіршення їхніх метрологічних та функціональних характеристик.

Метою цієї роботи є обґрунтування необхідності впровадження сучасної системи моніторингу і контролю експлуатаційних параметрів ЕУ, що використовуються для виробництва водню на енергогенеруючих підприємствах України для забезпечення власних потреб.

Основна частина. На рис. 1 представлено структурну схему стаціонарної електролізної установки (ЕУ) з інтегрованою системою моніторингу і контролю (СМК) у її складі. Компоненти ЕУ, представлені на схемі, зазвичай розміщуються в декількох окремих приміщеннях. При цьому ресивери для зберігання готового водню, для дотримання вимог безпеки, розташовуються на відкритій ділянці, що забезпечує ефективну вентиляцію та мінімізує ризики вибухів або виникнення інших небезпечних ситуацій. На структурній схемі ці приміщення позначені штриховими лініями, що забезпечує зручне сприйняття і точну ідентифікацію їх місця розташування.

Для отримання даних в СМК використовуються штатні контрольно-вимірювальні прилади (КВП), сигнали від яких надходять на відповідні панелі. Сигнали від КВП до СМК передаються по лініях зв'язку шляхом під'єднання до сигнальних клем панелей КВП входів відповідних адаптерів вхідних сигналів СМК, здебільшого використовується паралельне під'єднання.

Перетворення сигналів у цифрову форму і програмна обробка отриманих даних системним контролером СМК надає такі функціональні можливості для СМК:

- формування сигналізації відхилення контрольованих параметрів від значень уставок з поданням інформації на моніторі СМК та надсиланням інформації на головний щит управління (ГЩУ);
- індивідуальне та групове подання на виклик оператора поточних значень контрольованих параметрів на моніторі;
- зміна режимів ведення технологічного процесу;
- контроль параметрів з генерацією відповідних подій;
- збереження поточних подій із записом до журналу, до скидання їх оператором;
- налаштування порогів спрацьовування запобіжних та передаварійних ситуацій;
- передача даних та подій у програму верхнього рівня;
- налаштування витримок спрацьовування за запобіжними та передаварійними ситуаціями.

Таблиця 2. Визначення аварійних режимів

Table 2. Identification of emergency operating modes

Ознака аварійного режиму	Метод визначення	Засіб визначення та ідентифікації
Зниження чистоти водню	Візуальний, за показами Хімічний аналіз Перевірка на коротке замикання в одній або кількох комірках між анодами та рамами	Автоматичний газоаналізатор Лабораторне обладнання Вольтметр, Амперметр постійного струму
Підвищення тиску в апаратах ЕУ, що попереджає зростання тиску в ресивері	Візуальний	Вимірювач рівня води, манометри
Збільшення різниці температур водню та кисню на виході елект-ролізера	Візуальний	Термометри
Збільшення перепаду температури через довжину електролізера до 20 °С	Візуальний	Термометри
Перегрів вентилів випрямляча	Візуальний	Сигнальний індикатор на пульті. Манометр тиску води
Пробій вентилів випрямляча	Візуальний	Сигнальний індикатор на пульті

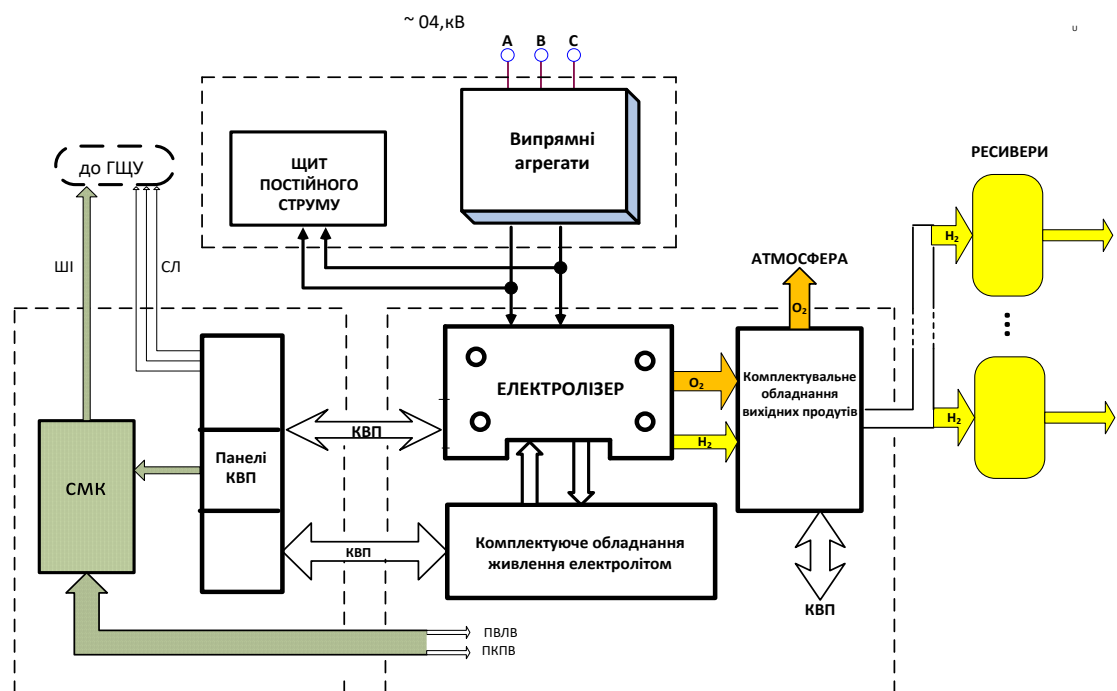


Рис. 1. Структурна схема стаціонарної електролізної установки

Fig.1. System architecture of stationary electrolyzer unit

Як зазначено в [8, 9], на ГЦУ щодо несправностей та ненормальних режимів роботи ЕУ по сигнальних лініях (СЛ) передаються лише три типи сигналів:

- «Вміст H_2 у повітрі електролізної – аварійний»;
- «Аварійне відключення на електролізній»;
- «Несправність на електролізній».

На штатних панелях КВП сигналізація щодо конкретних несправностей та ненормальних режимів роботи електролізної установки реалізована за допомогою вказівних випадаючих реле на панелі КВП. Це дозволяє оперативно отримати інформацію про порушення в роботі установки. Однак конкретна причина несправності на ГЦУ повідомляється черговим оператором лише після його прибуття в приміщення щитової.

СМК на основі програмної обробки отриманих значень експлуатаційних параметрів сформулює і передасть на ГЦУ через шини системного інтерфейсу (ШСІ) більш повну і чітку інформацію про стан ЕУ.

Ряд передаварійних станів за наявності тільки штатного обладнання визначаються лише оператором на основі аналізу зміни значень відповідних параметрів, зчитуваних виключно візуально зі шкал приладів. Це зумовлює ймовірність допущення помилок, обумовлених людським фактором. Виявлення таких станів СМК за допомогою програмного аналізу значень експлуатаційних параметрів установки та формування відповідної сигналізації дасть змогу уникнути таких помилок.

Згідно з [8] для керування роботою ЕУ використовується велика кількість вентилів та засувок з ручним управлінням: до 90 % арматури ЕУ. Цією арматурою трубопроводу ЕУ конфігуруються на різні режими роботи установки. Так, наприклад, в установці СЗУ-20 є 5 режимів роботи і 12 технічних пускових та стопових операцій [8]. Усі зазначені операції наразі виконуються вручну, безпосередньо операторами. Значна частина з них здійснюється в умовах підвищеного ризику в приміщенні ЕУ, яке належить до категорії об'єктів із підвищеним рівнем вогне- та вибухонебезпеки. Такий підхід не тільки підвищує рівень навантаження на персонал, але й створює додаткові ризики для безпечної експлуатації обладнання ЕУ.

Неправильне положення навіть одного з вентилів може стати причиною порушення штатного режиму роботи установки, що також підвищує ризик виникнення передаварійних або аварійних ситуацій. Тому в СМК доцільно ввести підсистему автоматичного контролю положення основних вентилів – ПКПВ.

Для контролю наявності водню в приміщенні електролізної у склад штатного обладнання установок типу СЗУ входять газоаналізатори типу ДАМ (рис. 2), які виконують функцію детектування і кількісного аналізу водню у газовій суміші на основі напівпровідникової технології [10]. Ці газоаналізатори для досягнення заявленої точності здійснюють вимірювання концентрації не лише

водню, а й супутніх впливових параметрів з одночасним вимірюванням концентрації водню та температури з метою автоматичної корекції показань і забезпечення високої точності в умовах змін зовнішніх впливів.



Рис. 2. Газоаналізатор типу ДАМ

Fig. 2. DAM-Type Gas Analyzers

Газоаналізатори типу ДАМ складаються з двох дистанційно рознесених блоків – газоаналізатора та системи живлення і сигналізації. Основний блок газоаналізатора (рис. 2) характеризується значними габаритними розмірами (165 × 130 × 280 мм) та масою (5,0 кг). Через ці конструктивні особливості, а також високу вартість пристрою, їх кількість в ЕУ істотно обмежена. Газоаналізатори використовуються переважно для контролю інтегральної концентрації водню в приміщеннях електролізерної установки з метою виявлення вибухонебезпечних умов.

Відповідно до інструкції з експлуатації, у разі виявлення критичного рівня концентрації водню робота ЕУ негайно припиняється, а приміщення піддається примусовому продуванню інертним газом, зокрема азотом. Проте, незважаючи на ці заходи безпеки, виявлення джерела витоку водню залишається складним і трудомістким завданням, що потребує додаткових технічних засобів та втручання висококваліфікованого персоналу.

Попередження розвитку цих аварійних ситуацій та забезпечення оперативного виявлення місць витоку водню може бути досягнуто інтеграцією до складу СМК спеціалізованої підсистеми локального виявлення витоків (ПВЛВ) водню. Така підсистема повинна забезпечувати безперервний контроль концентрації водню безпосередньо в критичних зонах електролізної установки, зокрема в області електролізера, апаратів розділення газів, трубопроводної арматури та інших потенційно небезпечних місцях конструкції ЕУ.

Функціональна схема СМК експлуатаційних параметрів ЕУ показана на рис. 3. Під час розробки схеми СМК ставилося за мету забезпечити достатній рівень універсальності як апаратних, так і програмних засобів, оскільки передбачалася можливість встановлення СМК на серійних електролізерах декількох типів. Тому СМК будується на базі серійного промислового комп'ютера як головного контролера СМК з відповідним стандартним інтерфейсом для пристроїв уведення та індикації інформації, який взаємодіє з функціональними блоками системи СМК ЕУ.

Контролер СМК виконує основні функції зі збирання та аналізу даних, а також формування архівів даних та індикування стану основних експлуатаційних параметрів ЕУ та рівнів водню в критично важливих точках системи з підвищеною ймовірністю витоків водню на основному інформаційному табло системи. Крім того, в контролер СМК вводяться відповідні уставки значень робочих параметрів ЕУ для аналізу стану ЕУ і для налаштувань функціональних блоків. Контролер також забезпечує передачу інформації про стан і події на ЕУ в інформаційну систему вищого рівня, яка розміщена на ГЦУ об'єкта енергетики.

Цифрові дані для програм контролю та аналізу стану ЕУ формуються у функціональних блоках, обмін даними з контролером СМК реалізується по інтерфейсу типу «спільна шина». Це дає можливість адаптувати СМК під заданий тип ЕУ модифікацією або створенням окремих нових блоків без зміни основної апаратури і базового програмного забезпечення (драйверів обміну, блоків вводу – виводу, аналізу даних тощо)

Електричні сигнали від штатних засобів вимірювання та контролю надходять до стандартних панелей КВП ЕУ. Паралельно до вхідних каналів цих панелей підключаються відповідні входи ААС та АДС для передачі сигналів до СМК. Структурно ААС і АДС містять вхідні кола нормалізації сигналів, перетворювачі аналогових та дискретних сигналів у цифрову форму, а також керуючі контролери. Для обробки дискретних сигналів використовуються мультиплексори, а для аналогових – багатоканальні АЦП. Контролери здійснюють управління процесом перетворення, формують цифрові коди результатів у форматі, сумісному з обміном даними з основним контролером СМК, та забезпечують безперервну передачу цих даних. Ці блоки адаптерів можуть бути реалізовані з використанням доступних серійних промислових перетворювачів та модулів збору даних [8, 9]. Зокрема, введення електричних параметрів (напруга, струм тощо) доцільно виконувати на основі вітчизняних багатофункціональних перетворювачів серії МТЕ [11], які забезпечують високий рівень точності та надійності вимірювань. Для обробки аналогових та дискретних сигналів рекомендується використовувати модулі NuDAM виробництва компанії ADLINK Technology Inc. [12], що забезпечують гнучку інтеграцію з промисловими контролерами, підтримку стандартних інтерфейсів обміну даними та мають розширені функції попередньої обробки сигналів.

В ЕУ типу СЗУ передбачено до шести режимів роботи, кожен з яких вимагає переконфігурацію трубопроводів установки встановленням запірних вентилів у певний стан. Важливість встановлення вентилів у регламентний стан визначається вже тим, що під час регламентних оглядів ЕУ проводиться контроль стану вентилів з обов'язковою відміткою у відповідному журналі [8].

Зміна стану цілої групи вентилів виконується вручну оператором, причому в приміщенні електролізерної на основі карти встановлення вентилів для відповідного режиму.

З метою мінімізації впливу людського фактора на роботу систем ЕУ та задання режимів роботи ПКПВ трубопровідної арматури, яка є складовою СКМ ЕУ (рис. 3), повинна забезпечувати виконання таких завдань:

1. Достовірний оперативний контроль положення запірних вентилів.
2. Формування сигналу попередження про відхилення від регламентного стану вентилів для безпосереднього обслуговуючого персоналу.
3. Створення умов для швидкого і точного відновлення регламентного стану вентилів під час відхилення від нього і для регламентного встановлення цих вентилів під час зміни конфігурації контрольованої системи.

Підсистема складається з контролера ПКПВ та СПВ. Більшість вентилів ЕУ у складі ПКПВ розміщено безпосередньо в приміщенні електролізерної, що класифікується як вибухо- та пожежонебезпечна зона через ризик витоків водню та кисню й утворення вибухонебезпечних сумішей. Тому всі компоненти ПКПВ і їх електричні з'єднання, встановлені в цьому приміщенні, мають відповідати вимогам вибухозахищеного виконання.

З огляду на те, що вентиля територіально розташовані між обладнанням на досить значній відстані й кількість сенсорів чимала (мінімум 2 сенсори для крайніх положень виконавчого вентиля), нераціонально організовувати з'єднання цих сенсорів з контролером підсистеми по селекторних каналах, що вимагає великої кількості ліній зв'язку.

Тому пропонується у ПКПВ цей зв'язок організувати лініями послідовного інтерфейсу типу RS-485 через інтелектуалізовані концентратори сенсорів положення вентилів (КСПВ). Вони встановлюються в безпосередній близькості від сенсорів функціональної групи вентилів, що зменшує довжину провідників до цих сенсорів, а також уніфікує протокол отримання даних про стан вентилів, незалежно від способу отримання цих даних від конкретного типу сенсора. КСПВ виконують прийом та обробку сигналів від сенсорів СПВ та формування й передачу коду стану відповідних вентилів ЕУ при адресному запиті від контролера ПКПВ.

Для спрощення процедури й підвищення надійності коректного встановлення вентилів у разі зміни конфігурації ЕУ до складу ПКПВ введено адаптер безпроводної передачі даних протоколу Wi-Fi (AWiFi) та переносний монітор встановлення вентилів (MBV).

Під час зміни конфігурації ЕУ оператор встановлює відповідні вентиля, користуючись командами, що індикуються на переносному MBV. Команди в послідовному порядку формуються контролером ПКПВ згідно з картою встановлення вентилів, яка завантажується з контролера СМК. Виконання команди відслідковується підсистемою, і тільки після отримання даних про її виконання підсистема видає наступну команду. Процес закінчується після виконання всієї карти встановлення.

Про всі нюанси виконання операцій формуються відповідні повідомлення контролеру СМК.

Для виконання розглянутої вище функції контролер СМК повинен забезпечуватися відповідними програмами для

виконання процедури встановлення вентилів, формування відповідних карт станів вентилів кожного з режимів зокрема. Принципи організації та формування цих карт можуть бути аналогічними до описаних в [13].

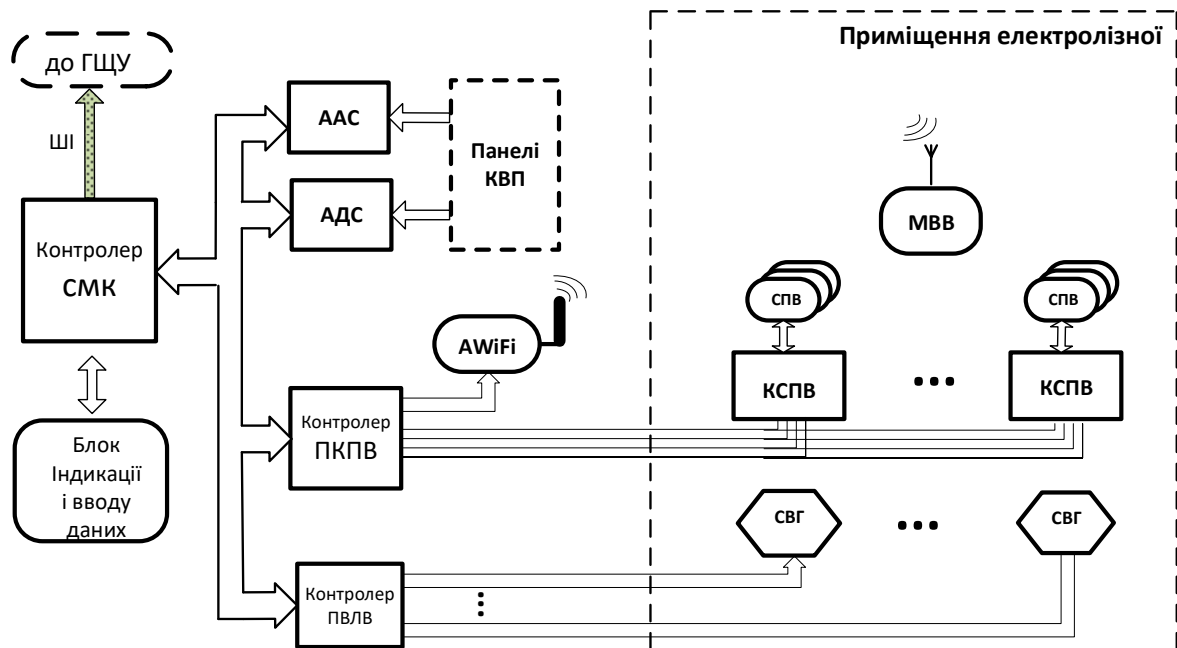


Рис. 3. Функціональна схема СМК експлуатаційних параметрів ЕУ

Fig. 3. Functional block diagram of a monitoring and control system for the operational parameters of electrolysis units

Під час розробки підсистеми особливо складним є створення надійних сенсорів положення вентилів. Підвищені вимоги до вибухобезпечності не дозволяють застосування механічних контактних кінцевих вимикачів. Перспективнішими є сенсори на базі оптоелектронних елементів з відкритим оптичним каналом [14]. Проте навіть такі сенсори вимагають підведення електричних ліній, що створює додаткові труднощі запобігання появи електричної іскри в разі виникнення розривів з'єднань. Тому для вентилів вузлів з потенційно найімовірнішим витоків водню доцільно розробити сенсори без підводу електричних ліній – наприклад, виключно оптичні [15].

Попередження розвитку аварійних ситуацій виконує ПВЛВ газів, на необхідність якої вказувалося вище. Приклад можливості вирішення подібної задачі наведений в [16]. Для електролізних установок, що експлуатуються на енергогенеруючих об'єктах України, зокрема на АЕС, питання впровадження підсистем виявлення витоків водню на поточний момент залишається невирішеним. Основна складність реалізації таких рішень полягає у відсутності сенсорів або детекторів водню, що одночасно відповідали б вимогам до габаритів, чутливості та вибухобезпечності для використання в умовах підвищеної небезпеки. На ринку здебільшого представлені окремі чутливі елементи, призначені для вимірювання лише одного параметра, які потребують додаткового апаратного забезпечення. Альтернативою є сенсорні модулі з нормалізованими аналоговими або цифровими виходами, що значно спрощує їх інтеграцію до систем

моніторингу вмісту водню. Більшість серійних сенсорів працюють на основі електрохімічного або напівпровідникового резистивного принципу, що обмежує їх довговічність, температурну стабільність і потребує регулярного калібрування. У табл. 3 подано технічні характеристики сенсорів водню, які, за даними виробників, доступні для постачання в Україну. У зазначених сенсорах використовуються різні типи чутливих елементів: зокрема, сенсори під позиціями 1, 3, 4, 8 та 12 базуються на напівпровідникових чутливих елементах резистивного типу, тоді як решта – на електрохімічному принципі дії. Зчитування інформативного параметра може бути як аналоговим – АО, так і цифровим – ДО.

Сенсори з напівпровідниковими резистивними чутливими елементами характеризуються відносно високим енергоспоживанням, значна частина якого спрямована на підігрів елемента до робочої температури. Це створює потенційно небезпечні умови при їх розміщенні поблизу електролізного обладнання через ризик витоків водню та можливість утворення вибухонебезпечного середовища.

Електрохімічні газові детектори забезпечують вищу чутливість до концентрації водню, що дозволяє виявити виток водню на більш ранній стадії. Однак недоліком цієї надзвичайної чутливості є те, що електрохімічні сенсори можуть бути зруйновані під впливом рівнів водню, що перевищують їх діапазон вимірювань, унаслідок чого сенсори потребують заміни.

Таблиця 3. Характеристики сенсорів водню

Table 3. Hydrogen sensors specifications

Найменування	Діапазон концентрації водню, % (ppm)	Точність %	Час відгуку, с	Вихід	Напруга живлення (вхідна), В DC	Споживана потужність (струм, мА)	Фірма-продуктент
TGS 821	(50–10000)			резистивний, 1kΩ–10 kΩ	5,0 ± 0,1	660 мВт	FIGARO Engineering
TGS 6812	0–100		> 30	(8,0~ 16) mV	3,0 ± 0,2	525 мВт	
TGS 2600	(1–30)			резистивний, 10kΩ–90 kΩ	5,0 ± 0,2	219 мВт	
MQ8 H2	(100–1000)			АО: (0–4) V	5,0	(150)	Winsen Electronics
ZIROX TCS	0–100	> 5,0	180	DO: RS 232 АО: 0/4–20 mA	24,0	20 Вт	Sensoren und Elecktronik GmbH
HY-ALERTA 600B	0,4–5,0	1,0–3,0	> 60	DO: RS 422 АО: (4–20) mA	10–26	10 Вт	H2scan
TB200B/ES4-H2	0–4,0	± 5,0	> 10	DO: UART MODBUS	5,0	25 мВт	EC Sense
NEO 974	0–5	±0,3	< 5,0	DO: MODBUS АО: 4–20 mA	5,0 DC	<2,4 Вт	neoxid groep
NEO 983	0–10						
NEO 986	0–100						
4-H2-1000	(0–1000)		< 70	0,02 μA/ppm	5–10		ISweek
SEN0572	0,1–1000 ppm			АО: (0–3,3/5) V	3,3–5 V	20mA	DFRobot

Таким чином, жодний з наведених вище (та їм подібних) сенсорів не можна вважати оптимальними для СМК стаціонарних ЕУ. Для підсистем виявлення витoku водню потрібні надійні довговічні порогові сигналізатори концентрації водню, стійкі до широкого діапазону цієї концентрації, з малим часом відновлення, здатні відновлюватися без гістерезису й забезпечувати високий рівень вибухобезпечності. У цьому плані дуже перспективними виглядають результати розробки ємнісних сенсорів концентрації водню, що ґрунтуються на зміні механічної напруженості чутливого до водню шару (наприклад, паладію), так звані сенсори з мікромеханічною системою (MEMS) [17–19]. Такі сенсори мають малу споживану потужність, бо не вимагають підігріву і можуть бути виконані разом із сігма-дельта перетворювачами ємності (CDC) у формі інтегральних схем [20].

Недоліком сенсорних структур на основі МЕМС-технологій є їхня чутливість до зовнішніх факторів, зокрема температурних коливань. Проте постійне вдосконалення конструкцій таких сенсорів останніми роками відкриває перспективи їх широкого застосування як високочутливих елементів сигналізації витоків водню у складі автоматизованих СМК ЕУ, а також на інших технологічних об'єктах, де існує ризик виникнення витоків водню.

Висновок. Отже, впровадження запропонованих у статті структурних та схемних рішень для побудови автоматизованої системи контролю та моніторингу електролізерних установок дозволить істотно підвищити надійність і безпеку процесу отримання водню. Для інтеграції в

уже діючі установки необхідно розробити та вдосконалити окремі компоненти системи, зокрема сенсори.

Робота виконана за держбюджетною темою «Розширення функціональних можливостей та підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання в системах моніторингу і діагностування в електроенергетиці» Шифр «ПАРАМЕТР-Д», реєстраційний номер (0122U000136).

ПОСИЛАННЯ

1. Хвалін Д. І. Підвищення надійності та ефективності експлуатації турбогенераторів електричних станцій. Boston, USA, 2021. 152 с.
2. Кенсіцький О. Г., Ключніков О. О., Федоренко Г. М. Безпека, надійність та ефективність експлуатації електротехнічного та електроенергетичного обладнання блоків АЕС. Чорнобиль: Ін-т проблем безпеки АЕС, 2009. 240 с.
3. Зозулін Ю. В., Антонов О. Є. та ін. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій. Харків: Колегіум, 2011. 223 с.
4. Установки електролізу [Електронний ресурс]. URL: <https://knu.english4ukraine.com/login> (дата звернення: 08.04.2025).
5. Електролізери типу СЭУ-4М, СЭУ-20, СЭУ-40 и СЭУ-10х2.
6. Електролізери типу ФВ-250М, ФВ-500М.
7. Електролізери типу БЭУ.

8. Типова інструкція з експлуатації електролізних установок для отримання водню та кисню. РД 34.50.501-96. ОРГРЭС, 2019. 37 с.
9. Система нормальної експлуатації 150-10-ЕЕЦ ВП «РІВНЕНСЬКА АТОМНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ». 2019. 21 с.
10. Датчики – аналізатори ДАМ. Посібник з експлуатації ІБЯЛ.407111.002-03 РЕ. ФГУП – СПО Аналітприлад. 60 с.
11. Перетворювачі вимірювальні МТЕ 1. Технічні умови. ТУ У 33.2-24077728-001:2010. 66 с.
12. ADLINK Digital I/O Modules. URL: <https://www.adlinktech.com>.
13. Кромплас Б. А., Левицький А. С., Зайцев Є. О. Система автоматизованого налаштування інтелектуалізованих щитових вимірювачів контрольно-діагностичних параметрів енергогенеруючих об'єктів. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2021. Вип. 65. С. 123–130.
14. Кромплас Б. А. Контролер стану клапанів рідинних та парових систем. Технічна електродинаміка. 2002. Тематичний випуск „Проблеми сучасної електротехніки”. Ч. 3. С. 116–120.
15. Zaitsev Ie., Levytskyi A., Kromplyas B., Rybachok P. Optical fiber in nuclear power plants: applications to improve the reliability, safety and work stability of fault control instrumentation. In: Systems, Decision and Control in Energy III / ed. A. Zaporozhets. Springer, 2021. P. 123–138. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-87675-3_7.
16. Пат. Китай CN112576942A Real-time monitoring system for hydrogen leakage; заяв. 27.11.2020, опубл. 30.03.2021.
17. Пат. Китай CN119596205A Capacitive hydrogen sensor; заяв. 18.10.2018, опубл. 20.12.2019.
18. Amazaki H., Hayashi Y., Masunishi K., Ono D., Ikehashi T. High sensitivity MEMS capacitive hydrogen sensor with inverted T-shaped electrode and ring-shaped palladium alloy for fast response and low power consumption. Journal of Micromechanics and Microengineering. Vol. 28. No. 9. 2018.
19. Building a TinyML powered Electronic Nose (E-nose) with MEMS Gas Detection Sensor and Edge Impulse. URL: <https://community.dfrobot.com/makelog-313440.html>.
20. Analog Device 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor AD7745/AD7746. Datasheet. Rev. 1.0. 2005. 28 p.
- tors for thermal power plants. Kharkiv: Kolegium, 2011. 223 p. (Ukr).
4. Electrolysis plants [Electronic resource]. URL: <https://knu.english4ukraine.com/login> (access date: 08.04.2025) (Ukr).
5. Electrolyzers of the type SEU-4M, SEU-20, SEU-40 and SEU-10x2. (Ukr).
6. Electrolyzers of the FV-250M, FV-500M type. (Ukr).
7. BEU type electrolyzers. (Ukr).
8. Typical operating instructions for electrolysis plants for hydrogen and oxygen production. RD 34.50.501-96. ORGRES, 2019. 37 p. (Ukr).
9. Normal operation system 150-10-EEC of the Rivnenska Nuclear Power Plant. 2019. 21 p. (Ukr).
10. Sensors – analyzers DAM. Operation manual IB-YAL.407111.002-03 RE. FSUE – SPO Analytprilad. 60 sec. (Ukr).
11. Measuring transducers MTE 1. Technical conditions. TU U 33.2-24077728-001:2010. 66 p. (Ukr).
12. ADLINK Digital I/O Modules. URL: <https://www.adlinktech.com>.
13. Kromplyas B. A., Levitsky A. S., Zaitsev I. O. System of automated adjustment of intelligent panel meters of control and diagnostic parameters of power generating facilities. Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2021. Issue 65. Pp. 123–130. (Ukr).
14. Kromplyas B. A. Valve status controller for liquid and steam systems. Technical Electrodynamics. 2002. Thematic issue “Problems of modern electrical engineering”. P. 3. Pp. 116–120. (Ukr).
15. Zaitsev Ie., Levytskyi A., Kromplyas B., Rybachok P. Optical fiber in nuclear power plants: applications to improve the reliability, safety and work stability of fault control instrumentation. In: Systems, Decision and Control in Energy III / ed. A. Zaporozhets. Springer, 2021. P. 123–138. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-87675-3_7.
16. Pat. China CN112576942A Real-time monitoring system for hydrogen leakage; application 11/27/2020, published March 30, 2021.
17. Pat. China CN119596205A Capacitive hydrogen sensor; application 10/18/2018, published December 20, 2019.
18. Amazaki H., Hayashi Y., Masunishi K., Ono D., Ikehashi T. High sensitivity MEMS capacitive hydrogen sensor with inverted T-shaped electrode and ring-shaped palladium alloy for fast response and low power consumption. Journal of Micromechanics and Microengineering. Vol. 28. No. 9. 2018.
19. Building a TinyML powered Electronic Nose (E-nose) with MEMS Gas Detection Sensor and Edge Impulse. URL: <https://community.dfrobot.com/makelog-313440.html>.
20. Analog Device 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor AD7745/AD7746. Datasheet. Rev. 1.0. 2005. 28 p.

REFERENCES

1. Khvalin D. I. Increasing the reliability and efficiency of operation of turbogenerators of power plants. Boston, USA, 2021. 152 p. (Ukr).
2. Kensiyskyi O. G., Klyuchnikov O. O., Fedorenko G. M. Safety, reliability and efficiency of operation of electrical and power equipment of NPP units. Chornobyl: Institute of Nuclear Safety Problems, 2009. 240 p. (Ukr).
3. Zozulin Yu. V., Antonov O. Ye. and other. Creation of new types and modernization of existing turbogenera-