

С. М. Якимець¹В. В. Гладкий²В. Ю. Ноженко¹А. В. Ткалич¹

КОНТРОЛЕР АВТОМАТИКИ ТЕПЛООВОГО ПУНКТУ З ПІДСИСТЕМАМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ В УМОВАХ ГІБРИДНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТЕПЛИЧНОГО КОМПЛЕКСУ

¹Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського;²ПРАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат»

Розглянуто питання щодо підвищення енергоефективності тепличного господарства в контексті сучасних викликів декарбонізації та впровадження відновлюваних джерел енергії. Проаналізовано технології інтелектуального управління мікрокліматом теплиць, включаючи сенсорні системи, автоматизовані алгоритми контролю та гібридні схеми електропостачання на основі сонячної енергетики. Автори пропонують рішення для підвищення енергетичної автономності тепличних комплексів, що сприяє зниженню операційних витрат та забезпеченню стійкості агровиробництва у разі використання гібридної схеми електропостачання тепличних комплексів з сонячними панелями. Проаналізовано економічні переваги, зокрема зниження витрат на електроенергію та можливість продажу надлишкової генерації в мережу. Розглянуто енергетичну автономність і надійність системи завдяки комбінуванню різних джерел живлення. Приділено увагу екологічним аспектам, таким як скорочення викидів CO₂ та зменшення навантаження на електромережу. Запропоновано узагальнену структурну схему системи, що містить основні блоки управління енергопостачанням та мікрокліматом теплиць. Детально описано функціональну схему контролера автоматики, який забезпечує ефективний розподіл енергії, стабільність мікроклімату та мінімізацію впливу людського фактора теплового пункту та запропоновано принципову схему реалізації. Проаналізовано енергоспоживання основних систем теплиці під час використання різних методів управління мікрокліматом. Встановлено, що впровадження інтелектуальних систем регулювання дозволяє значно знизити енергоспоживання: від 30...40 %, за використання інтелектуальних алгоритмів, до 50...60 %, у разі впровадження комплексних IoT-рішень на основі нейронних мереж та генетичних алгоритмів. Запропоноване схемне рішення підсистеми контролю мікроклімату. Наведено детальний опис функціональних компонентів системи, їх призначення та взаємодію. У дослідженнях проведено економічний аналіз окупності запропонованих систем. Встановлено, що перехід від ручного керування до інтелектуальних та IoT-систем дозволяє скоротити витрати на електроенергію до 60 % і забезпечити окупність у межах 0,3...1,5 року залежно від складності впровадження. Результати дослідження можуть бути використані для раціоналізації енергоспоживання в аграрному секторі, підвищення енергоефективності та сталого розвитку тепличного господарства.

Ключові слова: енергоефективність, електропостачання, альтернативна енергетика, тепличне господарство, автоматизована система контролю.

Вступ

Агропродовольча система є однією з найбільших споживачів енергії, яка витрачається на виробництво, переробку, транспортування та зберігання продуктів. На глобальну систему виробництва товарів сільськогосподарства та харчової промисловості припадає близько однієї третини глобального енергоспоживання та значна частка викидів парникових газів (ПГ) [1], [2]. Основні дже-

рела CO₂: використання викопного палива, виробництво добрив, механізація, іригація, переробка та логістика. Вуглецева нейтральність разом зі зменшенням високої потреби в енергії в сільськогосподарських теплицях з одночасним збільшенням врожайності, визначена як ключова мета сталого розвитку галузі [3].

Згідно з концепцією Energy-Smart Food [4] передбачено три основні принципи підвищення енергоефективності агропромислового сектору:

- зменшення споживання енергії агропродовольчих технологій;
- збільшення частки джерел відновлюваної енергії у сільському господарстві;
- підвищення стійкості енергетичних систем для зниження залежності від викопного палива.

Згідно з цією концепцією потенціал енергозбереження вбачається в оптимізації сільськогосподарських практик (наприклад, мінімальна обробка ґрунту, прецизійне землеробство); зменшення витрат на добрива (раціонально точне внесення азоту, застосування органічних добрив); використання енергоефективного обладнання (насоси, іригаційні системи, трактори з низьким споживанням пального). Перспективним напрямком декарбонізації сільського господарства є застосування біогазу (зі сільськогосподарських відходів, гною); сонячної енергії (для насосів, освітлення, теплиць); вітроенергетики (особливо для віддалених ферм); агровідходів та біомаси (паливних брикетів, піроліз).

Тепличне рослинництво, як один з видів Climate-smart agriculture (CSA) дозволяє вирощувати сільськогосподарські культури, подовжуючи періоди вирощування сезонних культур, поблизу місць споживання. CSA збільшує врожайність, скорочує відстані транспортування, зменшує споживання води та землі та потребу в пестицидах. Ці переваги господарювання очевидні, але підтримання умов середовища, необхідних для росту рослин, передбачає регулювання температури, вологості, доступності світла та використання води. Тому теплиці є енергоємними порівняно з іншими галузями сільського господарства. Енергія зазвичай є другою за величиною накладних витрат у тепличному рослинництві після витрат на оплату праці [3]. На її частку припадає до 25 % операційних витрат великих вертикальних ферм у США [5]. Питання побудови енергоефективної електротехнічної системи тепличного господарства розглянуто у цій публікації.

Аналіз досліджень і публікацій

Питання підвищення енергоефективності роботи теплиць шляхом досліджень стратегій управління енергоефективною роботою, контролю ключових параметрів навколишнього середовища, мережі датчиків і систем моніторингу, а також різноманітних алгоритмів керування є актуальною та широко дослідженою задачею. Роль динамічного енергетичного моделювання механізму теплового процесу роботи теплиці та його сприяння на енергоефективну роботу теплиці розкрито у публікаціях [5], [6]. Огляд [6], до того ж розкриває різні підходи до оптимізації енергоспоживання в теплицях, включно з технологічними та управлінськими аспектами, та визначає області проведення подальших досліджень, де існує потенціал для зменшення споживання парникової енергії та викидів. Дослідження щодо застосування інтелектуальних систем [7] описують технічні рішення для контролю мікроклімату CSA: застосування нейронних мереж (NNs) та генетичних алгоритмів (GAs) підтримання балансу між вегетативним і репродуктивним ростом рослин; оптимізацію концентрації поживних речовин у теплицях через алгоритми ухвалення рішень; врахування фізіологічного стану рослин у режимі реального часу на основі концепції Speaking Plant Approach, (SPA). В основу описаних рішень інтелектуального керування мікрокліматом покладено застосування автоматизованих систем моніторингу з використанням температурних сенсорів (регулювання опалення та вентиляції), ґрунтових давачів вологості та повітряних гігрометрів (керування системою зрошування та контроль рівня випаровування) та фотосенсорів і сенсори PAR (photosynthetically active radiation) для контролю рівня освітлення і його корекції за допомогою систем штучного підсвічування. У роботі [8] розглянуто рішення проблеми управління модульної ферми, що складається з кількох теплиць на основі гібридної дротової/бездротової мережі з використанням протоколів Controller Area Network і ZigBee.

Технічне рішення інтелектуальних систем контролю мікроклімату в теплиці запропоновані в публікаціях [9], [10]. В них описані розроблені системи контролю температури у теплиці на основі мікроконтролера PIC16F877A та сенсора DS1820 та акцентовано увагу на конструкціях блоків давачів параметрів мікроклімату відповідно. У статтях [11], [12] розглянуто реалізацію програмно-технічного комплексу автоматизованого обліку основних параметрів мікроклімату овочевої теплиці адаптивної системи керування та досліджена імітаційна модель функціонування інтелектуа-

льної системи керування температурно-вологісним режимом у теплиці. Дослідження можливості джерел сонячної енергетики умовно можна поділити на два напрями: застосування активних та пасивних систем для підтримання насамперед температурних параметрів [13], [14] та резервування систем електропостачання автоматики CSA [14]—[18]. Проведений аналіз показав, що більшість з розглянутих систем керування не є гнучкими та не завжди підходять для реальних умов використання. Висока вартість та складність у налаштуванні перешкоджають їх поширенню в умовах вітчизняного агросектору. Зважаючи на те, що проблема адаптивності залишається ключовою для розвитку CSA а також нестабільну ситуацію в енергетичній галузі України внаслідок воєнних дій, питання побудови контролера автоматики теплового пункту тепличного комплексу з використанням джерел розосередженої генерації є достатньо актуальним.

Результати дослідження

Використання гібридної схеми електропостачання тепличних комплексів з сонячними панелями є доцільним з кількох ключових причин, першою з яких є економічна ефективність. Сонячні панелі дозволяють значно скоротити витрати на електроенергію, особливо в денний час, коли потреба в освітленні та вентиляції є найвищою. Незважаючи на значні початкові вкладення у сонячні електростанції, ці кошти повернуться через зниження рахунків за електроенергію (ЕЕ) та можливість продажу надлишків в мережу. Суттєвими є аспекти енергетичної автономності та надійності. Гібридна схема дозволяє поєднувати кілька джерел енергії (мережа, сонячна генерація, дизельна електростанція, акумулятори тощо), мінімізує ризик перебоїв у роботі тепличного господарства та зменшує залежність системи від центрального електропостачання. В умовах України важливим також є можливість роботи на енергії від акумуляторів у разі відключень ЕЕ, що критично важливо для стабільного мікроклімату у теплиці. Екологічні переваги запропонованого авторами рішення полягає у зменшенні викидів CO₂ та інших шкідливих викидів. До того ж гібридна схема електропостачання дозволяє раціонально розподіляти ЕЕ, зменшуючи навантаження на загальну електромережу.

Проектована узагальнена структурна схема містить основні блоки, опис яких подано у табл. 1.

Таблиця 1

Основні блоки структурної схеми гібридного електропостачання

Блок	Призначення
Давачі параметрів мікроклімату	Вимірювання значень параметрів мікроклімату: температури, вологості, освітленості тощо
Контролер автоматики	Приймання даних від давачів і ухвалення відповідного рішення щодо керування системою електропостачання з відповідним впливом на значення параметрів мікроклімату
Система або підсистема гібридного електропостачання (за наявності більше одного джерела енергії)	Альтернативне живлення із застосуванням сонячних панелей, вітрогенераторів, дизельних генераторів, а також зберігання енергії (акумуляторні батареї тощо)
Підсистема управління розподілу електроенергії	Розподіл електроенергії та перемикання між різними джерелами енергії та споживачами енергетичних ресурсів в системі тепличного комплексу
Підсистема управління мікрокліматом окремого тепличного приміщення (теплиці)	Керування системами поливу, вентиляції, обігріву та кондиціювання
Телекомунікаційна мережа	Забезпечення зв'язку між всіма блоками систем, з дозволом обміну даними та командами

Основні структурні елементи, що пропонуються для застосування у системі гібридного електропостачання, наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Основні структурні елементи системи гібридного електропостачання

Структурний елемент	Обладнання
Джерело основної енергії	Мережа змінного струму 220 В
Джерела альтернативної енергії	Сонячні панелі, дизельний генератор
Система зберігання енергії	Акумуляторні батареї
Підсистема управління розподілом електроенергії	Контролер автоматики з функцією моніторингу та керування перетворенням електроенергії, включно з регулюванням, генерацією, зберіганням та розподілом споживання енергії для забезпечення раціонального використання електроенергії з урахуванням потреб енергії тепличного комплексу

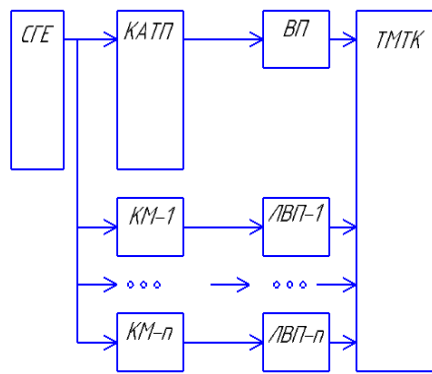


Рис. 1. Структурна схема системи енергетичного забезпечення тепличного комплексу

Автоматизація теплого пункту в застосуванні розробки тепличного комплексу відіграє основну роль для забезпечення ефективного вирощування рослин у тепличному сільському господарстві. Ця технологія дозволяє автоматично контролювати та виконувати регулювання основних параметрів мікроклімату для теплиць, забезпечить оптимальні кліматичні умови для росту та розвитку культивованих рослин незалежно від впливу зовнішніх факторів. Наявність автоматичного контролю дозволить знизити ризик помилок операторів та забезпечить стабільність мікроклімату у вирощуванні рослин. Більше того, застосування автоматизації теплого пункту дозволить спростити процес керування господарством і дозволить виробникам зосередитися на інших важливих питаннях сільськогосподарської діяльності. Застосування автоматики в тепловому пункті дозволить ефективно застосувати ресурси та зменшить негативний вплив на навколишнє середовище, що буде сприяти сталому розвитку аграрного сектору в розділі тепличних господарств.

Технічна реалізація контролера автоматики для теплого пункту виконуватиметься за структурною схемою, показаною на рис. 2.

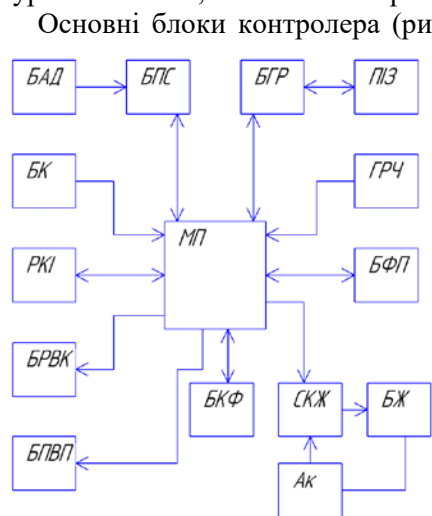


Рис. 2. Структурна схема системи контролера автоматики теплого пункту

На основі отриманих даних пропонується виконання реалізації системи з гібридним електропостачанням для контролера автоматики теплого пункту тепличного комплексу з структурною схемою, показаною на рис. 1.

Запропонована схема містить основні функціональні вузли: СГЕ — система гібридного електропостачання; КАТП — контролер автоматики теплого пункту; ВП — виконавчі пристрої контролера автоматики теплого пункту; ТМТК — тепла мережа тепличного комплексу; КМ-1..КМ-n — підсистема контролю параметрів мікроклімату; ЛВП-1...ЛВП-n — локальні виконавчі пристрої підсистеми контролю параметрів мікроклімату.

Останні два елементи схеми в комплексі можуть масштабуватись, залежно від кількості об'єктів локального контролю мікроклімату.

Основні блоки контролера (рис. 2): БАП — блок аналогових датчиків; БПС — блок перетворення сигналів; БК — блок клавіатури; РКІ — рідиннокристалічний індикатор; БРВК — блок реле відсічних клапанів; БПВП — блок підключення вторинних приладів; БКФ — блок контролю фази; БГР — гальванічна розв'язка; ПІЗ — перетворювач для інтерфейсу зв'язку з ЕОМ; ГРЧ — годинник реального часу; БФП — блок фіскальної пам'яті; СКЖ — схема керування живленням; БЖ — блок живлення; Ак — акумулятор.

Призначення контролера: вмикання та вимикання циркуляційних насосів подачі теплового носія згідно з розробленим алгоритмом подачі теплового носія; регулювання температури подачі теплового носія з контролем швидкості подачі теплового носія; архівація в базу даних значень показників теплового пункту — температури, тиску та витрати теплового носія і передача інформації на ПК.

Головною функцією зазначеного контролера теплого пункту є вимірювання значень температури та тиску подачі теплового носія з ухваленням відповідного керувального рішення, збереження отриманої інформації з подальшою програмною обробкою.

З увімкненням напруги живлення запускається програма роботи контролера, перевіряється стан акумулятора та якість напруги живлення. Згідно з програмами, налаштованими та збереженими в контролері, запускаються насоси подачі теплового носія та починає працювати програма регулятора контролю температури теплового носія.

За нормального режиму роботи на індикатор виводиться інформація про роботу контролера теплого пункту: дата, температура та тиск, параметри регулятора подачі теплового носія. На передній панелі контролера індикація сигналу «Мережа», індикатори роботи програм, індикатори роботи насосів подачі теплового носія. Підсвічування відповідних кнопок керування регулятора в момент подачі сигналу на відкриття або закриття поворотного механізму заслінки. Світлодіодні

індикатори спрацьовують у разі відхилення показників температури або тиску від вказаних меж, порушення електропостачання та перехід контролерів керування теплового пункту на живлення від акумулятора.

Для реалізації контролера керування тепловим пунктом тепличного господарства синтезовано функціональну схему, показану на рис. 3. Вона включає в себе функціональні блоки: A1 — перемикач каналів даних; A2 — пристрій контролю наявності фази; A3 — модуль вторинних приладів; A4 — клавіатура; A5 — мікропроцесор; A6 — фіскальна пам'ять; A7 — реле клапанів; A8 — блок реального часу; A9 — гальванічна розв'язка; H1 — рідкокристалалічний індикатор; U1-U4 — перетворювач струм-напруга; U5 — перетворювач аналогово-цифровий; U6 — перетворювач рівнів.

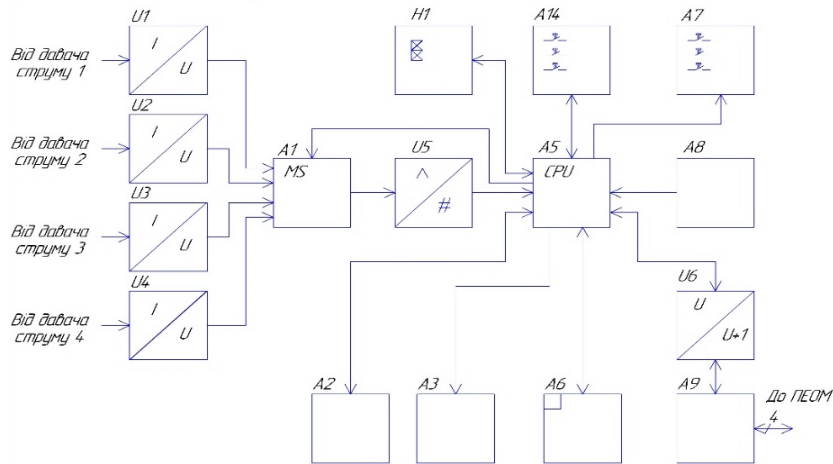


Рис. 3. Схема електрична функціональна контролера теплового пункту

Розроблена електрична принципова схема з переліком елементів принципової схеми для контролера автоматики теплового пункту тепличного комплексу показана на рис. 4.

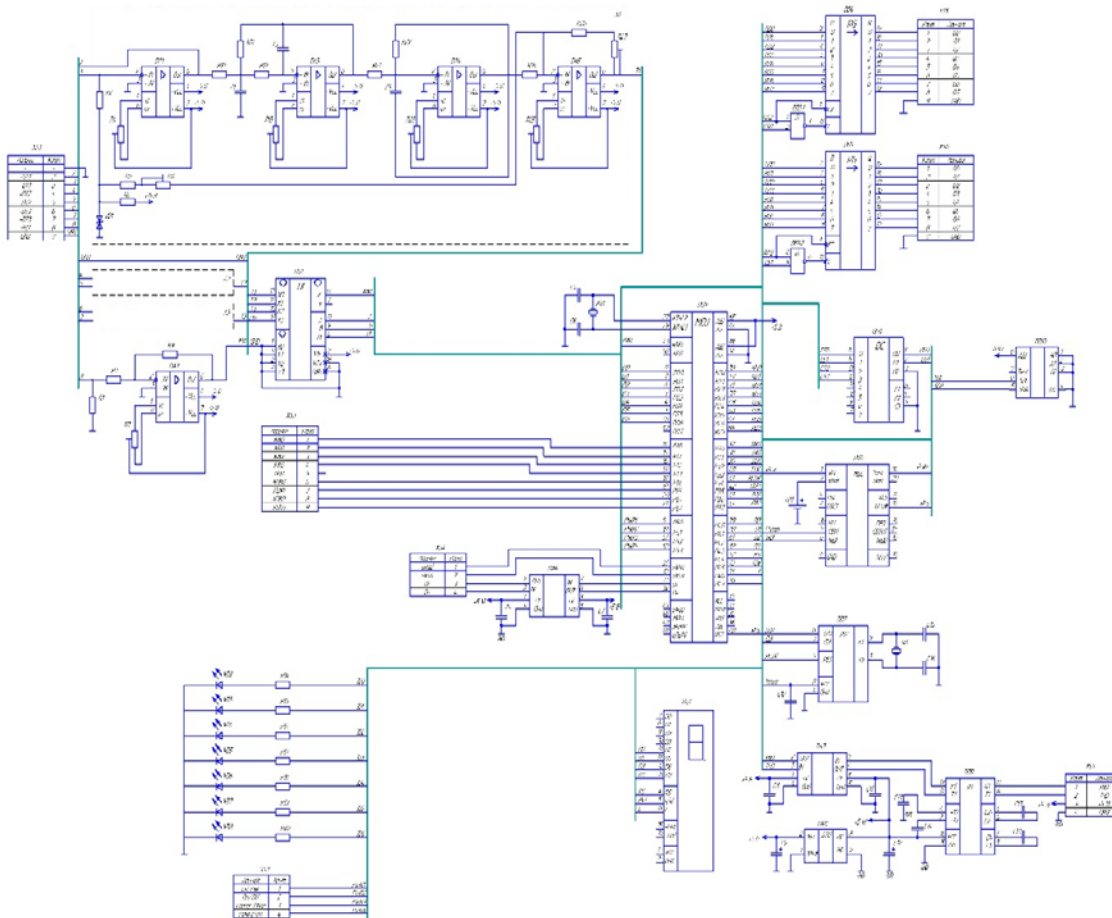


Рис. 4. Схема електрична принципова контролера теплового пункту

Під час реалізації підсистеми визначення параметрів CSA враховувалося, що основними споживачами енергії тепличних комплексів є системи обігріву (теплові насоси, електронагрівачі, газові котли); вентиляція та охолодження (вентилятори, кондиціонери, туманоутворювачі); освітлення (LED-лампи, натрієві лампи тощо). Порівняння даних щодо витрат електроенергії за різних способів управління мікрокліматом подані у табл. 3 [19].

Таблиця 3

Середнє енергоспоживання систем у теплиці (на 100 м² на добу)

Система	Обігрів	Охолодження	Освітлення	Загальні витрати
	(кВт·год/доба)			
Ручне управління	60...80	30...50	20...30	110...160
Термостатичний контроль	50...70	25...40	20...30	95...140
Система на таймерах	45...65	20...35	15...25	80...125
Інтелектуальна система	30...50	15...25	10...20	55...95
Комплексна IoT-система (NNs + GAs + сенсори)	20...40	10...20	5...15	35...75

Як випливає з таблиці, застосування автоматизованих систем дозволяє знизити витрати енергії на 30...40 % порівняно з традиційним ручним управлінням. Економія електроенергії у разі застосування комплексних IoT-систем (нейронні мережі, генетичні алгоритми, хмарні сервіси) дозволяє зменшити енергоспоживання до 50...60 %.

Ефективність способів управління може бути оцінена через фактори, подані у табл. 4:

Таблиця 4

Оцінка ефективності систем за 5-бальною шкалою

Система	🔥	❄️	🌿	⚡	Загальна оцінка
Ручне управління	**	**	*	*	** (2,0)
Термостатичний контроль	***	***	**	**	*** (3,0)
Система на таймерах	***	**	***	**	*** (3,0)
Автоматизована система	****	****	****	***	**** (4,0)
Комплексна IoT-система (NNs + GAs + сенсори)	*****	*****	*****	*****	***** (5,0)

Примітки: 🔥 — оптимальність обігріву (наявність перегріву або надмірне використання енергії);
❄️ — точність охолодження (ефективність зменшення зайвого споживання електроенергії системою);
🌿 — збереження сприятливого мікроклімату (забезпечення стабільності середовища без різких змін);
⚡ — автоматизація та економія людських ресурсів (зменшення витрат на обслуговування системи).

Як випливає з табл. 4, автоматизовані системи регулювання параметрів мікроклімату мають високу ефективність (4/5). Комплексні системи на основі IoT і штучного інтелекту дають максимальну енергоефективність (5/5), але їх впровадження потребує значних інвестицій.

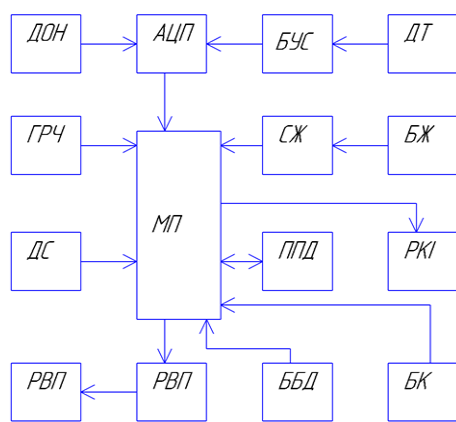


Рис. 5. Структурна схема підсистеми контролю параметрів мікроклімату

Для забезпечення реалізації підсистеми визначення параметрів середовища теплиці пропонується розроблена структурна схема, що показана на рис. 5.

Складові для підсистеми контролю параметрів мікроклімату: ДОН — джерело опорної напруги; АЦП — аналогово-цифровий перетворювач для аналогових даних; ГРЧ — годинник реального часу; ДС — джерело синхронізації пристрою; РВІ — реле блоку виконавчих пристроїв; МП — мікроконтролер керування; ККР — ключ керування реле; БУС — блок узгодження для сигналу датчиків; ДТ — датчик вимірювання температури контролюваного середовища; СЖ — супервізор контролю живлення підсистеми; БЖ — живлення підсистеми; ППД — постійна пам'ять внутрішніх даних; РВІ — індикатор/дисплей рідинно-кристалічний; ББД — блок підключення безпроводного датчика; БК — клавіатура.

Датчик для визначення температури отримує значення температури у теплиці. Отримані дані температури проходять через блок узгодження, де перетво-

рюються значення опору терморезистора у значення напруги і виконується підсилення та фільтрується сигнал, аналоговий сигнал надходить у блок аналогового-цифрового перетворювача, де перетворюється аналоговий сигнал значень температури в цифровий код і отримані цифрові дані передаються до мікроконтролера.

Для перетворення значень отриманої температури в цифровий код застосовують блок опорної напруги. Мікроконтролер оброблює отримані дані та керує роботою рідинно-кристалічного дисплею, виконує зчитування даних клавіатури, дані програми отримуються з постійної пам'яті даних. Результати вимірювання температури отримуються програмою керування, синтезується рішення для роботи ключа керування реле. Реле виконує функцію управління опаленням в теплиці.

Здійснено синтез функціональної схеми, яка показана на рис. 6.

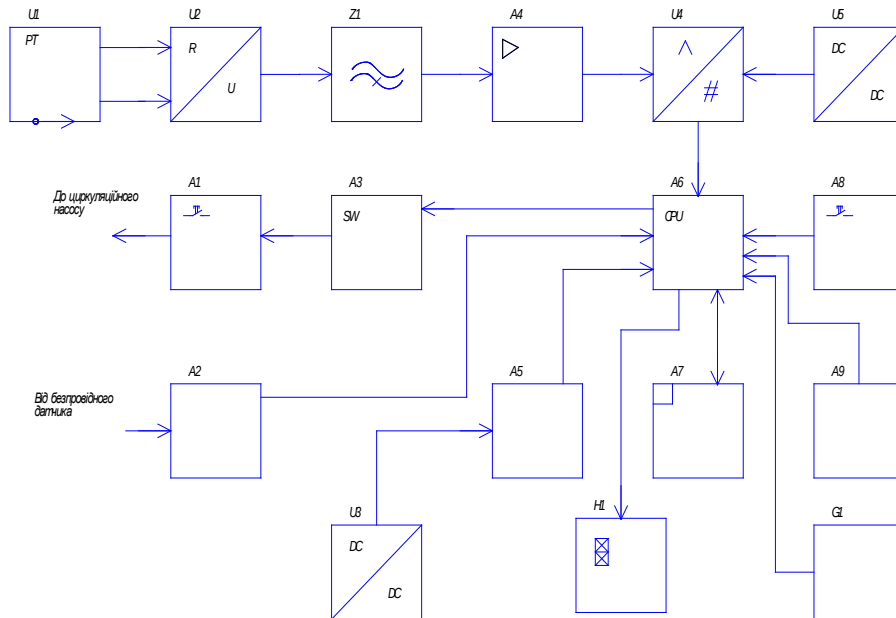


Рис. 6. Функціональна схема підсистеми контролю мікроклімату

Функціональна схема складається з функціональних блоків: A1 — реле управління ввімкнення насосу; A2 — блок з'єднання безпроводного датчика; A3 — ключ реле керування; A4 — підсилювач сигналу; A5 — блок контролю живлення; A6 — мікроконтролерний блок; A7 — пам'ять програм постійна; A8 — блок клавіатури; A9 — годинник реального часу; G1 — генератор керувальних синхроімпульсів; H1 — рідкокристалічний індикатор; U1 — датчик значень температури; U2 — перетворювач даних опір-напруга; U3 — перетворювач DC/DC; U4 — аналогово-цифровий перетворювач сигналу; U5 — джерело опорного сигналу напруги; Z1 — блок фільтра низьких частот.

Розроблена схема електрична принципова підсистеми контролю мікроклімату тепличного господарства показана на рис. 7.

Порівняння економічних показників запропонованого рішення підсистеми контролю з іншими варіантами подано у табл. 5. Оцінюючи окупність та економічний ефект запропонованого рішення, розраховано економію на 1 га теплиці за рік з урахуванням середньої вартості електроенергії 0,15 USD/кВт·год.

Таблиця 5

Економія на 1 га теплиці за рік (з урахуванням середньої вартості ЕЕ 0,15 USD/кВт·год)

Система	Річне споживання ЕЕ, МВт·год	Річна вартість, USD	Орієнтовна вартість впровадження, USD	Окупність, роки
Ручне управління	584	87600	0	—
Термостатичний контроль	511	76650	1000...5000	0,1...0,5
Система на таймерах	438	67500	1000...3000	0,1...0,4
Автоматизована система	320	48000	5000...15000	0,3...1,0
Комплексна IoT-система (NNs + GAs + сенсори)	240	36000	10000...50000	0,3...1,5

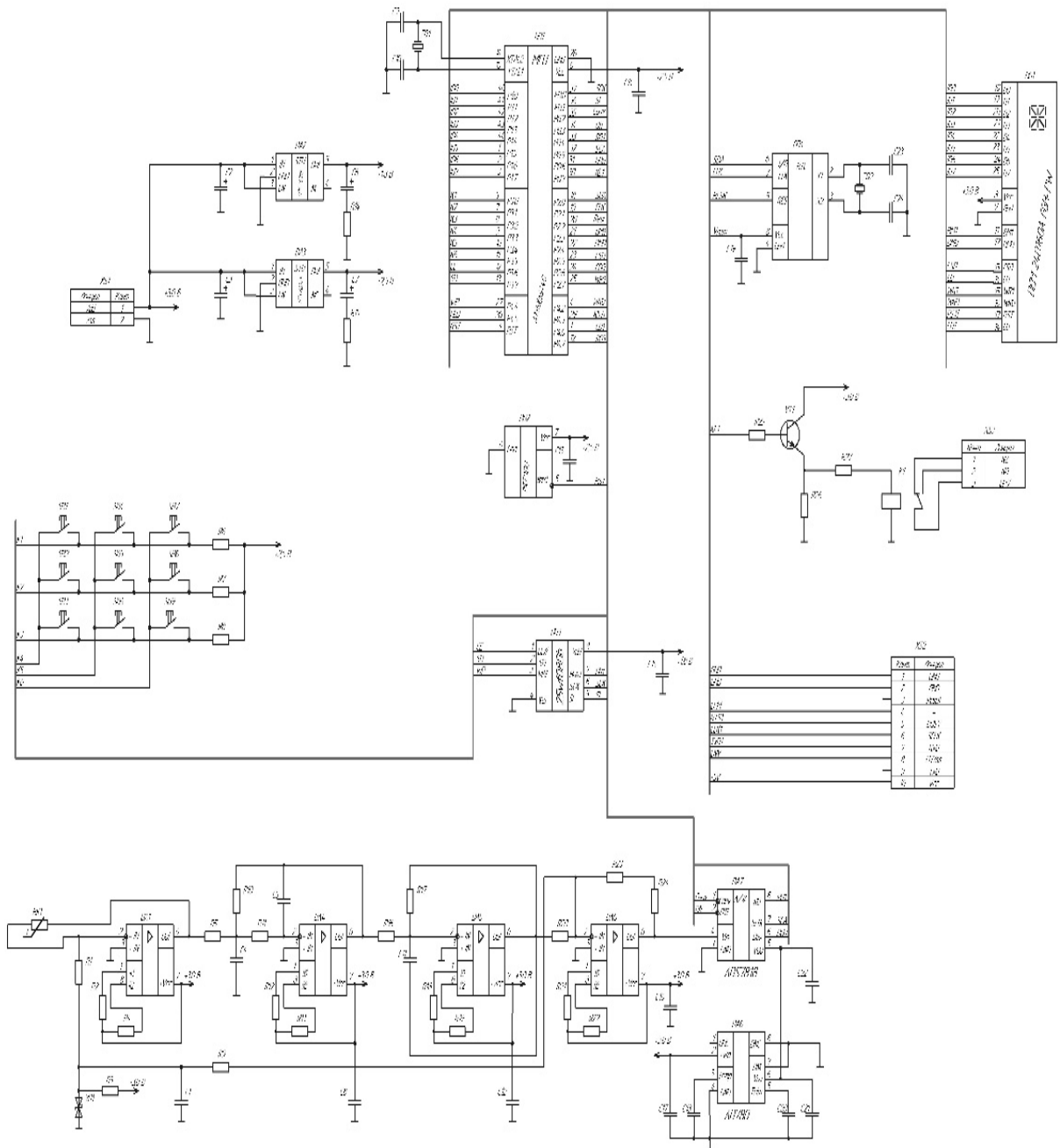


Рис. 7. Принципова схема підсистеми контролю мікроклімату

Висновки

У результаті проведених досліджень авторами розв'язано науково-практичну задачу побудови контролера автоматизації теплого пункту з підсистемами контролю параметрів мікроклімату, призначеного для роботи в системі гібридного електропостачання тепличного комплексу. Запропоновані схемні рішення призначені для забезпечення стабільності контрольованих параметрів CSA, раціонального розподілу електроенергії та зменшення впливу людського чинника. Інтеграція фотовольтаїчного джерела в традиційну систему електропостачання дозволить забезпечити енергетичну автономність агрокомплексу, знизить навантаження на електромережу та сприятиме скороченню викидів CO₂. Застосування автоматизованої системи дозволить знизити витрати енергії до 40 % з окупністю інвестицій 0,3...1 рік, залежно від складності реалізації системи. Інтеграція розробленої системи в наявні тепличні комплекси дає можливість підвищення їхньої продуктивності та сталого розвитку. Результати дослідження можуть бути застосовані для раціоналізації енергоспоживання в теплицях та розробки нових енергоефективних рішень у агропромисловості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] M. Taki, A. Rohani, and M. Rahmati-Joneidabad, "Solar thermal simulation and applications in greenhouse," *Information Processing in Agriculture*, vol. 5, iss. 1, pp. 83-113, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.10.003>.
- [2] Звіт UNDP про міжнародні добровільні та обов'язкові вуглецеві ринки з особливим акцентом на механізми, які застосовуються у випадку низьковуглецевого сільського господарства та потенційні можливості для українських розробників. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2022-11/FINAL%20REPORT%20UNDP%20LH%20CARBON%20FARMING%20UKR.pdf>.
- [3] Резолюція Генеральної Асамблеї ООН від 25 вересня 2015 року «Перетворення нашого світу: Порядок денний в області сталого розвитку на період до 2030 року». [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>.
- [4] *Special report. Carbon farming: Europe's new trend? Euractiv. Climate-smart agriculture*. [Electronic resource]. Available: <http://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/publications/climate-smart-agriculture>.
- [5] Liping Wang, and Emmanuel Iddio, "Energy performance evaluation and modeling for an indoor farming facility," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, part C, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102240>.
- [6] E. Iddio, L. Wang, Y. Thomas, G. McMorrow, and A. Denzer, "Energy efficient operation and modeling for greenhouses: A literature review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 117, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109480>.
- [7] Y. Hashimoto, H. Murase, T. Morimoto, and T. Torii, "Intelligent systems for agriculture in Japan," *IEEE Control Systems*, no. 21 (5), pp. 71-85, 2001. <https://doi.org/10.1109/37.954520>.
- [8] O. Mirabella, and M. Brischetto, "A Hybrid Wired/Wireless Networking Infrastructure for Greenhouse Management," *IEEE Transactions on Instrument and Measurement*, no. 60 (2), pp. 398-407, 2011. <https://doi.org/10.1109/TIM.2010.2084250>.
- [9] Shahad Al-Yousif, N. F. Zainuddin, and B. B. Hamzah, "Intelligent temperature control system at greenhouse," *International Journal of Applied Engineering Research*, no. 12, pp. 1811-1814, 2017.
- [10] Y. Jiaqiang, J. Yulong, and G. Jian, "An Intelligent Greenhouse Control System," *Telkomnika*, vol. 11, no. 8. pp. 4627-4632, 2013. <https://doi.org/10.11591/telkomnika.v11i8.3088>.
- [11] Л. Г. Віхрова, В. М. Калич, і Т. А. Прокопенко, «Адаптивна автоматизована система збору та контролю основних параметрів мікроклімату в теплиці», *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*, вип. 29, с. 168-172, 2016.
- [12] Т. О. Прокопенко, «Інтелектуальна система керування температурно-вологісним режимом у теплиці», *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*, вип. 209 (1), с. 140-147, 2015.
- [13] М. О. Тонюк, «Економічна ефективність впровадження пасивних сонячних систем для створення необхідного мікроклімату в теплицях», *Агроекологічний журнал*, № 4, с. 163-172, 2020. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2020.219457>.
- [14] V. P. Sethi, K. Sumathy, Chiwon Lee, and D.S. Pal, "Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies," *Solar Energy*, vol. 96, pp. 56-82, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.06.034>.
- [15] Jamel, Riahi and Vergura, Silvano, "Intelligent Control of the Microclimate of an Agricultural Greenhouse Powered by a Supporting PV System," *Applied Sciences*, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10041350>.
- [16] V. Syrotiuk, et al., "A hybrid system with intelligent control for the processes of resource and energy supply of a greenhouse complex with application of energy renewable sources," *Przegląd elektrotechniczny*, r. 96 nr 7, 2020. <https://doi.org/10.15199/48.2020.07.28>.
- [17] I. Trunina, K. Pryakhina, and S. Yakymets, "Research on the Development of Renewable Energy Sources in the World Due to the War in Ukraine," *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2022. <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005696>.
- [18] А. Гладир, В. Ноженко, і С. Якимець, «Лабораторний практикум із вивчення обладнання альтернативних джерел енергії», *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, вип. 1(144), с. 215-223, 2024. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.29>.
- [19] J. Oliveira, J. Boaventura-Cunha, and P. Oliveira, "Automation and control in greenhouses: state-of-the-art and future trends," *Lecture Notes in Electrical Engineering*, pp. 597-606, 2016.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 31.03.2025

Якимець Сергій Миколайович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки, e-mail: ysm.krnu.et@gmail.com.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук;

Гладкий Віктор Васильович — інженер з автоматизованих систем керування виробництвом підрозділу автоматизованих систем керування гірничим транспортом, e-mail: vv_gl@ukr.net.

ПРАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат», Горішні Плавні;

Ноженко Вікторія Юрійвна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки, e-mail: pozhenkovika@gmail.com;

Ткалич Андрій Васильович — студент Навчально-наукового інституту електричної інженерії та інформаційних технологій, e-mail: tkalychandrey@gmail.com.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук

S. M. Yakymets¹
 V. V. Gladkyi²
 V. Yu. Nozhenko¹
 A. V. Tkalych¹

Controller of Heat Point Automation with Microclimate Parameter Control Subsystems under Hybrid Power Supply Conditions in a Greenhouse Complex

¹Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University;

² PJSC “Ferrexpo Poltava Mining”, Gorishni Plavni

This paper focuses on improving the energy efficiency of greenhouse farming in the context of modern challenges related to decarbonization and the implementation of renewable energy sources. The study examines technologies for intelligent greenhouse microclimate control, including sensor systems, automated control algorithms, and hybrid power supply schemes based on solar energy. The authors propose innovative solutions to enhance the energy autonomy of greenhouse complexes, which contribute to reducing operational costs and ensuring the resilience of agricultural production. Special attention is paid to the development of hybrid power supply systems that combine conventional grid sources with renewable energy (solar panels). The proposed model allows the sale of surplus electricity to the grid, further reducing operational expenses and increasing the financial efficiency of the project. The study explores the energy autonomy and reliability of the system by integrating different power sources. Generalized structural diagram of the system is presented, incorporating key energy supply and microclimate management units. Detailed description of the automation controller functional scheme is provided, which ensures efficient energy distribution, microclimate stability, and minimizes human intervention. The analysis of the energy consumption of key greenhouse systems (heating, cooling, and lighting) under various microclimate control methods was conducted. The results indicate that the introduction of intelligent regulation systems significantly reduces energy consumption: by 30...40 % when using smart regulation algorithms; by 50...60 % with the implementation of comprehensive IoT solutions based on neural networks and genetic algorithms. The proposed microclimate control subsystem includes sensor blocks, a microcontroller module, actuator control units, and signal processing and conversion modules. A detailed description of each functional component, its role, and interactions is provided. The research also includes the economic analysis of the payback period for the proposed solutions. It was determined that transitioning from traditional management methods to intelligent and IoT-based systems can reduce electricity costs by up to 60 % and ensure a payback period within 0.3...1.5 years, depending on implementation complexity. The results of this study can be used to modernize greenhouse complexes, optimize energy consumption in the agricultural sector, and promote the sustainable development of greenhouse farming.

Keywords: energy efficiency, power supply, renewable energy, greenhouse farming, automated control system

Yakymets Serhii M. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electrical Engineering, e-mail: ysm.krnu.et@gmail.com ;

Gladkyi Viktor V. — Engineer of Automated Production Control Systems of the Department of Automated Mining Transport Control Systems, e-mail: vv_gl@ukr.net ;

Nozhenko Viktoriia Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electrical Engineering, e-mail: nozhenkovika@gmail.com ;

Tkalych Andrii V. — Student of the Educational and Research Institute of Electrical Engineering and Information Technologies, e-mail: tkalychandrey@gmail.com