

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГІДРОМОДУЛЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ДАТА-ЦЕНТРУ

ОСАДЧИЙ В.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривод та автоматизація промислових установок Національного університету “Запорізька політехніка”, Запоріжжя, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2707-0805>, e-mail: w.osadchiy@gmail.com;

НАЗАРОВА О.С. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривод та автоматизація промислових установок Національного університету “Запорізька політехніка”, Запоріжжя, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0784-7621>, e-mail: nazarova16@gmail.com;

КУНІЦІН А.В. магістр кафедри електропривод та автоматизація промислових установок Національного університету “Запорізька політехніка”, Запоріжжя, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6232-4676>, e-mail: artemzp2003@gmail.com;

Мета роботи. Розробка та дослідження системи автоматичного керування гідромодулем охолодження дата-центру на основі промислового контролера Siemens S7-1200 із впровадженням концепції цифрового двійника в середовищі MATLAB / Simulink для забезпечення прецизійної стабілізації температурних режимів за змінного теплового навантаження.

Методи дослідження. Математичне моделювання на основі диференціальних рівнянь, імітаційного моделювання, класичні методи теорії автоматичного керування.

Отримані результати. Розроблено комплексну математичну модель гідромодуля, що адекватно відтворює нелінійні теплофізичні процеси взаємодії між первинним та вторинним контурами охолодження. Створено інтегровану архітектуру керування, де реальний мікропроцесорний контролер здійснює керування віртуалізованим об'єктом у контурі імітаційної моделі. Шляхом чисельного моделювання встановлено, що розроблена система забезпечує підтримку цільових показників мікроклімату з високою прецизійністю та нульовою статичною похибкою. Аналіз перехідних процесів підтвердив аперіодичний характер регулювання при екстремальних збуреннях теплової потужності.

Наукова новизна. Отримала подальший розвиток методологія проєктування інтелектуальних систем автоматичного керування теплотехнічними об'єктами на основі концепції Digital Twin із безпосередньою інтеграцією реального промислового контролера у віртуальний контур керування. Для гідромодуля охолодження дата-центру запропоновано архітектуру, у якій Siemens S7-1200 функціонує в режимі апаратно-програмної зв'язки з імітаційною моделлю, реалізованою у середовищі MATLAB / Simulink, що забезпечує двосторонній обмін даними через протокол ISO-op-TCP у реальному часі. Отримали подальший розвиток методи предиктивного аналізу енергоефективності систем охолодження за рахунок перенесення етапу налаштування регуляторів у віртуальне середовище з апаратною верифікацією алгоритмів. Показано, що запропонована система забезпечує аперіодичний характер перехідних процесів та нульову статичну похибку при збуреннях теплової потужності.

Практична цінність. Створено інструментарій для безпечного та економічно доцільного налагодження систем автоматизації гідромодулів охолодження дата-центрів без ризику пошкодження дороговартісного обладнання. Запропонована система дозволяє: забезпечити стабілізацію температури вторинного контуру з похибкою, що не перевищує 5 %; досягти аперіодичного характеру регулювання з постійною часу $T = 20$ с; підвищити енергоефективність та надійність роботи насосного обладнання; зменшити витрати на пусконаладжувальні роботи за рахунок попереднього тестування алгоритмів у цифровому двійнику. Розроблені рішення можуть бути інтегровані в автоматизовані системи керування великих центрів обробки даних, а також масштабовані для багатомодульних конфігурацій із синтезом алгоритмів перерозподілу навантаження між кількома джерелами холоду.

Ключові слова: електрична інженерія; автоматизація; система керування; цифровий двійник; моделювання; Siemens S7-1200; система охолодження; дата-центр, моніторинг, енергоефективність.

I. ВСТУП

Стрімке зростання обсягів цифрової інформації

та розвиток хмарних технологій зумовлюють експоненціальне збільшення потужностей центрів обробки даних (ЦОД). Забезпечення надійної роботи сервер-

© Осадчий В.В., Назарова О.С., Куніцин А.В., 2026

Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC-BY-SA 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2026-1-6>

ного обладнання потребує створення високоефективної інженерної інфраструктури, де однією з найважливіших складових є система охолодження. Від її ефективності безпосередньо залежить продуктивність, безпека та загальний показник енергоефективності PUE (Power Usage Effectiveness), який визначає конкурентоспроможність дата-центру на ринку.

Сучасні системи охолодження ЦОД є складними багатоконтурними комплексами, де взаємодіють гідромодулі, теплообмінні апарати та автоматизовані засоби керування. Значна частина енергоспоживання таких об'єктів (близько 50%) припадає саме на інфраструктуру холодопостачання, що робить питання оптимізації теплових процесів вкрай актуальним.

Незважаючи на значну кількість існуючих рішень, у галузі спостерігається прогалина між теоретичним моделюванням та практичним впровадженням алгоритмів керування. Традиційні методи проектування часто не враховують динамічну зміну теплового навантаження в реальному часі, що призводить до інерційності регулювання або надмірного енергоспоживання. Протиріччя полягає в необхідності забезпечення прецизійної стабільності температури при одночасному зниженні витрат на приводні агрегати.

Одним із перспективних підходів до вирішення цієї проблеми є створення цифрового двійника системи охолодження в середовищі Simulink, що дозволяє виконувати дослідження без втручання в роботу реального обладнання. Застосування програмованих логічних контролерів (ПЛК) у поєднанні з такою моделлю дозволяє реалізувати інтегроване рішення, де реальний пристрій керування взаємодіє з математичною моделлю через мережеві протоколи [1]. Такий підхід забезпечує можливість тестування й налагодження складних законів регулювання, прогнозування станів системи та підвищення її загальної енергоефективності [2].

Дана робота присвячена дослідженню методів інтеграції імітаційних моделей Simulink з промисловими засобами автоматизації для оптимізації процесів холодопостачання дата-центрів.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Еволюція наукової думки у сфері охолодження центрів обробки даних пройшла шлях від адаптації загальнопромислових систем кондиціонування до створення спеціалізованих прецизійних комплексів. Перші фундаментальні дослідження у цій галузі були зосереджені на забезпеченні базових параметрів мікроклімату згідно з нормативами ASHRAE, де основна увага приділялася фізичному розташуванню серверних стійок (концепція «гарячих» та «холодних» коридорів). Згодом, із підвищенням щільності обчислювальних потужностей, наукові пошуки змістилися в бік розробки рідинних систем охолодження та гідромодулів, що дозволило значно інтенсифікувати відве-

дення тепла через пластинчасті теплообмінні апарати.

Сучасний етап розвитку характеризується впровадженням інтелектуальних систем автоматизації, спрямованих на оптимізацію показника енергоефективності PUE. У роботі [3] доведено, що централізована автоматизація чилерів із використанням ПЛК Siemens S7-1200 і алгоритмів керування за сумарною тепловою потужністю забезпечує істотну оптимізацію енергоспоживання систем холодопостачання. Дослідження дистанційно керованої системи охолодження на основі Industrial IoT і MODBUS TCP/IP демонструє, що інтеграція промислових протоколів обміну забезпечує підвищення керованості процесу, зниження експлуатаційних витрат і подовження ресурсу обладнання порівняно з ручним керуванням [4]. У праці Пупена О.М. [1] детально розглянуто архітектури промислових мереж, протоколи обміну даними та інтеграційні технології в АСУ ТП, що становить теоретичну основу для організації надійного мережевого зв'язку між ПЛК і цифровим двійником.

У статті [5], представлено підхід до побудови мехатронної системи автоматичного керування з використанням математичного моделювання та експериментальної верифікації, що підтверджує ефективність поєднання моделі об'єкта з реальним апаратним забезпеченням. У роботі [6], розглянуто створення програмно-апаратного комплексу для дослідження електропневматичних мехатронних систем із застосуванням підходу Hardware-in-the-Loop, що методично узгоджується з реалізованою у даному дослідженні концепцією інтеграції цифрового двійника та ПЛК. У праці [7] обґрунтовано доцільність використання цифрового двійника в реальному часі для оптимізації енергоефективності інженерних систем будівель через інтеграцію моделей із системами автоматизованого керування. Дослідження [8] підтверджує ефективність цифрових двійників для оптимізації охолодження та рекуперації тепла в центрах обробки даних шляхом тестування стратегій керування на віртуальній моделі серверної інфраструктури. Останні публікації вітчизняних та закордонних авторів розглядають використання нейронних мереж та методів предиктивного моделювання для прогнозування теплових потоків. Огляд [9] узагальнює сучасні досягнення однофазного імерсійного охолодження як енергоефективної та масштабованої альтернативи традиційним рішенням для ЦОД і НРС, акцентуючи на поєднанні термогідродинаміки та інтелектуального керування.

Проведений аналіз наукових праць свідчить про значний прогрес у розробленні математичних моделей і алгоритмів керування системами охолодження ЦОД, однак їх практична реалізація на промисловому рівні залишається обмеженою. Більшість моделей, створених у середовищах високого рівня, не враховують обмежень реального апаратного забезпечення та часових затримок обміну даними. Використання ОРС-серверів як проміжних ланок інтеграції часто спричиняє додаткову інерційність, що знижує якість

регулювання в умовах швидкозмінного теплового навантаження. Недостатньо досліджено питання прямої синхронізації цифрового двійника з промисловим ПЛК у режимі реального часу без втрати швидкодії системи. Таким чином, невирішеною залишається проблема створення ефективного інструментарію для реалізації контуру Hardware-in-the-Loop із використанням низькорівневих протоколів обміну даними.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення точності та швидкодії систем автоматичного керування охолодженням центрів обробки даних. В умовах зростання щільності обчислювальних потужностей навіть незначні затримки в контурі керування можуть призводити до перевитрат енергії та ризиків перегріву обладнання. Запропонований підхід до прямої інтеграції цифрового двійника з ПЛК дозволяє мінімізувати інерційність обміну та підвищити достовірність моделювання. Реалізація Hardware-in-the-Loop забезпечує можливість попередньої верифікації алгоритмів регулювання до впровадження фізичного обладнання. Це створює передумови для зниження експлуатаційних витрат, оптимізації енергоспоживання насосних груп і підвищення надійності функціонування систем холодопостачання ЦОД.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою дослідження є розробка та дослідження системи автоматичного керування гідромодулем охолодження дата-центру на основі промислового контролера Siemens S7-1200 із впровадженням концепції цифрового двійника в середовищі MATLAB / Simulink для забезпечення прецизійної стабілізації температурних режимів за змінного теплового навантаження.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розробка системи автоматизації розпочинається з формування функціональної структури керування гідромодулем. Представлена схема функціональна автоматизації (рис. 1), яка відображає всі засоби автоматизації, виявлені під час аналізу існуючої інфраструктури ЦОД, а також їх призначення. Така схема демонструє принцип роботи системи, структуру сигналів і взаємодію обладнання.

Організація керування за такою схемою передбачає використання каскадного або багатоконтурного принципу регулювання, де пріоритетним завданням є підтримка цільового значення RT2 шляхом динамічної зміни положення регулюючого органу на лінії подачі холодоагенту (RT3). Врахування параметрів RT1 та B1 дозволяє системі здійснювати компенсацію збурень при різких змінах теплового навантаження з боку IT-інфраструктури, що мінімізує транспортне запізнення в контурі зворотного зв'язку. Вимірювання тиску в магістралях інтегровано в загальний алгоритм безпеки для запобігання кавітації насосних агрегатів та контролю гідравлічного опору теплообмінного

апарату.

Такий комплексний моніторинг вхідних і вихідних температурних потоків у поєднанні з контролем масової витрати забезпечує високу точність ідентифікації поточного стану системи та дозволяє оптимізувати питоме енергоспоживання гідромодуля в автоматичному режимі. Центральним технологічним елементом гідромодуля, що забезпечує процес передачі теплової енергії між контурами, є пластинчастий теплообмінник. Вибір даного типу обладнання обумовлений його високою компактністю та інтенсивним коефіцієнтом теплопередачі при відносно малих температурних напорах, що є критичним для систем охолодження сучасних дата-центрів.

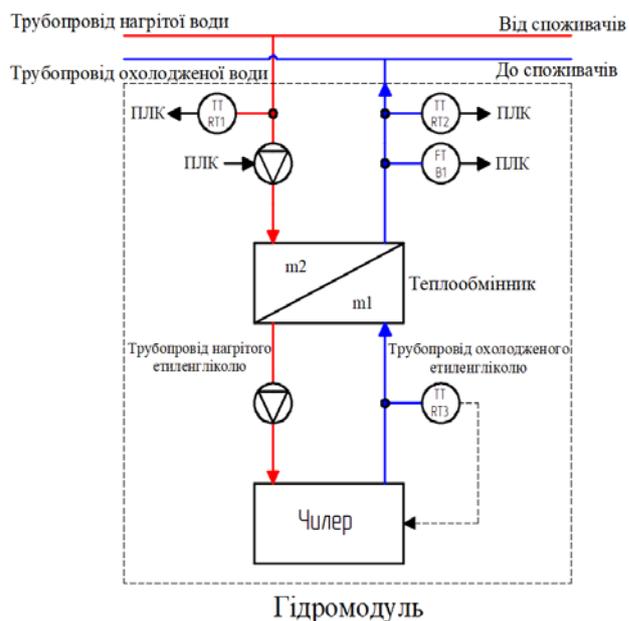


Рисунок 1. Функціональна схема автоматизації гідромодуля системи охолодження ЦОД.

Критерії оцінки якості результатів дослідження визначаються здатністю системи забезпечувати стабільність цільової температури вторинного контуру в межах від 18°C до 27°C незалежно від стохастичних змін IT-навантаження. Якість функціонування синтезованої системи оцінюється за показниками точності підтримки заданих значень у статичних режимах (відсутність статичної похибки), а також за динамічними характеристиками перехідних процесів, які повинні мати аперіодичний характер із мінімальним часом регулювання та високим запасом стійкості. Крім того, критерієм ефективності є забезпечення безперебійної синхронізації між віртуальною та апаратною частинами системи в режимі реального часу [10] - [11].

Обмеження при розв'язанні поставленої задачі зумовлені технічними характеристиками обраної бази автоматизації, зокрема обчислювальною потужністю мікропроцесорного контролера та жорстко заданим кроком дискретизації часових інтервалів. До фізичних обмежень належать інерційність теплообмінного об-

ладнання, обмеження швидкодії виконавчих механізмів та лімітований діапазон витрати теплоносія, що не перевищує 2 кг/с. Експлуатаційні обмеження вимагають дотримання градієнта зміни температури в машинному залі на рівні не більше 10°C на годину для запобігання термічним деформаціям серверного обладнання. Використання виключно стандартних бібліотек Simulink та мов програмування промислових контролерів є додатковим інструментальним обмеженням при реалізації проекту [12] - [13].

Принципова схема (рис. 2) передбачає рух теплоносіїв у режимі протитоку, що дозволяє досягти максимально можливої різниці температур між гарячим водяним контуром та охолодженим гліколевим розчином. Висока щільність теплового потоку в таких апаратах вимагає застосування прецизійних алгоритмів керування для запобігання різким коливанням температури при змінних витратах теплоносія.

Базова формула, яка була використана – формула теплової потужності:

$$P = Q \cdot c \cdot \Delta t; \quad (1)$$

де Q – масова витрата, кг/с;

c – теплоємність, Вт/кг·C°;

Δt – різниця температур, між входом і виходом теплоносія, C°.

Другим фізичним явищем, яке використовується при моделюванні теплообмінника, є теплопередача через тверду перегородку, що розділяє два незалежні теплоносії — воду та етиленгліколь. У спрощеній моделі передане тепло через пластину можна визначити за формулою теплопередачі:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot \Delta t; \quad (2)$$

де Q – передане тепло, Вт;

α – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м²·C°;

Δt – різниця температур, C°;

A – площа контактної площини, м².

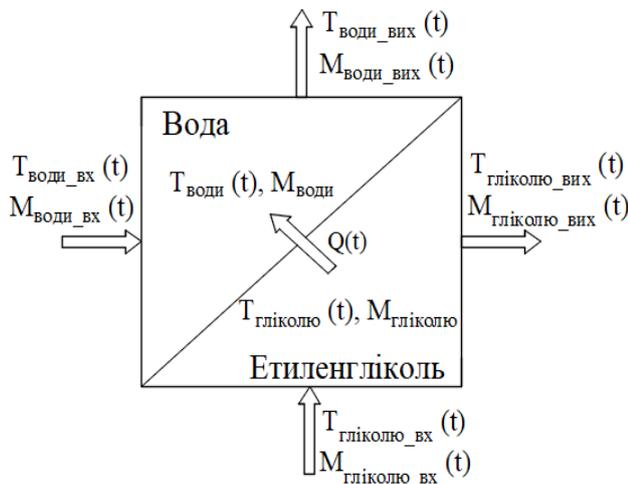


Рисунок 2. Принципова схема теплообмінника

Далі наведено значення величин зображених на (рис. 2): $T_{в_вх}$ - температура води при вході в теплообмінник, $T_{в_вих}$ - температура води при виході з теплообмінника, $M_{в_вх} / M_{в_вих}$ - витрата води в теплообміннику, $T_{гл_вх}$ - температура етиленгліколю при вході в теплообмінник, $T_{гл_вих}$ - температура етиленгліколю при виході з теплообмінника, $T'_в$ - температура води в теплообміннику, $T'_{гл}$ - температура етиленгліколю в теплообміннику, Q - потужність теплообміну між теплоносіями.

Грунтуючись на рівняннях, описаних вище, отримуємо такі диференціальні рівняння, що описують роботу теплообмінника.

Це рівняння описує енергію теплопередачі від етиленгліколю до води:

$$Q(t) = \alpha \cdot A \cdot (T_{гл_вих}(t) - T_{в_вих}(t)); \quad (3)$$

Це рівняння визначає баланс енергії в ємності з водою:

$$\frac{dT_{в}(t)}{dt} = \frac{1}{c_{в} \cdot M_{в}} \cdot (c_{в} \cdot M_{в_вх}(t) \cdot T_{в_вх}(t) - c_{в} M_{в_вих}(t) \cdot T_{в_вих}(t) + Q(t)); \quad (4)$$

Це рівняння для етиленгліколю записано аналогічним способом, грунтуючись на балансі енергії:

$$\frac{dT_{гл}(t)}{dt} = \frac{1}{c_{гл} \cdot M_{гл}} \cdot (c_{гл} \cdot M_{гл_вх}(t) \cdot T_{гл_вх}(t) - c_{гл} \cdot M_{гл_вих}(t) \cdot T_{гл_вих}(t) - Q(t)); \quad (5)$$

За отриманими диференціальними рівняннями будуватиметься динамічна модель теплообмінника в середовищі Simulink програмного комплексу Matlab.

Практична реалізація системи керування базується на концепції інтеграції віртуального об'єкта моделювання з реальним мікропроцесорним пристроєм за технологією Hardware-in-the-Loop [14] - [15]. У середовищі Simulink розроблено комплексну модель охолодження, яка відтворює динамічні характеристики гідромодуля. Ключовою особливістю даного етапу є винесення логіки керування за межі програмного середовища безпосередньо у пам'ять промислового контролера Siemens S7-1200 [16] - [17]. Це дозволяє перевірити працездатність алгоритмів у реальних умовах функціонування операційної системи контролера, враховуючи час сканування програми та особливості обробки аналогових сигналів.

Центральне місце в архітектурі системи посідає організація мережевого обміну даними. Для забезпечення високошвидкісного зв'язку між моделлю Simulink та ПЛК використано відкритий комунікаційний протокол ISO-op-TCP. Інформаційний потік структуровано таким чином, що кожні 300 мс модель передає значення поточної температури в дата-блоки контролера, а ПЛК, у свою чергу, повертає обчисле-

ний керуючий сигнал на виконавчий механізм (регулюючий клапан). Такий підхід забезпечує синхронізацію процесів та дозволяє розглядати модель як цифровий заміник фізичного об'єкта [18].

Розроблена структура імітаційного стенда дозволяє проводити дослідження системи в критичних режимах, які є небезпечними для реального обладнання дата-центру. Зокрема, реалізована можливість моделювання стрибкоподібних змін теплового навантаження та імітації відмов окремих датчиків. Це створює умови для глибокої верифікації параметрів ПІ-регулятора та відпрацювання логіки аварійного захисту. Таким чином, поєднання обчислювальної потуж-

ності Simulink з надійністю контролера S7-1200 формує універсальну платформу для проектування та предиктивного аналізу систем автоматизації прецизійного охолодження.

Програмна частина системи керування розроблена за модульним принципом, що забезпечує гнучкість налаштування та високу швидкість обробки технологічних даних [19] - [20]. Основний цикл виконання програми контролера розділено на декілька функціональних рівнів: рівень первинної обробки сигналів, рівень обчислення закону регулювання та рівень формування вихідних впливів на виконавчі механізми.

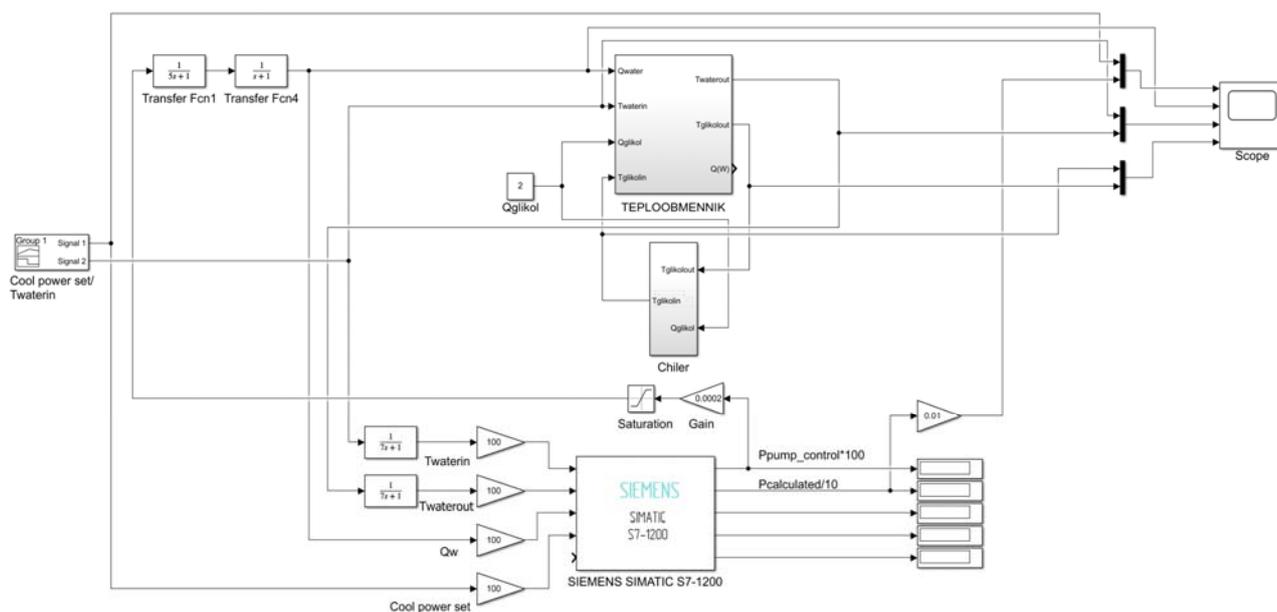


Рисунок 3. Інтеграція моделі гідромодуля з системою автоматичного керування на базі S7-1200

Такий підхід дозволяє ізолювати математичні операції від фізичних інтерфейсів, що спрощує адаптацію програмного забезпечення до різних конфігурацій гідромодулів.

Фундаментальним ядром програмної реалізації є модуль автоматичного регулювання, що функціонує з жорстко детермінованим кроком дискретизації для мінімізації фазових затримок у контурі керування [19]. В основі обчислювального алгоритму лежить модифікований закон пропорційно-інтегрального регулювання, доповнений механізмом запобігання інтегральному насиченню для коректної обробки обмежень виконавчих механізмів [20].

Інтеграція моделі гідромодуля з системою автоматичного керування. У даній моделі (рис. 3), керування перенесено безпосередньо в контролер Siemens S7-1200. Це забезпечує більш реалістичне відтворення роботи системи, оскільки алгоритм регулювання тепер виконується у тій формі, в якій він буде працювати на реальному обладнанні.

У структурну схему моделі додано спеціальний

блок комунікації з ПЛК, через який MATLAB та контролер обмінюються даними. Перехід даних між Simulink та S7-1200 відбувається за принципом: Simulink → Snap7 → ISO-on-TCP → PLC та та у зворотному напрямку PLC → ISO-on-TCP → Snap7 → Simulink. У результаті побудована комунікаційна схема дозволяє Simulink виступати цифровим двійником частини системи охолодження, а контролер S7-1200 — виконувати реальні алгоритми керування, отримуючи від моделі всі необхідні сигнали та передаючи назад фактичні значення параметрів. Такий підхід дає можливість тестувати логіку керування, перевіряти поведінку обладнання, налагоджувати алгоритми та проводити дослідження без потреби у фізичній установці, що значно підвищує ефективність проектування та експериментів.

Верифікація розробленого цифрового двійника здійснювалася шляхом моделювання перехідних процесів в інтегрованому середовищі «Simulink – ПЛК S7-1200» за допомогою блоку Signal Builder. Тестування охоплювало реакцію системи на ступінчасті зміни уставки холодопродуктивності (PЗВД) та ко-

ливання температури теплоносія на вході ($T_{WATERIN}$).

Аналіз отриманих результатів (рис. 4) дозволив виділити наступні етапи функціонування системи.

Початкова адаптація (до t_1): спостерігається вихід чиллера на сталий режим роботи. Температура гліколю на виході ($T_{GLIKOLOUT}$) стабілізується в робочому діапазоні 5–7°C.

Відпрацювання навантаження (t_1 - t_2): при стрибку завдання до 80 кВт ПІ-регулятор у ПЛК збільшує

витрату води (Q_{WATER}), забезпечуючи аперіодичний перехідний процес. Реальна потужність ($P_{РЕАЛЬНА}$) досягає уставки без перерегулювання з мінімальною статичною похибкою.

Компенсація збурень (t_3 - t_4): при зміні ($T_{WATERIN}$) до 18°C та згодом до 23°C контур регулювання потужності успішно нівелює вплив температурних коливань, зберігаючи сталість $P_{РЕАЛЬНА}$ за рахунок корекції витрати теплоносія.

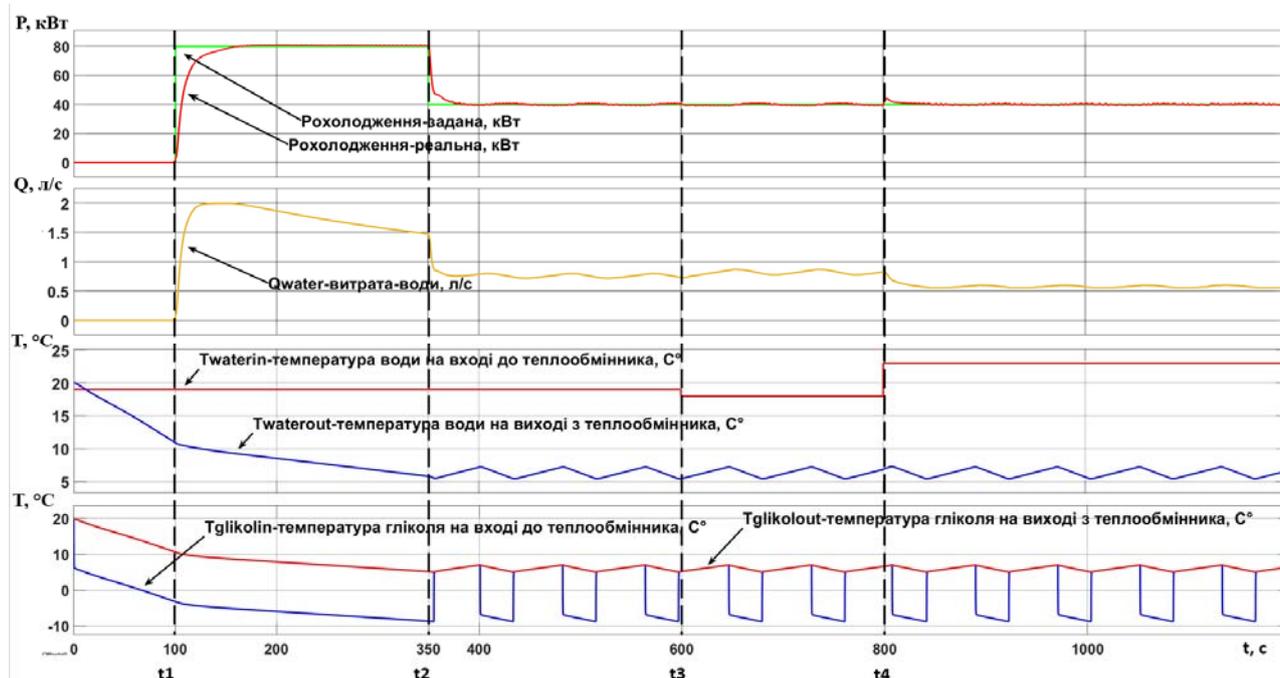


Рисунок 4. Перехідні процеси змінних $P_{ОХОЛОДЖЕННЯ}$, Q_{WATER} , T_{WATER} та T_{GLIKOL}

Дослідження підтвердило, що поділ функцій між температурним контуром чиллера та потужнісним контуром ПЛК забезпечує динамічну стійкість системи. Час регулювання при критичних змінах навантаження не перевищує 120 с, що повністю відповідає вимогам до прецизійного охолодження дата-центрів.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

V. ВИСНОВКИ

У результаті дослідження розроблено та досліджено систему автоматичного керування гідромодулем охолодження дата-центру на базі контролера Siemens S7-1200 із реалізацією цифрового двійника в середовищі MATLAB/Simulink. На основі аналізу теплотехнічних процесів сформовано вимоги до САК та створено динамічну математичну модель пластинчастого теплообмінника з урахуванням тепломасообміну між водяним і етиленгліколевим контурами, що забезпечило адекватне відтворення об'єкта керування.

Синтезовано контур регулювання холодопродуктивності гідромодуля на базі ПІ-регулятора, параметри якого визначено шляхом імітаційного моделюван-

ня. Реалізовано алгоритми керування на ПЛК та організовано двосторонній обмін даними за протоколом ISO-on-TCP у режимі Hardware-in-the-Loop. Моделювання й експериментальні дослідження підтвердили ефективність рішень: забезпечено стійку аперіодичну стабілізацію з постійною часу 20 с і похибкою не більше 5%. Досягнуті показники динамічної якості дозволяють підтримувати задану холодопродуктивність за змінного теплового навантаження, що є основою для забезпечення перерозподілу навантаження між гідромодулями, які працюють на спільний колектор системи охолодження ЦОД.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на масштабування системи з розробленням багатоконтурної теплової моделі та синтезом регуляторів перерозподілу навантаження між гідромодулями.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Пупена О. М. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах : навч. посіб. / О. М. Пупена, І.В. Ельперін, Н.М. Луцька, А. П. Ладанюк. – Київ : НУХТ, 2011. – 550с.
- [2] Marica M. C. Real-Time Pick-and-Place Digital

- Twin in Unity for Industry 4.0 / M. C. Marica, N. Bizon, I. Bostan // 2025 17th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Targoviste, Romania, 2025. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/ECAI65401.2025.11095550.
- [3] Energy optimization of chillers by automating a Cooling System / W. E. Sánchez, B. L. Robayo, P. E. Rodríguez [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2018. – Vol. 57. – 02002. – DOI: 10.1051/e3sconf/20185702002.
- [4] Ramirez Ramirez J. A. Remote-Controlled Cooling System for Chrome Plating Cells Using Industrial IoT and MODBUS TCP/IP / J. A. Ramirez Ramirez, D. B. Montalvo Hurtado, A. Hilario-Tacuri // SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2025. – Vol. 12, No. 6. – P. 214–223. – DOI: 10.14445/23488379/IJEEE-V12I6P119.
- [5] Mechatronic automatic control system of electropneumatic manipulator / O. Nazarova, V. Osadchyy, T. Hutsol [et al.] // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – P. 6970. – DOI: 10.1038/s41598-024-56672-4.
- [6] Nazarova O. Software and Hardware Complex for the Study of Electropneumatic Mechatronic Systems / O. Nazarova, V. Osadchyy, S. Shulzhenko, M. Olieinikov // 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2022. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005698.
- [7] Krayem H. A digital twin solution for optimizing productivity and energy performance in hybrid ventilated office space / H. Krayem, J. Younes, K. Ghali [et al.] // Energy Conversion and Management. – 2026. – Vol. 349. – 120880. – DOI: 10.1016/j.enconman.2025.120880.
- [8] Giordani S. Digital Twins for Data Centre Cooling Optimisation and Waste Heat Recovery / S. Giordani, R. Scoccia, M. Aprile // Building Digital Twins. – Cham : Springer, 2026. – (Lecture Notes in Civil Engineering ; vol. 775). – DOI: 10.1007/978-3-032-09040-9_8.
- [9] Lua K. B. Single-phase immersion cooling for data centers and HPC: Recent advances and system-level challenges / K. B. Lua, C.-C. Wang // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2026. – Vol. 232. – 116786. – DOI: 10.1016/j.rser.2026.116786.
- [10] Bhatia A. HVAC cooling systems for data centers : Course No: M05-020. – 65 p.
- [11] Coroamă V. C. Temperature Optimisation in Data Centres. – Roegen Centre for Sustainability, 2025. – 46 p. – DOI: 10.48550/arXiv.2509.26163.
- [12] Torrell W. The Unexpected Impact of Raising Data Center Temperatures / W. Torrell, K. Brown, V. Avelar. – Schneider Electric, 2016. – 16 p.
- [13] ASHRAE. Thermal Guidelines for Data Processing Environments. – 2nd ed. – 2009.
- [14] Liu G. Reducing Step Size of Hardware-in-Loop Simulation in Electro-Dynamic Shaker Controller Design by Electrical-Mechanical Analogy / G. Liu, Z. Pan, L. Chen // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 88819–88828. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3418623.
- [15] Anticaglia A. Hardware-in-the-Loop Driving Simulators: Simplifying Real Component Integration in Simulated Environments / A. Anticaglia, R. Capitani, C. Annicchiarico // IEEE Open Journal of Vehicular Technology. – 2025. – Vol. 6. – P. 2891–2908. – DOI: 10.1109/OJVT.2025.3622519.
- [16] Liu Y. Research on Maglev Power Heat Pipe Refrigeration Control System Based on 1200 PLC Modbus Serial Communication Acquisition Technology / Y. Liu // 2023 IEEE 6th International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE), Dalian, China, 2023. – P. 1010–1014. – DOI: 10.1109/ICISCAE59047.2023.10392875.
- [17] Osadchyy V. Laboratory Stand for Investigation of Liquid Level Microprocessor Control Systems / V. Osadchyy, O. Nazarova // 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240868.
- [18] Siemens. Basic examples for open user communication TCP. – 2020. – 82 p. – Режим доступу: https://docs.tia.siemens.cloud/r/K_rGver6ldNCaKD650C6lg/7UDRC3kAeXTkjb3CITAEBVA
- [19] Шевченко В. В. Основи автоматизації технологічних процесів : конспект лекцій : навч. посіб. / В. В. Шевченко, Г. С. Тимчик. – Київ : КПІ, 2023. – 111 с.
- [20] Баган Т. Г. Проектування систем автоматизації : навч. посіб. / Т. Г. Баган, О. В. Некрашевич. – Київ : КПІ, 2020. – 59 с.

Надійшла (Received) 12.01.2016;

Прийнята (Accepted) 24.02.2026;

Опублікована (Published) 30.03.2026;

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR DATA CENTER COOLING HYDRAULIC MODULES

- OSADCHY V.V. PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Electric Drive and Commercial Plant Automation Department, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2707-0805>, e-mail: w.osadchiy@gmail.com ;
- NAZAROVA O.S. PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Electric Drive and Commercial Plant Automation Department, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0784-7621>, e-mail: author@mail.com;
- KUNITSYN A.V. Master student of the Electric Drive and Commercial Plant Automation Department, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6232-4676>, e-mail: artemzp2003@gmail.com

Purpose of the work. Development and research of an automatic control system for a data center cooling hydromodule based on the Siemens S7-1200 industrial controller with the implementation of the digital twin concept in the MATLAB / Simulink environment to ensure precise stabilization of temperature regimes under variable thermal load.

Research methods. Mathematical modeling based on differential equations, simulation modeling, and classical methods of automatic control theory.

Results. A complex mathematical model of the hydromodule has been developed that adequately reproduces the nonlinear thermophysical interactions between the primary and secondary cooling circuits. An integrated control architecture has been created, in which a real microprocessor controller controls a virtualized object within the simulation model's circuit. Numerical modeling indicates that the developed system supports target microclimate indicators with high precision and zero static error. The analysis of transient processes confirmed the aperiodic nature of regulation during extreme thermal power disturbances.

Scientific novelty. The methodology for designing intelligent systems for the automatic control of heat engineering facilities based on the Digital Twin concept, with direct integration of a real industrial controller into a virtual control loop, has been further developed. For the data center cooling hydromodule, an architecture has been proposed in which the Siemens S7-1200 operates in hardware-software communication mode with a simulation model implemented in the MATLAB/Simulink environment, providing two-way data exchange via the ISO-on-TCP protocol in real time. Methods for predictive analysis of energy efficiency in cooling systems have been further developed by moving the regulator-tuning stage into a virtual environment, with hardware verification of the algorithms. It has been shown that the proposed system provides an aperiodic nature of transient processes and zero static error during thermal power disturbances.

Practical value. A toolkit has been created to enable safe, cost-effective adjustment of automation systems for data center cooling hydromodules without risking damage to expensive equipment. The proposed system allows: to ensure stabilization of the secondary circuit temperature with an error not exceeding 5%; to achieve aperiodic regulation with a time constant $T = 20$ s; to increase energy efficiency and reliability of pumping equipment; to reduce costs for commissioning and adjustment due to preliminary testing of algorithms in a digital twin. The developed solutions can be integrated into automated control systems of large data centers and scaled for multi-module configurations by synthesizing load redistribution algorithms across several cold sources.

Keywords: electrical engineering; automation; control system; digital twin; modeling; Siemens S7-1200; cooling system; data center; monitoring; energy efficiency.

REFERENCES

- [1] Pupena, O. M., Elperin, I. V., Lutska, N. M., & Ladanuik, A. P. (2011). *Promyslovi merezhi ta intehratsiini tekhnologii v avtomatyzovanykh systemakh*. Kyiv: NUKHT.
- [2] Marica, M. C., Bizon, N., & Bostan, I. (2025). Real-time pick-and-place digital twin in Unity for Industry 4.0. In *Proceedings of the 17th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/ECAI65401.2025.11095550>
- [3] Sánchez, W. E., Robayo, B. L., Rodríguez, P. E., Salazar, M. E., Jácome, S., & Mullo, A. S. (2018). Energy optimization of chillers by automating a cooling system. *E3S Web of Conferences*, 57, 02002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185702002>
- [4] Ramirez, J. A., Montalvo, D. B., & Hilario-Tacuri, A. (2025). Remote-controlled cooling system for chrome plating cells using industrial IoT and MODBUS TCP/IP. *SSRG Int. Journ. of Electrical and Electronics Engineering*, 12(6), 214–223. <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V12I6P119>
- [5] Nazarova, O., Osadchyy, V., Hutsol, T., Glowacki, S., Nurek, T., Hulevskiy, V., & Horetska, I. (2024). Mechatronic automatic control system of electro-pneumatic manipulator. *Scientific Reports*, 14, 6970. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56672-4>

- [6] Nazarova, O., Osadchyy, V., Shulzhenko, S., & Olieinikov, M. (2022). Software and hardware complex for the study of electropneumatic mechatronic systems. In *Proc. of the 4th Int. Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005698>
- [7] Krayem, H., Younes, J., Ghali, K., Jradi, M., Ghaddar, N., & others. (2026). A digital twin solution for optimizing productivity and energy performance in hybrid ventilated office space. *Energy Conversion and Management*, 349, 120880. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120880>
- [8] Giordani, S., Scoccia, R., & Aprile, M. (2026). Digital twins for data centre cooling optimisation and waste heat recovery. In A. Jurelionis, P. A. Fokaidis, L. Mazzarella, & T. Hartmann (Eds.), *Building digital twins* (Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 775). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-032-09040-9_8
- [9] Lua, K. B., & Wang, C.-C. (2026). Single-phase immersion cooling for data centers and HPC: Recent advances and system-level challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 232, 116786. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.116786>
- [10] Bhatia, A. (n.d.). *HVAC cooling systems for data centers: Course No. M05-020*.
- [11] Coroamă, V. C. (2025). *Temperature optimisation in data centres*. Roegen Centre for Sustainability. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.26163>
- [12] Torrell, W., Brown, K., & Avelar, V. (2016). *The unexpected impact of raising data center temperatures*. Schneider Electric.
- [13] ASHRAE. (2009). *Thermal guidelines for data processing environments* (2nd ed.).
- [14] Liu, G., Pan, Z., & Chen, L. (2024). Reducing step size of hardware-in-loop simulation in electrodynamic shaker controller design by electrical-mechanical analogy. *IEEE Access*, 12, 88819–88828. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3418623>
- [15] Anticaglia, A., Capitani, R., & Annicchiarico, C. (2025). Hardware-in-the-loop driving simulators: Simplifying real component integration in simulated environments. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 6, 2891–2908. <https://doi.org/10.1109/OJVT.2025.3622519>
- [16] Liu, Y. (2023). Research on maglev power heat pipe refrigeration control system based on 1200 PLC Modbus serial communication acquisition technology. In *Proc. of the 6th Int. Conf. on Information Systems and Computer Aided Education* (pp. 1010–1014). <https://doi.org/10.1109/ICISCAE59047.2023.10392875>
- [17] Osadchyy, V., & Nazarova, O. (2020). Laboratory stand for investigation of liquid level microprocessor control systems. In *Proc. of the IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)* (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240868>
- [18] Siemens. (2020). *Basic examples for open user communication TCP*. <https://url.zp.edu.ua/08105>
- [19] Shevchenko, V. V., & Tymchuk, H. S. (2023). *Osnovy avtomatyzatsii tekhnologichnykh protsesiv*. Kyiv: KPI.
- [20] Bahan, T. H., & Nekrashevych, O. V. (2020). *Proiektuvannia system avtomatyzatsii*. Kyiv: KPI.