

АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА

УДК 004.021:004.94

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-7>

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРАЛЬНОЮ МАШИНОЮ З УРАХУВАННЯМ КОНЦЕПЦІЇ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК» (частина друга)

Бублікков Андрій Вікторович,

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем Національного технічного
університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-3015-6754

Гурбанов Руслан Аламдарович,

аспірант групи
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0009-0002-4606-7107

Рибачук Ілля Сергійович,

здобувач
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

Нині технології «розумного будинку» є дуже затребуваними у світі та, зокрема, в Україні. Їх упровадження дає змогу зменшити споживання ресурсів будинком, підвищити безпеку й комфортність перебування в приміщеннях. Тому всі дослідження, що пропонують нові рішення за напрямом технологій «розумного будинку», є затребуваними й актуальними. Показані недоліки використання класичного ПІД-регулятора для нагрівання води в пральній машині з позиції вирішення завдання розподілу потужності між побутовими приладами. З урахуванням цього запропоновано алгоритм адаптивного автоматичного керування процесом нагрівання води в пральній машині, що базується на ідентифікації динамічних властивостей об'єкта керування. Результати ідентифікації використовуються як для прогнозування кількості споживаної електроенергії пральною машиною, так і для синтезу оптимального за швидкодією регулятора для керування нагріванням води. Результатами дослідження є встановлені нові закономірності процесу керування температурою води в пральній машині, які дали змогу запропонувати інноваційний підхід щодо синтезу системи автоматичного керування з урахуванням концепції «розумний будинок». Установлено, що ідентифікацію динамічної моделі нагрівання води в пральній машині при роботі системи керування з прийнятною точністю можна проводити за половини експериментальної кривої розгону – до точки її перегину. Фактично довжина експериментальної кривої розгону до точки її перегину є оптимальною для проведення процедури ідентифікації моделі об'єкта керування за критеріями тривалості етапу формування кривої (продуктивність системи керування) і точності визначення параметрів моделі (точність відпрацювання системою зміни уставки). З'ясовано, що зі збільшенням амплітуди тестового керуючого сигналу при формуванні експериментальної кривої розгону збільшується похибка під час розрахування інтервалів перемикавання оптимального за швидкодією регулятора, через що збільшується статична похибка на момент закінчення нагрівання води (закінчення другого інтервалу перемикавання регулятора). Проведена перевірка ефективності запропонованого алгоритму керування на основі розробленої імітаційної моделі системи автоматичного керування температурою води у пральній машині.

Ключові слова: синтез системи автоматичного керування, імітаційна модель, температура води в барабані, пральна машина.

Bublikov Andrii, Gurbanov Ruslan, Rybachuk Illia. Features of the washing machine automatic control process taking into account the smart home concept

Currently, "smart home" technologies are in great demand in the world and, in particular, in Ukraine. Their implementation makes it possible to reduce the consumption of resources by the house, increase the safety and comfort of staying in the premises. Therefore, all research that offers new solutions in the direction of "smart home" technologies is in demand and relevant. Disadvantages of using a classic PID regulator for heating water in

a washing machine are shown from the point of view of solving the problem of power distribution between household appliances. Taking this into account, an algorithm for adaptive automatic control of the water heating process in the washing machine is proposed, based on the identification of the dynamic properties of the control object. The results of the identification are used both for forecasting the amount of electricity consumed by the washing machine and for the synthesis of the speed-optimized regulator for controlling water heating. The results of the study established new regularities of the water temperature control process in the washing machine, which made it possible to propose an innovative approach to the synthesis of an automatic control system taking into account the concept of "smart house". It was established that identification of the dynamic model of water heating in the washing machine during operation of the control system with acceptable accuracy can be carried out by half of the experimental acceleration curve - up to the point of its inflection. In fact, the length of the experimental acceleration curve to the point of its inflection is optimal for carrying out the procedure for identifying the model of the control object based on the criteria of the duration of the curve formation stage (performance of the control system) and the accuracy of determining the parameters of the model (accuracy of working out the setpoint change system). It was established that with an increase in the amplitude of the test control signal during the formation of the experimental acceleration curve, the error in calculating the switching intervals of the optimal regulator in terms of speed increases, due to which the static error at the end of the water heating (end of the second switching interval of the regulator) increases. The effectiveness of the proposed control algorithm was verified on the basis of the developed simulation model of the automatic water temperature control system in the washing machine.

Key words: synthesis of the automatic control system, simulation model, water temperature in the drum, washing machine.

Вступ. У першій частині статті проведені дослідження щодо автоматичного керування нагріванням води в барабані пральної машини з використанням класичного ПІД-регулятора з обмеженням діапазону зміни значень вихідного сигналу та захистом від перенасичення його інтегральної складової, який налаштований з використанням комп'ютеризованого методу синтезу системи керування. Дослідження показали, що цей регулятор може коректно відпрацьовувати зміну уставки води за умови змінного обмеження щодо керуючого сигналу через зміну системою енергетичного менеджменту тактики розподілу потужності. Але в його роботі виділені такі недоліки, через які робота цього типу регулятора сумісно із системою енергетичного менеджменту в розумному будинку значно ускладнюється:

- наявність часових інтервалів, де керуючий сигнал змінюється безперервно, що ускладнює використання цього споживача електроенергії сумісно з іншими споживачами з точки зору вироблення певної тактики розподілу потужності, оскільки багато споживачів є за характером споживання електроенергії дискретними об'єктами;

- немає можливості спрогнозувати час, протягом якого буде мати місце незмінний рівень споживаної потужності, оскільки сам алгоритм формування керуючого впливу в ПІД-регуляторі це не передбачає.

Тож зроблено висновок, що потрібний інший інноваційний підхід щодо синтезу системи автоматичного керування температурою води в пральній машині, у якому будуть усунуті перелічені недоліки.

Методи та методики дослідження. Для дослідження системи автоматичного керування

температурою води в барабані пральної машини використані методи теорії автоматичного керування. Дослідження проведені на основі обчислювальних експериментів із використанням комп'ютеризованих методів ідентифікації та синтезу систем автоматичного керування [1], а також імітаційної моделі системи автоматичного керування [2].

В основу синтезу кіберфізичної системи автоматичного керування температурою води в пральній машині покладено такий інноваційний підхід:

- основну частину процесу нагрівання води в пральній машині пропонується здійснювати тоді, коли кіберфізична система керування визначила цифрову проєкцію цього фізичного процесу з точки зору нагрівання води, на основі якої отримується інформація про кількість електроенергії, що необхідна на нагрівання води. Цю інформацію кіберфізична система керування температурою води передає інтелектуальній системі енергетичного менеджменту для зміни тактики перерозподілу потужності на найближчий час, після чого вона отримує від системи верхнього рівня обмеження за потужністю (виділену кількість електроенергії). Далі формування керуючого впливу під час процесу нагрівання води відбувається з урахуванням цього обмеження;

- для визначення цифрової проєкції фізичного процесу нагрівання води спочатку температура води збільшується на незначну величину з одночасним споживанням незначної кількості електроенергії. При цьому формується експериментальна крива розгону, за результатом обробки якої отримується передаточна функція за каналом керування, де вхідна

величина – потужність ТЕН, а вихідна – температура;

– щоб нагрівання води після ідентифікації об'єкта керування відбувалося за заданими критеріями якості (монотонний перехідний процес з перерегулюванням не більше ніж 5 % і статичною похибкою не більше ніж 1 %, який має мінімальну тривалість з огляду на обмеження керуючого сигналу), а потужність змінювалася в часі дискретно для забезпечення сумісності роботи з іншими споживачами електроенергії (серед яких багато саме дискретних з точки зору споживання електроенергії), на основному етапі нагрівання води пропонується використовувати оптимальний за швидкодією регулятор, при розрахунку якого діапазон зміни керуючого сигналу вказується з урахуванням установленого обмеження за потужністю ТЕН.

З огляду на описані основні положення підходу щодо синтезу кіберфізичної системи керування температурою води в пральній машині, розроблено алгоритм керування на базі графу переходів (рис. 1).

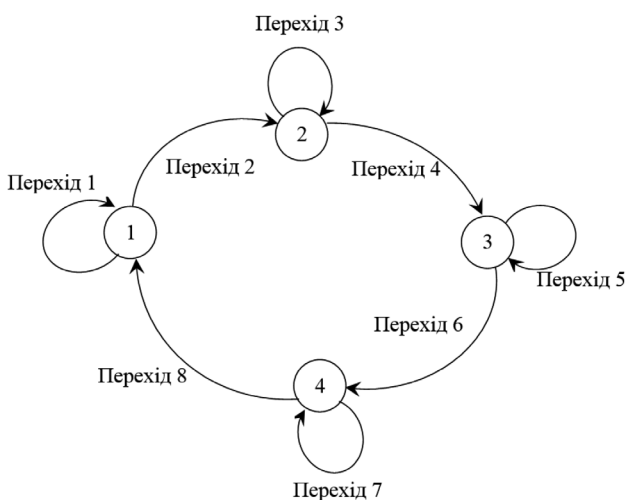


Рис. 1. Схема алгоритму автоматичного керування температурою води в пральній машині для кіберфізичної системи

Граф стану на рис. 1 має чотири вершини, які відповідають стану системи керування:

- 1 – стан підтримки заданої температури;
- 2 – стан збирання даних для визначення цифрової проєкції фізичного процесу нагрівання води;
- 3 – стан відпрацювання першого інтервалу перемикавання оптимального за швидкодією регулятора;
- 4 – стан відпрацювання другого інтервалу перемикавання оптимального за швидкодією регулятора.

Умова переходу 1 – відсутність зміни уставки температури, дія – формування керуючого впливу для підтримки заданого рівня температури.

Умова переходу 2 – завдання нової уставки температури, дія – підготовка масивів для накопичення експериментальних даних.

Умова переходу 3 – невиконання умови достатньої довжини експериментальної кривої розгону для ідентифікації об'єкта керування, дія – додавання до масивів значень потужності ТЕН і температури води нового значення.

Умова переходу 4 – достатність експериментальних даних для ідентифікації об'єкта керування. Пропонується це визначати за критерієм, який характеризує віддаленість від точки перегину на кривій розгону. За цей критерій прийняте відношення поточного та максимального значень диференціалів температури за часом. Дія переходу 4 – проведення процедури ідентифікації, розрахунок прогнозованої кількості електроенергії, що необхідна для завершення відпрацювання системою керування нової уставки за температурою води. Передавання цієї інформації інтелектуальній системі верхнього рівня для формування нової тактики розподілу потужності. Розрахунок оптимального за швидкодією регулятора на основі отриманого від системи верхнього рівня обмеження щодо потужності ТЕН. Підготовка таймера для відпрацювання першого інтервалу перемикавання оптимального за швидкодією регулятора.

Умова переходу 5 – відсутність завершення першого інтервалу перемикавання оптимального за швидкодією регулятора, дія – формування максимального керуючого впливу з урахуванням обмеження потужності ТЕН.

Умова переходу 6 – закінчення першого інтервалу перемикавання оптимального за швидкодією регулятора, дія – підготовка таймерів для наступного відпрацювання зміни уставки температури.

Умова переходу 7 – відсутність завершення другого інтервалу перемикавання оптимального за швидкодією регулятора, дія – формування мінімального керуючого впливу.

Умова переходу 8 – завершення другого інтервалу перемикавання оптимального за швидкодією регулятора, дія – підготовка таймерів для наступного відпрацювання зміни уставки температури.

Результати. Проведемо аналіз результатів моделювання, отриманих за допомогою описаної в першій частині статті імітаційної моделі системи автоматичного керування з використанням вище наведеного підходу при синтезі системи.

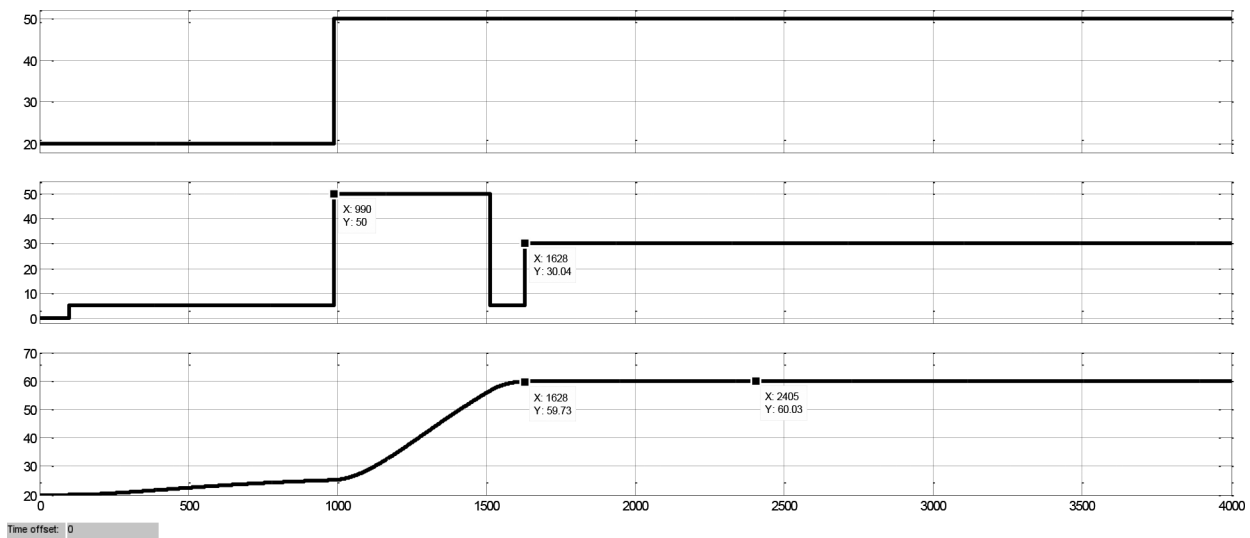


Рис. 2. Зміна в часі обмеження щодо потужності від системи енергетичного менеджменту, фактичної потужності ТЕН і температури води при роботі кіберфізичної системи керування в режимі неперервного споживання електроенергії

З рис. 2 можна простежити стани системи, що показані на рис. 1 та описані вище.

Так, до 990 с моделювання відбувається формування експериментальної кривої розгону (рис. 2, б). Робота оптимального за швидкістю регулятора відбувається з 990 до 1628 с моделювання. На цьому часовому діапазоні ми бачимо, як перший інтервал перемикавання з максимальною потужністю 50 кВт (рис. 2, б), що відповідає обмеженню від системи верхнього рівня (рис. 2, а), так і другий інтервал з мінімальною потужністю ТЕН 5 кВт, яка спостерігалася під час формування експериментальної кривої розгону. Рис. 2, в підтверджує коректність відпрацювання зміни уставки: ми бачимо, що температура змінюється монотонно без перерегулювання, а статична похибка фактично дорівнює нулю.

На рис. 3 показано результат визначення прогнозованої кількості електроенергії на

нагрівання води в третьому та четвертому станах системи керування. Коректність розрахунку підтверджена обчислювальними експериментами (відносна похибка становила до 1 %).

Недолік кіберфізичної системи, робота якої показана на рис. 2, у тому, що вона передбачає неперервне споживання електроенергії ТЕНом, тоді як багато інших споживачів електроенергії в будинку мають періодичний дискретний характер споживання електроенергії (прилади вмикаються й вимикаються з певним періодом). Щоб запропоновану кіберфізичну систему керування більше адаптувати під сумісну роботу з такими споживачами електроенергії, запропоновано реалізувати так званий імпульсний режим споживання електроенергії ТЕНом. Фактично йдеться про той самий алгоритм керування, але, замість установлення неперервного керуючого сигналу, на певному рівні формується

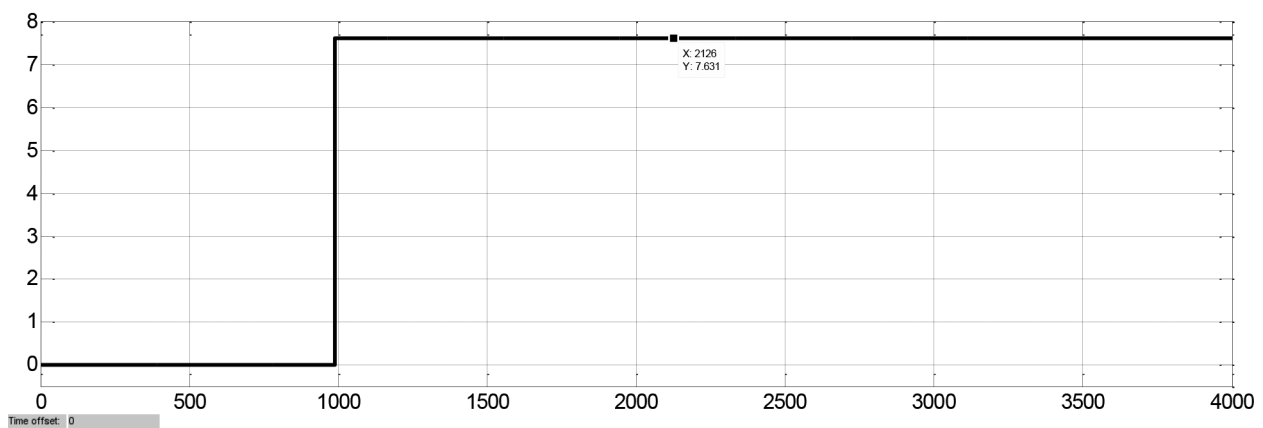


Рис. 3. Результат прогнозування кіберфізичною системою кількості електроенергії, що необхідна для підігрівання води в режимі неперервного споживання електроенергії

імпульсний керуючий сигнал, середнє значення якого відповідає цьому рівню. У зв'язку з цим доопрацьований алгоритм керування шляхом уведення генераторів імпульсних сигналів за заданими параметрами. Параметри імпульсного керуючого сигналу під час нагрівання води визначаються системою верхнього рівня, яка задає як амплітуду імпульсів, так і їх шпаруватість. Максимальний керуючий вплив для оптимального за швидкістю регулятора визначається як середнє значення імпульсних сигналів.

Результат моделювання роботи кіберфізичної системи керування температурою води в пральній машині за умови забезпечення імпульсного споживання електроенергії ТЕНом показано на рис. 4.

З рис. 4 видно, що кіберфізична система, з одного боку, забезпечує імпульсний керуючий

сигнал, що відповідає встановленим обмеженням щодо амплітуди та шпаруватості системою енергетичного менеджменту верхнього рівня (рис. 4, а, в), а з іншого – дає змогу отримати перехідний процес за температурою з прийнятними критеріями якості щодо перерегулювання та статичної похибки. Таким чином, доведено, що запропонований алгоритм є дієвим і для режиму імпульсного споживання електроенергії ТЕНом.

Результат моделювання на рис. 5 також підтверджує дієвість запропонованого алгоритму керування за умови імпульсного споживання електроенергії ТЕНом і щодо прогнозування кількості електроенергії на нагрівання води в пральній машині. Порівняння рис. 3 та рис. 5 дає змогу зробити висновок, що прогнозована кількість електроенергії на нагрівання води для

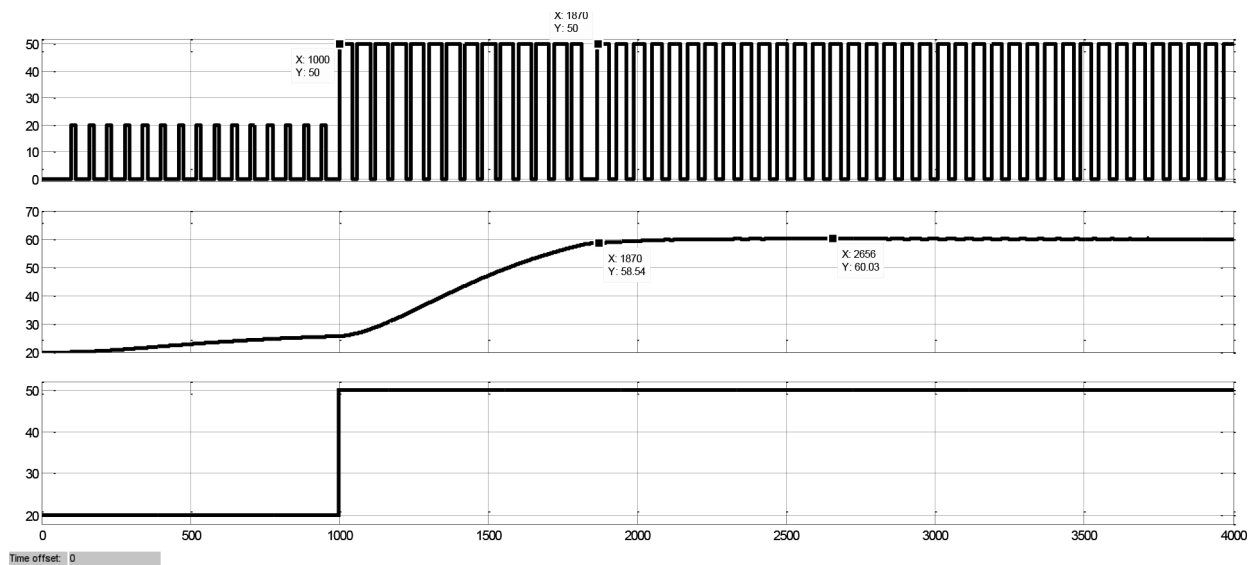


Рис. 4. Зміна в часі фактичної потужності ТЕН, температури води й обмеження щодо потужності від системи енергетичного менеджменту при роботі кіберфізичної системи керування в режимі імпульсного споживання електроенергії

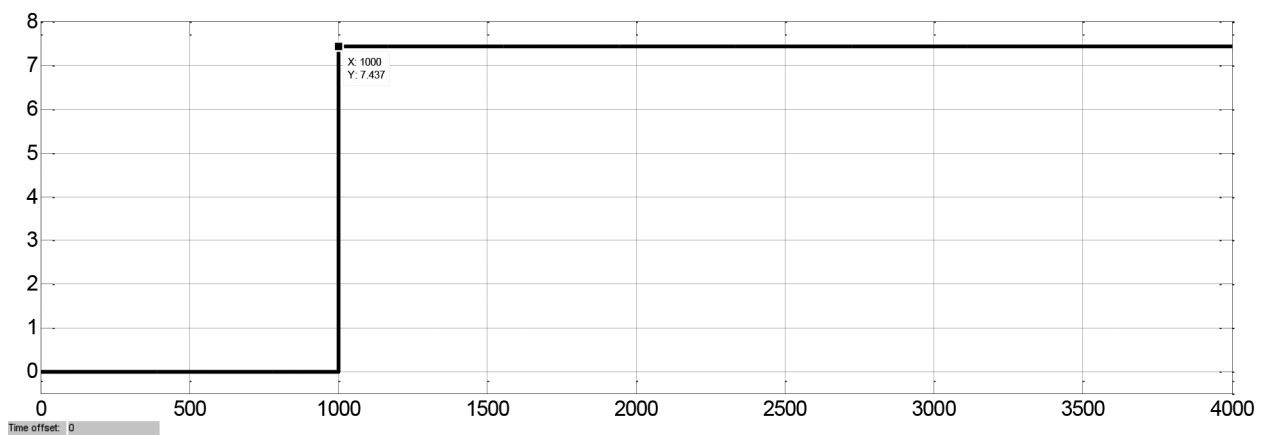


Рис. 5. Результат прогнозування кіберфізичною системою кількості електроенергії, що необхідна для підігрівання води в режимі імпульсного споживання електроенергії

режимів неперервного й імпульсного споживання електроенергії є практично однаковою – 7,63 кВт·г для першого випадку та 7,44 кВт·г для другого випадку.

Висновки. Запропонований новий підхід щодо синтезу системи автоматичного керування температурою води в барабані пральної машини, що передбачає використання оптимального за швидкодією регулятора в основній фазі нагрівання води, параметри якого розраховані на основі вхідних даних від системи

енергетичного менеджменту щодо обмеження потужності й параметрів її імпульсного споживання, а також з урахуванням передавальної функції пральної машини як об'єкта керування, що визначається на початковій стадії нагрівання води.

Результати обчислювальних експериментів підтвердили ефективність запропонованого підходу як щодо перехідного процесу при нагріванні води, так і щодо прогнозування кількості електроенергії, яка потрібна для цього.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Бублік А. В., Рибачук І. С. Кіберфізична система автоматичного керування температурою води у пральній машині. *Молодь: наука та інновації* : матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених. 2022. С. 332–333. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2022/molod-2022.pdf>
2. Рибачук І. С. Синтез та дослідження кіберфізичної системи автоматичного керування температурою води у барабані промислової пральної машини : кв. роб. ... магістра зі спец. 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Д. : НТУ «ДП», 2023. 111 с. URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/164290?show=full>

REFERENCES:

1. Bublikov, A. V., & Rybachuk, I. S. (2022). Cyber-physical system for automatic control of water temperature in a washing machine [A cyber-physical system for automatic water temperature control in a washing machine]. Materials of the 10th international scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists «Youths: science and innovation». P. 332–333. Retrieved from <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2022/molod-2022.pdf>
2. Rybachuk, I. S. (2023). Synthesis and research of a cyber-physical system of automatic water temperature control in the drum of an industrial washing machine: qualifying work on master's degree in specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies" / Ilya Serhiyovych Rybachuk. D. : NTU "DP", 111 p. Retrieved from <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/164290?show=full>