

## АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА

УДК 004.021:004.94

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-8>

### ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРАЛЬНОЮ МАШИНОЮ З УРАХУВАННЯМ КОНЦЕПЦІЇ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК» (ЧАСТИНА ПЕРША)

**Бублікоч Андрій Вікторович,**

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

**Гурбанов Руслан Аламдарович,**

аспірант групи 174А-23-10  
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»  
ORCID ID: 0009-0002-4606-7107

**Рибачук Ілля Сергійович,**

здобувач групи 151М-21-1  
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Наразі технології «розумного будинку» є дуже затребуваними у світі та, зокрема, в Україні. Їх впровадження дозволяє зменшити споживання ресурсів будинком, підвищити безпеку та комфортність перебування у приміщеннях. Тому усі дослідження, що пропонують нові рішення за напрямом технологій «розумного будинку» є затребуваними й актуальними. Показані недоліки використання класичного ПІД-регулятора для нагрівання води у пральній машині з позиції вирішення задачі розподілу потужності між побутовими приладами. З урахуванням цього запропонований 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 у пральній машині, які дозволили запропонувати інноваційний підхід щодо синтезу системи автоматичного керування з урахуванням концепції «розумний будинок». Встановлено, що ідентифікацію динамічної моделі нагрівання води в пральній машині при роботі системи керування з прийнятною точністю можна проводити за половиною 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) та точності визначення параметрів моделі (точність відпрацювання системою зміни уставки). Встановлено, що зі збільшенням амплітуди тестового керуючого сигналу при формуванні експериментальної кривої розгону збільшується похибка при розрахуванні інтервалів перемикання оптимального за швидкодією регулятора, через що збільшується статична похибка на момент закінчення нагрівання води (закінчення другого інтервалу перемикання 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.** Наразі технології «розумного будинку» є дуже затребуваними у світі та, зокрема, в Україні [1]. Їх впровадження дозволяє зменшити споживання ресурсів будинком, підвищити безпеку та комфортність перебування у приміщеннях. Тому усі дослідження, що пропонують нові рішення за напрямом технологій «розумного будинку» є затребуваними й актуальними.

Одним з напрямів впровадження технологій «розумного будинку» є інтелектуалізація побутових приладів з метою економії споживання ресурсів, підвищення комфортності користування ними. При цьому йдеться не тільки про використання технологій інтернет-речей, завдяки чому створюється технічна база для впровадження складних сценаріїв інтелектуальної сумісної роботи приладів, а й про надання системам керування приладами властивостей кіберфізичних систем, коли в алгоритм прийняття керуючих рішень закладається цифрова проекція реальних фізичних процесів, їх "розуміння" системою [2].

Процеси нагрівання води та опалення є найбільш енерговитратними в будинках. І якщо здійснювати одну з головних функцій системи енергетичного менеджменту, що стосується розподілу електроенергії між споживачами, то побутові прилади, де мають місце ці енерговитратні фізичні процеси, мають бути адаптовані під сумісну роботу з системою енергетичного менеджменту, що є одною з систем розумного будинку [3].

Саме це завдання вирішується в даній роботі – відбувається модифікація системи автоматичного керування нагріванням води у пральній машині через надання їй властивостей кіберфізичної системи з метою інтелектуалізації пральної машини та її адаптації

для сумісної роботи з системою енергетичного менеджменту в будинку.

При цьому поставлено за мету визначити закономірності процесу нагрівання води, що дозволять адаптувати процес автоматичного керування температурою води під сумісну роботу з системою енергетичного менеджменту в будинку.

Для досягнення поставленої мети сформовані і вирішені такі наукові задачі:

- створена імітаційна модель системи автоматичного керування температурою води у барабані пральної машини;

- проведено дослідження ефективності та доцільності використання для автоматичного керування температурою води у барабані пральної машини ПІД-регулятора в умовах обмеженого енергоресурсу;

- запропонований новий метод синтезу кіберфізичної системи автоматичного керування температурою води у барабані пральної машини на основі розбиття процесу нагрівання води на два етапи, коли на першому етапі відбувається визначення цифрової проекції фізичного процесу, а на другому – відпрацювання уставки регулятором, що розрахований на базі моделі фізичного процесу нагрівання води з урахуванням обмеження за потужністю ;

- проведені дослідження режимів роботи синтезованої кіберфізичної системи керування температурою води у барабані пральної машини, що дозволили встановити оптимальні параметри алгоритму керування.

**Матеріали та метод.** Для дослідження системи автоматичного керування температурою води у барабані пральної машини використані методи теорії автоматичного керування. Дослідження проведені на основі

обчислювальних експериментів з використанням комп'ютеризованих методів ідентифікації та синтезу систем автоматичного керування [4].

За основу взяті експериментальні дані, отримані в реальних умовах для промислової пральної машини. За підсумками обробки експериментальних даних отримана модель процесу нагрівання води в пральній машині як об'єкта керування (рис. 1).

Таким чином, за результатами обробки експериментальних даних маємо досить простий за своїми статичними й динамічними властивостями об'єкт автоматичного керування другого порядку з від'ємними дійсними коренями характеристичного рівняння з лінійною статичною характеристикою та без транспортного запізнення.

Отже, за аналізом властивостей об'єкта автоматичного керування можна зробити висновок, що за умови синтезу системи автоматичного керування при реалізації функції нагрівання води з заданими критеріями якості перехідного процесу підійде класичний ПІД-регулятор, але в якому відпрацьоване обмеження щодо вихідного керуючого сигналу з забезпеченням функції захисту від перенасичення інтегральної складової регулятора.

Модель системи автоматичного керування створена з розрахунку прийняття за основу при синтезі системи керування принципу керування за зворотним від'ємним зв'язком. У такому разі структурна схема системи автоматичного керування температурою води у пральній машині буде виглядати так, як на рис. 2.

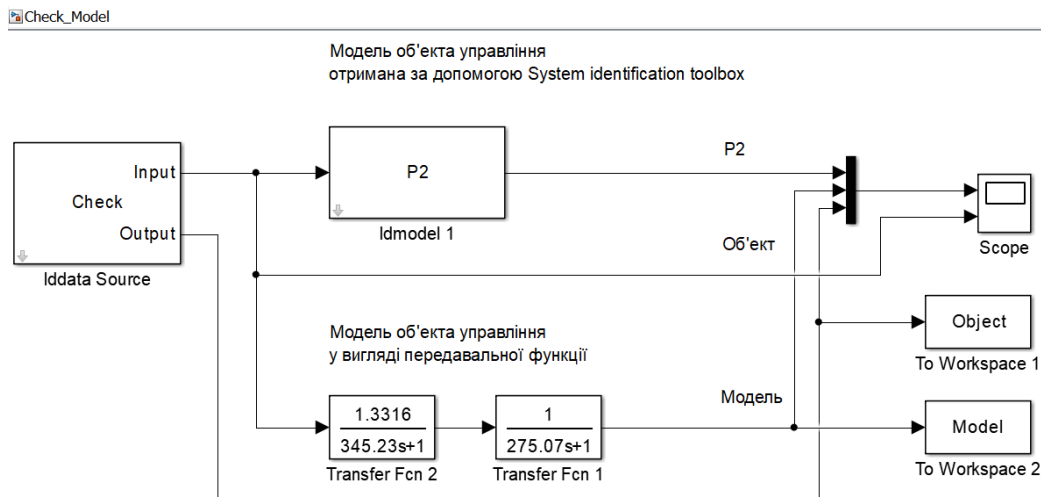


Рис. 1. Модель об'єкту управління в середовищі Simulink

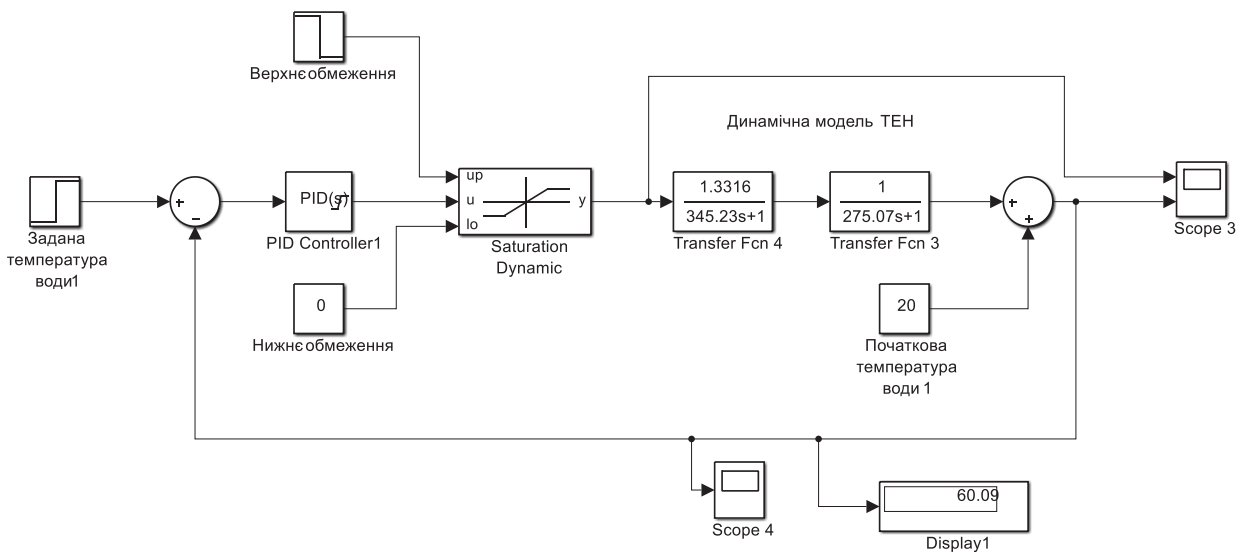


Рис. 2. Структурна схема динамічної моделі системи автоматичного керування температурою води у пральній машині

В модель на рис. 2 введений блок, який динамічно змінює обмеження щодо керуючого сигналу на виході ПІД-регулятора для імітування зміни виділеної потужності для пральної машини системою енергетичного менеджменту. Справа в тому, що ставиться за мету синтез не простої системи автоматичного керування, а тієї, яка має ознаки кіберфізичної системи. Оскільки кіберфізична система автоматичного керування температурою води у пральній машині має додаткову функцію забезпечення коректного нагрівання води в умовах обмеженого енергоресурсу, регулятор повинен якісно працювати завдання саме в цих умовах, коли потужність ТЕН може в будь який момент зменшитись. Це зумовлено тим, що інтелектуальна система енергетичного менеджменту в будинку формує тактику розподілу потужності, що зберігається незмінною певний час, доки суттєво не зміняться умови енергоспоживання в будинку.

ПІД-регулятор реалізується за допомогою блоку PID Controller (рис. 2). Цей блок дозволяє просто й якісно реалізувати ПІД-регулятор, при цьому в ньому закладена можливість врахування обмеження вихідного сигналу у певному діапазоні з захистом від перенасичення інтегральної складової. Налаштування ПІД-регулятора проведено комп'ютеризованим методом за допомогою вбудованого в блок PID Controller інструменту для автоматизації процесу розрахунку параметрів регулятора PID Tuner (рис. 3) [5].

За замовчанням інструмент PID Tuner визначає такі параметри регулятора, що забезпечують оптимальне співвідношення критеріїв швидкодії та стійкості системи автоматичного керування. У нашому випадку в системі керування немає факторів, що негативно впливають на її стійкість. Параметри передаточної функції об'єкта керування залишаються практично незмінними (об'єм води та напруга мережі живлення змінюються несуттєво).

Транспортного запізнення також немає, крім того, сама модель об'єкта керування є структурно простою. Тож, при додатковому налаштуванні регулятора акцент зроблений на максимальній швидкодії системи керування.

З рис. 3 видно, що при обраних параметрах регулятора маємо перерегулювання 4,56% (поле Performance and robustness), але в абсолютних одиницях це складає менше 2 °C, що для даного технологічного процесу є цілком припустимим.

**Результати.** Проведемо аналіз результатів моделювання, отриманих за допомогою розробленої імітаційної моделі системи автоматичного керування.

На рис. 4 показана робота системи автоматичного керування без зміни обмеження щодо керуючого сигналу.

Аналіз роботи імітаційної моделі системи автоматичного керування температурою води у пральній машині на рис. 4 показує, що регулятор налаштований коректно.

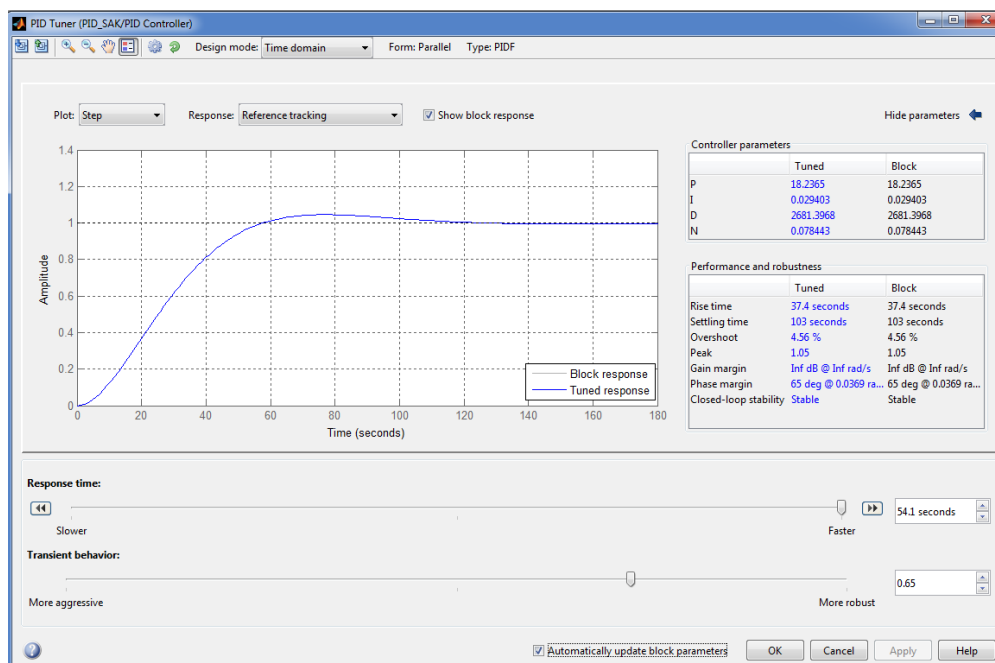
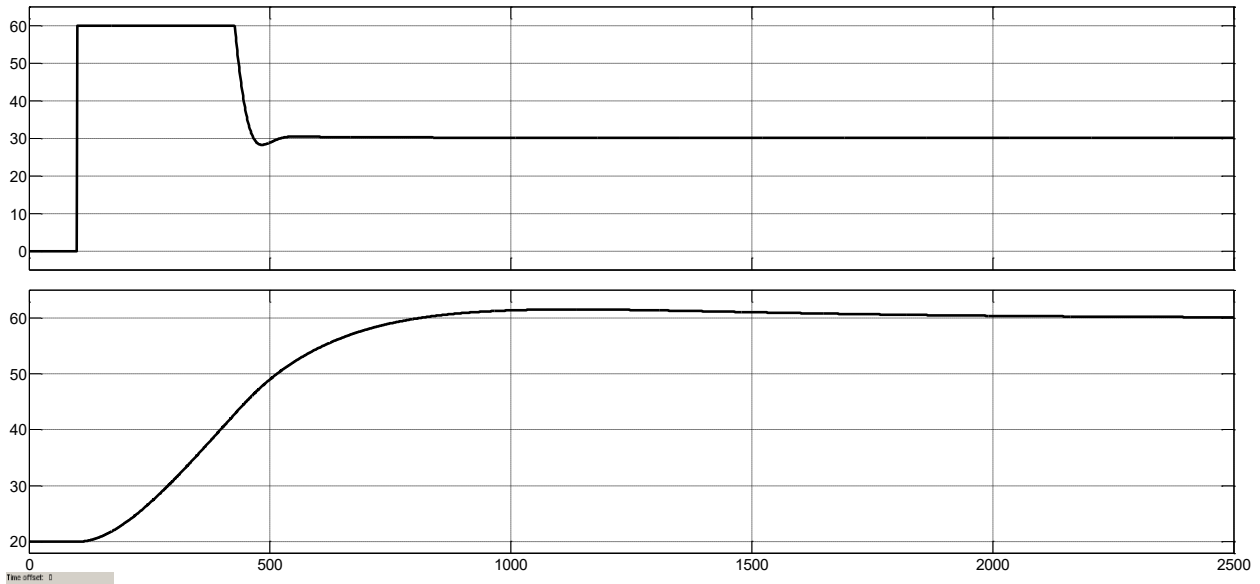
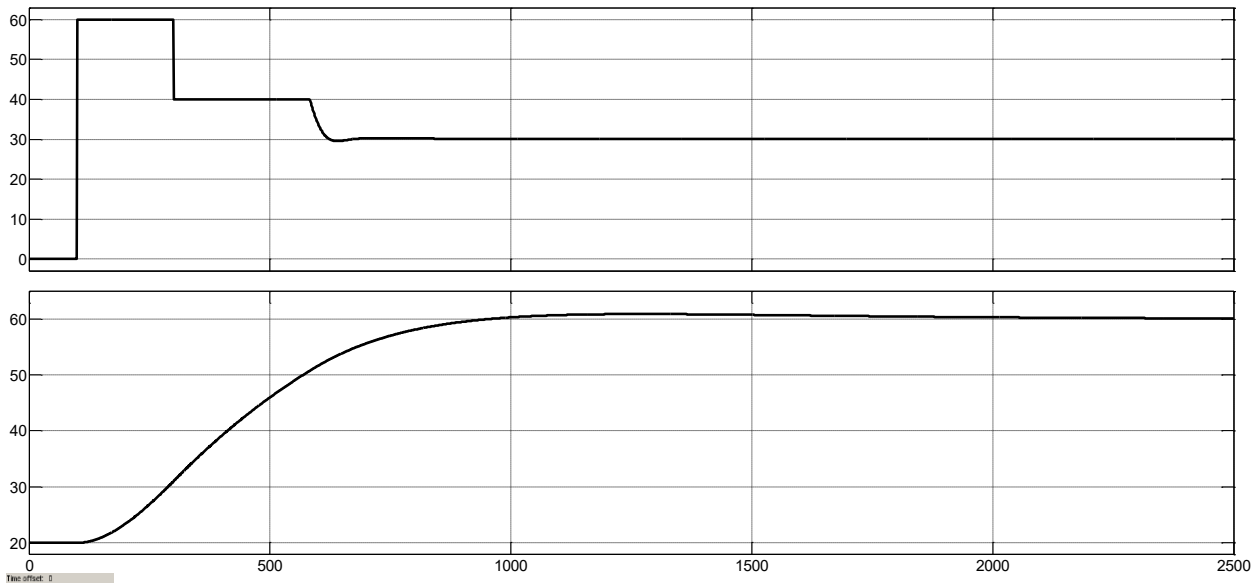


Рис. 3. Вікно налаштувань інструменту PID Tuner, що реалізує комп'ютеризований метод синтезу системи автоматичного керування



**Рис. 4. Зміна у часі потужності ТЕН (зверху) та температури води (знизу) у пральній машині за умови використання ПІД-регулятора без зміни обмеження потужності**



**Рис. 5. Зміна у часі потужності ТЕН та температури води у пральній машині за умови використання ПІД-регулятора з обмеженням потужності**

Те, що керуючий сигнал (верхня частина рис. 4) за формою має досить тривалу ділянку з максимальним значенням (до приблизно 400 с моделювання) та подальшим різким зменшенням до рівня, який забезпечує задану температуру 60 °С, означає, що система має швидкодію, яка наближена до максимальної. Задана температура досягається при цьому за приблизно 700 с з перерегулюванням до 2 °С (нижня частина рис. 4).

Далі проведемо аналіз роботи системи керування при змінному обмеженні щодо керуючого

сигналу. Так, на 300 с моделювання обмеження щодо потужності ТЕН зменшено з 60 до 40 кВт (верхня частина рис. 5).

З аналізу рис. 5 можна зробити висновок, що ПІД-регулятор навіть за умови змінного обмеження щодо керуючого сигналу через зміну системою енергетичного менеджменту тактики розподілу потужності коректно відпрацьовує зміну уставки води. З нижньої частини рис. 5 ми можемо помітити, що температура води збільшується монотонно, без коливань. Перерегулювання залишилося до 5%,

статична похибка відсутня. Таким чином, ПІД-регулятор міг би ефективно виконувати автоматичне керування температурою в умовах динамічно зміненого обмеження щодо потужності ТЕНа, працюючи сумісно з інтелектуальною системою енергетичного менеджменту верхнього рівня.

Але, в роботі ПІД-регулятора можна виділити наступні недоліки, через які його робота сумісно з системою енергетичного менеджменту значно ускладнюється:

– наявність часових інтервалів, де керуючий сигнал змінюється неперервно (в районі 400 с моделювання на верхній частині рис. 5), 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.

**Висновки.** Дослідження показали, що класичний ПІД-регулятор з обмеженням діапазону зміни значень вихідного сигналу та захистом від перенасичення його інтегральної

складової, налаштований з використанням комп'ютеризованого методу синтезу системи керування, може коректно відпрацьовувати зміну уставки води за умови змінного обмеження щодо керуючого сигналу через зміну системою енергетичного менеджменту тактики розподілу потужності.

Але, в роботі ПІД-регулятора можна виділити наступні недоліки, через які його робота сумісно з системою енергетичного менеджменту значно ускладнюється:

– наявність часових інтервалів, де керуючий сигнал змінюється неперервно (в районі 400 с моделювання на рис. 2.9,а), 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, потрібний інший інноваційний підхід щодо синтезу системи автоматичного керування температурою води у пральній машині, в якому будуть усунуті перелічені недоліки.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Stolojescu-Crisan, C., Crisan, C., & Butunoi, B. P. An IoT-Based Smart Home Automation System. *Sensors* (Basel, Switzerland), 2021, 21(11), 3784. <https://doi.org/10.3390/s21113784>
2. Ван Чунжі, Яцишин, С.П., Лиса, О.В. & Мідик, А-В. В. Кіберфізичні системи та їх програмне забезпечення. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 2018, 79 (1), 34-38. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2018.01.034>
3. Бубликов А.В., Рибачук І.С. Кіберфізична система автоматичного керування температурою води у пральній машині. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Молодь: наука та інновації». 2022. С. 332-333. <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2022/molod-2022.pdf>
4. 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» / Рибачук Ілля Сергійович. Д.: НТУ «ДП». 2023. 111 с. <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/164290?show=full>
5. Дослідницька частина в кваліфікаційній роботі магістра: навч. посіб. / В.Г. Шаруда, В.В. Ткачов, А.В. Бубликов; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. Д.: НГУ. 2015. 487 с.

#### REFERENCES:

1. Stolojescu-Crisan, C., Crisan, C., & Butunoi, B. P. (2021). An IoT-Based Smart Home Automation System. *Sensors* (Basel, Switzerland), 21(11), 3784. <https://doi.org/10.3390/s21113784>
2. Wang Chunzhi, Yatsyshyn, S.P., Lysa, O.V. & Midyk, A-V. V. (2018). Kiberfizychni systemy ta yikh prohranne zabezpechennia [Cyber-physical systems and their software]. *Measuring technique and metrology*, 79 (1), 34-38. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2018.01.034> [in Ukrainian].
3. Bublikov A.V., Rybachuk I.S. (2022). Kiberfizychna systema avtomatychnoho keruvannia temperaturoiu vody u pralnyi mashyni [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". pp. 332-333. Retrieved from: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2022/molod-2022.pdf> [in Ukrainian].

4. Rybachuk I. S. (2023). Syntez ta doslidzhennia kiberfizychnoi systemy avtomatychnoho keruvannia temperaturoiu vody u barabani promyslovoi pralnoi mashyny : kv. rob. ... mahistra zi spets. 151 «Avtomatyziatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii» [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"] D.: NTU "DP". 111 p. Retrieved from: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/164290?show=full>

5. Sharuda V.G., Tkachev V.V., Bublikov A.V. (2015). Doslidnytska chastyna v kvalifikatsiinii roboti mahistra: navch. posib [The research part of the master's qualification work: teaching. manual]. Ministry of Education and Science of Ukraine, National mountain Univ. D.: NSU. 487 p. [in Ukrainian].