

¹Ноздренков В.С., к.т.н.,
orcid.org/0009-0002-0579-6821,
e-mail: valerii.nozdrenkov@gmail.com,

²Павлов А.В., к.ф.-м.н.,
orcid.org/0009-0002-8861-8472,
e-mail: a.pavlov@ksu.sumdu.edu.ua,

²Олексієнко Г.А., к.ф.-м.н.,
orcid.org/0000-0002-0274-5095,
e-mail: galyana2@ukr.net,

²Журавльов О.Ю.,
orcid.org/0009-0002-7834-6661,
e-mail: san.75@i.ua,

³Журавльов Ю.О.,
orcid.org/0009-0008-2369-198X,
e-mail: nagatoura@gmail.com

ПРОГРАМНА АДАПТАЦІЯ ОПОРНОГО АЛГОРИТМУ ДЛЯ ДИСКРЕТНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

¹Codeminders/Tristero Consulting

²Сумський державний університет

³ТОВ "НЕТКРЕКЕР"

Вступ

Сучасні реалії розвитку автоматики, ще на етапі проектування систем автоматичного управління технологічними об'єктами, в розряд обов'язкових вводять дедалі більше вимог. До таких вимог можна віднести: надійність, швидкодію, ергономічність відповідних інтерфейсів, бюджетність як всієї системи управління, так і окремих виконавчих механізмів об'єкта управління, а сам процес управління, відповідно, повинен, як правило, забезпечувати максимальне ресурсозбереження. Це особливо актуально при створенні недорогих (бюджетних) систем управління відносно нескладними технологічними об'єктами, виконавчі механізми яких працюють за принципом *on-off*.

Для побудови систем управління на даний момент широко застосовуються регулятори, які працюють на основі аналогового (неперервного) алгоритму управління, де вихідний (керуючий) сигнал неперервно змінюється в залежності від зміни вхідного сигналу. Іншим варіантом є дискретні регулятори, вихідним сигналом яких є сигнал високого або низького рівня,

які часто називають двопозиційними. Кожен з перерахованих вище методів регулювання має свої переваги і недоліки та, відповідно, може бути застосований розробником, виходячи з врахування специфіки об'єкта управління для забезпечення відповідності названим вище вимогам.

Аналіз останніх досліджень

Алгоритми управління двопозиційним регулятором розглянуті у роботі [1]. Тут аналізуються два алгоритми управління: на основі порівняння стану системи та на основі функціональності між вхідним та вихідним сигналом.

У джерелах [2, 3] проведено порівняння роботи нечіткого контролера, що працює за аналоговим алгоритмом та двопозиційного контролера для регулювання температури в приміщенні для вирощування грибів, а також інкубатора яєць. Результати випробувань та середнє значення, отримане за допомогою двох різних методів, показали, що нечітке керування з найменшим стандартним відхиленням, дисперсією та помилкою краще, ніж цифрове керування. Система нечіткого управління мала найнижчу коливальність і найвужчу

смугу пропускання. Судячи зі зміни графіка, кращого та гіршого результатів, можна зробити висновок, що нечітке управління показало кращий відгук під час управління процесом [2].

Достатньо велика кількість робіт присвячена створенню гібридних систем управління. Гібридна система – це динамічна система з дискретними та неперервними змінами стану. Часто управління об'єктом складно організувати лише за неперервним чи дискретним способом управління. В цьому випадку створюються неперервно – дискретні (гібридні) системи управління.

У роботі [4] розглядається можливість використання системи з дискретним часом як заміни систем з неперервним часом у процесі проектування контролера з гарантованими межами похибок.

Опис програмних засобів управління неперервно – дискретними системами наводиться в роботі [5], де описано новий програмний засіб, створений на основі мереж Петрі, здатний взаємодіяти безпосередньо з мікроконтролерами, що підтримують протокол *Firmata*.

Нерідко виникає завдання адаптації неперервного аналогового алгоритму управління, який було досліджено та отримано його задовільні перехідні характеристики, до його дискретного аналогу. У роботі [6] запропоновано використання дискретного часового коректора при переході до імпульсних систем управління, внаслідок чого можуть бути зменшені втрати енергії виконавчими пристроями та механізмами.

У роботі [7] описаний набір інструментів *MATLAB* для моделювання гібридних систем, заснований на розширеній системі паралельних дискретних подій.

Для об'єктів, що характеризуються гібридною (безперервною та дискретною) динамікою в роботі [8] показана можливість моделювання складних періодичних процесів з досить високою продуктивністю, точністю та практичністю у *MATLAB/Simulink* з використанням набору інструментів *StateFlow*.

Двопозиційний регулятор запропоновано використовувати у роботі [9] для забезпечення регулювання процесів другого порядку, з великим часом наростання. Описано достатній набір інструментів у програмному середовищі *LabVIEW*, що дозволяє детально моделювати двопозиційний регулятор. Описано переваги його застосування, а саме, відзначено простоту, надійність роботи та низьку вартість реалізації.

Дослідження оптимального самонавчального регулювання для нелінійних систем з дискретним часом у подійно-орієнтованій постановці розглянуто в роботі [10].

Робота [11] присвячена огляду стратегії адаптивного управління для кусково-афінних систем з багатьма змінними, які є популярним інструментом для моделювання гібридних систем та апроксимації нелінійних систем.

У роботі [12] розглянута проблема пояснення результатів «чорного ящика», тобто пояснення причин рішення, прийнятого у конкретному випадку. Запропоновано метод, здатний дати інтерпретовані та точні пояснення.

Моделі опалення будівель, розроблені в середовищі *MATLAB*, представлені в роботі [13] та є підтвердженням актуальності даної тематики та ефективності відповідного програмного засобу для їх вирішення.

У роботі [14] розглянуто метод контролю температури будівлі, здатний подавляти завади, пов'язані зі зміною температури зовнішнього повітря.

Резюмуючи сказане вище, слід зазначити, що проведений аналіз сучасних методів реалізації дискретного регулювання лише доводить актуальність розробки прикладних проектних методик забезпечення потреб оптимального управління, чому власне, на основі попередньо оптимізованого опорного алгоритму, присвячена дана стаття. Дискретне регулювання навіть на даному етапі розвитку технічних засобів не втрачає своєї актуальності, а аналітика, пов'язана з цією тематикою, все дедалі більше актуалізується, особливо коли

завдання вирішуються у розрізі енергетика/або ресурсозберігаючого управління.

Етапи адаптації опорного алгоритму управління

Спочатку розглянемо основні етапи адаптації опорного алгоритму управління.

Опис причинно-наслідкових зв'язків у об'єкті управління. У цій статті, в якості ілюстрації, об'єктом управління взято побутове приміщення, що розглядається лише на рівні відповідних причинно-наслідкових (принцип "чорного ящика") зв'язків (рис. 1), які враховують максимальний ефект регулювання. В цьому випадку вхідними параметрами можна вважати:

- витрату газу у котлі для нагрівання приміщення;
- втрати теплової енергії, наведені до розмірності температури, що витрачається на нагрівання суміжних стін та ін.
- Тому вихідними параметрами можна прийняти:
 - кількість витраченого на нагрівання газу;
 - фактичне значення температури у приміщенні.

На рис. 1 dQ/dt – це споживання газу бойлером для підігріву приміщення; T_L – втрати температури; T – значення температури приміщення; V – кількість спожитого газу.

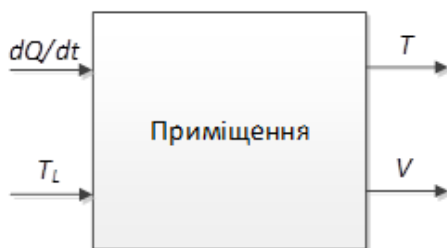


Рис. 1. Структурне представлення приміщення з його вхідними та вихідними параметрами

Спростити математичний опис цієї підсистеми дозволяє ряд припущень, які забезпечують, без будь-яких протиріч, відповідні причинно-наслідкові зв'язки, а саме:

1. Кількість спаленого газу для розігріву приміщення (V) до заданого

значення температури (T_{sp}) знаходиться в пропорційній залежності від витрати газу в котлі (dQ/dt).

2. Процес нагрівання приміщення до заданого значення температури (T_{sp}) є інерційним. В результаті котел може бути описаний передавальною функцією аперіодичної ланки першого порядку, що має в якості власних параметрів постійну часу (T_R) і коефіцієнт перетворення (k_R), оцінити які нескладно експериментальним шляхом.

Структурна схема підсистеми нагріву побутового приміщення. Враховуючи наведене вище щодо формалізованого опису процесу контрольованого нагріву приміщення, можна структурно подати відповідну підсистему у вигляді схеми, наведеної на рис. 2. Головною бюджетною особливістю практичної реалізації даної системи управління є те, що у якості нагрівача може використовуватися побутовий опалювальний котел, в якому зовнішнє автоматичне регулювання можливо реалізувати виключно завдяки замиканню «сухого» контакту (робота за принципом «on-off»). З замиканням цього контакту котел переходить у робочий стан та починає розігрів теплоносія, інакше котел вимкнений.

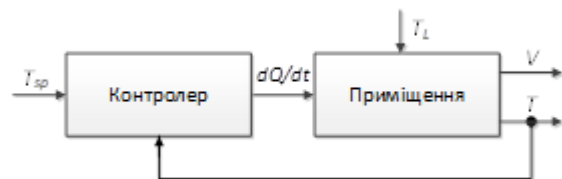


Рис. 2. Структурна схема контуру регулювання температури у приміщенні

Головною бюджетною особливістю практичної реалізації даної системи управління є те, що у якості нагрівача може використовуватися побутовий опалювальний котел, в якому зовнішнє автоматичне регулювання можливо реалізувати виключно завдяки замиканню «сухого» контакту (робота за принципом «on-off»). З замиканням цього контакту котел переходить у робочий стан та починає розігрів теплоносія, інакше котел вимкнений.

При розробці методу безпосередня реалізація автоматичного управління на низькому рівні здійснювалася самостійно розробленим *IoT*-пристроєм (модулем), що дозволило забезпечити необхідну гнучкість та варіативність процесу. До основних особливостей відповідного пристрою можна віднести: вбудовані функції для його гнучкої інтеграції у локальну інформаційно-керуючу мережу приміщення, вимірювання температури за місцем та релейного увімкнення/вимкнення підключеного до нього котла. Передача та обмін даними з зовнішнім сервером або сервісом було забезпечено за промисловим протоколом. Під час розробки методу використовувався протокол *ModBus TCP*.

За необхідності програма *IoT*-пристрою завжди може бути модернізована на рівні коду методом *OTA* та, відповідно, може бути додана функція автоматичного відновлення з'єднання у разі втрати зв'язку за протоколом *ModBus TCP*, що інколи відбувається мимоволі при створенні випадкових «фантомних» з'єднань. Вбудована програма *IoT*-модуля додатково до основних функцій відстежує та порівнює кількість вхідних та вихідних повідомлень та при прояві відповідного розбалансування здатна автоматично апаратно перезавантажити відповідний мікроконтролер.

Що ж до самого процесу регулювання, то необхідне оптимальне рішення може бути отримано відразу. У випадку, якщо на етапі попереднього моделювання відповідного контуру регулювання отримати адаптаційну характеристику, вона може бути застосована для спрощення *soft*-реалізації одного з фундаментальних законів управління. Програмно реалізувати таку характеристику зручно в серверній частині системи управління, що, у свою чергу, робить цілком обґрунтованим використання клієнт-серверної структури системи управління на основі загальної інформаційно-керуючої мережі.

Щодо структури опорного алгоритму управління слід зазначити, що на підготовчому етапі розгортання системи

зручно використовувати пропорційно-інтегрально-диференціальний алгоритм внаслідок його універсальності, з подальшим зниженням його складності (за необхідності).

З урахуванням всього наведеного вище структурне представлення системи управління має вигляд, наведений на рис. 3.

При практичній реалізації розподіл керуючих функцій цієї системи можна зробити таким чином:

- *soft* – адаптація та моніторинг параметрів на сервері, який буде розташований у спільній локальній мережі (при розробці методу відповідна організація здійснювалася на базі середовища *Node-Red* – середовища програмування для об'єднання апаратних пристроїв, *API* та онлайн-сервісів від компанії *IBM*);
- безпосереднє вимірювання параметрів забезпечується *IoT*-модулем, інтегрованим у загальну локальну інформаційно-керуючу мережу (власна розробка на основі мікроконтролера *ESP8266*).

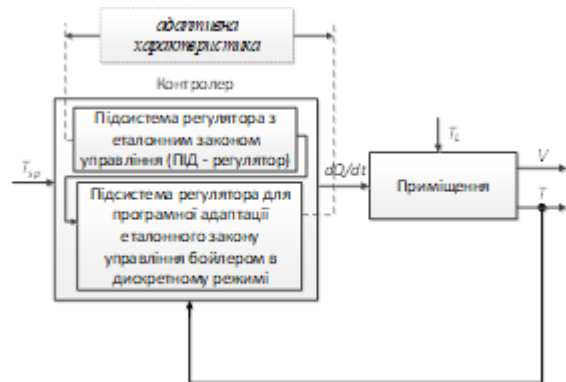


Рис. 3. Структурна схема контуру регулювання температури у приміщенні з адаптаційною характеристикою

Формалізація режимів роботи котла для дискретного керування. Для дозованого введення тепла в систему опалення приміщення котлом, який може працювати лише у дискретному режимі (робота за принципом *on-off*) планується до реалізації наступний механізм (рис. 4):

- обирається безпечний проміжок часу роботи котла, на краях якого зміна робочого стану не є станом частого

перемикання (наприклад, 10 хв.) та, відповідно, технічно безпечна;

- дозування тепла при передачі від котла до теплоносія відбувається шляхом одноразової зміни стану протягом вищеприписаного проміжку часу;
- відсоткове відношення роботи котла в режимі нагрівання до значення безпечного проміжку часу і є тим дискретним еквівалентом аналогового сигналу керування.



Рис. 4. Циклограма безпечної роботи котла у дискретному режимі

Цей етап проектування є дуже важливим, оскільки вибір необґрунтовано завищеного значення безпечного проміжку роботи виконавчого пристрою може призвести до невідповідності результатів проектування на рівні перехідних характеристик до реальних значень у роботі системи.

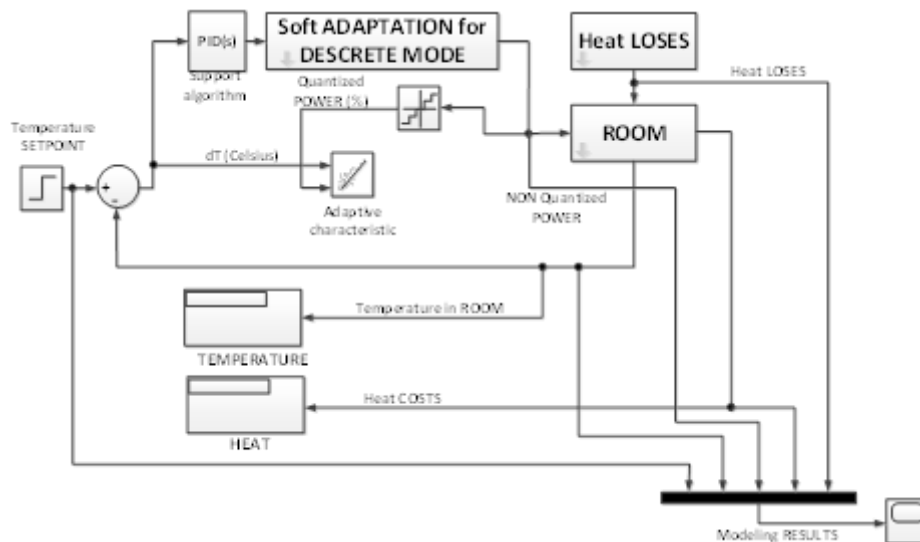


Рис. 5. Схема для моделювання процесу керування опаленням приміщення у середовищі *MATLAB*

Для візуалізації результатів моделювання та більш зручнішого їх аналізу використані наступні блоки:

- результуюче значення температури у приміщенні («*Temperature*»);

З іншого боку, занижене значення відповідного параметра може різко знизити термін служби обладнання та призвести до додаткових фінансових витрат на ремонт відповідного елемента системи управління. Тобто розробка циклограми роботи пристроїв з дискретним способом роботи має проводитися у повній відповідності до документації на відповідне обладнання.

Моделювання процесу управління опаленням приміщення у середовищі *MATLAB*

Для моделювання процесу управління опаленням приміщення та аналізу ключових параметрів у середовищі *MatLab* реалізовано схему, наведену на рис. 5. Як видно з рис. 5, відповідна модель включає в себе наступні підсистеми:

- підсистема приміщення («*ROOM*»);
- підсистема опорного алгоритму управління («*PID(s)*»);
- підсистема програмної адаптації опорного алгоритму до дискретного режиму роботи котла («*Soft adaptation for discrete mode*»);
- Підсистема обліку теплових втрат («*Heat loses*»).

- значення витраченої теплової енергії («*Heat*»);

- графіки перехідних процесів за ключовими параметрами («*Modeling results*»);

- графік адаптаційної характеристики для використання на рівні коду *IoT*-модуля або при налаштуванні сервера *Node-Red* («*Adaptive characteristic*»).

З урахуванням аспектів, зазначених при формалізації приміщення в якості об'єкту управління, приклади реалізації відповідних підсистем для моделювання наведено на рис. 6.

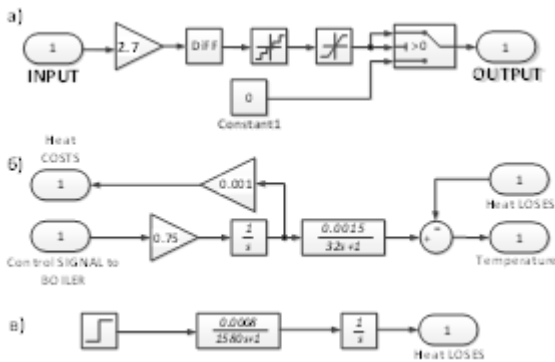


Рис. 6. Варіант реалізації підсистем моделі в середовищі *MatLab Simulink*

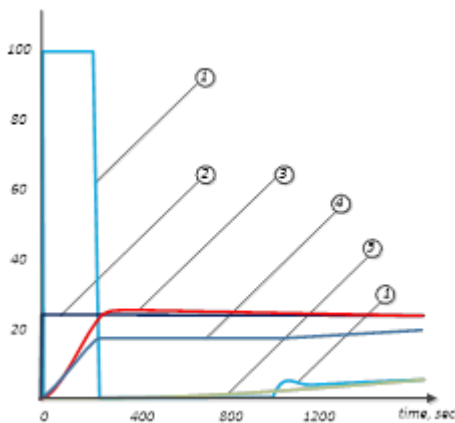


Рис. 7. Приклад перехідних процесів у системі при використанні в якості опорного алгоритму управління ПІД-регулятора з параметрами $P=9.8$, $I=11$, $D=0.1$, $N=150$

На рис. 6 використані такі позначення: а) підсистема програмної адаптації опорного алгоритму для дискретного режиму роботи котла («*Soft adaptation for discrete mode*»); б) підсистема приміщення («*ROOM*»); в) підсистема обліку теплових втрат («*Heat loses*»)

На рис. 7 побудовані такі криві: (1 – неквантована потужність роботи котла у відсотках від максимальної; 2 – уставка температури; 3 – температура у приміщенні; 4 – сумарна теплова витрата на нагрівання

приміщення; 5 – сумарні втрати тепла приміщенням).

Саме адаптаційна характеристика (рис. 8) є тим самим наочним і простим, з прикладної точки зору, представленням опорного алгоритму управління для потреб дискретного управління, який з легкістю дозволяє забезпечити відповідне регулювання за заданим (оптимальним) законом та найзручніше реалізується у серверній частині (рис. 9).

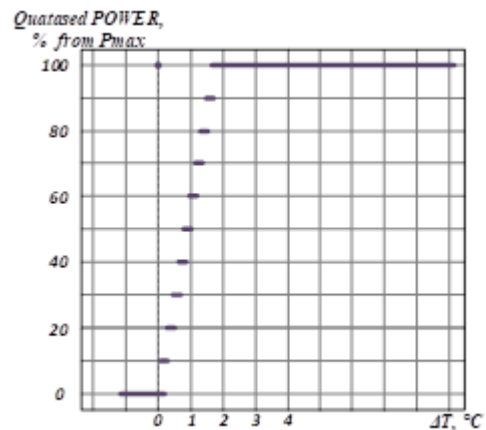


Рис. 8. Варіант адаптаційної характеристики дискретного режиму роботи котла при використанні у якості опорного алгоритму управління алгоритму ПІД-регулятора з параметрами $P=9.8$, $I=11$, $D=0.1$, $N=150$

```

1 function onMessageReceived(msg: any) {
2   var dT = msg.payload;
3   var P = 0;
4
5   if ( dT < 0.23 ) { P = 0; }
6   if ( dT >= 0.23 && dT < 0.47 ) { P = 1; }
7   if ( dT >= 0.47 && dT < 0.55 ) { P = 2; }
8   if ( dT >= 0.55 && dT < 0.73 ) { P = 3; }
9   if ( dT >= 0.73 && dT < 0.91 ) { P = 4; }
10  if ( dT >= 0.91 && dT < 1.12 ) { P = 5; }
11  if ( dT >= 1.12 && dT < 1.39 ) { P = 6; }
12  if ( dT >= 1.39 && dT < 1.56 ) { P = 7; }
13  if ( dT >= 1.56 && dT < 1.7 ) { P = 8; }
14  if ( dT >= 1.7 ) { P = 9; }
15
16  return {power: P};
17 }
    
```

Рис. 9. Варіант реалізації адаптаційної характеристики мовою програмування *JavaScript* у *Node-Red*

Наведена адаптаційна характеристика спочатку була розрахована задля забезпечення перехідних процесів виду, наведеного на рис. 7, та, по суті, подальше її використання звелось до ручного перенесення у *JavaScript*-код серверної частини системи управління (рис. 9).

Що ж до практичної складової роботи, то за результатами попередньо

проведеного моделювання можна заздалегідь спрогнозувати характер перехідних процесів у системі, оцінити всю специфіку технічних режимів роботи системи, а також її ключових елементів та, за необхідності, своєчасно скоригувати структуру алгоритму управління.

Мається на увазі, що використовуючи підхід, описаний у цій статті, можна звести всю роботу з проектування динаміки конкретної системи управління до наступного набору дій:

1-й крок – формалізуємо об'єкт управління за принципом «чорного ящика» (отримуємо узагальнену передаточну функцію) та задаємо загальну структуру системи управління (формуємо необхідну кількість зворотних зв'язків від об'єкта управління до керуючого пристрою). При цьому принцип технічної реалізації структури системи управління не впливає на кінцевий результат. Стаття написана за результатами проектування для системи управління, побудованої за «клієнт-серверним» принципом на основі загальної інформаційно-керуючої мережі, підключеної до екосистеми Інтернету речей (*IoT*).

2-й крок – розроблена на першому кроці система відповідної структури (кожен окремий канал управління, незалежно) переноситься до *MATLAB* та для кожного каналу обирається необхідний закон регулювання, здатний забезпечити необхідні значення всіх прямих показників якості всіх ключових перехідних процесів, а також забезпечити всі вимоги по грубості системи. Результатом повинні стати конкретні передаточні функції регуляторів по всіх каналах управління з конкретними коефіцієнтами та параметрами.

3-й крок – *MATLAB*-моделі каналів керування доповнюються блоками програмної адаптації опорних алгоритмів керування до дискретного режиму роботи виконавчих пристроїв об'єкта керування (за опорні алгоритми каналів керування приймаються ті, що були отримані на попередньому кроці) та розраховуються відповідні адаптаційні характеристики. Результатом

має стати повний набір адаптаційних характеристик по всіх каналах управління.

4-й крок – ручне перенесення отриманих адаптаційних характеристик у керуючу частину системи. Відповідні характеристики неявно вже містять у собі всю інформацію про структуру законів регулювання, здатних забезпечити необхідні прямі показники якості перехідних процесів по всіх каналах управління, а відповідно, і необхідну грубість усієї системи в цілому.

Щодо матеріалів, які виносилися як ілюстративні у цій статті, то вони були використані при реалізації на кількох реальних об'єктах та дозволили обґрунтувати, і тим самим забезпечити, для заданої системи управління відповідність наведеним нижче аспектам:

- використання ПІ або ПІД закону регулювання в системі управління опаленням з використанням теплового котла, здатного працювати тільки в дискретному режимі, забезпечує стійкий перехідний процес за температурою;

- показники якості перехідного процесу за температурою з використанням ПІ або ПІД закону регулювання в системі управління, реалізованій за архітектурою, описаною в статті, мають значення, що відповідають загальноприйнятим нормам, а саме: перерегулювання <1% та вкрай низька коливальність перехідного процесу, що наближає його (перехідний процес) до аперіодичного 2-го порядку. Аналогічне співвідношення між основними прямими показниками якості (перерегулювання – час перехідного процесу – коливальність) спостерігається під час використання контурів регулювання з передаточними функціями фільтрів Баттерворта 2-го порядку;

- найменші витрати газу для опалення приміщення, без втрати якісного перехідного процесу та стійкості, можна забезпечити з використанням пропорційно-інтегрального або пропорційно-інтегрально-диференціального законів регулювання зі слабкою диференціальною складовою (частки відсотків від інтегральної складової);

- отримання адаптаційної характеристики значно спрощує процес розгортання та налаштування алгоритму управління в серверній частині системи управління, що є суттєвим часовим бонусом при проектуванні бюджетних систем управління з високою якістю регулювання та відповідною надійністю.

Висновки

На основі моделі та методики, наведеної вище, було проведено низку аналітичних експериментів шляхом моделювання в середовищі *MATLAB Simulink*. У самій статті винесено лише ті результати, які безпосередньо ілюструють принципи, реалізовані при розробці моделі процесу нагрівання приміщення та управління ним з урахуванням теплових втрат. Також представлені результати, що ілюструють загальні принципи запропонованої методики зручного представлення адаптаційної характеристики для переведення опорного алгоритму управління до його представлення у дискретній реалізації для пристроїв, здатних працювати за схемою «On/Off».

Наведена у статті модель і методика отримання адаптаційної характеристики сама по собі ілюструє зручність архітектури системи управління виду «сервер – виконуючий пристрій зі зворотним зв'язком на основі загальної інформаційно-керуючої мережі». Важливим фактором, який обов'язково потрібно врахувати при проектуванні та реалізації, є використання протоколу, здатного забезпечити високий ступінь достовірності даних, що передаються. Під час розробки методу використовувався промисловий протокол *ModBus TCP*, який повністю задовольняє раніше описаним вимогам.

Практична апробація методики на основі результатів, наведених у матеріалах статті, доводить можливість прямого та прогнозованого переходу до управління реальними дискретними об'єктами, що функціонують за принципом «on – off», без втрати якості перехідних процесів та не потребує глибокої подальшої корекції.

Література

1. Urica T. et al. The Control Process of an On-off Controller. *2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)* : proceedings, Kouty nad Desnou, Czech Republic, 15–17 May 2019 / IEEE. Ostrava, 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/EPE.2019.8778003.
2. Faizollahzadeh S. et al. Modeling and comparison of fuzzy and on/off controller in a mushroom growing hall. *Measurement*. 2016. Vol. 90. P. 127–134.
3. Khera N., Kohli S. Comparison of Fuzzy and On/Off Controller for Winter Season Egg Hatching Incubator System. *2018 International Conference on Sustainable Energy, Electronics, and Computing Systems (SEEMS)* : proceedings, Greater Noida, India, 26–27 October 2018 / IEEE, 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/SEEMS.2018.8687365.
4. Nejati A., Soudjani S., Zamani M. Compositional abstraction-based synthesis for continuous-time stochastic hybrid systems. *European Journal of Control*. 2021. Vol. 57. P. 82–94. DOI: 10.1016/j.ejcon.2020.04.001.
5. Kučera E. et al. New Software Tool for Modeling and Control of Discrete-Event and Hybrid Systems Using Timed Interpreted Petri Nets. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, iss. 15. 5027.
6. Sheremet O. et al. Relay Control Systems with Discrete Time Equalizer. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)* : proceedings, Kremenchuk, Ukraine, 21–25 September 2020 / IEEE, 2020. P. 1–4. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240809.
7. Deatcu C., Freymann B., Pawletta T. PDEVS-based hybrid system simulation toolbox for MATLAB. *SpringSim '17: Spring Simulation Multi-Conference* : proceedings, Virginia Beach, VA, USA, 23–26 April 2017 / San Diego, 2017. P. 2:1-2:12.
8. Böhner F. D., Prado-Rubio O. A., Huusom J. K. Discrete-continuous dynamic simulation of plantwide batch process systems in MATLAB. *Chemical Engineering Research and Design*. 2020. Vol. 159. P. 66–77. DOI:10.1016/j.cherd.2020.03.030.

9. Uriča T., Simonová A. Simulation of an on-off Controller for Systems of Second Order with the Use of LabVIEW. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 192. P. 905–910.

10. Wang D., Ha M., Qiao J. Self-learning optimal regulation for discrete-time nonlinear systems under event-driven formulation. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2019. Vol. 65, no. 3. P. 1272–1279.

11. Kersting S., Buss M. Direct and indirect model reference adaptive control for multivariable piecewise affine systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2017. Vol. 62, no. 11. P. 5634–5649. DOI: 10.1109/TAC.2017.2690060.

12. Guidotti R. et al. Local rule-based explanations of black box decision systems. arXiv:1805.10820. 2018. 10 p.

13. Perera D. W. U., Winkler D., Skeie N. O. Multi-floor building heating models in MATLAB and Modelica environments. *Applied Energy*. 2016. Vol. 171. P. 46–57.

14. Utama Y. A. K., Hari Y. Design of PID disturbance observer for temperature control on room heating system. *2017 4th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI) : proceedings, Yogyakarta, Indonesia, 19–21 September 2017 / IEEE*. Piscataway, 2017. P. 1–6.

**Ноздренков В.С., Павлов А.В., Олексієнко Г.А., Журавльов О.Ю., Журавльов Ю.О.
ПРОГРАМНА АДАПТАЦІЯ ОПОРНОГО АЛГОРИТМУ ДЛЯ ДИСКРЕТНОГО РЕГУЛЮВАННЯ**

Запропоновано прикладну методіку швидкого переходу від заздалегідь оптимізованого опорного алгоритму управління до його дискретизованого (програмного) аналога для потреб дискретного управління об'єктами, які працюють за принципом on-off. Ця методіка може бути корисною при проектуванні та реалізації бюджетних систем автоматичного управління, зокрема систем побудованих на основі єдиної інформаційно-керуючої мережі за клієнт-серверним принципом. Застосування методіки передбачає ряд етапів, а саме: базова формалізація контурів регулювання та отримання оптимальних перехідних процесів за допомогою моделювання (у статті реалізовано за допомогою середовища MatLab Simulink), виявлення оптимального опорного алгоритму управління та його параметрів, побудова адаптаційної характеристики, soft-реалізація адаптаційної характеристики на рівні контролера.

Ключові слова: дискретні системи керування; релейні системи керування; on-off контролер; процес дискретного керування; метод адаптації.

Nozdrenkov V.S., Pavlov A.V., Oleksiienko G.A., Zhuravlov O.Y., Zhuravlov Y.O.

SOFT-ADAPTATION OF REFERENCE ALGORITHM FOR DISCRETE CONTROL

An applied technique for quickly transitioning from a pre-optimized reference control algorithm to its discretized (software) alternative for the needs of discrete control of objects operating on the “on-off” principle is proposed. This technique can effectively facilitate the design and implementation of low-cost automatic control systems, in particular, based on a unified information and control network organized by the client-server principle. The method application involves some stages, namely: basic formalization of the control circuits and obtaining of optimal transient processes through modeling (implemented using the MatLab Simulink environment in the current article), identifying the optimal reference control algorithm and its parameters, an adaptation characteristic constructing, software implementation of the adaptation characteristic on controller level.

Keywords: discrete control systems; relay control systems; on-off Controller for Systems; Control Process of an On-off Controller; adaptation method.