

**Баган Т.Г.**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Бунь В.П.**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Безуглий Р.О.**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ НА БАЗІ ТЕПЛОВОГО НАСОСУ

*У статті досліджено синтез системи опалення та кондиціонування на базі теплового насосу. Мета роботи полягає у створенні автоматичної системи керування мікрокліматом будинку, яка буде базуватися на альтернативних джерелах енергії, таких як теплонасосне обладнання, й адаптуватиметься під зміни зовнішніх факторів.*

*Система опалення та кондиціонування будівлі є однією з основних інженерних систем будівлі. Її задача – підтримка температурного режиму незалежно від пори року та погодних умов. Такі системи є досить гнучкими щодо наявності великої кількості варіантів комбінацій обладнання, залежно від поставленої мети та певної кількості коштів. Щодо опалювального сезону, то система опалення повинна працювати безперервно та за мінімальних витрат тепла забезпечувати нормальну температуру в усіх приміщеннях, а під час літнього сезону повинна забезпечувати комфортну температуру для перебування людей у визначеному приміщенні. У запропонованій системі як джерело тепла використовується тепловий насос. Його застосування дозволяє споживати екологічно чисту енергію. Тепловий насос качає теплову енергію з низькопотенційної джерела на потрібний рівень для споживача і дозволяє використовувати низькопотенційну енергію (з низькою температурою) як джерело тепла. Моделювання роботи теплового насосу й опалювального приміщення виконано у середовищі MatLAB за допомогою бібліотеки Simscape. Ця бібліотека має дуже багато елементів, завдяки яким можна створити різноманітні моделі реальних фізичних систем.*

*Для компенсування збурень і відпрацювання зміни завдання пропонується використовувати MPC-підхід. Для реалізації цього підходу були синтезовані АСК опалення та вентиляції. Внаслідок порівняння різних алгоритмів управління встановлено, що використання MPC-регуляторів надає переваги у відпрацюванні зміни заданої температури та мінімізації впливу зовнішніх збурень на кінцеву температуру повітря у кімнаті.*

**Ключові слова:** модель теплових процесів, адаптивна система, MPC-регулятор, система підтримки мікроклімату.

У сучасних містах постійно йде будівництво житлових комплексів, торгових центрів, офісних і складських приміщень, а отже, для всіх цих будівель необхідне впровадження автоматичних систем керування (АСК) інженерних систем будівлі. Оскільки зараз ці системи дуже необхідні, вони постійно вдосконалюються, переходячи від традиційних джерел енергії на альтернативні: теплонасосне обладнання, геліосистеми. Окрім джерел енергії, вдосконалюються також і способи передачі тепла від системи опалення до об'єкта. Якщо раніше це були трубні системи, то сьогодні

це тепла підлога, електрична підлога, фанкойли, радіатори опалення з більшим ККД, ніж у чавунних труб. Відповідно до цих тенденцій більш досконалими стають і елементи АСК. Виходять нові контролери, як вільнопрограмовані, так і конфігуровані, дедалі більше компаній виробляють різноманітні датчики під будь-яку задачу замовника. Саме тому АСК інженерних систем будівель стрімко розвиваються.

Існують багато факторів, які впливають на температуру всередині приміщення. Деякі з них, такі як інфільтрація зовнішнього повітря, сонячна

радіація, виробничі та побутові тепловиділення залишаються неврахованими і призводять до відхилень температурного режиму від заданого. Основним показником, необхідним для визначення комфортного температурного режиму, залишається температура всередині приміщення.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Головною задачею автоматичної системи керування на об'єкті є контроль та управління температурою приміщень всередині.

Нові тенденції дають можливість вдосконалення систем керування інженерним обладнанням приміщень. Так, замість традиційних ПД-алгоритмів регулювання зі зміною завдання за температурними графіками для керування тепловим режимом приміщень можуть використовуватися більш складні алгоритми автоматичного чи оптимального керування. Зокрема, сьогодні широко представлені роботи, у яких для керування мікрокліматом будівель пропонуються системи адаптивного й оптимального керування, системи на базі нечіткої логіки та навіть із використанням нейромережових і генетичних алгоритмів [1]. Останніми роками досить активно обговорюється підхід із використанням прогнозуючих моделей – MPC [2]. До переваг MPC-підходу можна віднести те, що оптимальний регулятор, який синтезований відповідно до цього підходу, забезпечує дотримання обмежень на керувані та вихідні змінні, а також встановлює компроміс між робастністю та якістю регулювання [3], проте, як і більшість оптимальних систем, він вимагає отримання якомога точної моделі об'єкта керування.

Адаптивні системи керування – це системи, які вирішують задачі керування в умовах невизначених змінних зовнішніх впливів або параметрів об'єкта керування шляхом автоматичного самоналаштування [4].

У цій системі необхідно підлаштовувати перехідний процес під компенсацію зовнішніх збурень у вигляді різкої зміни температури й автоматичної максимально швидкої зміни заданого значення залежно від обставин [5].

Для компенсування збурень і відпрацювання зміни завдання досить непогано підходить MPC-регулятор, оскільки він прогнозує зміну контрольованого значення та дає відповідний керуючий сигнал.

**Моделювання теплового насосу і опалювального приміщення.** У цій системі як джерело тепла для системи опалення використовується ґрунтовий тепловий насос (ТН), тому що, по-перше, це екологічно чиста енергія, по-друге, використовуючи мінімальну кількість електро-

енергії, він виробляє у 3–4 рази більше теплової енергії незалежно від пори року.

Для підвищення ефективності джерела опалення для впровадження на об'єкті був обраний тепловий насос із технологією «ґрунт – вода» [6]. Технологія теплового насосу «ґрунт – вода» суттєво відрізняється від інших, оскільки цей вид теплових насосів використовує енергію землі, у якій на глибині 15–20 метрів, незалежно від пори року, температура тримається у діапазоні  $+7 - +10^{\circ}\text{C}$ . Тобто такі теплові насоси є більш ефективним, але більш дорогим у вартості обладнання та монтажу. Крім того, використовуючи такий вид теплового насосу, забезпечується досить великий середньорічний коефіцієнт потужності – COP (*Coefficient of performance*) через те, що у ґрунті більш стабільна температура, ніж у повітрі. Взагалі COP є дуже важливим показником у роботі теплового насосу. Він визначає відношення виробленої теплової енергії до спожитої електричної. Тобто чим вищий COP, тим ефективніше працює тепловий насос і тим більше теплової енергії він зможе виробити з однакової кількості електричної.

До сучасних засобів енергомодельовання висувають жорсткі вимоги до точності математичних та імітаційних моделей, які використовуються при проектуванні систем керування. Серед факторів, які впливають на адекватність моделі, можна виділити: деталізацію моделей обмежуючих конструкцій та інженерних систем, зміну погодних умов, вплив сонячної активності та ін. [7].

Модель теплового насосу будемо створювати у середовищі MatLAB за допомогою пакету Simulink, а саме бібліотеки Simscape. Бібліотека Simscape дозволяє створювати моделі фізичних систем у середовищі Simulink. За допомогою цієї бібліотеки є можливість створювати моделі фізичних систем або компонентів на базі фізичних зв'язків, які можна використовувати разом із іншими блоками. Особливістю бібліотеки Simscape є те, що модель буде відповідати фізичній структурі реальної системи. Можна чітко побачити та відстежити проходження сигналу, оскільки всі елементи системи з'єднані разом і пов'язані один з одним [8].

Переважна більшість теплових насосів складається із чотирьох основних елементів: конденсатора, розширювального клапана, випарника та компресора. Внаслідок об'єднання цих складників отримаємо повноцінну модель теплового насосу, представлену на рис. 1.

Об'єктом для впровадження системи автоматизації є літня крита закрита тераса. Наявні 2 входи

до внутрішніх приміщень тераси: до основного залу тераси та до кухні. Для збільшення рівня освітленості вдень майже по всьому периметру встановлені пластикові вікна. Внутрішнє приміщення тераси розділене на 4 основні кімнати: основну залу, кухню, вбиральню та бойлерню.

Модель кімнати становить сукупність ланок, які моделюють процеси теплообміну в різних

середовищах, враховуючи теплообмін через стіни, стелю, вікна та двері.

На рис. 2 зображена загальна модель протікання теплових процесів у кімнаті. У ланках, які відповідають за теплообмін через стіни між кімнатами, відсутні елементи, оскільки вони реалізовані у блоках інших кімнат, тобто кухні, бойлерної та вбиральні. Також у цій моделі наявний блок

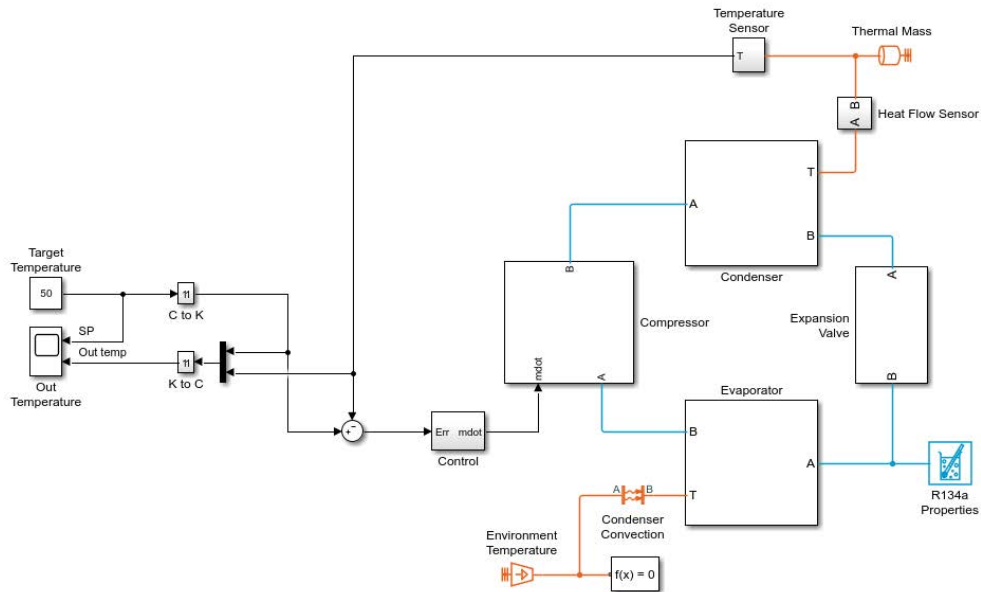


Рис. 1. Модель теплового насосу

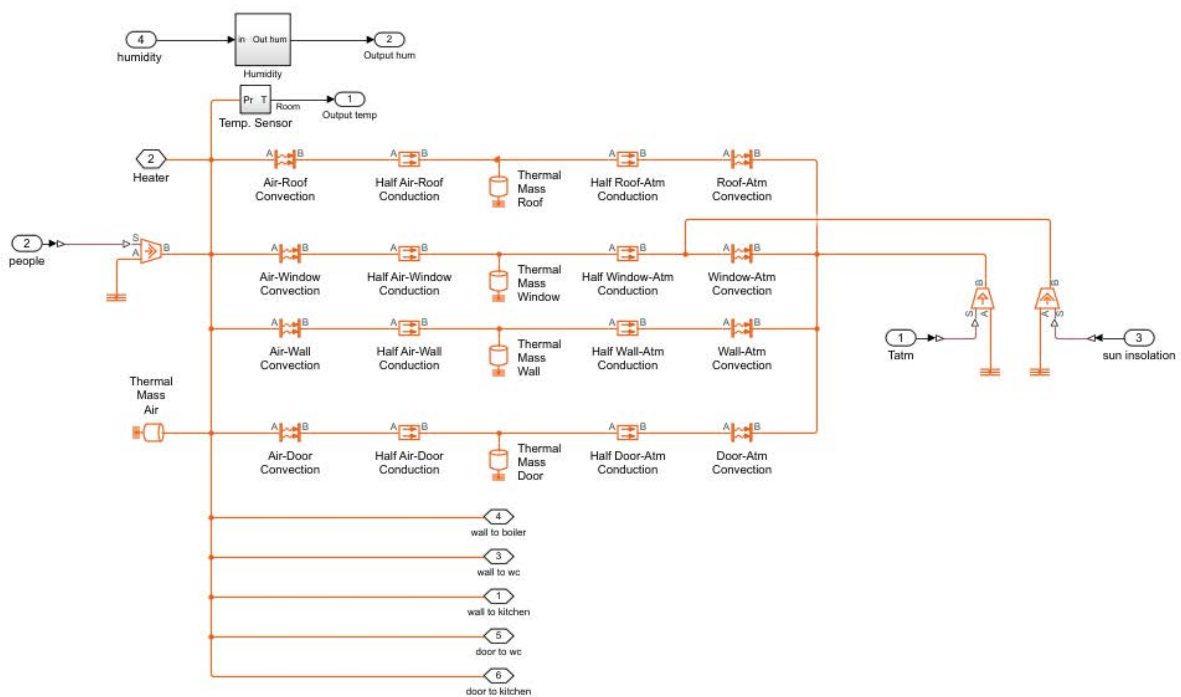


Рис. 2. Термодинамічна модель основної зали

*Thermal Mass*, який відповідає за об'єм повітря всередині кімнати та його здатність поглинати та зберігати тепло.

Маючи геометричні розміри окремих кімнат, отримуємо повноцінну модель закладу:

На рис. 3 зображена модель, яка описує протікання теплових процесів у закладі. Від нагрівачів подається лінія опалення на кожну кімнату, у котрих потім розділяється на ланки з тепловтратами. Також передбачені 2 блоки, які відповідають за надходження енергії від людей, у вигляді теплових втрат людини, а також від сонця у вигляді інсоляції. У правій частині зображена реалізація теплообміну між кімнатами через суміжні стіни та спільні двері. Також для правильного функціонування елементів бібліотеки Simscape додано блок *Solver Configuration*, що відповідає за проведення всіх операцій із тепловими лініями й елементами тепловтрат. Для розрахунку теплових втрат необхідна інформація про температуру навколишнього середовища. Через вхід *Tatm* подається сигнал до цієї підсистеми, який потім надходить на вхід до блоку кожної з кімнат. Окрім цього, у кожній кімнаті встановлено датчик тем-

ператури для контролю значень і передачі зворотного сигналу на контролер.

**Дослідження АСК з MPC-регулятором.** MPC-регулятор будемо реалізовувати для керування температурою в основному залі, оскільки саме у ньому збурення більші за інші кімнати, адже у цій кімнаті завжди перебуває більше людей, і внаслідок великої площі огорожувальних конструкцій тепловтрати мають вагомий вплив на зміну внутрішньої температури приміщення. Через велику кількість вікон і географічне положення закладу до основного залу надходить найбільше порівняно з іншими кімнатами теплової енергії у вигляді сонячної інсоляції.

Адаптивна система керування схожа на АСК з ПІ-регулятором, але відрізняється вміст підсистеми *Regulators* (Рис. 4). Замість регулятора, який відповідає за зміну температури в основному залі, стоїть MPC-регулятор. На вхід *ref* заходить сигнал від блоку, який задає значення температури у кімнаті. На вхід *to* надходить вихідне значення із блоку моделі, а саме значення температури основного залу. На вхід *md* заходить значення від вимірюваного збурення. У цьому випадку таким збуренням є температура навколишнього

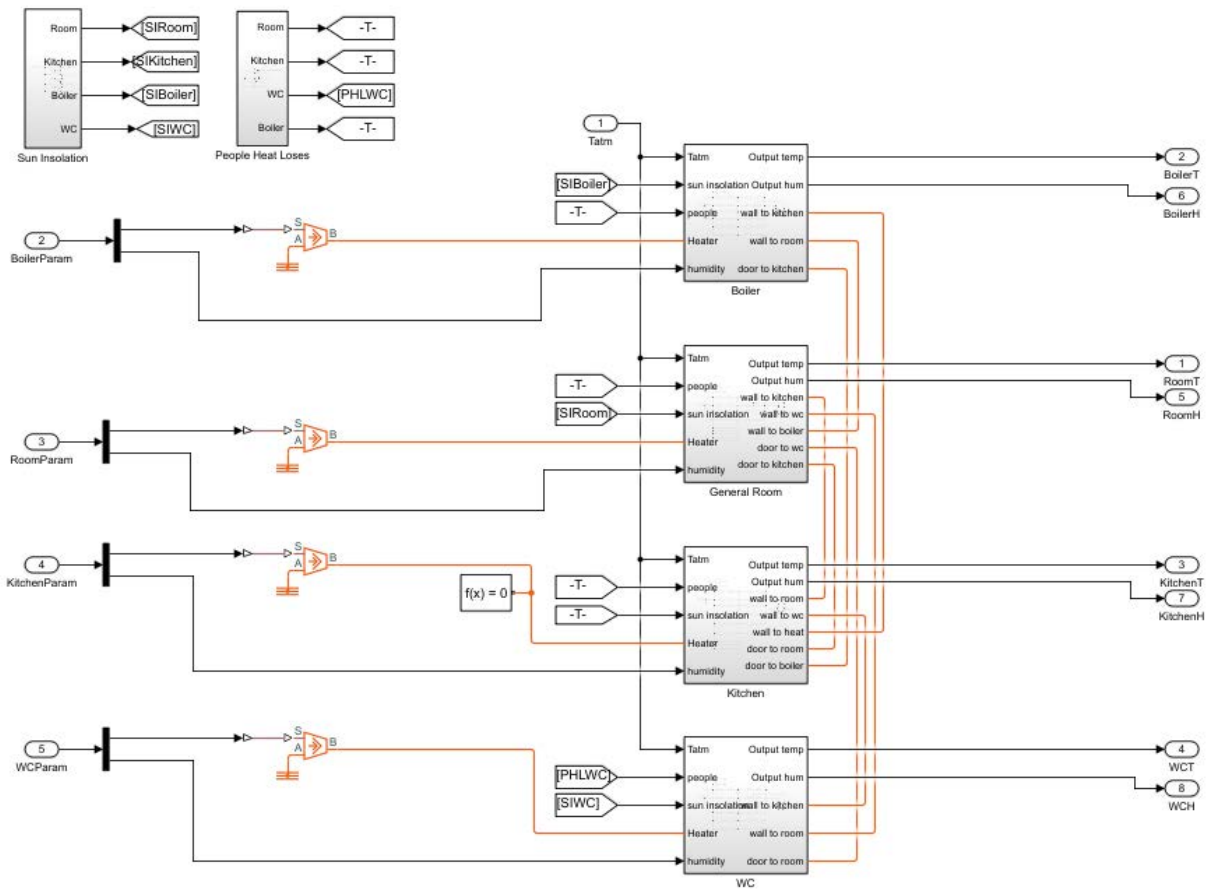


Рис. 3. Загальна модель теплових процесів закладу

середовища. Безпосередньо вихід  $mv$  блоку MPC-регулятора є керуючим сигналом і заходить на нагрівач для обмеження витрати теплоносія, який проходить через фанкойли.

**Порівняння отриманих результатів моделювання.** Провівши імітаційне моделювання стандартної АСК з ПІД-регулятором та адаптивної АСК, ми отримали результати у вигляді перехідних процесів (рис. 5).

Оцінюючи дані системи за прямими показниками якості (таблиця 1), можна зробити висновок, що перехідні процеси мають прямі показники якості майже однакові, однак у системи з MPC-регулятором відсутнє максимальне динамічне відхилення і перерегулювання, а також значно менше час перехідного процесу. Внаслідок чого можна вважати, що адаптивна система краща за систему з ПІД-регулятором.

Порівняємо графіки зміни температур у кімнатах по каналу «збурення – вихід» (рис. 6).

Отримаємо прямі показники якості по каналу «збурення – вихід».

Роблячи висновки з порівняння даних у таблиці 2, можемо сказати, що реакція обох систем на одичне збурення майже однакова, оскільки максимальне динамічне відхилення адаптивної системи менше, але час перехідного процесу трохи більший за АСК з ПІД-регулятором.

Порівняємо дві автоматизовані системи керування в умовах денної варіації температури протягом часового інтервалу в 48 годин.

За графіком, зображеним на рис. 7, можемо стверджувати, що зміна зовнішньої температури впливає на адаптивну систему значно менше, ніж на АСК з ПІД-регулятором. Можемо спостерігати менше початкове значення температури, яке сприяє економії теплової енергії, а також більш стабільну зміну температури під час мінімальної температури навколишнього середовища. Температура в основному залі у системи з ПІД-регулятором коливається у межах 23,5–26,8°C, тоді як в адаптивній системі – з 24,4°C до 25,6°C. Мінімізація відхилень на піках зміни температури зовні сприятиме економії теплової енергії, а в

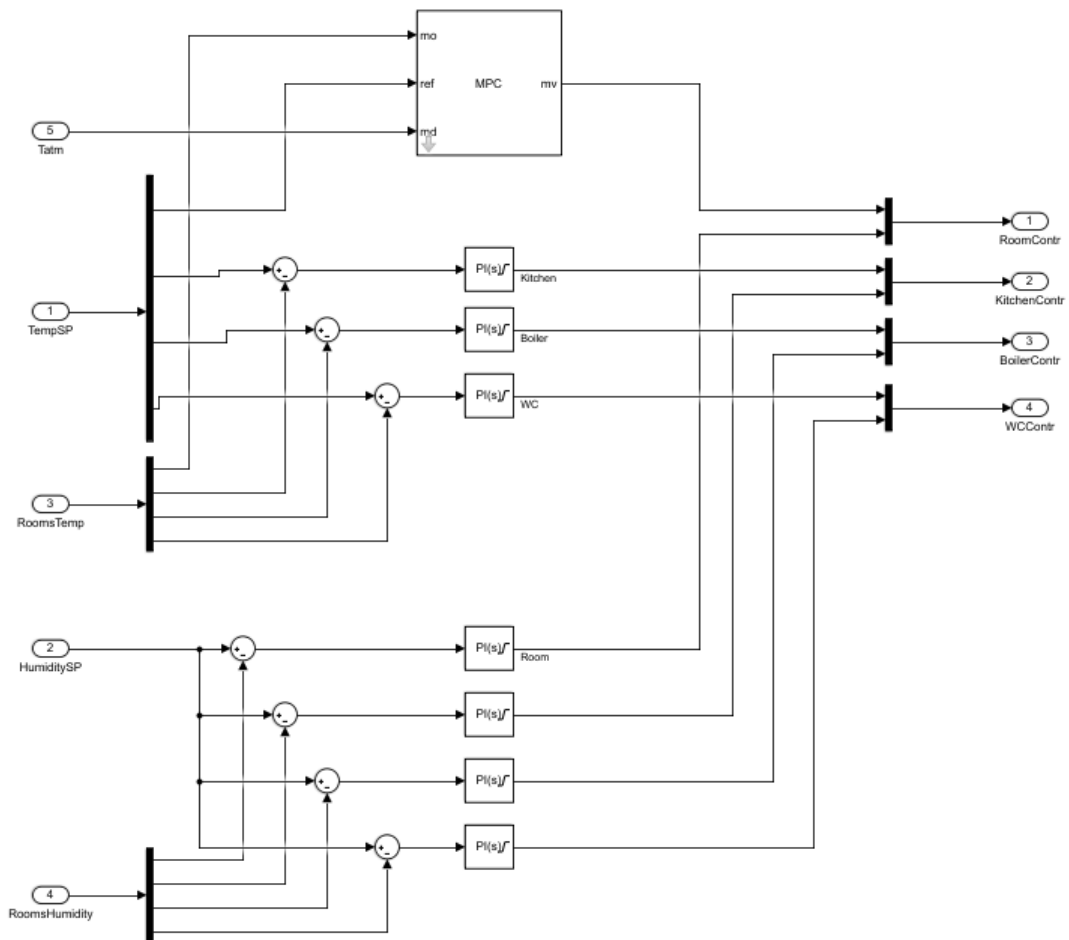


Рис. 4. Схема АСК з MPC-регулятором

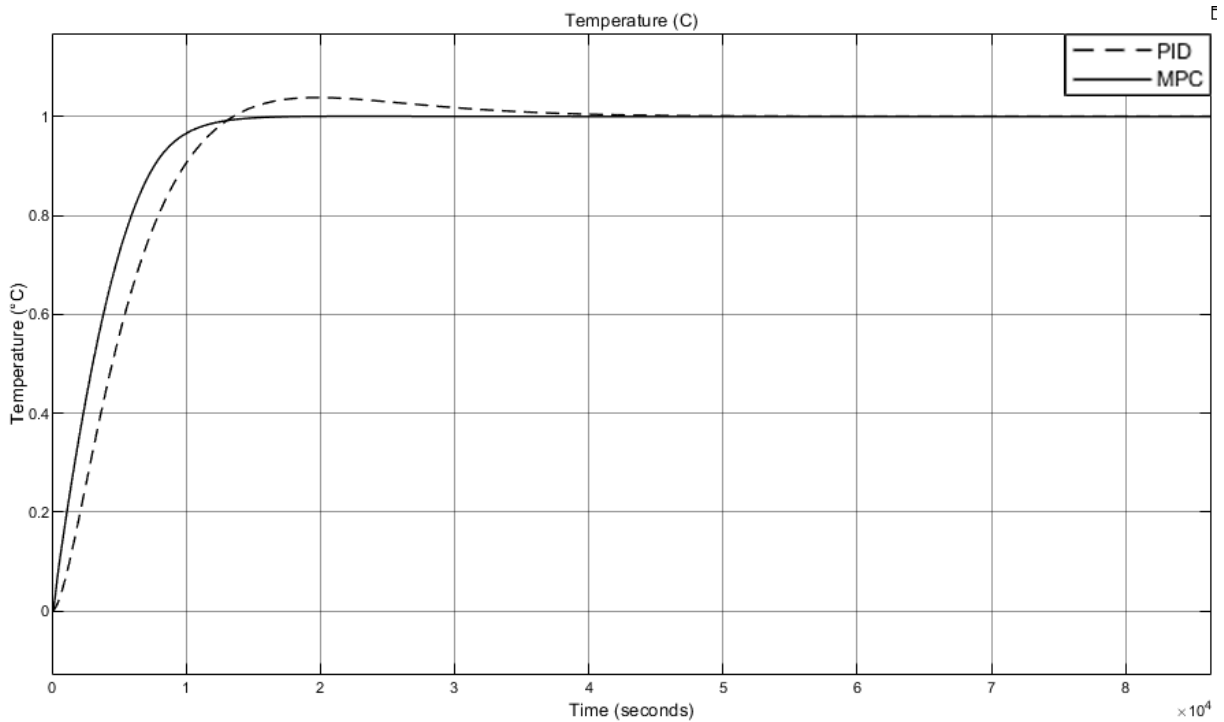


Рис. 5. Перехідні процеси систем по каналу «завдання – вихід»

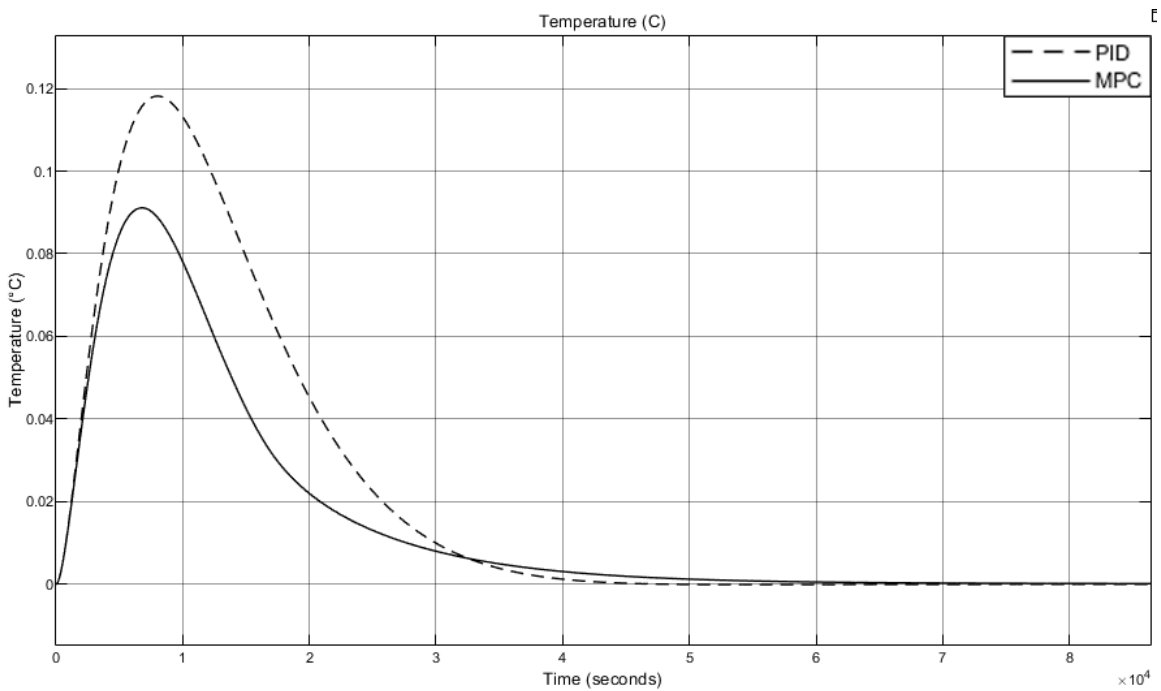


Рис. 6. Перехідні процеси систем по каналу «збурення – вихід»

Таблиця 1

Прямі показники якості по каналу «завдання – вихід»

	$\Delta y$	$\sigma, \%$	$t_{\text{пн}}, \text{C}$	$\Psi$	$y_{\text{cm}}$
Система з ПІ-регулятором	0.05	4	19844	1	0
Система з MPC-регулятором	0	0	9120	1	0

Прямі показники якості по каналу «збурення – вихід»

	$\Delta y$	$\sigma, \%$	$t_{\text{шп}}, \text{C}$	$\psi$	$y_{\text{cm}}$
Система з ПІ-регулятором	0.118	0	32829	1	0
Система з МРС-регулятором	0.0911	0	33067	1	0

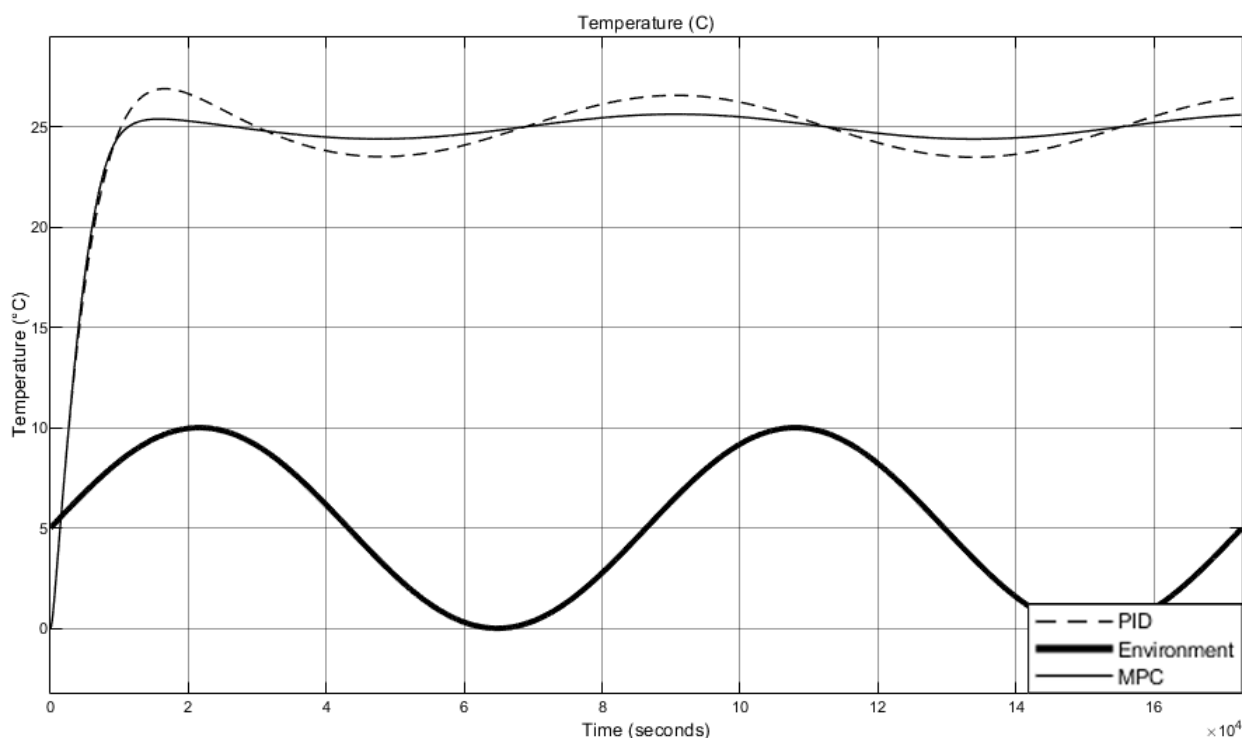


Рис. 7. Перехідні процеси систем в умовах денної варіації температури навколишнього середовища

наслідку максимізації економії бюджету, витраченого на опалення, за рахунок використання альтернативних джерел енергії й адаптивної системи керування.

**Висновки.** У статті розглянуті процеси опалення та кондиціонування у системах із використанням теплового насосу. Була створена його модель, яка описує рух теплової енергії всередині кімнат. Запропонована розробка адаптивної системи керування з МРС-регулятором для мініміза-

ції стороннього впливу на температуру основного залу. Синтез цієї АСК та результатів досліджень показав, що система з МРС-регулятором дає кращі результати роботи як у стаціонарному режимі, так і за умов варіації зовнішньої температури. Таким чином, використання МРС-регулятора у цій системі надало значні переваги у відпрацьованні зміни заданої температури та мінімізації впливу зовнішніх збурень на кінцеву температуру повітря у кімнаті.

#### Список літератури:

1. Dounis A.I., Caraiscos C. Advanced control system engineering for energy and comfort management in a building environment: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* № 13 (7). 2009. P. 1246–1261.
2. Марьясин О.Ю., Колодкина А.С. Управление тепловым режимом зданий с использованием прогнозирующих моделей. *Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. технические науки.* 2017. № 1 (53). С. 122–132.
3. Stepanets O. Mariiash Y. Model Predictive Control Toolbox Design for Nonstationary Process. *KPI Science News.* 2021. P. 42–49.
4. Morato M.M. et al., Model predictive control design for linear parameter varying systems: A survey. *Ann. Rev. Control.* Vol. 49. 2020. P. 64–80.
5. Application of heat pumps in the design of heating and conditioning systems / T. Bahan, V. Boun, R. Bezuhlyj. *Актуальные научные исследования в современном мире.* 2020. № 4 (60). С. 13–16.
6. Мокляк В.Ф. Теплонасосні установки в харчовій та інших галузях. Київ, 2015. 33 с.

7. Стрижак П.А., Морозов М.Н. Математическое моделирование теплового режима здания с учетом инсоляционных теплопоступлений. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2015. Т. 326. № 8. С. 36–46.

8. Dynamic modeling of temperature and humidity for greenhouse using matlab-simulink environment / Yau J., JianWei J., Wang H., Eniola O., Ibitoye F.P. *Journal of Scientific and Engineering Research*. 2020. № 7 (7). P. 159–169.

#### **Bahan T.H., Boun V.P., Bezuhlyj R.O. ADAPTIVE MICROCLIMATE CONTROL SYSTEM BASED ON HEAT PUMP**

*The article investigates the synthesis of a heating and air conditioning system based on a heat pump. The aim of the work is creating an automatic control system of the microclimate of the house, which will be based on alternative energy sources, such as heat pump equipment and will adapt to changes in external factors.*

*The heating and air conditioning system of the building is one of the main engineering systems of the building. Its task is to maintain the temperature regardless of the season and weather conditions. Such systems are quite flexible in terms of the availability of a large number of equipment combinations, depending on the goal and a certain amount of money. Regarding the heating season, the heating system must work smoothly and at a minimum heat consumption to ensure a normal temperature in all rooms and during the summer season should provide a comfortable temperature for people to stay in a particular room. The proposed system uses a heat pump as a heat source. Its use allows you to consume environmentally friendly energy. The heat pump pumps heat energy from a low-potential source to the desired level for the consumer and allows the use of low-potential energy (low temperature) as a heat source. The simulation of the heat pump and heating room was performed in the MatLAB environment using the Simscape library. This library has many elements that allow you to create a variety of models of real physical systems.*

*It is recommended to use the MPC approach to compensate for disturbances and work out the change of the task. To implement this approach, ASCs for heating and ventilation were synthesized. As a result of comparison of different control algorithms it is established that the use of MPC-regulators provides advantages in working out the change of the set temperature and minimizing the influence of external perturbations on the final air temperature in the room.*

**Key words:** *model of thermal processes, adaptive system, MPC-regulator, microclimate support system.*