

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»

Бунке О.С.

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

Надєляєв К.О.

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

ПРЕДИКТИВНЕ КЕРУВАННЯ В СИСТЕМАХ РЕГУЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ

У статті досліджено синтез системи підтримки мікроклімату з використанням предиктивного керування. В якості об'єкта керування обрано готельний номер. Для підтримки мікроклімату в ньому використовується припливно-витяжна система типу чилер-фанкойл з каналними внутрішніми блоками або фанкойлами. Використання модельно-прогнозуючого керування (МРС) в системах підтримки мікроклімату дозволяє отримати декілька важливих можливостей. МРС може адаптуватися до змін зовнішніх умов та внутрішніх параметрів системи мікроклімату, таких як температура, вологість, швидкість потоку повітря тощо. МРС може враховувати обмеження на витрату енергії та оптимізувати керування системами підтримки мікроклімату для забезпечення комфортних умов та економії енергії. Системи підтримки мікроклімату мають різні зони, такі як готельні номери, технологічні приміщення, нежитлові зони тощо. МРС може керувати кожною зоною окремо та оптимізувати умови в кожній з них. До того ж такий регулятор може прогнозувати та керувати температурними коливаннями, запобігаючи перегріву або охолодженню приміщень та забезпечуючи оптимальний комфорт. МРС може враховувати індивідуальні вимоги користувачів щодо комфорту, забезпечуючи персоналізований підхід до керування мікрокліматом. Завдяки оптимізації керування та забезпеченню ефективної роботи систем мікроклімату, МРС може допомогти знизити витрати на обслуговування та підтримку систем.

Моделювання роботи системи з МРС-регулятором виконано в середовищі MatLAB. В результаті порівняння різних алгоритмів керування встановлено, що використання МРС-регуляторів надає переваги у відпрацюванні зміни заданої температури на кінцеву температуру повітря в кімнаті.

В цілому, використання МРС в системах підтримки мікроклімату дозволяє досягти більшого рівня комфорту, ефективності та енергоефективності порівняно з традиційними методами керування.

Ключові слова: предиктивне керування, система підтримки мікроклімату, налаштування МРС-регулятора.

Постановка проблеми. Мікроклімат приміщення – це набір параметрів, які впливають на здоров'я та комфорт людей, які в ньому перебувають. Зазвичай до таких параметрів відносяться: температура, вологість та якість повітря. Для забезпечення необхідного стану повітря в приміщенні використовуються системи вентиляції, які представляють собою комплекс обладнання та установок, організованих для забезпечення

ефективного повітрообміну в робочій зоні приміщення. Ці системи включають в себе як обладнання для очищення повітря від пилу та інших домішок (включаючи повітропроводи), так і пристрої для припливу та витяжки повітря.

В якості прикладу приміщення розглянемо готельний номер. Кондиціонування повітря в готельних номерах може виконуватись наступними способами і системами: місцеві

спліт-системи, мультизональні спліт-системи, VRV/VRF системи або системи чилер-фанкойл.

Спліт-системи є найпростішими в монтажі та управлінні, однак вони мають недоліки в дизайні і обмежені тим, що до одного зовнішнього блоку може підключатися тільки один внутрішній блок, а також малі відстані від зовнішнім та внутрішнім блоком.

Мультизональні системи кондиціонування є покращеним варіантом простих спліт-систем. В цьому випадку до одного зовнішнього блоку підключається кілька внутрішніх, а довжини трас – більші.

VRV/VRF системи можуть підключати до 64 внутрішніх блоків до одного зовнішнього, є великий вибір різних внутрішніх блоків, довжини трас сягають кілометрів. Принцип їх роботи такий: зовнішній блок з'єднується з внутрішніми блоками через фреонові магістралі. Компресор, що розташований у зовнішньому блоці системи VRF, стискає фреон, який подається туди у пароподібному стані. Після цього стиснутий охолоджений агент подається в теплообмінник, який може бути охолоджений повітрям або водою. Вентилятор обдуває теплообмінник, охолоджуючи фреон до рідкого стану. Далі охолоджений агент подається в розгалужувач-рефнет, де він розподіляється фреоновими магістралями до внутрішніх блоків системи. Внутрішні блоки обладнані дросельними клапанами для регулювання кількості фреону в поточний період. Потім охолоджений агент подається в випарник, де він кипить і охолоджує повітря, що відбирається з обслуговуваного приміщення. На завершення цього процесу, фреон направляється в компресор для подальшого циклу.

Система чилер-фанкойл має кращі характеристики, адже потужності одного чилера можуть бути більшими, довжини трас обмежені тільки використовуваними насосами, також є великий вибір внутрішніх блоків. У системі кондиціонування чилер-фанкойл особливістю та основною відмінністю від інших кліматичних систем є використання води для охолодження повітря замість фреону, що характерно для інших систем кондиціонування. Ця система використовує чилер як холодильний апарат, який охолоджує воду. Чилер використовує воду у випарнику для виконання процесу охолодження, чим суттєво відрізняється від звичайного фреонового кондиціонера.

В готельних номерах в основному використовують систему типу чилер-фанкойл з каналними внутрішніми блоками або фанкойлами. В менших готелях використовують VRV/VRF, а для готелів

побільше використовуються чилери. Канальний фанкойл чи внутрішній блок в основному розташовують в підшивній стелі в коридорі відразу після входу в номер. Витяжна решітка розташовується біля входу зі стелі, а припливна решітка розташовується в стелі кімнати або зі стіни в кімнату.

Вибір саме такої комбінації обумовлений рядом причин, а саме:

- наявність двох каналів (припливного та витяжного) дає можливість більш точного регулювання параметрів приміщення (температури, вологості тощо);
- необхідність підтримувати належну якість повітря та виводити застоєне повітря з приміщення;
- завдяки системі чилер-фанкойл немає потреби у зовнішньому блоці. Також враховуючи те, що в готелі велика кількість номерів, це знижує вартість системи.

Система регулювання мікроклімату готельного номера виконує наступні функції: інформаційні, регулювання та захисту.

Інформаційні функції дозволяють отримувати дані з датчиків та виконувати взаємодію між різними рівнями АСК ТП. Функції регулювання призначені для безперервного керування відповідними параметрами. Захисні функції виконують захист системи під час нештатних ситуацій та аварій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основною метою подібних автоматичних систем керування є контроль та регулювання температури в приміщеннях. Останні тенденції сприяють удосконаленню систем керування інженерним обладнанням приміщень. Замість традиційних ПД-алгоритмів, які використовуються для регулювання за температурним графіком, в керуванні тепловим режимом приміщень можуть застосовуватися складніші алгоритми автоматичного чи оптимального керування. На сьогоднішній день досить часто розглядаються роботи, де для керування мікрокліматом будівель пропонуються системи адаптивного та оптимального керування, системи на основі нечіткої логіки, а також системи, що використовують нейромережеві та генетичні алгоритми [1]. В останні роки активно обговорюється підхід, що використовує прогнозуючі (предиктивні) моделі – MPC (від англ. *Model predictive control*) [2, 3].

Побудова MPC-регулятора з функціоналом урахування обмежень на вхідні сигнали може пропонуватися для нестационарного об'єкту керування, для якого використання класичних методів управління ускладнене [4].

Використання MPC-регулятора надає значні переваги при відпрацюванні зміни уставки та мінімізації впливу зовнішніх збурень на кінцевий параметр [5].

Мета роботи полягає в створенні автоматизованої системи керування мікрокліматом готельного номера з використанням технології прогнозування керування. Така система дозволяє ефективно застосовувати наявні ресурси, використовуючи їх у найбільш необхідний час.

Виклад основного матеріалу. Принцип роботи предиктивного керування. Предиктивне керування – це метод оптимального керування, у якому розраховані керуючі дії мінімізують функцію витрат для обмеженої динамічної системи на кінцевому горизонті подій, що поступово зменшується. На кожному кроці часу MPC-регулятор отримує або оцінює поточний стан системи. Потім він розраховує послідовність керуючих дій, яка мінімізує витрати шляхом вирішення задачі обмеженої оптимізації, що залежить від поточного стану системи. Далі регулятор застосовує лише першу обчислену керуючу дію, не враховуючи наступні. На наступному часовому проміжку процес повторюється.

MPC використовує модель процесу, щоб зробити прогноз щодо його майбутньої поведінки. Він також використовує оптимізатор, який гарантує, що прогнозований майбутній вихід відповідає встановленій уставці. Функція вартості обривається згідно формули:

$$J = \sum_{i=1}^p w_e e_{k+i}^2 + \sum_{i=0}^{p-1} w_{\Delta u} \Delta u_{k+i}^2$$

MPC-регулятор повинен знайти найкращий прогнозований шлях, який є найближчим до уставки. Отже, він моделює кілька подібних сценаріїв майбутнього. Однак він не виконує ці симуляції у випадковому порядку, а робить це систематично, за встановленим алгоритмом, за допомогою оптимізатора. Вирішуючи задачу оптимізації, MPC-регулятор намагається мінімізувати розбаланс e між уставкою та прогнозованою траєкторією. Він також намагається мінімізувати зміну керуючого впливу від одного кроку до іншого. Функція J цієї оптимізаційної задачі включає обидва ці фактори та представлена як зважена квадратна сума прогнозованих помилок і приростів керуючого впливу.

На довільному кроці MPC-регулятор вирішує задачу оптимізації на горизонті прогнозування. Прогнозована траєкторія з найменшим J дає оптимальне рішення, а отже, визначає оптимальну послідовність впливів, яка максимально

наблизить вихідну величину до значення уставки. На поточному кроці часу регулятор застосовує до автомобіля лише перший розрахунок цієї оптимальної послідовності та ігнорує решту. Виходячи з застосованого керування маємо певне значення вихідної величини. На наступному кроці регулятор отримує нове вимірювання параметра. Тепер горизонт прогнозування зміщується вперед на один часовий проміжок, і регулятор повторює той самий цикл обчислень, щоб знайти оптимальне керування для наступного часового проміжку.

Налаштування MPC-регулятора. Даний регулятор має наступні параметри:

- Частота дискретизації;
- Горизонт прогнозування;
- Контрольний горизонт;
- Обмеження;
- Пріоритетність.

Частота дискретизації (T_s) визначає швидкість, з якою регулятор виконує алгоритм керування. Важливо правильно підібрати даний параметр, оскільки при занадто великому значенні регулятор не встигне зреагувати на зовнішнє збурення. І, навпаки, при занадто малому значенні регулятор буде робити велику кількість обчислень, що перевантажить контролер та вплине на його коректну роботу.

Рекомендується встановлювати даний параметр по наступній формулі:

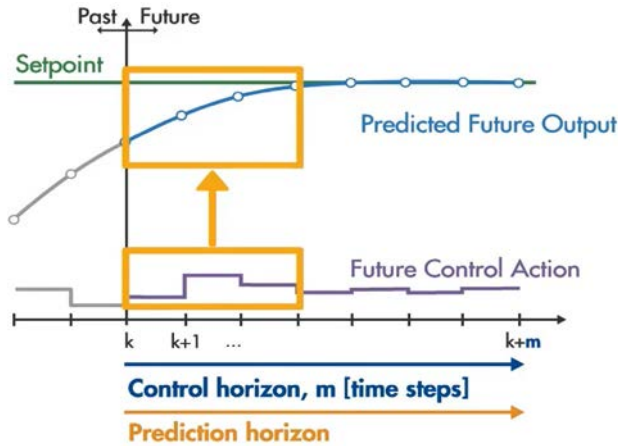
$$\frac{T_r}{20} \leq T_s \leq \frac{T_r}{10},$$

де T_r – час наростання.

Горизонт прогнозування визначає кількість прогнозованих майбутніх кроків. При занадто малому значенні регулятор не встигне зреагувати на зовнішнє збурення. Але при занадто великому значенні регулятор стане занадто повільним та негнучким, оскільки при будь-якому збуренні йому знадобиться відкинути значну частину обриваного, що є неефективним використанням потужностей регулятора. Рекомендація щодо вибору горизонту прогнозування полягає в тому, щоб мати від 20 до 30 вибірок, що охоплюють час регулювання системи.

Контрольний горизонт m – це кількість кроків, які потрібно оптимізувати на контрольному інтервалі k . Кожен контрольний хід у контрольному горизонті можна розглядати як вільну змінну, яку має обчислити оптимізатор. Відповідно при занадто малому значенні параметра ми отримаємо неточний прогнозований результат. В той же час, при занадто великому значенні, буде значне навантаження на регулятор. Варто зауважити, що зазвичай лише перші кілька обчислень мають

значний вплив на прогнозовану вихідну поведінку. Хорошим емпіричним правилом для вибору контрольного горизонту є встановлення його на 10–20% від горизонту прогнозування та наявність мінімум 2–3 кроків (рис. 1).



Predicted Future Output – прогнозований майбутній вихід;
Future Control Action – прогнозовані майбутні кроки регулювання.

Рис. 1. Контрольний горизонт

MPC може включати обмеження на вхідні дані, швидкість їх зміни входів і вихідні дані. Це можуть бути як м'які, так і жорсткі обмеження. Жорсткі обмеження не можна порушити, тоді як м'які обмеження можна. Рекомендується встановити вихідні обмеження як м'які та уникати жорстких обмежень одночасно на вхідні дані і на швидкість їх зміни [7].

Пріоритетність визначає, які вхідні дані будуть більш важливими при регулюванні. Це реалізується за допомогою коефіцієнтів, на які домножуються вхідні або вихідні дані. Налаштування цього параметру індивідуально для кожної окремої системи.

Дослідження АСК з MPC-регулятором. Налаштування MPC-регулятора будемо здійснювати з урахуванням математичної моделі водяного калорифера та приміщення [6]. Склавши рівняння теплового балансу для різних складових маємо систему з трьома диференційними рівняннями:

$$\begin{cases} G_W c_W (\theta_{W0} - \theta_W) - \alpha_0 F_0 (\theta_W - \theta_M) = M_W c_W \frac{d\theta_W}{dt} \\ \alpha_0 F_0 (\theta_W - \theta_M) - \alpha_1 F_1 (\theta_M - \theta_A) = M_M c_M \frac{d\theta_M}{dt} \\ G_A c_A (\theta_{A0} - \theta_A) - \alpha_1 F_1 (\theta_M - \theta_A) = M_A c_A \frac{d\theta_A}{dt} \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} \frac{d\theta_W}{dt} = \frac{G_W c_W (\theta_{W0} - \theta_W) - \alpha_0 F_0 (\theta_W - \theta_M)}{M_W c_W} \\ \frac{d\theta_M}{dt} = \frac{\alpha_0 F_0 (\theta_W - \theta_M) - \alpha_1 F_1 (\theta_M - \theta_A)}{M_M c_M} \\ \frac{d\theta_A}{dt} = \frac{G_A c_A (\theta_{A0} - \theta_A) - \alpha_1 F_1 (\theta_M - \theta_A)}{M_A c_A} \end{cases}$$

де

- G_W – витрата води;
- $\theta_{W0}(t), \theta_W$ – температура теплоносія на вході та виході калорифера відповідно;
- $\theta_M(t)$ – усереднена температура трубок калорифера (калорифер містить n трубок довжиною H);
- $G_A(t)$ – витрата повітря, що надходить до теплоносія;
- $\theta_{A0}(t), \theta_A(t)$ – вхідна та вихідна температура повітря відповідно;
- c_A – теплоємність повітря;
- M_A – маса повітря в об'ємі калорифера.
- c_W – теплоємність теплоносія;
- α_0 – коефіцієнт тепловіддачі між теплоносієм та внутрішньою поверхнею труб;
- F_0 – площа внутрішньої поверхні усіх труб, $F_0 = nLd_0$;
- d_0 – внутрішній діаметр труб;
- M_W – маса теплоносія в усіх трубах калорифера.

Після лінеаризації та отримання матриці коефіцієнтів отримуємо модель системи в просторі станів.

MPC-регулятор змодельовано у Matlab в пакеті для формалізації прогнозуючої моделі Designer App (рис. 2).

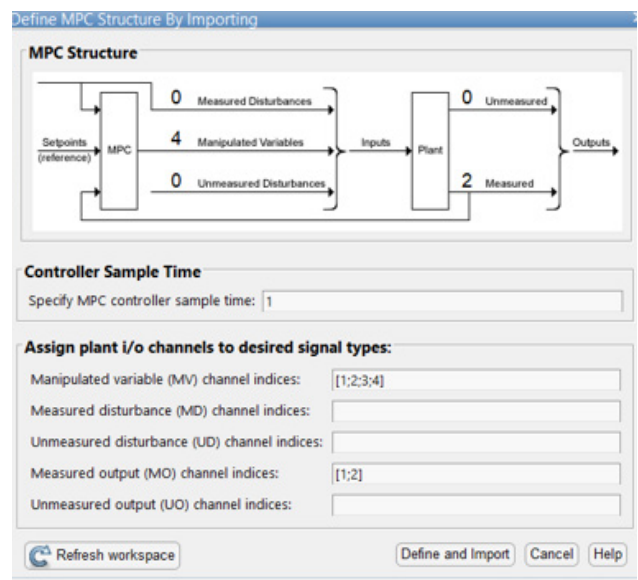


Рис. 2. Діалогове вікно Define MPC Structure By Importing

В результаті було отримано сценарій моделювання (рис. 3), прогнозуючий та контрольний

горизонти (рис. 4), встановлено обмеження параметрів (рис. 5) та налаштовані вагові коефіцієнти регулятора (рис. 6).

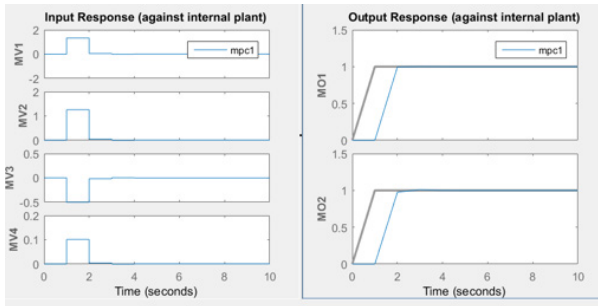


Рис. 3. Сценарій моделювання MPC

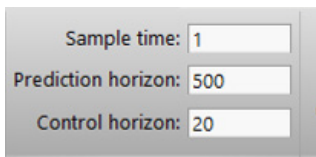


Рис. 4. Налаштування горизонтів

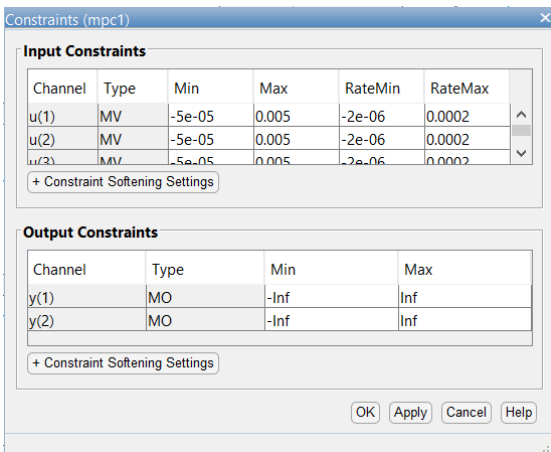


Рис. 5. Встановлення обмежень параметрів

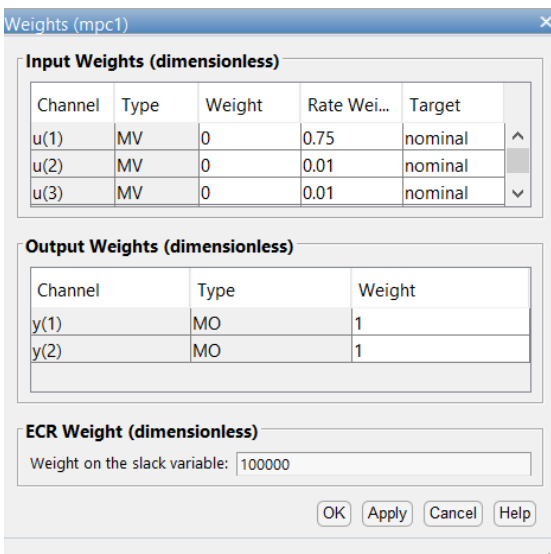


Рис. 6. Налаштування вагових коефіцієнтів

Після цього експортуємо налаштований MPC-регулятор у Simulink (рис. 7) та проведемо дослідження його роботи в системі підтримки заданої температури.

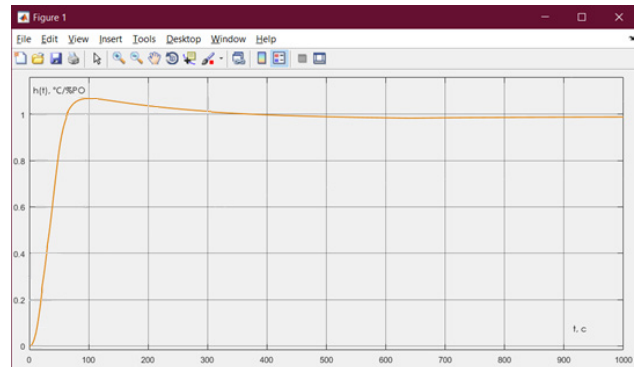


Рис. 7. Перехідний процес по каналу завдання-вихід із використанням MPC-регулятора

Перехідний процес по каналу завдання-вихід у системі з MPC-регулятором має більш плавний перехідний процес за рахунок зменшення динамічної похибки та перерегулювання.

За результатами досліджень можна зробити висновки, що модельно-прогнозуюче керування (MPC) може забезпечити кращі результати порівняно з традиційним ПД-керуванням у випадку, коли необхідно керувати багатьма об'єктами з великою кількістю змінних та обмежень. MPC може бути ефективнішим завдяки своїм оптимізаційним можливостям. Також у випадку коли важливо враховувати обмеження під час керування, наприклад, обмеження на витрату енергії або на вихідні сигнали, то MPC може бути кращим вибором, оскільки він може враховувати ці обмеження під час оптимізації керування.

Крім того, якщо важливо мати точні прогнози майбутнього стану системи для ефективного керування, то MPC може бути оптимальним, оскільки він базується на математичній моделі системи та прогнозує її стан у майбутньому.

Отже, у подібних ситуаціях MPC може забезпечити кращу продуктивність та ефективність у порівнянні з традиційним ПД-керуванням.

Висновки. Запропоновано розробку системи керування з MPC-регулятором. Синтез даної АСК та проведення досліджень, показали, що система з MPC-регулятором дає кращі результати роботи як в стаціонарному режимі, так і при умовах змін збурень і параметрів системи. MPC добре підходить для керування складними динамічними системами з багатьма змінними та обмеженнями, такими як системи підтримки мікроклімату. Він може ефективно керувати цими системами,

враховуючи їх складну динаміку та обмеження. Предиктивний регулятор може легко адаптуватися до змін у системі та середовищі завдяки своїм прогнозним можливостям. Це робить його ефективним для застосування у змінних умовах роботи системи. Інструментарій MPC може використовувати оптимізаційні алгоритми для пошуку найкращого керування в кожен момент

часу, що дозволяє підтримувати оптимальний режим роботи системи навіть у змінних умовах. MPC може легко враховувати обмеження, такі як обмеження на витрату енергії або обмеження на вихідні сигнали, під час оптимізації керування. В цілому, MPC є потужним інструментом для оптимізації керування складними технічними системами з урахуванням їх динаміки та обмежень.

Список літератури:

1. Dounis A.I. Advanced control system engineering for energy and comfort management in a building environment / A.I. Dounis, C.Caraiscos // A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 13(7), 2009. P. 1246–1261.
2. Alhajeri M., Soroush M. Tuning guidelines for model-predictive control. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2020, 59, 10, P. 4177–4191.
3. Morato M.M. Model predictive control design for linear parameter varying systems // A survey. *Ann. Rev. Control*, vol. 49. 2020. P. 64–80.
4. Stepanets O. Model Predictive Control Toolbox Design for Nonstationary Process / Y. Mariash, O. Stepanets // *KPI Science News*. № 1. 2021. P. 42–49.
5. Баган Т.Г. Адаптивна система керування мікроклімату на базі теплового насосу / Т.Г. Баган, В.П. Бунь, Р.О. Безуглий // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. Том 33 (72), № 1. 2022. С. 66–73.
6. Голінко І. М., Галицька І.Є. Динамічна модель теплообміну для водяного калорифера у просторі станів // *Інформаційні системи, механіка та керування*. Київ – 2016. № 15. С. 83–92.
7. Баган Т.Г. Оптимізації процесу керування промисловими об'єктами методом моделювання на основі горизонту передбачення / Т.Г. Баган, К.О. Наделяєв // *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики*. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. Т. 2. С. 72–73.

Bahan T.H., Boun V.P., Bunke O.S., Nadeliaev K.O. PREDICTIVE CONTROL IN CONTROL SYSTEMS OF MICROCLIMATE

The article explores the synthesis of a microclimate support system using predictive control. A hotel room was selected as the control object. To support the microclimate, a chiller-fancoil system with ducted indoor units or fancoils is used in it. The use of Model Predictive Control (MPC) in microclimate support systems enables several important capabilities. MPC can adapt to changes in external conditions and internal parameters of the microclimate system, such as temperature, humidity, air flow rate, etc. MPC can consider energy consumption constraints and optimize the control of microclimate support systems to ensure comfortable conditions and energy savings. Microclimate support systems have various zones such as hotel rooms, technical rooms, non-residential areas, etc. MPC can control each zone separately and optimize conditions in each of them. Moreover, such a controller can forecast and control temperature fluctuations, preventing overheating or cooling of rooms and ensuring optimal comfort. MPC can consider individual user comfort requirements, providing a personalized approach to microclimate control. By optimizing control and ensuring the effective operation of microclimate systems, MPC can help reduce maintenance and support costs.

The modeling of the system's operation with an MPC controller was performed in the MatLAB environment. As a result of comparing different control algorithms, it was established that the use of MPC controllers provides advantages in achieving the desired temperature change to the final room air temperature.

Overall, the use of MPC in microclimate support systems enables a higher level of comfort, efficiency, and energy efficiency compared to traditional control methods.

Key words: predictive control, microclimate support system, MPC controller tuning.