ISNN 3030-3907

2026
JUNE
ISSUE - 6
VOLUME -6

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

IYUN 2026
Issue - 6, VOLUME – 6

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

УДК 663.52:681.54

MPC-BOSHQARISH VAZIFALARI UCHUN KO‘P O‘LCHOVLI REKTIFIKATSIYA KOLONNASINI IDENTIFIKATSIYALASH VA MODELLASHTIRISH

Султанов Ильдар Рафкатович
Андижанский государственный технический институт, ст. преподаватель Бабуршах 56, 170119
Андижан, Узбекистан
E-mail: ryunusd@yandex.ru
Tel: +99874 223-43-67
https://orcid.org/0000-0003-3190-5366

Annotatsiya. Ushbu maqolada zamonaviy bashoratli modellashtirish algoritmlari asosida distillash jarayonini avtomatik boshqarish samaradorligini oshirish masalasi ko‘rib chiqiladi. Tadqiqot ob’ekti aniq kechikish, chiziqli bo‘lmaganlik va jarayon parametrlarining kuchli o‘zaro bog‘liqligiga ega bo‘lgan ko‘p o‘zgaruvchili (MIMO) tizimdir. Distillash ustunida ikkilik aralashmani ajratish sifat parametrlarini barqarorlashtirish uchun MATLAB/Simulink muhitida MPC (Model Predictive Control) kontrolleriga asoslangan boshqaruv tizimi ishlab chiqildi. Klassik PID kontrolleri bilan ishlab chiqilgan tizimning dinamik xususiyatlarining qiyosiy tahlili o‘tkazildi. Vaqtinchalik simulyatsiya natijalari shuni ko‘rsatdiki, MPC kontrolleridan foydalanish boshqaruv vaqtini uch martadan ko‘proqqa (6 sekundgacha) qisqartiradi va ortiqcha yuklanishni butunlay yo‘q qiladi, jarayon cheklovlari doirasida parametrlarning barqaror saqlanishini ta’minlaydi.

Kalit so‘zlar: distillash ustuni, ko‘p o‘zgaruvchili kontroller, MPC, MIMO, PID kontrolleri, vaqtinchalik jarayon, modellashtirish, MATLAB/Simulink, kechikish, avtomatlashtirish.

Аннотация. В статье рассматривается вопрос повышения эффективности автоматического управления процессом ректификации на основе современных алгоритмов прогностического моделирования. Объект исследования представляет собой многомерную систему (MIMO) с выраженным запаздыванием, нелинейностью и сильными перекрестными связями технологических параметров. В среде MATLAB/Simulink разработана система управления на базе MPC-контроллера (Model Predictive Control) для стабилизации качественных показателей разделения бинарной смеси в ректификационной колонне. Проведен сравнительный анализ динамических характеристик разработанной системы с классическим ПИД-регулятором. Результаты моделирования переходных процессов показали, что применение MPC-контроллера позволяет сократить время регулирования

более чем в 3 раза (до 6 секунд) и полностью устранить перерегулирование, обеспечивая стабильное удержание параметров в рамках технологических ограничений.

Ключевые слова: ректификационная колонна, многомерный контроллер, MPC, MIMO, ПИД-регулятор, переходный процесс, моделирование, MATLAB/Simulink, запаздывание, автоматизация.

Abstract. This article examines improving the efficiency of automated distillation process control using modern predictive modeling algorithms. The subject of the study is a multivariate (MIMO) system with significant delay, nonlinearity, and strong cross-coupling of process parameters. A control system based on an MPC (Model Predictive Control) controller was developed in the MATLAB/Simulink environment to stabilize the quality parameters of binary mixture separation in a distillation column. A comparative analysis of the dynamic characteristics of the developed system with a classic PID controller was conducted. Transient simulation results showed that the use of an MPC controller reduces control time by more than three times (to 6 seconds) and completely eliminates overshoot, ensuring stable parameter maintenance within process constraints.

Keywords: distillation column, multidimensional controller, MPC, MIMO, PID controller, transient process, modeling, MATLAB/Simulink, delay, automation.

ВВЕДЕНИЕ.

В современных химико-технологических производствах, в частности в процессах ректификации, предъявляются повышенные требования к качеству автоматического управления, включая точность поддержания технологических параметров, быстродействие системы и устойчивость к внешним возмущениям. Ректификационные колонны широко применяются в нефтехимической, газоперерабатывающей и пищевой промышленности, при этом их эффективное функционирование напрямую влияет на энергетические затраты и качество конечной продукции [1,2,3,7].

Ректификационная колонна представляет собой сложный динамический объект, обладающий рядом особенностей, существенно усложняющих задачу управления как показано на рисунке 1.

ISSN 3030-3907

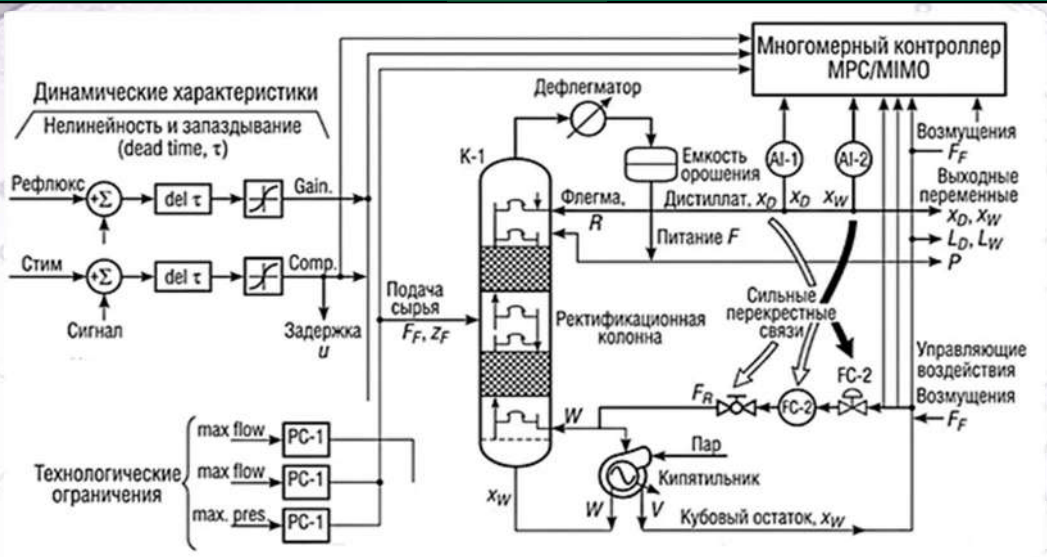


Рис.1. Функциональная структура системы MPC/MIMO управления процессом ректификации.

К таким особенностям относятся:

—выраженная многомерность (MIMO-структура), при которой несколько входных воздействий (например, подача тепла, расход флегмы) одновременно влияют на несколько выходных переменных (состав дистиллята, состав кубового остатка);

—наличие сильных перекрёстных связей между каналами управления;

—нелинейность динамических характеристик, особенно при изменении режимов работы;

—значительные запаздывания (dead time) и большие постоянные времени;

—наличие технологических ограничений на управляющие и выходные переменные (давление, температура, расход, концентрация).

В условиях указанных особенностей применение классических ПИД-регуляторов сталкивается с рядом ограничений. Несмотря на широкое распространение и простоту настройки (в том числе с использованием автоматизированных инструментов, таких как PID Tuner в среде Simulink), ПИД-регуляторы являются по своей природе реактивными системами управления, формирующими управляющее воздействие исключительно на основе текущей ошибки регулирования [3,6].

К основным недостаткам ПИД-регулирования применительно к ректификационным процессам можно отнести:

—отсутствие явного учёта ограничений на управляющие воздействия и состояния системы, что может приводить к физически нереализуемым режимам;

ISSN 3030-3907

—сложность настройки в условиях многомерных (MIMO) объектов с перекрёстными связями, где независимая настройка контуров приводит к деградации качества управления;

—ухудшение характеристик при наличии запаздываний и нелинейностей, что проявляется в виде значительного перерегулирования, колебаний и увеличения времени переходного процесса;

—необходимость компромисса между быстродействием и устойчивостью, который не всегда может быть достигнут в рамках классической структуры ПИД.

В качестве альтернативы классическим методам в последние десятилетия активно развивается предиктивное управление (Model Predictive Control, MPC), которое демонстрирует высокую эффективность при управлении сложными технологическими объектами.

Принципиальным отличием MPC является использование математической модели объекта для прогнозирования его поведения на конечном горизонте предсказания. На каждом шаге управления решается задача оптимизации, направленная на минимизацию функционала качества, учитывающего отклонение выходных переменных от заданных значений и величину управляющих воздействий [4,5,9].

Ключевые преимущества MPC при управлении ректификационной колонной заключаются в следующем:

—возможность одновременного управления многими переменными в рамках единой оптимизационной задачи (естественная работа с MIMO-системами);

—явный учёт ограничений на управляющие и выходные переменные, что обеспечивает технологическую реализуемость управления;

—способность учитывать динамику и запаздывания объекта за счёт прогнозирования будущего поведения;

—снижение перерегулирования и колебательности за счёт оптимального выбора траектории управления;

—гибкость настройки через параметры оптимизации (горизонты предсказания и управления, весовые коэффициенты), что позволяет адаптировать систему под конкретные технологические требования.

Таким образом, в современных системах автоматического управления возрастают требования к точности, быстродействию и устойчивости. Исследование и сравнительный анализ методов настройки ПИД-регуляторов и MPC-контроллеров для управления ректификационной колонной является

ISSN 3030-3907

актуальной научной задачей, направленной на повышение эффективности и качества управления сложными технологическими процессами [16].

Постановка задачи.

В рамках данного исследования рассматривается задача автоматического управления ректификационной колонной как многомерным динамическим объектом с перекрёстными связями между каналами управления.

Объект управления представляется в виде линеаризованной MIMO-модели, полученной в окрестности номинального режима работы. В качестве управляющих воздействий рассматриваются:

$u_1(t)$ — подвод тепла в кипятильник;

$u_2(t)$ — расход флегмы.

Выходными переменными системы являются:

$y_1(t)$ — концентрация (или температура) в верхней части колонны (дистиллят);

$y_2(t)$ — концентрация (или температура) в нижней части колонны (кубовый остаток).

Таким образом, объект управления описывается системой с двумя входами и двумя выходами (2×2 MIMO), для которой характерны существенные перекрёстные связи, запаздывания и различие динамики по каналам.

В операторной форме модель может быть представлена в виде матрицы передаточных функций:

$$Y(s)=G(s)U(s),$$

где G(s) — матрица передаточных функций объекта управления.

Для дальнейшего анализа используется типовая структура с запаздыванием:

$$G_{ij}(s)=\frac{K_{ij}}{T_{ij}+1}e^{-\tau_{ij}s}, \qquad i,j=1,2$$

Цель управления

Целью управления является обеспечение асимптотического слежения выходных переменных $y_1(t)$, $y_2(t)$ за заданными уставками $r_1(t)$, $r_2(t)$ при минимальных динамических отклонениях и соблюдении технологических ограничений.

Ограничения

В реальных условиях на систему накладываются ограничения:

на управляющие воздействия:

$$u_{min} \le u(t) \le u_{max}$$

ISSN 3030-3907

на скорость изменения управления:

$$| \Delta u(t) | \leq \Delta u_{max}$$

на выходные параметры:

$$y_{min} \leq y(t) \leq y_{max}$$

Учет данных ограничений является критически важным для обеспечения безопасной и эффективной работы колонны.

Математическая модель ректификационной колонны

Общая характеристика объекта

Ректификационная колонна представляет собой сложный массообменный аппарат, предназначенный для разделения многокомпонентных смесей на фракции за счёт различия летучестей компонентов. Процесс основан на противоточном контакте восходящего парового потока и нисходящего жидкостного потока, что приводит к установлению фазового равновесия на каждой теоретической тарелке.

Динамика ректификационной колонны характеризуется:

—распределёнными параметрами по высоте аппарата;

—сильной взаимосвязью между температурой, составом и расходами;

—наличием существенных запаздываний;

—нелинейностью, обусловленной фазовыми равновесиями.

Ввиду сложности полной модели, основанной на уравнениях материального и теплового баланса для каждой тарелки, в задачах синтеза систем управления применяется упрощённое (редуцированное) описание, адекватно отражающее динамику ключевых переменных.

Нелинейная модель (базовый уровень)

В общем случае динамика колонны может быть описана системой уравнений материального баланса для i-й тарелки:

1. Материальный баланс колонны [1, 7, 8, 17]

Для каждой i-й тарелки:

$$M_i \frac{\partial x_i}{\partial t} = L_{i+1}x_{i+1} - L_i x_i + V_{i-1}y_{i-1} - V_i y_i - F_i z_{F,i}$$

где:

- x_i— концентрация лёгколетучего компонента;
- y_i — концентрация в паровой фазе;
- L_i — поток жидкости;
- V_i — поток пара;
- F_i — поток сырья;
- M_i — удержание жидкости на тарелке.

2. Уравнение фазового равновесия

Для бинарной смеси:

ISSN 3030-3907

$$y_i = \frac{\alpha x_i}{1+(\alpha-1)x_i}$$

где:

α — относительная летучесть.

Это основная причина нелинейности объекта.

3. Тепловой баланс

Для i-й тарелки:

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = L_{i+1}h_{i+1} - L_i h_i + V_{i-1}H_{i-1} - V_i H_i + Q_i$$

где:

Ti — температура;

Qi— подвод/отвод тепла;

hi, Hi— энтальпии.

4. Модель дефлегматора

Баланс конденсатора:

$$M_D \frac{\partial x_D}{\partial t} = V_{TyT} - (R+D)x_D$$

где:

R — флегмовое число;

D — расход дистиллята;

x_D — концентрация дистиллята.

Тепловой баланс дефлегматора:

$$Q_C = V_T \lambda$$

5. Модель кипятильника

Материальный баланс куба:

$$M_W \frac{dx_W}{dt} = L_B x_B - W x_W - V y_B$$

Тепловой баланс:

$$Q_R = V\lambda$$

где:

Q_R— тепловой поток кипятильника;

V — парообразование.

λ —удельная теплота парообразования, то есть количество тепла, необходимое для превращения единицы массы жидкости в пар.

6. Модель гидравлики колонны

Динамика потоков жидкости:

$$L_i = L_{0i} + \frac{M_i - M_{0i}}{T_L}$$

7. Нелинейность и запаздывание

На схеме присутствуют dead-time элементы.

ISSN 3030-3907

Модель транспортного запаздывания:

$$Q_d(s) = e^{-\tau s}$$

Аппроксимация Паде:

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1-\frac{\tau}{2}s}{1+\frac{\tau}{2}s}$$

8. Модель исполнительных механизмов

Клапаны FC-1, FC-2:

$$\tau_v \frac{\partial u}{\partial t} + u = K_v u_c$$

где:

u_c — управляющий сигнал МРС;

u — реальное воздействие.

9. Перекрёстные связи (MIMO)

Колонна является многосвязным объектом:

$$x_D = f(R, V, F, z_F)$$
$$x_W = f(R, V, F, z_F)$$
$$P = f(Q_C, V)$$

Изменение одного канала влияет на остальные.

10. Полная нелинейная модель состояния

Объединённая модель:

$$\dot{x} = f(x, u, d)$$

где:

x — состояния колонны;

u — управляющие воздействия;

d — возмущения.

Вектор состояний:

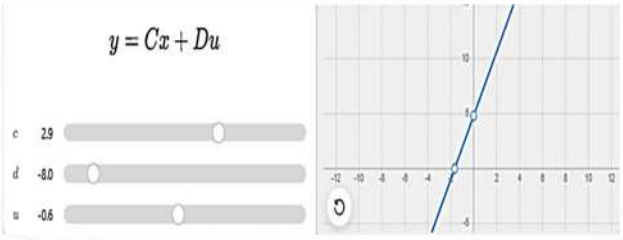
$$x = [x_1 \quad x_2 \quad \ldots \quad x_n \quad T_1 \quad T_2 \quad \ldots \quad T_n \quad M_1 \quad M_2 \quad \ldots]^T$$

11. Линеаризованная модель для МРС

После линеаризации около рабочей точки:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ed$$

Выходы:



где:

$$y = [x_D, x_W, P, L_D, L_W]^T$$

ISSN 3030-3907

12. Передаточная матрица MIMO-объекта

Модель в операторной форме:

$$H(s) = G(s)U(s)$$

где:

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix}$$

Типовая передаточная функция:

$$G_{ij}(s) = \frac{K_{ij} e^{-\tau_{ij} s}}{T_{ij} s + 1}$$

13. Модель MPC-регулятора

Функционал оптимизации MPC:

$$J = \sum_{k=1}^{N_p} (y_k - r_k)^T Q (y_k - r_k) + \sum_{k=1}^{N_c} \Delta u_k^T R \Delta u_k$$

при ограничениях:

$$u_{min} \le u \le u_{max}$$

$$y_{min} \le y \le y_{max}$$

14. Основные управляющие воздействия

$$u = \begin{bmatrix} R \\ Q_R \\ F_R \end{bmatrix}$$

где:

R — флегма;

Q_R — тепло кипятильника;

F_R — расход возврата.

15. Основные выходные координаты

$$y = \begin{bmatrix} x_D \\ x_W \\ P \end{bmatrix}$$

16. Возмущающие воздействия

$$d = \begin{bmatrix} F_F \\ z_F \\ T_F \end{bmatrix}$$

где:

F_F — изменение расхода сырья;

z_F — изменение состава сырья;

T_F — изменение температуры подачи.

17. Итог

Полученная математическая модель представляет собой:

- нелинейную;
- многомерную (MIMO);

ISSN 3030-3907

- многосвязную;
- объект с распределёнными параметрами;
- объект с запаздываниями и ограничениями.

Такая модель является базой для:

- синтеза PID;
- разработки MPC/NMPC;
- моделирования в MATLAB/Simulink;
- построения цифрового двойника ректификационной колонны.

Экспериментальная часть

Таблица 1.

Числовые значения коэффициентов MIMO-модели

Коэффициент «a»	Коэффициент «b»	Коэффициент «c»
$a_{12} = -1.09*10^{-5}$	$b_{12} = -12,95*10^{-4}$	$c_{12}=0,9$
$a_{21} = -0,89$	$b_{22} = -0,98$	$c_{22}=2,89$
$a_{24} = -0,65$	$b_{32} = 1,0$	$c_{24}=1,72$
$a_{33} = 0,93$	$b_{41} = 1,14$	-
$a_{41} = -0,88$	-	-
$a_{42} = -0,59$	-	-
$a_{52} = 1,17$	-	-

Для оценки эффективности разработанной системы предиктивного управления (MPC) на базе MIMO-модели ректификационной колонны К-1 было проведено компьютерное моделирование в среде MATLAB/Simulink. На рисунке 2 представлены переходные процессы выходных переменных y_1 (концентрация дистиллята x_D) и y_2 (концентрация кубового остатка x_W) при отработке ступенчатого единичного воздействия. С целью сравнительного анализа качественных показателей регулирования было выполнено моделирование аналогичного контура с классическим ПИД-регулятором. Сравнительные кривые переходных процессов для канала y_1 приведены на рисунке 3.

ISSN 3030-3907

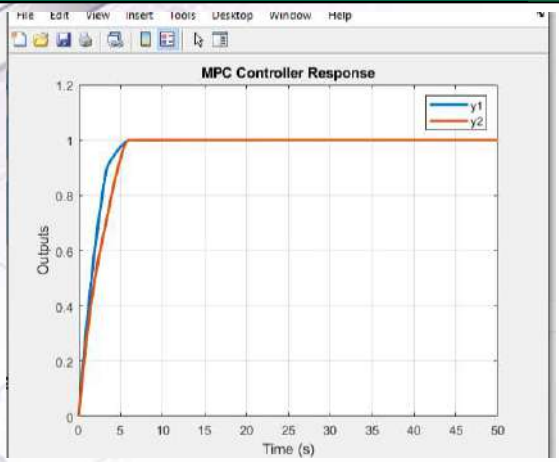


Рис.2. Переходные процессы выходных переменных

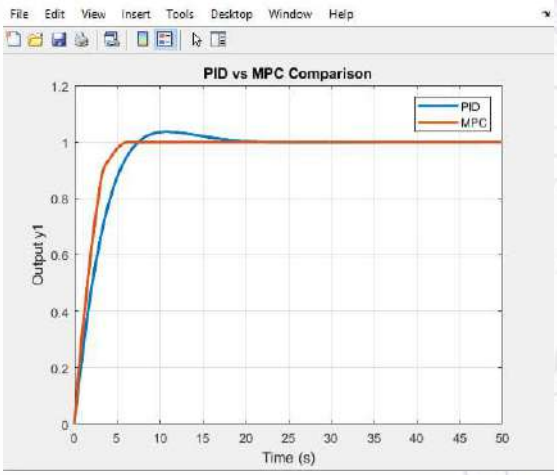


Рис.3. Сравнительные кривые переходных процессов

РЕЗУЛЬТАТЫ.

Анализ полученных графиков (см. рис. 3) показывает, что классический ПИД-регулятор обеспечивает время регулирования порядка 20 секунд, однако переходный процесс сопровождается перерегулированием (около 4%). В то же время, многомерный MPC-контроллер демонстрирует существенно лучшие динамические показатели: система выходит на заданное значение (уставку) за 6 секунд без перерегулирования и колебаний, успешно компенсируя сильные перекрестные связи объекта.

ВЫВОДЫ.

В результате проведённого исследования был выполнен сравнительный анализ методов оптимальной настройки PID-регулятора и MPC-контроллера для управления ректификационной колонной в среде MATLAB/Simulink. Рассматриваемый объект представляет собой сложную многомерную динамическую систему с существенными перекрёстными связями, нелинейностью, инерционностью и транспортными запаздываниями, что значительно усложняет задачу обеспечения качественного управления.

Проведённый анализ показал, что классический PID-регулятор обеспечивает удовлетворительное качество регулирования только в ограниченном диапазоне режимов работы и при относительно слабом влиянии перекрёстных связей. Несмотря на простоту реализации и настройки, PID-регулирование характеризуется повышенным перерегулированием, увеличенным временем переходного процесса и снижением устойчивости при наличии значительных возмущений и ограничений.

В свою очередь, применение MPC-контроллера позволило существенно повысить качество управления процессом ректификации.

ISSN 3030-3907

Использование математической модели объекта и механизма прогнозирования обеспечило возможность учёта многомерности системы, динамических взаимосвязей между каналами, а также технологических ограничений на управляющие воздействия и выходные параметры. В результате MPC-регулятор продемонстрировал более высокую точность поддержания заданных параметров, снижение колебательности и перерегулирования, а также уменьшение времени установления переходных процессов.

Разработанная математическая модель ректификационной колонны позволила адекватно описать динамику технологического процесса и может быть использована в дальнейшем для синтеза современных интеллектуальных систем управления, включая адаптивные и нелинейные методы MPC/NMPC.

Применение алгоритмов предиктивного управления (MPC/MIMO) для автоматизации ректификационных колонн позволяет значительно повысить быстродействие системы и обеспечить строгое удержание технологических параметров в рамках заданных ограничений без колебательности, что напрямую снижает энергозатраты на кипятильник и дефлегматор.

Таким образом, результаты исследования подтверждают целесообразность применения MPC-контроллеров для управления сложными химико-технологическими объектами, в частности ректификационными колоннами, где требуется обеспечение высокой точности, устойчивости и энергоэффективности технологического процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seborg D.E., Edgar T.F., Mellichamp D.A., Doyle F.J. Process Dynamics and Control. — 3rd ed. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. — 512 p.
2. Skogestad S. Dynamics and Control of Distillation Columns: A Tutorial Introduction // Chemical Engineering Research and Design. — 1997. — Vol. 75. — P. 539–562.
3. Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. — 2nd ed. — Chichester: Wiley, 2005. — 590 p.
4. Camacho E.F., Bordons C. Model Predictive Control. — 2nd ed. — London: Springer, 2007. — 405 p.
5. Qin S.J., Badgwell T.A. A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology // Control Engineering Practice. — 2003. — Vol. 11, No. 7. — P. 733–764.
6. Åström K.J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. — 2nd ed. — Research Triangle Park: ISA, 1995. — 343 p.

ISSN 3030-3907

7. Ogunnaike B.A., Ray W.H. Process Dynamics, Modeling, and Control. — New York: Oxford University Press, 1994. — 1260 p.
8. Luyben W.L. Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers. — 2nd ed. — New York: McGraw-Hill, 1990. — 741 p.
9. Morari M., Lee J.H. Model Predictive Control: Past, Present and Future // Computers and Chemical Engineering. — 1999. — Vol. 23. — P. 667–682.
10. Rawlings J.B., Mayne D.Q. Model Predictive Control: Theory and Design. — Madison: Nob Hill Publishing, 2009. — 558 p.
11. Bequette B.W. Process Control: Modeling, Design and Simulation. — New Jersey: Prentice Hall, 2003. — 768 p.
12. Stephanopoulos G. Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice. — New Jersey: Prentice Hall, 1984. — 696 p.
13. Garcia C.E., Prett D.M., Morari M. Model Predictive Control: Theory and Practice — A Survey // Automatica. — 1989. — Vol. 25, No. 3. — P. 335–348.
14. Smith C.A., Corripio A.B. Principles and Practice of Automatic Process Control. — 3rd ed. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. — 644 p.
15. Nise N.S. Control Systems Engineering. — 7th ed. — Hoboken: Wiley, 2015. — 944 p.
16. Mr. Djalolitdin Muhitdinov, Mr. Azamat Yusupov, Elyor Safarov, et al. "An improved device for automated control of mass transfer processes used in distillation units", Proc. SPIE 13217, Third International Conference on Digital Technologies, Optics, and Materials Science (DTIEE 2024), 132170T (31 Jul 2024); https://doi.org/10.1117/12.3035642
17. Rectification process control by separation process efficiency evaluation using a predictive model. Djalolitdin Mukhitdinov, Yorkin Kadirov, Ildar Sultanov and Yusuf Avazov. EPJ Web Conf., 321 (2025) 01013 DOI: https://doi.org/10.1051/epjconf/202532101013

ISSN 3030-3907