

TECH SCIENCE

ISSN 3030-3702

**TEXNIKA FANLARINING
DOLZARB MASALALARI**

**TOPICAL ISSUES OF TECHNICAL
SCIENCES**



№ 5 (4) 2026

TECHSCIENCE.UZ

№ 5 (4)-2026

**TEXNIKA FANLARINING DOLZARB
MASALALARI**

**TOPICAL ISSUES
OF TECHNICAL SCIENCES**

TOSHKENT-2026

BOSH MUHARRIR:

KARIMOV ULUG'BEK ORIFOVICH

TAHRIR HAY'ATI:

Usmankulov Alisher Kadirkulovich - Texnika fanlari doktori, professor, Jizzax politexnika universiteti

Fayziyev Xomitxon – texnika fanlari doktori, professor, Toshkent arxitektura qurilish instituti;

Rashidov Yusuf Karimovich – texnika fanlari doktori, professor, Toshkent arxitektura qurilish instituti;

Adizov Bobirjon Zamirovich– Texnika fanlari doktori, professor, O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti;

Abdunazarov Jamshid Nurmuxamatovich - Texnika fanlari doktori, dotsent, Jizzax politexnika universiteti;

Umarov Shavkat Isomiddinovich – Texnika fanlari doktori, professor, Jizzax davlat pedagogika universiteti;

Bozorov G'ayrat Rashidovich – Texnika fanlari doktori, Buxoro muhandislik-texnologiya instituti;

Maxmudov Muxtor Jamolovich – Texnika fanlari doktori, Buxoro muhandislik-texnologiya instituti;

Asatov Nurmuxammat Abdunazarovich – Texnika fanlari nomzodi, professor, Jizzax politexnika universiteti;

Mamayev G'ulom Ibroximovich – Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), Jizzax politexnika universiteti;

Ochilov Abduraxim Abdurasulovich – Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), Buxoro muhandislik-texnologiya instituti.

OAK Ro'yxati

Mazkur jurnal O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasi Rayosatining 2025-yil 8-maydagi 370-son qarori bilan texnika fanlari bo'yicha ilmiy darajalar yuzasidan dissertatsiyalar asosiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro'yxatiga kiritilgan.

Muassislar: "SCIENCEPROBLEMS TEAM" mas'uliyati cheklangan jamiyati;
Jizzax politexnika insituti.

TECHSCIENCE.UZ- TEXNIKA**FANLARINING DOLZARB**

MASALALARI elektron jurnali

15.09.2023-yilda 130343-sonli

guvohnoma bilan davlat ro'yxatidan o'tkazilgan.

TAHRIRIYAT MANZILI:

Toshkent shahri, Yakkasaroy tumani, Kichik Beshyog'och ko'chasi, 70/10-uy.

Elektron manzil:

scienceproblems.uz@gmail.com

Barcha huquqlar himoyalangan.

© Scienceproblems team, 2026-yil

© Mualliflar jamoasi, 2026-yil

MUNDARIJA

<i>Беккулов Джахонгир, Тураев Хуршид</i> ПРОГНОЗИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ТВЁРДЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ	5-15
<i>Бахромов Хасан, Бозорбоев Жавлонбек, Жумаев Фиёсжон</i> АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ ФИЛЬТРА ВИНЕРА-ХОПФА И ФИЛЬТРАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ЕГО ОСНОВЕ	16-20
<i>Hamdamova Dilshoda</i> BADIIY ADABIYOTLAR VOSITASIDA O'QUVCHILARNING AXLOQIY MADANIYATINI YUKSALTIRISH TIZIMI Й	21-23
<i>Babadjanov Elmurod, Maxambetjaliev Musabek</i> RFID YORDAMIDA AVTOTURARGOH KIRISH-CHIQUISHINI NAZORAT QILISH VA BANDLIKNI QISQA MUDDATTA VAHOLASH	24-29
<i>Айтмуратов Бакберген, Оразымбетов Темурубек</i> МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ НУКУССКОГО РАЙОНА НА ОСНОВЕ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ И МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	30-36
<i>Qutlimuratov Yusup, Orazbayev Shaxmardan</i> YERLARNING SHO'RLANISH DARAJASINI ANIQLASH VA PROGNOZ QILISHDA NEYRON TARMOQLARDAN FOYDALANISH	37-42
<i>Aimbetova Gulara, Sarsenbaeva Hu'rlixa, Djumabaev Alpamis</i> KAM RESURSLI TILLARNI RAQAMLASHTIRISHDA SUN'TY INTELLEKT MODELLARINING SAMARADORLIGI VA MAVJUD MUAMMOLAR	43-48
<i>Abdullayev Elmurod, Bektemirov Hojimurod</i> TABIIY TILNI QAYTA ISHLASH ALGORITMLARINING BARQARORLIGINI NAZARIY TAHLIL QILISH	49-54
<i>Mamatov Narzillo, Samijonov Abdurashid, Abdullaeva Barno,</i> <i>Usarov Jurabek, Samijonov Boymirzo</i> QULOQ CHANOG'IGA ASOSLANGAN SHAXSNI IDENTIFIKATSIYALASH USULI	55-67
<i>Xaqberdiyev Asliddin</i> TOMCHILATIB SUG'ORISHDA NAVIER - STOKES TENGLAMALARIDAN FOYDALANIB, SUV SARFINI OPTIMALLASHTIRISH	68-74
<i>Xamzayev Dilshod</i> PAXTANI QURITISH QURILMASI: KONSTRUKSIYA, ISH PRINSIPLARI VA ISSIQLIK-TEXNIK XUSUSIYATLARNING KENGAYTIRILGAN TADQIQI	75-80
<i>Odilova Mohigul</i> METROLOGIYA SOHASIDA XALQARO UYG'UNLASHUV: O'ZBEKISTON MISOLIDA TAHLIL INTERNATIONAL HARMONIZATION IN THE FIELD OF METROLOGY: A CASE STUDY OF UZBEKISTAN	81-87

<i>Doniyev Erkin, Yusupov Rustam, Eshqurbonov Anvar</i> BAZALT TOLALI KOMPOZIT QOPLAMALARNI YAQIN INFRAQIZIL NURLANISH YORDAMIDA QURITISH: TEXNOLOGIYA, STRUKTURA VA XOSSALAR	88-94
<i>Sayitov Shavkatjon, Xolmatov Erkinjon</i> PAHTA QURITISH JARAYONINING ENERGIYA SAMARADORLIGINI OSHIRISH ISTIQBOLLARI	95-103
<i>Эргашева Камола</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКИХ СРЕД	104-110
<i>Ismoilov Muxriddin, Rahimov Anvarjon, Isomiddinova Soliha, Xolmamatova Shaxzoda</i> ASINXRON DVIGATELLAR BOSHQARUV TIZIMLARIDA TIZIMLI XATOLIKLARNI DIAGNOSTIKA QILISH VA ULARNI KOMPENSATSIYA QILISH ORQALI DASTGOHLAR ANIQLIGINI OSHIRISH	111-120
<i>To'rayev Azizbek, Karimov Abror</i> YAQIN INFRAQIZIL NURLANISHGA ASOSLANGAN O'LCHASH ASBOBLARINI TADQIQ QILISH VA ULARNING METROLOGIK XARAKTERISTIKALARINI O'RGANISH	121-126
<i>Рустамзаде Джошгун</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖАРКОГО КЛИМАТА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СГОРАНИЯ В ГАЗОВЫХ ТУРБИНАХ И РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ	127-136
<i>Mammadov Fuad, Kalbaliyev Faig</i> PERFORMANCE ASSESSMENT OF SUPERCRITICAL CO2 BRAYTON CYCLES IN SOLAR POWER TOWER SYSTEMS	137-145
<i>Xasanov Azimjon</i> MAHALLIY XOM ASHYOLAR VA CHIQINDILAR ASOSIDA YENGIL BETON	146-151
<i>Abdumannopov Ozodbek, Askarov Xasanjon</i> O'ZBEKISTONDA ZAMONAVIY QURILISH MATERIALLARINI ISHLAB CHIQRISH: HOLATI, MUAMMOLAR VA ISTIQBOLLAR	152-156
<i>Xujanov Chariyar</i> QUTQARUV-QIDIRUV ISHLARINING VAZIFALARI VA TASHKILIY TUZILMASI	157-162

ПРОГНОЗИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ТВЁРДЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Беккулов Джахонгир Шербоевич

Каршинский государственный технический университет
доктор философии (PhD) по техническим наукам, доцент кафедры автоматизации и управления технологическими процессами

Email: jbekqulov@mail.ru

Tel:+998-99-081-09-55

Тураев Хуршид Салим угли

Ташкентский государственный технический университет
доктор философии (PhD) по техническим наукам, доцента кафедры автоматизации производственных процессов

Email: xturayev@mail.ru

Tel:+998-90-325-85-55

Аннотация: Излагаются вопросы применения метода предиктивного управления (Model Predictive Control - MPC) процессами сушки твёрдых сыпучих материалов. На основе алгоритма MPC синтезирована система управления и обосновано формирование оптимальных управляющих сигналов путем прогнозирования будущего состояния системы. Разработаны методы оценки параметров, которые невозможно измерить непосредственно с помощью наблюдателя состояния объекта. Показано, что предложенный подход позволяет повысить устойчивость процесса сушки, снизить энергозатраты, а также улучшить качество продукции.

Ключевые слова: предиктивное управление, сушка сыпучих материалов, энергозатраты, алгоритм усовершенствованного управления, вектор состояния, оптимизация, рекуррентное уравнение, референсная траектория.

PREDICTIVE CONTROL OF THE DRYING PROCESS OF BULK SOLID MATERIALS

Bekkulov Jahongir Sherboevich

Karshi State Technical University

Doctor of Philosophy (PhD) in Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Automation and Control of Technological Processes

Turayev Khurshid Salim ugli

Tashkent State Technical University

Doctor of Philosophy (PhD) in Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Automation of Industrial Processes

Annotation. The article discusses the application of the Model Predictive Control (MPC) method to solid material drying processes. Bulk materials. A control system was synthesized using the MPC algorithm, and the generation of optimal control signals by predicting the system's future state was substantiated. Methods for estimating parameters that cannot be measured directly using a state observer were developed. It was shown that the proposed approach can improve the stability of the drying process, reduce energy consumption, and improve product quality.

Keywords: predictive control, bulk materials drying, energy consumption, advanced control algorithm, state vector, optimization, recurrence equation, reference trajectory.

DOI: <https://doi.org/10.47390/ts-v4i5y2026N01>

Введение. В последние годы имеет место усиление тенденций цифровизации и интеллектуализации промышленности обусловило формирование новых требований к управлению процессами сушки твёрдых сыпучих материалов. Посредством внедрения современных автоматизированных и интеллектуальных систем управления [1-5].

Интеллектуальный контроль и управление технологическим процессом сушки является одним из важных направлений совершенствования промышленных технологических процессов.

Применение интеллектуальных алгоритмов управления позволяет повысить качество продукции, снизить энергозатраты и ресурсопотребление, а также повысить эффективность производства [8-12]. Данный подход полностью соответствует требованиям концепции «Индустрия 4.0» и является перспективным решением для современной химической промышленности [2].

В настоящее время в целях повышения эффективности промышленного производства, обеспечения точности контроля процессов и надежности эксплуатации объектов разрабатывается и внедряется в практику компьютеризированное оборудование, работающее на основе современных алгоритмов управления [3]. Данный подход способствует не только оптимизации технологических процессов, но и повышению общей конкурентоспособности предприятия.

Поэтому предлагается современная усовершенствованная система управления, обеспечивающая точный контроль основных технологических параметров процесса сушки, снижение энергопотребления и обеспечение стабильности качества продукции [5].

Работа усовершенствованной системы управления реализуется в следующей последовательности: с помощью датчиков непрерывно измеряются основные параметры технологического процесса, протекающего в сушильной камере – такие, как температура, влажность и расход воздуха. Данные, полученные в результате измерений, передаются в блок МРС, осуществляющий прогнозирование параметров и управление ими, сравнивая полученные значения в режиме реального времени с заданными значениями и определяя отклонение между ними [5-14].

На основе выявленного отклонения алгоритм управления формирует оптимальный управляющий сигнал. Сформированный управляющий сигнал передается на исполнительные механизмы, через которые соответствующим образом регулируются технологические параметры процесса сушки.

В результате обеспечивается стабильность процесса сушки, а показатели качества продукции поддерживаются на заданном уровне [6]. Усовершенствованная система управления процессом сушки твердых сыпучих материалов организована на основе замкнутого контура управления [9]. На рис.1 показана структурная схема этой системы, состоящая из функциональных блоков, которые работают во взаимной интеграции.

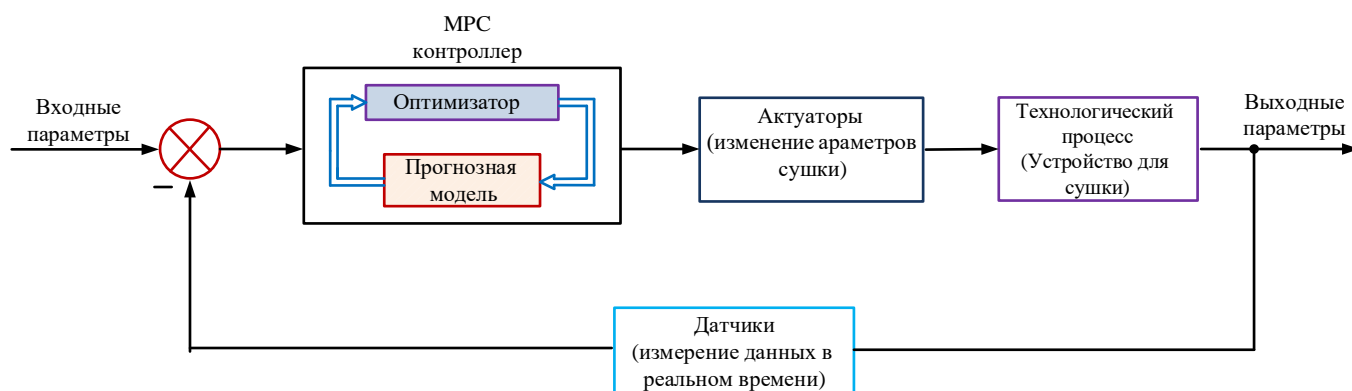


Рис.1. Структурная схема усовершенствованной системы управления процессом сушки твердых сыпучих материалов.

В работе внимание уделяется концепции прогнозирующего функционального управления (Predictive Functional Control -PFC), которая широко используется как упрощенный и практически ориентированный вариант метода прогнозирующего управления на основе модели (Model Predictive Control-MPC) [10]. К основным преимуществам предиктивного функционального управления (PFC) относят его алгоритмическую компактность, низкую вычислительную сложность, относительную простоту интеграции в практические системы управления, а также способность автоматически прогнозировать будущее состояние системы и формировать соответствующие управляющие решения [11].

Этот подход отличается более простой структурой и быстрой настройкой по сравнению с пакетами MPC, разработанными для практики применения классических теорий MPC и научных результатов в промышленных условиях [12-16].

Алгоритмы MPC прогнозируют будущие состояния технологического процесса на основе его математической модели и формируют оптимальные управляющие воздействия [16]. Такой подход позволяет поддерживать стабильное качество продукции и снижать энергозатраты с учётом ограничений.

Технология Model Predictive Control (MPC) является широко применяемой стратегией многопараметрического автоматического управления в промышленности [17]. Она является особой эффективный метод управления процессами со сложными динамическими характеристиками и обладает гибкостью по отношению к изменению параметров процесса во времени [15-18].

Поэтому MPC - эффективное средство проектирования и оптимизации автоматизированных систем управления в сложных, интерактивных и изменяющихся условиях протекания исследуемого процесса. MPC (Model Predictive Control - управление на основе модели с предсказанием) использует, как уже отмечалось динамическую модель процесса для прогнозирования его будущего состояния [19]. На каждом цикле управления процесс прогнозирования обновляется или корректируется на основе измерений переменных объекта управления.

Таким образом, система управления MPC оптимально корректирует управляющие воздействия с учётом разницы между реальным и прогнозируемым состояниями процесса [20-25]. На рис.2 приведена иерархическая структура системы управления на основе моделируемого предиктивного управления (MPC).

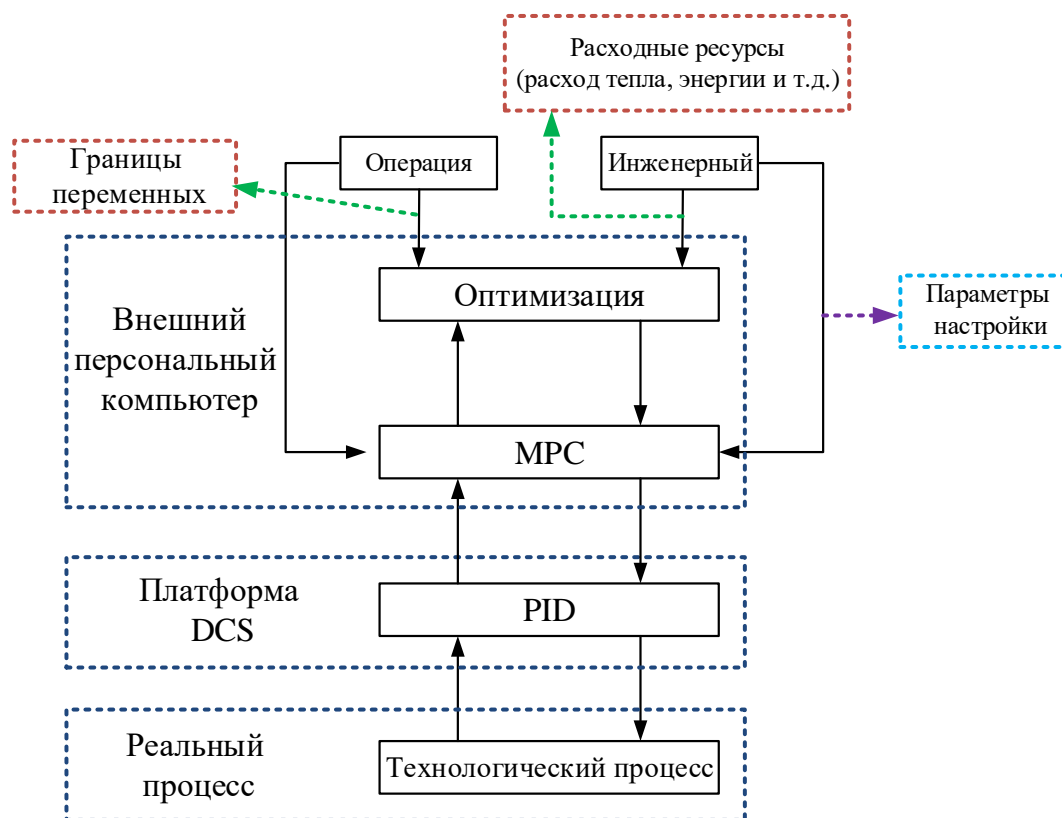


Рис.2. Иерархическая структура системы управления на основе прогностической модели.

В этой системе управления каждая переменная процесса – (например, влажность, расход и температура сушильного агента, расход материала, а также влажность на входе и выходе) - контролируется отдельно [18].

Управление переменными процесса осуществляется с помощью PID -регуляторов в рамках распределённой системы управления (DCS - Distributed Control System), что обеспечивает устойчивую и эффективную работу всей системы.

PID-регуляторы позволяют поддерживать каждый параметр процесса в реальном времени, приближая его к оптимальному значению в рамках ограничений и компенсируя динамическое поведение процесса [14].

Кроме того, через платформу DCS они работают в интегрированном режиме, что обеспечивает согласованное управление с высокоуровневыми предиктивными алгоритмами ступенчатой и моделируемой системы управления. В результате эффективность, устойчивость и безопасность промышленных процессов значительно повышаются [8-22].

Принцип предиктивного управления процессом сушки заключается в том, что на основе математической модели установки её будущая температура, влажность и другие технологические параметры рассчитываются заранее в пределах заданного горизонта предсказания. На основе этих прогнозов определяется последовательность оптимальных управляющих воздействий, минимизирующих выбранную целевую функцию (например, сокращающую время сушки или энергозатраты), и применяется к параметрам управления [23].

Принцип предиктивного управления процессом сушки. Динамика сушильной установки описывается следующей математической моделью:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= f(x(k), u(k)), \\ y(k) &= h(x(k)),\end{aligned}$$

$x(k)$ – вектор состояния процесса (например, влажность материала, температура); $u(k)$ – вектор управляющих воздействий (интенсивность (сила) камеры формирования сушильного агента, скорость воздушного потока); $y(k)$ – измеряемые параметры процесса (например, влажность выходного материала); f и h – динамические и измерительные функции процесса.

Для практических расчётов модель обычно преобразуется в дискретный вид:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k), \\ y(k) &= Cx(k)\end{aligned}$$

Здесь: A, B, C – матрицы системы.

Основным этапом алгоритма MPC является прогнозирование выходов системы в будущем временном интервале [24]. Прогнозирование осуществляется с помощью следующих рекуррентных уравнений:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ x(k+2) &= A^2x(k) + ABu(k) + Bu(k+1) \\ x(k+3) &= A^3x(k) + A^2Bu(k) + ABu(k+1) + Bu(k+2)\end{aligned}$$

На этой основе прогнозируются выходные параметры системы. В процессе сушки влажность на выходе определяется с помощью модели следующим образом:

$$\hat{y}(k+i/k) = h(\hat{x}(k+i/k))$$

Если влажность измеряется напрямую, тогда:

$$\hat{y}(k+i/k) = M(k+i/k)$$

Здесь: $\hat{y}(k+i/k)$ – прогнозируемая влажность на выходе в момент времени $(k+i)$, вычисленная на момент времени k ; $\hat{x}(k+i/k)$ – прогнозируемое состояние (влажность, расход, температура и др.); $h(\cdot)$ – выходная функция; $M(k+i/k)$ – прогнозируемая влажность материала.

Основная идея предиктивного управления заключается в том, что в пределах заданного горизонта предсказания N_p заранее рассчитываются будущие состояния:

$$\hat{x}(k+i/k) = f(\hat{x}(k+i-1/k), u(k+i-1)), i=1,2,\dots, N_p$$

В Model Predictive Control (MPC) и других современных методах управления минимизируется разница между прогнозируемыми выходами и законом изменения целевых значений во времени, к которым должна стремиться система управления, что и является целевым результатом алгоритма управления (рис.3).

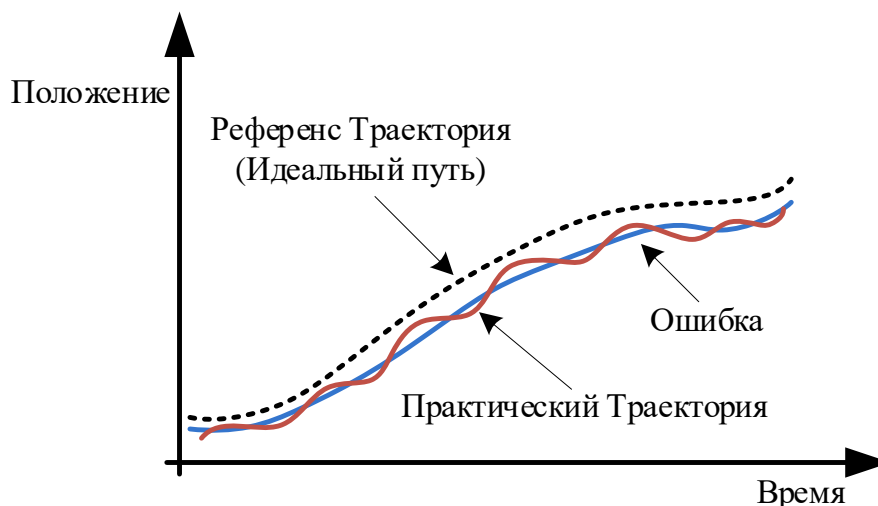


Рис.3. Референсная траектория

После этого определяется последовательность оптимальных управляющих воздействий $\{u(k), u(k+1), \dots, u(k+N_p-1)\}$, минимизирующих выбранную целевую функцию (например, ошибку по влажности выходного материала, а также энергозатраты):

$$\min_{u(k), \dots, u(k+N_p-1)} J = \sum_{i=1}^{N_p} (y_{ist}(k+i) - \hat{y}(k+i/k))^2 + \lambda \sum_{i=0}^{N_c-1} \Delta u(k+i)^2$$

где: y_{ist} – траектория произвольной влажности; $y_{ist}(k+i) - \hat{y}(k+i/k)$ – ошибка по влажности (относительно произвольной траектории); $\lambda \sum_{i=0}^{N_c-1} \Delta u(k+i)^2$ – изменение управляющего воздействия (энергозатраты); λ – весовой коэффициент, регулирующий изменения управляющего воздействия; N_p – горизонт прогнозирования; N_c – горизонт управления.

Из данной последовательности применяется только первое управляющее значение $u(k)$, после чего на следующем шаге процесс повторно измеряется, и процедуры прогнозирования и оптимизации выполняются заново. Таким образом, процесс сушки контролируется устойчиво и эффективно [11-25].

Данная функция оптимизации направлена на ограничение отклонений выходных параметров от заданных значений, а также чрезмерно быстрых изменений управляющих сигналов [24]. Физический смысл функции заключается в том, что первая сумма минимизирует отклонение влажности и температуры продукта от заданных значений, а вторая сумма обеспечивает снижение энергопотребления и избыточной активности движения управляющих клапанов.

Для обеспечения безопасности процесса и соблюдения технологических условий вводятся определённые ограничения на управляющие воздействия и параметры процесса.

Технологические ограничения обеспечивают надёжную и безопасную эксплуатацию сушильной установки, а также гарантируют точное и стабильное управление процессом.

Основным контролируемым параметром процесса сушки является влажность материала, которая выступает показателем качества процесса. Поэтому в соответствии с технологическими требованиями влажность материала должна поддерживаться в заданном диапазоне [9-24].

В системах управления на основе моделируемого предиктивного управления ограничение по влажности выражается следующим неравенством:

$$W(k)_{\min} \leq W(k) \leq W(k)_{\max}, k = 0,1,2,\dots,N$$

где: $W(k)$ – текущая влажность материала при шаге времени k ; $W(k)_{\min}$ – допустимая влажность материала (чтобы продукт не был слишком сухим и не ухудшалось его качество); $W(k)_{\max}$ – допустимая максимальная влажность материала (чтобы продукт был достаточно высушен)

В начале процесса сушки влажность материала высокая. Если она слишком велика, это может привести к снижению качества продукта или негативно повлиять на последующие технологические процессы [22]. Поэтому вводится следующее ограничение:

$$W(k) \leq W(k)_{\max}$$

Когда материал чрезмерно высушен, это может привести к ухудшению качества продукта, нарушению его структуры или избыточному расходу энергии. Поэтому устанавливается минимальный предел влажности:

$$W(k) \geq W(k)_{\min}$$

В процессе сушки сыпучих материалов ограничения управления связаны не только с актуаторами (мощностью нагрева, расходом воздуха), но и с влажностью материала. В алгоритме MPC ограничения по влажности вводятся для обеспечения качества продукта и предотвращения чрезмерной сушки [24-25].

Алгоритм MPC измеряет текущее состояние объекта, прогнозирует будущие выходы с помощью математической модели и формирует оптимальные управляющие воздействия для достижения референсной траектории. Управляющие сигналы применяются в пределах заданного горизонта управления.

Связь между текущим состоянием системы, прогнозируемыми будущими состояниями и оптимальными управляющими воздействиями показана на рис.4.

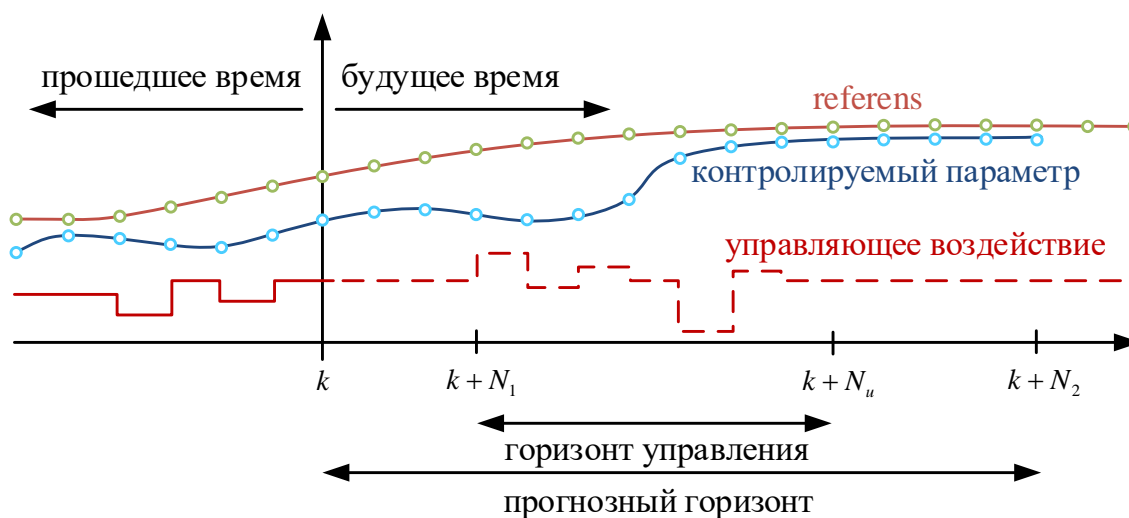


Рис.4. График системы управления на основе моделируемого предиктивного управления: k – текущий момент времени; $k + N_1, \dots, k + N_2$ – предстоящий период времени; прошедший период (past) - время до k ; будущее время (future) - время после k , прогнозируемый период; горизонт управления - период, за который оптимизируются управляющие воздействия; горизонт прогнозирования - это период времени, на который прогнозируется состояние системы [4-18].

Данный график представляет собой концепцию MPC или прогнозируемой системы управления [19]. Процедура ограничений управляющих воздействий в процессе сушки несколько сложнее (открытие клапана управления потоком первичного воздуха и природного газа в процессе формирования сушильного агента, вторичный расход воздуха):

$$u_{\min} \leq u_{k+i/k} \leq u_{\max}, i = 0, 1, \dots, N_u - 1$$

Поэтому для ограничений управляющих воздействий сначала определяются следующие векторы нижних и верхних границ размерности $n_u \cdot N_n$.

$$U_{\min} = \begin{bmatrix} u_{\min} \\ \vdots \\ u_{\min} \end{bmatrix}, U_{\max} = \begin{bmatrix} u_{\max} \\ \vdots \\ u_{\max} \end{bmatrix}$$

После этого значения сигналов можно выразить через их изменения. Для этого используют следующие уравнения:

$$u(k+i/k) = u(k-1) + \sum_{j=0}^i \Delta u(k+j/k), i = 0, 1, \dots, N_u - 1$$

Таким образом, ограничения по влажности продукта в процессе сушки можно выразить в следующей форме:

$$U_{\min} \leq U(k-1) + R\Delta U(k) \leq U_{\max}$$

$$\text{где: } U(k-1) = \begin{bmatrix} u(k-1) \\ u(k-1) \\ \vdots \\ u(k-1) \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} \mu_u & 0 & \dots & 0 \\ \mu_u & \mu_u & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_u & \mu_u & \mu_u & \mu_u \end{bmatrix}$$

Таким образом, длина вектора $U(k-1)$ равна $n_u \cdot N_n$, а каждая матрица идентификации μ_u имеет размер $n_u \times n_n$. Наконец, ограничения, накладываемые на выходные параметры процесса, можно описать с помощью выражения.

$$y_{\min} \leq y(k+i/k) \leq y_{\max}, i = N_1, N_2 + 1, \dots, N$$

Здесь: $y(k+i/k)$ – предсказанное значение на момент $k+i$, вычисленное в момент k ; y_{\min} – допустимая минимальная влажность; y_{\max} – допустимая максимальная влажность; $i = N_1, N_2$ – интервал горизонта прогнозирования.

Ограничения выходных параметров (влажность продукта) имеют важное значение в системе управления на основе моделируемого предиктивного управления. Эти ограничения обеспечивают соответствие качества продукта требованиям в процессе сушки [4-25].

Выходное значение ограничено для каждой точки времени на горизонте прогноза:

$$\forall_i \in [N_1, N]: y(k + i/k) \in [y_{\min}, y_{\max}]$$

Иными словами, в алгоритме предиктивного управления (Model Predictive Control) ограничения на выходную переменную устанавливаются для всех точек горизонта прогноза. В результате этих ограничений в процессе оптимизации контролируется не только конечный результат, но и вся траектория прогнозирования [22-24]. Это обеспечивает работу системы с учётом физических и технологических ограничений.

В процессе получения сушильного агента степень открытия клапанов, регулирующих потоки первичного воздуха и природного газа, должна быть ограничена минимальным и максимальным значениями, а расход вторичного воздуха, подаваемого в камеру смешения, не должен выходить за пределы диапазона, установленного для оптимального ведения технологического процесса [20-23].

Для обеспечения стабильной и эффективной сушки необходимо поддерживать влажность, расход и температуру сушильного агента, расход материала, а также его влажность на входе и выходе в пределах нормативных значений, установленных технологическими требованиями.

Учет технологических ограничений интегрируется в целевую функцию и блок оптимизации алгоритма MPC, что обеспечивает стабильную и безопасную работу сушильной установки в любой реальной ситуации [21-25].

Заключение. Выявлена недостаточная эффективность традиционных методов в управлении процессами сушки твёрдых сыпучих материалов и обоснована необходимость их совершенствования. В результате исследования была разработана система управления на основе метода прогнозирующего управления (MPC) и продемонстрированы её преимущества.

Разработанный алгоритм MPC позволяет формировать оптимальные управляющие воздействия с учётом будущего состояния системы. Результаты показывают, что применение предложенного подхода в промышленных сушильных установках даёт возможность повысить энергоэффективность, улучшить производительность процесса и значительно поднять качество готовой продукции.

Adabiyotlar/Literatura/References:

1. Юсупбекова Н.Р., Алиев Р.А., Алиев Р.Р., Юсупбеков А.Н. Интеллектуальные системы управления и принятия решений// Учебник для ВУЗов. Ташкент - 2014: Узбекистон миллий энциклопедияси.
2. Юсупбекова Н.Р., Гулямов Ш.М., Сабиров У.К., Кабулов Н.А. Устройство для контроля состояния хранящегося сыпучих материалов//Агентство интеллектуальной собственности РУз. Заявка на патент № IAP 2018 0047 от 05.02.2018 г. А 01 5/00, "Вестник", №2, 2018 – с.7 - 8.
3. Юсупбекова Н.Р., Гулямов Ш.М., Адиллов Ф.Т., Турапина Н.Н., Жоров С.В. Advanced process control – усовершенствованное управление технологическими процессами и производствами // Сборник статей VII международной научной конференции «Приоритетные направления в области науки и технологии в XXI веке», Ташкент «ChinorEnk», 2014 г.
4. Kuan-Han Lin. Advances in Nonlinear Model Predictive Control and Their Applications in Chemical Engineering // Carnegie Mellon University. Pittsburgh, Pennsylvania, August, 2023. Copyright © Kuan-Han Lin.

5. Johannes Philippus Maree and Lars Imsland. Combined economic and regulatory predictive control. *Automatica*, 69:342–347, 2016.
6. Zhou Joyce Yu and Lorenz T. Biegler. Advanced-step multistage nonlinear model predictive control: robustness and stability. *Journal of Process Control*, 84(20):192–206, 2019.
7. Yang Shi, Chao Shen, Henglai Wei and Kunwu Zhang. Advanced Model Predictive Control for Autonomous Marine Vehicles // ISSN 1430-9491. © The Editor(s) (if applicable) and The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG 2023.
8. L. Wang, P. C. Young, P.J. Gawthrop, and C.J. Taylor. Non-minimal state space model-based continuous-time model predictive control with constraints // To appear in *International Journal of Control*, 2009.
9. Morari, M. and J. Lee, "Model Predictive Control: Past, Present and Future", *Comp. Chem. Eng.*, 21, 667-682, 1999.
10. P. Tondel, T.A. Johansen, and A. Bemporad. An algorithm for multiparametric quadratic programming and explicit MPC solutions. *Automatica*, 39:489–497, 2003.
11. J.Sh.Bekkulov. Predictive analysis and synthesis, modeling and control of complex technological processes and systems// "Chemical technology. Control and management" International scientific and technical journal. Tashkent-2021, №6 (102) pp.12-16. Journal homepage: <https://uzjournals.edu.uz/ijctcm/>.
12. Huang, L.X.; Mujumdar, A.S. Numerical study of two-stage horizontal spray dryers using computational fluid dynamics. *Drying Technology* 2006, 24(6), 727-733.
13. Дозорцев В.М., Ицкович Э.П., Кнеллер Д.В. Усовершенствованное управление технологическими процессами (APC): 10 лет в России// *Автоматизация в промышленности*. 2013. №1. С. 12-19.
14. Implement Advanced Process Control / Lehman Keight A. // *Chemical engineering progress*. – 2018. – Vol.114. – No.1. – PP. 60-66.
15. Р.Ю. Дадиомов, А.Г. Шумихин, Д.К. Корнилицин. Виртуальный анализатор влажности KCL на основе аналитической модели сушки в печи с кипящим слоем// *ВЕСТНИК ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология*. Пермь-2020. №3. DOI: 10.15593/2224-9400/2020.3.07.
16. Cecil Smith. Advanced process control (Beyond single loop control)// ISBN:9780470612880. // 2018.06.08.- 464 стр.
17. Бурцев А. Г., и др. Автоматизация процесса дозирования сыпучего материала с учетом заданного расхода воды и флотореагента //ISSN 2072-0297.Молодой учёный. Международный научный журнал. Выходит два раза в месяц № 10 (114) / 2016.
18. Логунов П.Л., Шаманин М.В. и др. Усовершенствованное управление технологическими процессами //Автоматизация в промышленности. 2015. №4, с. 4-14 с.
19. Lehman Keight A. Implement Advanced Process Control. *Chemical engineering progress*, 2018, vol. 114, no. 1, pp. 60-66.
20. J. Kohler, M. A. Muller, and F.Allgower. A nonlinear model predictive control framework using reference generic terminal ingredients//*IEEE Trans. Autom. Control*, 2020.
21. Бахтадзе Н. Н., Лотоцкий В. А. Современные методы управления производственными процессами / *Системы управления технологическими процессами*. - 2009. - №3 (1). - С. 56-63.
22. James B. Rawlings, David Q. Mayne, Moritz M. Diehl. *Model Predictive Control*// Copyright © 2022 by Nob Hill Publishing-LLC. <http://www.nobhillpublishing.com>.
23. Remes A. *Advanced Process Monitoring and Control Methods in Mineral Processing Applications*. Espoo : Aalto University, 2012. 76 p.

24. Черешко Алексей Анатольевич. Методы управления технологическими процессами на основе ассоциативных прогнозирующих моделей//Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2022. Федеральное Государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской Академии наук.
25. Adetola V., DeHan D. and Guay M. Robust adaptive MPC for constrained uncertain nonlinear systems // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2011.Vol. 25. P. 155–168.

TECHSCIENCE.UZ

**TEXNIKA FANLARINING DOLZARB
MASALALARI**

№ 5 (4)-2026

TOPICAL ISSUES OF TECHNICAL SCIENCES

**TECHSCIENCE.UZ- TEXNIKA
FANLARINING DOLZARB MASALALARI**
elektron jurnali 15.09.2023-yilda 130346-
sonli guvohnoma bilan davlat ro'yxatidan
o'tkazilgan.

Muassislar: "SCIENCEPROBLEMS TEAM"
mas'uliyati cheklangan jamiyati;
Jizzax politexnika insituti.

TAHRIRIYAT MANZILI:

Toshkent shahri, Yakkasaroy tumani, Kichik
Beshyog'och ko'chasi, 70/10-uy.

Elektron manzil:

scienceproblems.uz@gmail.com