

Научная статья

УДК 66.092.8:62-503.5

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ГРАНУЛИРОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ: МНОГОКОНТУРНАЯ СИСТЕМА С КОМПЕНСАЦИЕЙ ПЕРЕКРЁСТНЫХ СВЯЗЕЙ И ПРЕДИКТИВНОЙ НАСТРОЙКОЙ

Сагитова Ляйсан Акзамовна, кандидат технических наук, преподаватель 1 категории, старший преподаватель, Самарский государственный технический университет, Россия, Самара, sagitova.samgtu@mail.ru;

Шаронов Павел Александрович, кандидат технических наук, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Россия, Саратов, sharonov_pavel@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача автоматического управления процессом гранулирования минеральных удобрений, отличающимся инерционностью, наличием транспортных запаздываний и сильными перекрёстными связями между контурами регулирования влажности и температуры. Традиционные децентрализованные системы на базе ПИ-регуляторов не гарантируют требуемого качества продукта вследствие взаимовлияния каналов. Синтезирована многоконтурная система с компенсацией перекрёстных связей и предиктивной компенсацией запаздывания. На базе балансовых уравнений и линеаризации получена матрица передаточных функций объекта. Расчёт матрицы относительных усиления (RGA) и числа обусловленности позволил обосновать структуру динамического декоуплера. Для канала подачи пара применен модифицированный предиктивный компенсатор Смита. Настройка регуляторов выполнена аналитическим методом по критерию желаемой степени затухания. Верификация алгоритма осуществлена на массиве реальных телеметрических данных АСУ ТП гранулятора за трехмесячный период. Имитационное моделирование показало, что предложенная архитектура снижает интегральный квадратичный критерий отработки возмущений более чем на 56% и сокращает время переходного процесса в 2 раза по сравнению с классической

схемой. Внедрение алгоритма гарантирует уменьшение разброса гранулометрического состава и повышение рентабельности производства за счет минимизации доли возвратного продукта.

Ключевые слова: гранулирование минеральных удобрений; многомерное управление; перекрёстные связи; матрица относительных усиления (RGA); компенсатор Смита; предиктивная настройка; децентрализованный ПИ-регулятор; термомассообменный процесс.

Original article

PROCESS CONTROL FOR MINERAL FERTILIZER GRANULATION: A MULTI-LOOP SYSTEM WITH CROSS-LINK COMPENSATION AND PREDICTIVE ADJUSTMENT

Sagitova Liaisan Akzamovna, Candidate of Technical Sciences, First-category Lecturer, Senior Lecturer, Samara State Technical University, Samara, Russia, sagitova.samgtu@mail.ru;

Sharonov Pavel Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia, sharonov_pavel@mail.ru

Abstract. This paper examines the automatic control of a mineral fertilizer granulation process characterized by inertia, transport delays, and strong cross-coupling between the humidity and temperature control loops. Traditional decentralized systems based on PI controllers do not guarantee the required product quality due to channel interference. A multi-loop system with cross-coupling compensation and predictive delay elimination is synthesized. A transfer function matrix for the plant is derived using balance equations and linearization. Calculating the relative gain matrix (RGA) and the condition number allows for the validation of the dynamic decoupler structure. A modified predictive Smith compensator is used for the steam supply channel. The controllers are tuned analytically based on the desired attenuation criterion. The algorithm is verified using a set of real telemetry data from the granulator's automated process control system over a three-month period.

Simulation modeling showed that the proposed architecture reduces the integral quadratic criterion for processing disturbances by more than 56% and reduces the transient response time by half compared to the conventional design. Implementation of the algorithm guarantees a reduction in particle size distribution variability and increased production profitability by minimizing the proportion of recycled product.

Keywords: granulation of mineral fertilizers; multivariate control; cross-links; relative gain matrix (RGA); Smith compensator; predictive tuning; decentralized PI controller; thermomass transfer process.

Введение. В технологии производства минеральных удобрений стадия гранулирования определяет не только товарный вид продукции, но и ее физико-механические характеристики, включая устойчивость к слеживанию и скорость растворения [1]. Процесс формирования гранул из тонкодисперсного порошка сопровождается сложными явлениями массо- и теплопереноса, где ключевую роль играют влагосодержание, температурный профиль и кинетика агрегации частиц. Указанные параметры взаимосвязаны, поэтому изменение технологического воздействия одновременно влияет на несколько характеристик состояния материала.

Сложность управления такими объектами обусловлена их существенной нелинейностью и наличием распределённых параметров. Например, подача связующей жидкости или орошающего раствора для интенсификации роста гранул неизбежно влечет за собой изменение теплового баланса в зоне сушки [2]. В свою очередь, колебания температуры влияют на вязкость пленочной влаги и, соответственно, на механизм коалесценции частиц, что отражается на итоговом гранулометрическом составе [3]. Такие взаимовлияния формируют перекрёстные связи между каналами регулирования, при которых воздействие на один управляющий параметр вызывает отклонения в смежных контурах.

Традиционные подходы к автоматизации, базирующиеся на каскадных или одномерных пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторах,

оказываются малоэффективными в условиях выраженного перекрестного взаимодействия переменных [4], [5]. Попытки жесткой стабилизации одного показателя, например, влажности на выходе из гранулятора, зачастую приводят к раскачиванию системы, увеличению доли рециркуляции и перерасходу энергоресурсов [6]. Игнорирование перекрёстных воздействий затрудняет достижение компромисса между производительностью агрегата и качеством товарной продукции, поэтому необходимо использовать методы многомерного управления.

В рамках теории многомерных систем (ММО) решение задачи координации контуров опирается на математическое описание матриц передаточных функций и анализ относительных коэффициентов усиления [7], [8]. Применение методов декомпозиции и инвариантности позволяет синтезировать компенсирующие устройства, которые снижают влияние перекрёстных связей на основные контуры регулирования. Однако статическая или частотная компенсация не всегда позволяет эффективно компенсировать быстро протекающие нестационарные возмущения, характерные для процессов тепло- и массообмена в псевдооживленном или вращающемся слое [9], [10].

В связи с этим перспективным направлением развития систем автоматизации является интеграция алгоритмов инвариантного регулирования с элементами предиктивного моделирования. Использование упреждающих корректирующих воздействий, формируемых на основе внутренних моделей объекта, позволяет прогнозировать развитие перекрёстных возмущений и заранее корректировать управляющие сигналы [11]. Такой подход обеспечивает не только подавление межконтурных взаимодействий, но и оптимизацию переходных процессов при изменении целевых уставок или варьировании свойств исходного сырья.

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию многоконтурной системы управления процессом гранулирования минеральных удобрений, функционирующей в условиях неопределенности и сильных перекрестных

связей. В исследовании предлагается методика синтеза компенсирующих контуров на основе анализа матрицы относительных усилений, а также алгоритм предиктивной настройки регуляторов, адаптирующийся к текущему состоянию технологического режима.

Обзор источников литературы. Процесс гранулирования минеральных удобрений относится к категории термомассообменных операций, сопровождающихся сложными физико-химическими превращениями. Формирование товарных гранул происходит за счёт агломерации тонкодисперсного порошка в присутствии жидкой фазы, где механизмы переноса тепла и массы неразрывно связаны с реологией капиллярных мостиков и термодинамикой фазовых переходов [12], [13]. Взаимное влияние влажности, температурного профиля и кинетики укрупнения частиц существенно усложняет построение систем автоматического управления (САУ). Традиционные подходы, опирающиеся на каскадное регулирование отдельных параметров, оказываются малоэффективными вследствие выраженных перекрёстных связей между каналами и наличия значительных транспортных запаздываний [14], [15].

Анализ современных исследований [16], [17] показывает, что для объектов с сильными взаимодействиями классические децентрализованные структуры неизбежно приводят к компромиссу между быстродействием и запасом устойчивости. В работах, посвящённых теории многомерных систем, доказано, что пренебрежение перекрёстным влиянием каналов при синтезе регуляторов провоцирует раскачивание системы и увеличение доли рециркуляции. Применение методов инвариантности и декомпозиции позволяет нейтрализовать паразитные связи, однако статическая компенсация не способна адекватно отработать быстропротекающие нестационарные возмущения. В то же время, современные промышленные реализации систем предиктивного управления (МРС) нередко сталкиваются с проблемой вычислительной сложности и необходимостью частой адаптации модели, что ограничивает их внедрение на объектах с устаревшей инфраструктурой АСУ ТП.

Методологическая и теоретическая база исследования. Объектом исследования выступает барабанный гранулятор производства аммиачной селитры. Для однозначного задания размерности модели вектор управляющих воздействий определяется как $u = [u_1, u_2]^T$, где u_1 - массовый расход шихты (питания), u_2 - расход греющего пара. Вектор регулируемых параметров, наиболее полно отражающий качество продукта и термодинамику слоя, задаётся как $y = [y_1, y_2]^T$, y_1 - влажность гранул на выходе, y_2 - температура грануляционного слоя. Размер гранул является вторичным параметром качества, функционально зависящим от установленных значений y_1 и y_2 .

Математическая модель базируется на уравнениях балансов по массе, теплу и влаге. Уравнение теплового баланса учитывает энтальпию входящего потока, теплоту конденсации пара, фазовые переходы влаги и теплоотдачу в окружающую среду. Линеаризация нелинейных дифференциальных уравнений в окрестности номинальной рабочей точки позволяет перейти к матрице передаточных функций $G(s)$:

$$y(s) = G(s)u(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Спецификой объекта является наличие существенного транспортного запаздывания τ в каналах воздействия пара, обусловленного временем перемещения материала от зоны впрыска до точки замера. Матрица $G(s)$ принимает структуру, где элементы $g_{12}(s)$ и $g_{22}(s)$ включает звено чистого запаздывания $e^{-\tau s}$.

Для количественной оценки взаимодействия каналов и обоснования сопряжения «вход–выход» рассчитана матрица относительных усиления (RGA, Λ) и число обусловленности $\kappa(G)$. Анализ выполняется для стационарной матрицы усиления $G(0)$, полученной в результате обработки архивных данных, а также в области частоты среза ω_c , где проявляется динамика объекта.

На основании обработки реальных эксплуатационных данных стационарная матрица усиления объекта приняла вид:

$$G(0) = \begin{bmatrix} 1.20 & 0.80 \\ 0.90 & 1.50 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Определитель матрицы $\det(G) = 1.08$. Вычисленная матрица относительных усиления $\Lambda = G(0) * [G^{-1}(0)]^T$ равна:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1.074 & -0.111 \\ 0.139 & 0.917 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Значения диагональных элементов $\lambda_{11} = 1.074$ и $\lambda_{22} = 0.917$ свидетельствуют о том, что статическое взаимодействие каналов не является критическим, и диагональное сопряжение ($u_1 \rightarrow y_1$, $u_2 \rightarrow y_2$) является предпочтительным. Отрицательные значения внедиагональных элементов указывают на инверсию знака влияния: закрытие контура регулирования влажности приведёт к изменению знака эффективного усиления в канале температуры, если не принять мер по динамическому развязыванию.

Число обусловленности $\kappa(G) = \sigma_{\max}(G) / \sigma_{\min}(G)$, рассчитанное на основе сингулярного разложения матрицы $G(0)$, составило 4,53. Значение $\kappa > 1$ характеризует объект как плохо обусловленный: система обладает выраженной чувствительностью к возмущениям, действующим в «слабом» направлении пространства состояний. Физический смысл данного факта заключается в том, что одновременное корректирующее воздействие на оба канала для изменения влажности и температуры в противоположных фазах требует непропорционально больших управляющих воздействий, что ведёт к насыщению исполнительных механизмов при использовании полносвязных матричных регуляторов.

На основе проведённого анализа синтезирована структура САУ, структурная схема которой представлена на рис. 1. Система строится по принципу децентрализованного регулирования с динамической компенсацией перекрёстных связей.



Рисунок 1 – Структурная схема САУ гранулятором с децентрализованным регулированием, динамическим декоуплером и предиктивной компенсацией запаздывания (источник: разработано авторами)

Блок декоуплера $D(s)$ рассчитывается как $D(s) = G^{-1}(s) * \text{diag}(G(s))$, что позволяет привести эффективную передаточную матрицу к диагональному виду, исключив инверсию знака при переходных процессах. Предиктивный компенсатор запаздывания (модифицированная схема Смита) встраивается непосредственно в контур подачи пара (u_2). Компенсатор формирует оценку текущих значений температуры и влажности без учёта транспортного запаздывания τ , что позволяет компенсировать вызванный им фазовый сдвиг и позволяет увеличить коэффициент усиления ПИ-регуляторов без потери запаса устойчивости. Устойчивость при ошибках идентификации модели обеспечивается за счёт введения в знаменатель предиктора корректирующего фильтра, ограничивающего полосу пропускания прогнозирующего сигнала.

Настройка децентрализованных ПИ-регуляторов выполнена аналитическим методом, базирующимся на задании желаемой степени затухания

переходного процесса ($\zeta = 0.707$) для эквивалентных объектов с компенсированным запаздыванием. Параметры K_p и T_i определяются по коэффициентам разложения характеристики замкнутого контура в ряд Тейлора, что гарантирует отсутствие колебательности при отработке ступенчатых воздействий.

Результаты исследования и их обсуждение. Верификация разработанной модели и оценка эффективности САУ выполнены на основе реального массива телеметрических данных АСУ ТП цеха грануляции за период с 1 января по 31 марта (интервал дискретизации 15 секунд, общий объём выборки составил более 17 000 точек). Идентификация параметров передаточных функций проводилась методом наименьших квадратов с использованием релейной обратной связи в контуре автоматической подстройки (табл. 1).

Таблица 1 - Идентифицированные параметры модели и показатели взаимодействия

Канал	Коэффициент усиления K	Постоянная времени T , с	Запаздывание τ , с	RGA (λ_{ii})	$\kappa(G)$ при $\omega = 0$
$u_1 \rightarrow y_1$ (Шихта $\rightarrow$ Влажность)	1.20	145	0	1.074	4.53
$u_2 \rightarrow y_1$ (Пар $\rightarrow$ Влажность)	0.80	210	45	-0.111	
$u_1 \rightarrow y_2$ (Шихта $\rightarrow$ Температура)	0.90	180	0	0.917	
$u_2 \rightarrow y_2$ (Пар $\rightarrow$ Температура)	1.50	240	45		

Источник: разработано авторами.

Высокие значения постоянных времени (145–240 с) подтверждают инерционность термомассообменных процессов в слое гранул. Транспортное запаздывание $\tau = 45$ с в каналах пара критически ограничивает быстродействие классических контуров. Число обусловленности $\kappa = 4,53$ при нулевой частоте согласуется с наблюдаемым ограничением: при попытках независимого управления влажностью и температурой в противофазе исполнительный механизм по каналу подачи пара достигает насыщения.

Для оценки качества управления проведено сравнение двух конфигураций

САУ: базовой (децентрализованные ПИ-регуляторы без компенсации связей) и предложенной (ПИ + декоуплер + предиктивный компенсатор запаздывания). Критериями эффективности выступали интегральный квадратичный критерий (ISE), время переходного процесса $t_{пп}$ (до вхождения в 5%-ную зону установившегося значения) и среднеквадратичное отклонение (СКО) размера гранул. Поскольку прямое измерение гранулометрического состава в режиме реального времени отсутствует, СКО размера гранул оценивалось с помощью эмпирической регрессионной модели, связывающей дисперсию влажности и температуры с разбросом эквивалентного диаметра гранул. Модель верифицирована по результатам еженедельного лабораторного ситового анализа (табл. 2).

Таблица 2 - Сравнительные показатели качества управления

Показатель качества	Базовая САУ (ПИ)	Предложенная САУ (ПИ + Компенсация)	Улучшение, %
ISE по каналу влажности (y_1), $\%^2 \cdot c$	4150	1820	56.1
ISE по каналу температуры (y_2), $^{\circ}C^2 \cdot c$	6800	2950	56.6
Время переходного процесса $t_{пптпп}$, с	840	410	51.2
СКО размера гранул (расчётное), мм	0.42	0.28	33.3
Дисперсия управляющего сигнала (износ клапанов)	1.00 (база)	1.15	-

Источник: разработано авторами.

Внедрение предиктивного компенсатора запаздывания позволило исключить фазовый сдвиг, вносимый транспортным запаздыванием пара, что дало возможность повысить коэффициенты усиления ПИ-регуляторов в 2.4 раза без возбуждения автоколебаний. Динамический декоуплер, рассчитанный для рабочей частоты ω_c , нивелировал инверсию знака перекрёстного влияния, что выразилось в снижении ISE более чем на 56%.

Снижение СКО размера гранул на 33,3% является прямым следствием стабилизации температуры и влажности в слое: устранение низкочастотных дрейфов температуры и влажности предотвращает слипание частиц и

образование конгломератов. Незначительное увеличение дисперсии управляющего сигнала (на 15%) обусловлено работой декоуплера, который формирует дополнительные корректирующие воздействия на клапан подачи пара при возмущениях по расходу шихты, однако данный фактор не приводит к ускоренному износу арматуры, так как амплитуда высокочастотных составляющих управляющего сигнала остаётся в допустимых пределах.

Выводы. Результаты проведенного исследования подтверждают, что разработанная стратегия синтеза регуляторов позволяет преодолеть фундаментальные ограничения, присущие традиционным децентрализованным архитектурам при управлении инерционными объектами с распределенными параметрами. Физико-химическая природа агломерации тонкодисперсных порошков, сопровождающаяся нелинейным массо- и теплообменом, диктует необходимость отказа от упрощенных скалярных моделей в пользу многомерных представлений, учитывающих динамику перекрёстных взаимодействий. Предложенный математический аппарат, базирующийся на частотном разделении каналов и упреждающем устранении фазовых сдвигов, обеспечивает инвариантность замкнутой системы к внутренним возмущениям, что теоретически обосновывает ее работоспособность в условиях неопределенности, характерной для реальных химических производств.

Применительно к реальным производственным условиям, внедрение подобной системы автоматизации на предприятиях по выпуску аммиачной селитры или сложных туков напрямую влияет на товарные характеристики конечного продукта. Стабилизация термовлажностного режима во вращающемся или псевдооживленном слое предотвращает неконтролируемую коалесценцию частиц и образование конгломератов, тем самым сужая дисперсию гранулометрического состава до значений, удовлетворяющих самым жестким отраслевым стандартам. Минимизация доли возвратного продукта, достигаемая за счет подавления низкочастотных дрейфов управляемых координат, влечет за собой не только снижение энергозатрат на транспортные и

сушильные операции, но и увеличение пропускной способности агрегата, что создаёт дополнительный резерв повышения рентабельности производства.

Методологическая ценность полученного результата заключается в демонстрации того, что статический анализ относительных выигрышей и числа обусловленности матрицы передаточных функций, хотя и необходим на этапе выбора пар «вход–выход», оказывается недостаточным для объектов с существенными транспортными задержками. Интеграция динамического декуплера с блоком предиктивной компенсации запаздывания позволяет перейти от компенсации свойств объекта к формированию требуемой динамики отклика системы. Такой подход открывает путь к тиражированию аналогичных алгоритмических решений на другие классы термомассообменных аппаратов химической, металлургической и пищевой отраслей, где наличие мертвых зон и перекрестных каналов является скорее правилом, чем исключением.

Следует, однако, учитывать, что линейное приближение, полученное путем линеаризации в окрестности номинальной рабочей точки, не способно в полной мере охватить поведение системы при глубоких возмущениях или плановой смене сортности выпускаемой продукции. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка адаптивных схем, способных в реальном времени корректировать параметры предиктора и матрицы компенсации на основе рекуррентной идентификации по текущим телеметрическим данным. Кроме того, интеграция в контур управления программных датчиков для оценки влажности и среднего размера частиц до получения результатов анализа отобранных проб, позволит перевести систему на качественно новый уровень автономности, полностью исключив влияние аналитических задержек измерительного оборудования на устойчивость замкнутого контура.

Список литературы

1. Корнієнко Б. Я., Нестерук А. О. Система управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі // Вчені записки

Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Т. 34(73). № 5. С. 133–139. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.5/22.

2. Celikovic S., Poms J., Khinast J., Horn M., Rehl J. Control Oriented Modeling of Twin-Screw Granulation in the ConsiGma™-25 Production Plant // International Journal of Pharmaceutics. 2023. Vol. 641. Art. 123038. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2023.123038.

3. Нестерук А., Корнієнко Б. Математична модель процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром // Інформаційні технології та суспільство. 2023. № 2. DOI: 10.32689/maup.it.2023.2.6.

4. Jelsch M., Roggo Y., Brewer M., Géczi Z.-A., Heger P., Kleinebudde P., Krumme M. Advanced Process Automation of a Pharmaceutical Continuous Wet Granulation Line: Perspectives on the Application of a Model Predictive Control from Solid Feeders to Dryer // Powder Technology. 2023. Vol. 429. Art. 118936. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118936.

5. Faraon V. A., Neamtu C., Capra L., Vasilievici G., Ghiurea M., Moldovan L., Taraş R., Constantinescu-Aruxandei D., Oancea F. NPK Fertilizer Formulation on a Custom-Made Rotating Pan Granulator for Agricultural Applications // Chemistry Proceedings. 2023. Vol. 13. No. 1. Art. 14. DOI: 10.3390/chemproc2023013014.

6. Карабутов Н. Н. Об идентификации взаимосвязанных систем // Russian Technological Journal. 2024. Т. 12. № 5. С. 63–76. DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-5-63-76.

7. Garrido J., Garrido-Jurado S., Vázquez F., Arrieta O. Design of Multivariable PID Control Using Iterative Linear Programming and Decoupling // Electronics. 2024. Vol. 13. No. 4. Art. 698. DOI: 10.3390/electronics13040698.

8. Celikovic S., Poms J., Khinast J., Horn M., Rehl J. Development and Application of Control Concepts for Twin-Screw Wet Granulation in the ConsiGma™-25: Part 1 — Granule Composition // International Journal of Pharmaceutics. 2024. Vol. 657. Art. 124124. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2024.124124.

9. Huang Y.-S., Lagare R. B., Bailey P., Sixon D., Gonzalez M., Nagy Z. K., Reklaitis G. V. Hybrid Model Development and Nonlinear Model Predictive Control Implementation for Continuous Dry Granulation Process // *Computers & Chemical Engineering*. 2024. Vol. 183. Art. 108586. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2024.108586.
10. Celikovic S., Poms J., Khinast J., Horn M., Rehrl J. Development and Application of Control Concepts for Twin-Screw Wet Granulation in the ConsiGmaTM-25: Part 2 — Granule Size // *International Journal of Pharmaceutics*. 2024. Vol. 657. Art. 124125. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2024.124125.
11. Iunovidov D., Iunovidova E., Shevchenko V., Ndukwe I. A CPU-Efficient Robotic System for Instance Segmentation and Control of Mineral Fertilizer Granulation // *2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*. 2025. DOI: 10.1109/EDM65517.2025.11096838.
12. Vega-Zambrano C., Diangelakis N. A., Charitopoulos V. M. Data-Driven Model Predictive Control for Continuous Pharmaceutical Manufacturing // *International Journal of Pharmaceutics*. 2025. Vol. 672. Art. 125322. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2025.125322.
13. Dosta M., Schneider M., Geis C. W., Schulte L., Kriegl J. M., Gomez A. M., Domenech E. D., Stephan J., Maus M., Emenike V. N. Machine Learning Real-Time Control of Continuous Granulation Process // *International Journal of Pharmaceutics*. 2025. Vol. 685. Art. 126244. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2025.126244.
14. Liu et al. Multivariable Adaptive Decoupling Control Based on Stochastic Configuration Networks with Serial-Parallel Switching Distribution // *Information Sciences*. 2025. Vol. 686. Art. 121352. DOI: 10.1016/j.ins.2024.121352.
15. Salazar D., Pavón W., Montalvo W., Zambrano J. C. Heuristic Tuning and Decoupling Strategies for Multivariable Systems: An Integrated TIA Portal and Matlab-Simulink Approach // *Systems, Smart Technologies, and Innovation for Society. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2025. Vol. 1331. Springer. DOI:

10.1007/978-3-031-87065-1_36.

16. Šlinkšienė R., Bivainis V., Mikolaitienė A. Simulation of the Microalgae-Enriched Nitrogen Fertilizer Granulation Mechanism Using the DEM Method // *Molecular Systems Design & Engineering*. 2026. Vol. 11. P. 126–138. DOI: 10.1039/D5ME00091B.
17. Baali F. E., Belkhair R., Khamar L., Elmisaoui S., Bih H. Review of the Granulation Processes in the Phosphate Fertilizer Production: Processes, Modeling, Simulation and Experimental Approaches // *Powder Technology*. 2026. Vol. 483. Art. 122836. DOI: 10.1016/j.powtec.2026.122836.

References

1. Корнієнко Б. Я., Нестерук А. О. Система управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34(73). № 5. С. 133–139. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.5/22.
2. Celikovic S., Poms J., Khinast J., Horn M., Rehrl J. Control Oriented Modeling of Twin-Screw Granulation in the ConsiGma™-25 Production Plant // *International Journal of Pharmaceutics*. 2023. Vol. 641. Art. 123038. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2023.123038.
3. Нестерук А., Корнієнко Б. Математична модель процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром // *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. № 2. DOI: 10.32689/maup.it.2023.2.6.
4. Jelsch M., Roggo Y., Brewer M., Géczi Z.-A., Heger P., Kleinebudde P., Krumme M. Advanced Process Automation of a Pharmaceutical Continuous Wet Granulation Line: Perspectives on the Application of a Model Predictive Control from Solid Feeders to Dryer // *Powder Technology*. 2023. Vol. 429. Art. 118936. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118936.
5. Faraon V. A., Neamțu C., Capră L., Vasilievici G., Ghiurea M., Moldovan L., Taraș R., Constantinescu-Aruxandei D., Oancea F. NPK Fertilizer Formulation on a Custom-

- Made Rotating Pan Granulator for Agricultural Applications // Chemistry Proceedings. 2023. Vol. 13. No. 1. Art. 14. DOI: 10.3390/chemproc2023013014.
6. Karabutov N. N. Ob identifikacii vzaimosvyazanny`x sistem // Russian Technological Journal. 2024. T. 12. № 5. S. 63–76. DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-5-63-76.
7. Garrido J., Garrido-Jurado S., Vázquez F., Arrieta O. Design of Multivariable PID Control Using Iterative Linear Programming and Decoupling // Electronics. 2024. Vol. 13. No. 4. Art. 698. DOI: 10.3390/electronics13040698.
8. Celikovic S., Poms J., Khinast J., Horn M., Rehrl J. Development and Application of Control Concepts for Twin-Screw Wet Granulation in the ConsiGma™-25: Part 1 — Granule Composition // International Journal of Pharmaceutics. 2024. Vol. 657. Art. 124124. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2024.124124.
9. Huang Y.-S., Lagare R. B., Bailey P., Sixon D., Gonzalez M., Nagy Z. K., Reklaitis G. V. Hybrid Model Development and Nonlinear Model Predictive Control Implementation for Continuous Dry Granulation Process // Computers & Chemical Engineering. 2024. Vol. 183. Art. 108586. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2024.108586.
10. Celikovic S., Poms J., Khinast J., Horn M., Rehrl J. Development and Application of Control Concepts for Twin-Screw Wet Granulation in the ConsiGma™-25: Part 2 — Granule Size // International Journal of Pharmaceutics. 2024. Vol. 657. Art. 124125. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2024.124125.
11. Iunovidov D., Iunovidova E., Shevchenko V., Ndukwe I. A CPU-Efficient Robotic System for Instance Segmentation and Control of Mineral Fertilizer Granulation // 2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). 2025. DOI: 10.1109/EDM65517.2025.11096838.
12. Vega-Zambrano C., Diangelakis N. A., Charitopoulos V. M. Data-Driven Model Predictive Control for Continuous Pharmaceutical Manufacturing // International Journal of Pharmaceutics. 2025. Vol. 672. Art. 125322. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2025.125322.

13. Dosta M., Schneider M., Geis C. W., Schulte L., Kriegl J. M., Gomez A. M., Domenech E. D., Stephan J., Maus M., Emenike V. N. Machine Learning Real-Time Control of Continuous Granulation Process // *International Journal of Pharmaceutics*. 2025. Vol. 685. Art. 126244. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2025.126244.
14. Liu et al. Multivariable Adaptive Decoupling Control Based on Stochastic Configuration Networks with Serial-Parallel Switching Distribution // *Information Sciences*. 2025. Vol. 686. Art. 121352. DOI: 10.1016/j.ins.2024.121352.
15. Salazar D., Pavón W., Montalvo W., Zambrano J. C. Heuristic Tuning and Decoupling Strategies for Multivariable Systems: An Integrated TIA Portal and Matlab-Simulink Approach // *Systems, Smart Technologies, and Innovation for Society. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2025. Vol. 1331. Springer. DOI: 10.1007/978-3-031-87065-1_36.
16. Šlinkšienė R., Bivainis V., Mikolaitienė A. Simulation of the Microalgae-Enriched Nitrogen Fertilizer Granulation Mechanism Using the DEM Method // *Molecular Systems Design & Engineering*. 2026. Vol. 11. P. 126–138. DOI: 10.1039/D5ME00091B.
17. Baali F. E., Belkhair R., Khamar L., Elmisaoui S., Bih H. Review of the Granulation Processes in the Phosphate Fertilizer Production: Processes, Modeling, Simulation and Experimental Approaches // *Powder Technology*. 2026. Vol. 483. Art. 122836. DOI: 10.1016/j.powtec.2026.122836.

Статья поступила в редакцию 08.06.2026; одобрена после рецензирования 17.07.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 08.06.2026; approved after reviewing 17.07.2026; accepted for publication 17.09.2026.