



МРНТИ 51.39.29

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-149-4-363-380>

Научная статья

Разработка системы автоматического регулирования температурного режима вакуум-сублимационной сушки на основе идентификации параметров объекта

А.Б.Рахматуллина¹, Ж.Ж.Омирбекова², М.Б.Толганбаева*³,
Н.М.Тасмурзаев⁴

¹РГП на ПХВ «Институт механики и машиноведения имени академика У. А. Джолдасбекова»

²Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева

³Южно-Казахстанский государственный университет имени М. Ауезова

⁴Казахский национальный университет имени Аль-Фараби

(E-mail: *tolganbaeva86@mail.ru)

Аннотация. Статья посвящена исследованию методов управления процессом сушки молока с особым вниманием к выбору оптимальных регуляторов на основе данных и параметрической идентификации объекта. Рассматриваются различные подходы к улучшению точности и эффективности системы управления, что позволяет адаптировать её к изменяющимся условиям производства. Основной акцент сделан на параметрической идентификации с использованием температурных данных для более точного моделирования динамики процесса сушки. Это позволяет разработать более эффективные регуляторы, обеспечивающие стабильное управление процессом и снижение энергозатрат. Представленные результаты показывают, что предложенные методы улучшают качество конечного продукта и оптимизируют энергопотребление. Исследование делает значительный вклад в область оптимизации технологических процессов в молочной промышленности, предлагая современные решения для управления с учетом специфики производства. Эти выводы способствуют повышению конкурентоспособности и устойчивости предприятий в данной отрасли.

Ключевые слова: сушка молока, контур управления, регулирование процесса, оптимальный регулятор, идентификация объекта, молочная промышленность.

Поступила 22.10.2024. Доработана 18.11.2024. Одобрена 07.12.2024. Доступна онлайн 31.12.2024

¹*автор корреспонденции

Введение

Вакуумная сублимационная сушка представляет собой передовую технологию, применяемую в пищевой промышленности для обработки разнообразных продуктов. Она используется для сушки фруктов и овощей, мяса и птицы, морепродуктов, приправ, полуфабрикатов и специализированных продуктов. Благодаря этой технологии удается сохранять исходный цвет, аромат, вкус, форму и свежесть продуктов, обеспечивая их высокое качество [1-4].

Процесс вакуумной сублимационной сушки обладает рядом преимуществ. Важнейшее из них – отличная дегидратация, которая позволяет удалять влагу из продукта при низких температурах, сохраняя при этом его питательные и органолептические свойства. Готовый продукт, полученный таким способом, легко хранить и транспортировать, поскольку снижается его масса и объем. Стоимость хранения и транспортировки уменьшается, а срок годности продуктов значительно увеличивается [4].

В последние годы исследования показали, что точный контроль температурных и вакуумных параметров является ключом к эффективности сублимации. Важно поддерживать оптимальный температурный градиент между продуктом и конденсатором, так как это ускоряет переход воды в парообразное состояние, не повреждая структуру продукта. Например, исследование показало, что при увеличении разницы температур между полками и продуктом процесс сублимации ускоряется, сохраняя высокое качество конечного продукта [5].

Кроме того, использование вакуума для создания идеальных условий сублимации также играет важную роль. Недавние исследования подчеркивают, что слишком низкое давление может замедлить процесс, так как температура продукта также снижается при понижении давления. Это может привести к ухудшению качества сушки и увеличению времени цикла [6].

Оптимизация температуры и давления обеспечивает более быструю и эффективную дегидратацию, что особенно важно для продуктов с чувствительными компонентами, такими, как биофармацевтические препараты и пищевые продукты высокого качества.

Таким образом, современные технологии управления вакуумом и температурой позволяют минимизировать время сублимационной сушки и улучшить качество продукции за счет более точного контроля фазовых переходов. Исследования подтверждают, что поддержание стабильных условий, а также правильный выбор оборудования (например, вакуумных насосов с высокой точностью) значительно увеличивают эффективность процесса [7].

Современная вакуумная сублимационная сушилка представляет собой сложную систему, включающую в себя:

Систему охлаждения, обеспечивающую необходимую температуру для замораживания продуктов перед сушкой.

Вакуумную систему, создающую условия низкого давления для эффективного сублимационного процесса.

Систему нагрева масляного теплоносителя, которая обеспечивает равномерное и контролируемое нагревание продуктов.

Систему осушения, отвечающую за удаление влаги и поддержание требуемых параметров воздуха внутри сушильной камеры.

Разработка систем автоматического управления (САУ) и автоматического регулирования (САР) для оборудования вакуум-сублимационной сушки кобыльего и верблюжьего молока требует особого внимания к специфике продукта и технологических процессов. В данном исследовании будет предложен алгоритм разработки таких систем, обеспечивающий оптимизацию процесса сушки и высокое качество конечного продукта [9-10].

Методология

Контур управления вакуумной сублимационной сушилкой состоит из двух ключевых этапов, которые обеспечивают эффективное и качественное высушивание продукта при минимальных потерях питательных веществ и сохранении его органолептических свойств. Первый этап – это глубокое замораживание продукта, которое начинается с активации системы охлаждения. Важность этого этапа заключается в том, что замораживание при очень низких температурах (обычно ниже -40°C) способствует образованию мелких кристаллов льда, что предотвращает разрушение клеточной структуры продукта. Это обеспечивает сохранение текстуры, вкуса и питательной ценности. На этом этапе важнейшую роль играет холодная ловушка, которая улавливает пары воды и замораживает их, предотвращая возврат влаги в продукт. Холодная ловушка критически важна для обеспечения стабильности процесса, поскольку она минимизирует вероятность окисления, разрушения структуры и других нежелательных химических реакций. Это помогает продлить срок хранения и улучшить качество конечного продукта.

Второй этап – это собственно процесс лиофилизации, который начинается с активации вакуумных насосов и компрессоров. Эти устройства создают крайне низкое давление (обычно около 1–2 Па), что приводит к тому, что вода из замороженного продукта начинает испаряться, минуя жидкую фазу. Этот процесс называется сублимацией, и он позволяет удалить влагу без разрушения структуры продукта, как это может происходить при обычной термической сушке. Важно поддерживать стабильное давление и температуру в системе, чтобы предотвратить изменение фазового состояния воды и обеспечить максимально эффективную дегидратацию. Точная настройка этих параметров играет ключевую роль в повышении качества продукта: стабильный вакуум обеспечивает равномерное удаление влаги, а контролируемая температура позволяет избежать перегрева и изменений текстуры или вкуса.

В совокупности этапы замораживания и сублимации, управляемые в строгом соответствии с заданными параметрами, позволяют достичь высокого уровня дегидратации при минимальной потере питательных веществ. Контур управления вакуумной сублимационной сушилкой, оснащенный современными средствами автоматизации и

датчиками для постоянного мониторинга температуры и давления, является ключевым элементом в обеспечении высокой эффективности и качества конечного продукта. Поддержание этих параметров на оптимальных уровнях не только увеличивает срок хранения, но и позволяет сохранить цвет, аромат, вкус и структуру, что критически важно для продуктов, подвергающихся лиофилизации, таких, как молоко, фрукты, мясо и биофармацевтические препараты.

Разработка системы управления

Планируется разработка системы управления, оснащенной семидюймовым цветным сенсорным экраном, который будет прост в использовании и эффективен. Каждый экран сможет отображать обширные данные, которые будут интуитивно понятны и легко интерпретируемы. Система будет способна сохранять до 40 программ контроля температуры, каждая из которых сможет включать до 36 сегментов. Использование усовершенствованного алгоритма нечеткого ПИД-регулирования обеспечит точный и стабильный контроль температуры. В процессе автоматического контроля температуры параметры смогут быть изменены в любое время, что обеспечит гибкость работы.

Система управления будет контролировать температуру перегородки согласно заранее заданным параметрам. Для обеспечения стабильной и надежной работы системы управления планируется внедрить различные меры по поддержанию стабильности. В рамках разработки предусмотрено отображение различных экранов для мониторинга и управления процессом. Такая система управления обеспечит высокую точность и надежность, что является критически важным для эффективного проведения процесса вакуумной сублимационной сушки.

Идентификация объекта с помощью данных

Параметрическая идентификация для вакуумной сублимационной сушки использовала входные данные (уставка температуры) и выходные значения (температуры в точках 1-5) для построения модели, описывающей динамическое поведение системы. Процесс идентификации включает в себя сбор данных, их нормализацию и выбор подходящей модели, которая связывает входные и выходные данные. В данном случае была выбрана линейная модель ARX (Auto-Regressive with exogenous inputs), которая учитывает влияние уставки на изменение температур в разных точках системы сублимации [ссылка].

После применения метода наименьших квадратов для оценки параметров модели была получена передаточная функция, описывающая связь между уставкой температуры и температурными изменениями. Модель первого порядка может быть представлена передаточной функцией вида:

$$W(s) = \frac{K}{Ts+1} \quad (1)$$

где K – коэффициент усиления, а T – постоянная времени, характеризующая скорость реакции системы на изменение уставки. Передаточная функция позволяет понять, насколько быстро система стабилизирует температуру при изменении уставки и насколько велико влияние этого изменения на конечные параметры.

Использование передаточной функции в системе управления сублимацией позволяет не только лучше контролировать температурные параметры, но и оптимизировать процесс сушки. Это особенно важно для обеспечения равномерного и качественного удаления влаги без нарушения структуры продукта. Такая модель позволяет улучшить точность регулирования и минимизировать затраты энергии за счет оптимальной настройки параметров системы управления.

Идентификация объекта управления является важным этапом в разработке эффективной системы управления вакуумной сублимационной сушилкой. Этот процесс включает в себя использование данных, собранных в ходе работы прототипного оборудования типа ZLGJ-300 для определения параметров, описывающих динамическое поведение системы. Параметрическая идентификация непрерывных систем фокусируется на установлении параметров дифференциальных уравнений, которые моделируют поведение управляемого объекта [10-11].

Прототипное оборудование оснащено датчиками, которые непрерывно измеряют и записывают данные о различных параметрах системы, таких, как температура внутри камеры, температура холодной ловушки, давление и другие ключевые показатели. Эти данные служат основой для процесса идентификации. Контур управления вакуумной сублимационной сушилкой включает в себя взаимодействие между заданной температурой и температурой холодной ловушки. Для достижения оптимальной работы системы необходимо точно моделировать это взаимодействие, что требует точного определения параметров дифференциальных уравнений, описывающих тепловые и динамические процессы. Данные приведены в таблице 1.

Процесс параметрической идентификации начинается с анализа данных, собранных с прототипного оборудования. Эти данные включают в себя временные ряды измерений температуры, давления и других параметров в различных точках системы. На основе этих данных строятся математические модели, которые затем калибруются с целью минимизации расхождений между предсказаниями модели и реальными наблюдениями. Для этого применяются методы статистической идентификации, такие, как метод наименьших квадратов, метод максимального правдоподобия и другие современные алгоритмы оптимизации.

После определения параметров модели проводится их верификация и валидация. Верификация включает проверку модели на соответствие исходным данным, а валидация – проверку модели на новых, независимых наборах данных, которые не использовались при калибровке. Это позволяет убедиться в том, что модель правильно описывает поведение системы в широком диапазоне рабочих условий.

Разработанная модель затем интегрируется в систему управления сушилкой, позволяя осуществлять более точное и стабильное регулирование процесса сублимационной сушки. В итоге этот подход обеспечивает высокий уровень контроля над процессом, улучшая качество конечного продукта и повышая эффективность работы оборудования.

Таблица 1. Измеренный температурный режим сушки кобыльего молока (отрывок)

MCGS_TIME	Температура холодной ловушки	Уставка температуры	Вакуум, ПА	температура 1	температура 2	температура 3	температура 4	температура 5
15.03.2024 11:54	-32.6	-50	110000	-16.3	-20.9	-18.9	-22.7	-23.2
15.03.2024 11:57	-34.4	-50	110000	-18.1	-22.9	-20.9	-24.7	-25.3
15.03.2024 12:00	-36	-50	110000	-19.6	-24.8	-22.7	-26.4	-27.1
15.03.2024 12:03	-37.4	-50	110000	-20.9	-26.5	-24.3	-28.1	-28.9
15.03.2024 12:06	-38.7	-50	110000	-22.5	-28	-25.7	-29.7	-30.4
15.03.2024 12:09	-40	-50	110000	-23.6	-29.5	-27.1	-31	-31.8
15.03.2024 12:12	-41.2	-50	97160	-24.7	-30.8	-28.4	-32.4	-33.1
15.03.2024 12:15	-42.3	-50	95733.33	-25.6	-32.1	-29.5	-33.5	-34.3
15.03.2024 12:18	-43.4	-50	95733.33	-26.6	-33.2	-30.6	-34.6	-35.4
15.03.2024 12:21	-44.4	-50	94306.66	-27.4	-34.3	-31.6	-35.6	-36.5
15.03.2024 12:24	-45.3	-50	92880	-28.1	-35.3	-32.5	-36.7	-37.5
15.03.2024 12:27	-46.2	-50	92880	-28.9	-36.3	-33.3	-37.6	-38.4
15.03.2024 12:30	-47.1	-50	92880	-29.8	-37.2	-34.1	-38.4	-39.2
15.03.2024 12:33	-47.8	-50	92880	-30.6	-38.1	-34.8	-39.3	-40.1
15.03.2024 12:36	-48.6	-50	91453.33	-31.4	-38.9	-35.5	-39.8	-40.9
15.03.2024 12:39	-49.3	-50	91453.33	-32	-39.6	-36.1	-40.6	-41.7
15.03.2024 12:42	-50	-50	91453.33	-32.6	-40.4	-36.7	-41.2	-42.4
15.03.2024 12:45	-49.8	-50	91453.33	-33.1	-41	-37.1	-41.6	-42.9

15.03.2024 12:48	-49.7	-50	91453.33	-33.4	-41.6	-37.5	-42	-43.3
---------------------	-------	-----	----------	-------	-------	-------	-----	-------

Массив данных, использованный для параметрической идентификации, состоит из 482 записей, каждая из которых отражает изменение температуры в течение 20 часов процесса сублимационной сушки. Сбор данных проводился с интервалом в 3 минуты, что обеспечило высокую временную разрешающую способность и позволило детально анализировать динамику температурных изменений. Эти данные были получены в ходе реального эксперимента сушки верблюжьего молока, проведенного 15 марта 2024 года. Результаты эксперимента послужили основой для построения модели, точно описывающей поведение системы сушки в условиях изменения температур и давления, что делает модель высоко применимой для дальнейших исследований и оптимизации процесса.

Такой подробный временной ряд позволяет учесть как кратковременные флуктуации температуры, так и долговременные тренды, связанные с переходными процессами и стабилизацией системы. Данные о температуре, полученные с заданной частотой, являются критически важными для построения точных моделей, которые могут адекватно описать тепловое поведение системы в различных режимах работы.

В результате использование этого массива данных позволяет достичь высокой точности при параметрической идентификации и обеспечивает разработку надежных моделей для системы управления вакуумной сублимационной сушилкой.

Исследование динамических систем с использованием System Identification Toolbox MATLAB включает процесс построения математической модели на основе экспериментальных данных, чтобы точно описать поведение системы. В данном исследовании целью является определение передаточной функции на основе данных временной области (например, "mydata"). Для этого был выбран метод TFEST (Transfer Function Estimation), который позволяет оценить параметры передаточной функции на основе измеренных входных и выходных данных системы.

Метод TFEST работает с временными рядами, позволяя пользователю определить порядок передаточной функции и оценить её параметры (коэффициенты числителя и знаменателя). Это важно для построения модели, которая точно описывает динамическое поведение системы в ответ на входные воздействия. После идентификации передаточная функция может быть использована для моделирования и анализа системы, а также для дальнейшей настройки регуляторов, таких как ПИД, что особенно важно в контексте управления и автоматизации.

Использование System Identification Toolbox и метода TFEST делает возможным построение моделей с высокой точностью, что позволяет инженерам и исследователям эффективно анализировать сложные динамические системы, прогнозировать их поведение и оптимизировать процессы управления. [11, 12-13].

В процессе идентификации было установлено, что передаточная функция системы имела два полюса и два нуля, что точно отражало её динамические характеристики. Оценка модели показала высокую степень соответствия с расчетными данными – 96,07%,

что подтвердило стабильность и точность полученной модели. Оценки качества модели, такие, как Final Prediction Error (FPE) и Mean Squared Error (MSE), составили 2,177 и 2,128 соответственно, что указывало на хорошую адаптацию модели к экспериментальным данным.

Результаты исследования продемонстрировали возможность их непосредственного применения для анализа и управления динамическими системами, а также для последующей интеграции модели в Simulink MATLAB для проведения симуляций и принятия инженерных решений. Подход с использованием идентификации системы показал высокую эффективность в использовании данных для оптимизации процессов и разработки технологических решений в области автоматизации и управления системами.

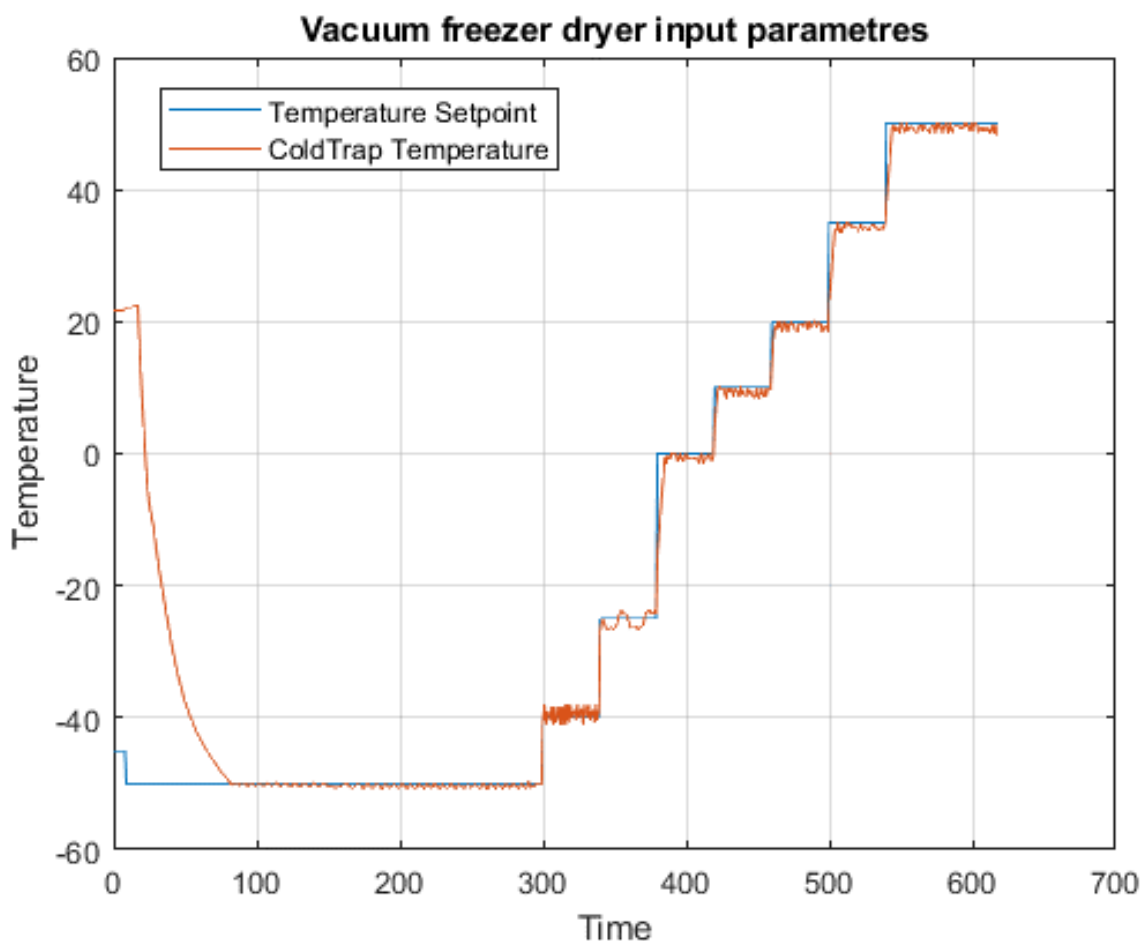


Рисунок 1. Входные данные для идентификации.

Модель, полученная в результате идентификации, представлена в формуле 2 и показана на рисунке 2. Она точно описывает динамическое поведение системы и может использоваться для дальнейшей разработки алгоритмов управления и симуляций в инженерных приложениях.

После идентификации объекта управления следующим этапом исследования становится разработка оптимальных параметров регулятора.

На рисунке 2 представлены результаты измеренных и смоделированных данных, описывающих динамическое поведение системы при управлении температурным режимом. Чёрная линия представляет измеренные данные, а цветные линии – это модели, полученные для пяти различных передаточных функций (tf1, tf2, tf3, tf4, tf5), каждая из которых демонстрирует точность моделирования в процентах.

– tf1 (синяя линия) показывает точность 88.79%. Она описывает близкое соответствие моделированного отклика с реальными данными, однако в начале графика видно отклонение при первых изменениях.

– tf2 (зелёная линия) имеет точность 83.46%, демонстрируя несколько более значительное отклонение на ранних этапах по сравнению с tf1.

– tf3 (красная линия) показывает точность 84.85% и сходную динамику отклика с tf2, но небольшое расхождение с измеренными данными.

– tf4 (пурпурная линия) демонстрирует точность 96.07%, которая является одной из самых высоких среди моделей. Она почти идеально повторяет изменения системы, особенно в областях с более медленными изменениями.

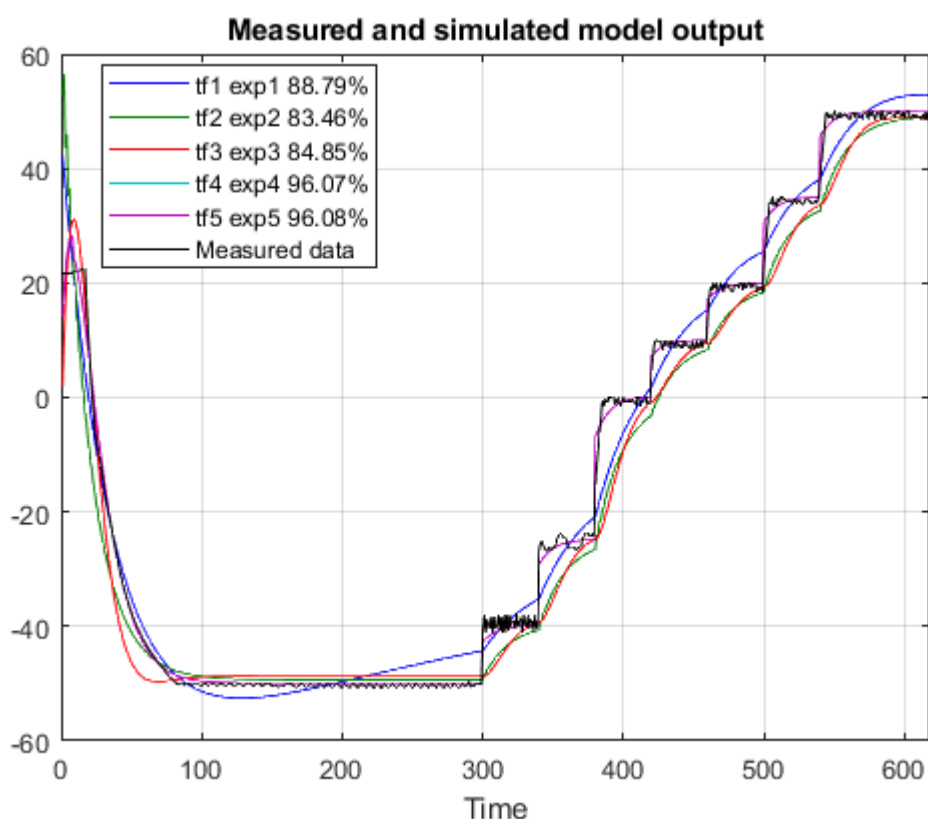


Рисунок 2. Результаты идентификации объекта управления.

$$W(s) = \frac{0.7184s^2 + 0.1313s + 0.005}{s^2 + 0.1448s + 0.005} \quad (2)$$

– tf5 (чёрная линия) имеет точность 96.08% и показывает практически идеальное совпадение с измеренными данными на всём интервале времени.

Результаты показывают, что модели с tf4 и tf5 имеют наибольшую точность и лучше всего описывают динамику системы с минимальными отклонениями от реальных данных.

Синтез параметров оптимального регулятора

В качестве алгоритма синтеза параметров оптимального регулятора был выбран LQR (Linear Quadratic Regulator), который представляет собой эффективный метод синтеза оптимальных параметров регулятора для управления линейными динамическими системами, оптимизируя квадратичный критерий производительности в формуле (3). Он использует теорию оптимального управления и методы линейной алгебры для построения регулятора, который минимизирует взвешенные квадраты состояний системы и управляющих воздействий. Основой LQR является динамическое программирование Беллмана, которое определяет оптимальную обратную связь состояний через уравнение Риккати. Этот подход широко применяется в автоматическом управлении, робототехнике и управлении процессами, обеспечивая стабильное и точное управление системами с переменными параметрами или в условиях неопределённости. LQR является мощным инструментом, способным быстро адаптироваться к изменениям в системе и обеспечивать высокую производительность при оптимальном использовании ресурсов [6-8].

$$J(t) = \int_0^{\infty} \left(x^T Q x(t) dt + u^T(t) R u(t) \right) dt \quad (3)$$

Верхняя схема на рисунке 3 демонстрирует замкнутый контур управления без использования ПИД-регулятора. Входной сигнал (ступенчатый) поступает на схему через сумматор, где он сравнивается с выходным сигналом системы (обратная связь). Разница между этими сигналами (ошибка) поступает на объект управления, который представлен передаточной функцией. Выход системы возвращается в сумматор для дальнейшей обработки. Такой контур управления, несмотря на наличие обратной связи, может иметь значительные отклонения от уставки, так как не включает механизм коррекции ошибки по времени (интегральная составляющая) или скорости изменения сигнала (дифференциальная составляющая).

Нижняя схема добавляет в контур ПИД-регулятор, который находится между сумматором и объектом управления. ПИД-регулятор корректирует управляющее воздействие на объект, используя пропорциональную (P), интегральную (I) и дифференциальную (D) составляющие для улучшения характеристик системы. Этот регулятор минимизирует ошибку, ускоряет достижение уставки и снижает перерегулирование, обеспечивая более плавный и точный переходной процесс. Добавление регулятора улучшает поведение системы, делая её более устойчивой к возмущениям и обеспечивая точное следование за заданным сигналом.

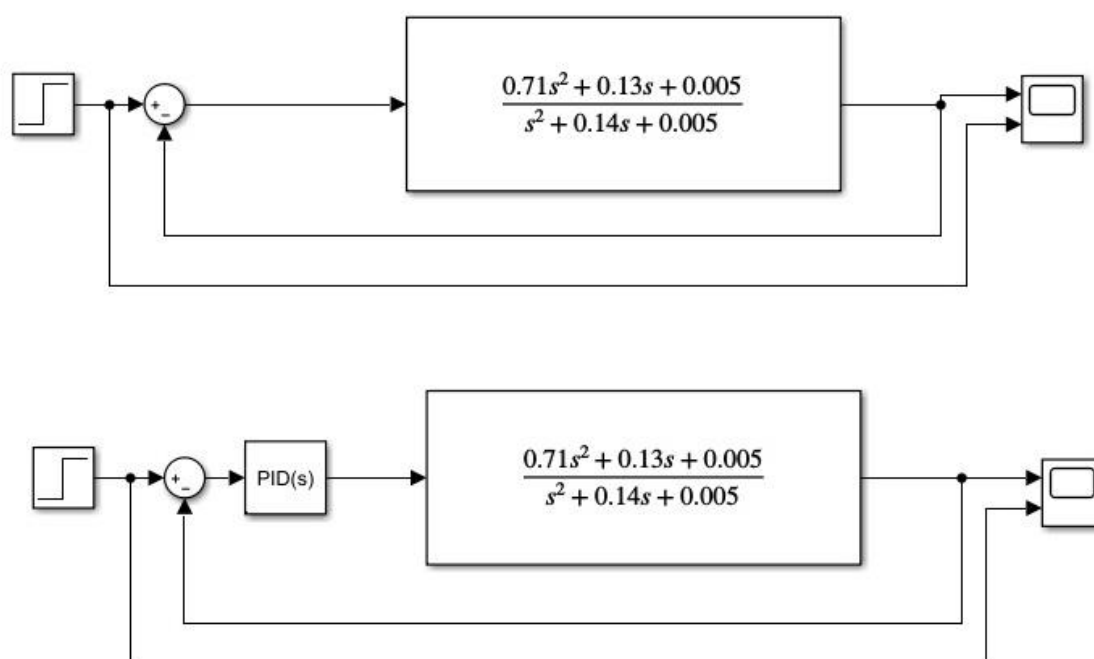


Рисунок 3. Структурные схемы замкнутой САУ с регулятором и без.

Результаты и обсуждение

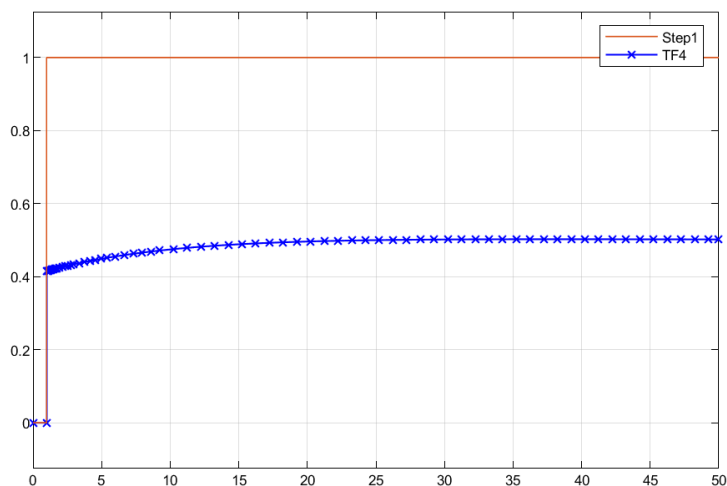
Результатом синтеза являются прямые оценки качества. Прямые оценки качества ПИД-регулятора играют ключевую роль в его эффективной настройке и оптимизации. Одним из основных критериев является стабильность системы под управлением регулятора – способность поддерживать выводимый сигнал близким к заданному значению без колебаний или перерегулирований. Точность управления также важна, измеряя, насколько близко регулятор достигает заданных целей и с какой скоростью это происходит, что особенно значимо для систем, требовательных к динамике. Кроме того, оценка реакции на возмущения и способность справляться с шумами помогают определить устойчивость работы ПИД-регулятора в реальных условиях эксплуатации. В таблице 2 приведены прямые оценки качества.

В результате синтеза ПИД-регулятора получены важные прямые оценки качества, которые играют ключевую роль в оценке его эффективности. Одним из главных критериев является стабильность системы, что означает способность регулятора поддерживать выходной сигнал близко к уставке без колебаний или перерегулирования. Важным параметром также является точность управления, которая измеряет, насколько точно система достигает заданных целей и насколько быстро это происходит. В условиях, где требуется высокая динамика, важна быстрая реакция на изменения, а также способность системы справляться с внешними возмущениями и шумами, что определяет устойчивость регулятора.

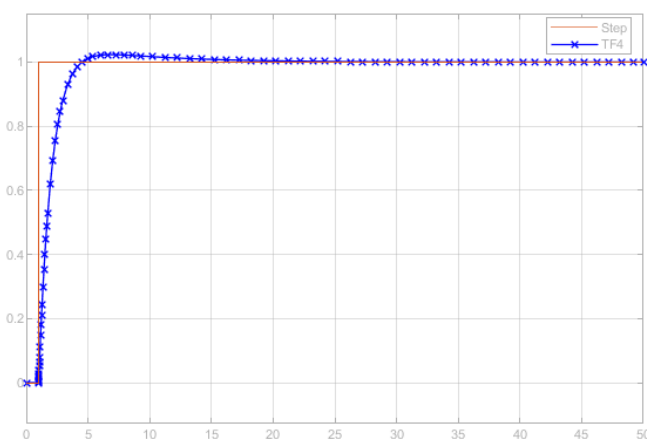
На основе анализа результатов, приведённых в графиках, видно, что синтезированный ПИД-регулятор достигает качественных показателей на уровне 96,07%. В частности,

перерегулирование составляет всего 0,821%, что указывает на минимальные колебания вокруг уставки, а время регулирования составляет 41,4 секунды, что отражает достаточно быструю стабилизацию системы. Колебательность системы (параметр μ) равна нулю, что говорит о хорошей демпфирующей способности регулятора и отсутствии повторяющихся колебаний. Таким образом, система демонстрирует высокую стабильность и быстрое достижение установленных параметров без значительных отклонений.

В таблице приведены точные числовые значения различных оценок качества, таких, как установившаяся ошибка 0,167, время нарастания 82,6 секунды и частота колебаний 0,025 рад/с. Эти показатели показывают высокую точность и предсказуемость работы регулятора в условиях промышленного процесса сушки. Результаты синтеза и анализа системы управления подтверждают, что выбранные параметры регулятора способствуют повышению эффективности процесса, а также улучшению качества конечного продукта.



a)



b)

Рисунок 5. а) переходный процесс замкнутой системы хоть и является монотонным, однако не достигает уставки, б) синтез ПИД-регулятора, качественные показатели соответствуют 96,07%.

На двух графиках представлены результаты моделирования отклика системы на входное воздействие (шаговый сигнал) с использованием передаточной функции TF4.

А) Первый график показывает медленное увеличение отклика системы по сравнению с установленным шаговым сигналом. Система достигает примерно 60% от заданного значения за первые 50 единиц времени. Этот график демонстрирует медленное нарастание системы, которая нуждается в более точной настройке для достижения желаемого быстрого действия. Данный контур без регулятора создан для анализа первичных характеристик.

Второй график демонстрирует быстрый отклик системы, где выходной сигнал достигает уставки и стабилизируется с минимальным перерегулированием. Отклик TF4 практически совпадает с шаговым сигналом, что говорит о хорошем контроле и стабильности системы. Время регулирования значительно меньше по сравнению с первым графиком, что указывает на более эффективную настройку системы управления.

Эти результаты показывают, что при правильной настройке ПИД-регулятора система может демонстрировать быстрый и точный отклик с минимальными колебаниями, что особенно важно для обеспечения качественного управления процессом сушки.

Таблица 2. Прямые оценки качества

№	Оценка качества	Обозначение	Значение
1	Время регулирования, сек	Tset	41.4
2	Перерегулирование, %	Pov	0.821
3	Число колебаний	M	1
4	Колебательность, %	μ	0
5	Период колебаний, сек	Tosc	1.4
6	Частота колебаний, рад/с	ω_{osc}	0.025
7	Установившаяся ошибка	Ess	0,167
8	Время достижения первого максимума	Tr	124
9	Время нарастания, сек	Tr	82,6
10	Декремент затухания		0%

Заключение

В статье рассматривается технология сушки верблюжьего молока, которая играет важную роль в промышленных процессах производства молочных продуктов. Основной акцент делается на описании контура управления, который включает в себя систему датчиков, исполнительные механизмы и регуляторы, необходимые для поддержания оптимальных условий сушки. Методы управления и регулирования рассматриваются с точки зрения их эффективности в поддержании стабильности процесса и достижения требуемых параметров продукта.

Для повышения эффективности процесса сушки молока в статье также проводится идентификация объекта на основе собранных данных. Это позволяет более точно настроить параметры управления и адаптировать регулирование под специфические условия производства. Выбор оптимального регулятора является ключевым аспектом исследования, поскольку от правильного выбора зависит стабильность и экономическая эффективность процесса сушки молока. Использование современных методов управления и точной идентификации объекта позволяет улучшить качество и конкурентоспособность производимой продукции в сфере молочной промышленности.

Кроме того, для оценки качества работы системы были проведены прямые измерения основных характеристик процесса. Среди них время регулирования, перерегулирование, колебательность, частота колебаний и другие параметры, которые обеспечивают контроль над качеством и стабильностью процесса сушки. Как показали результаты моделирования, время регулирования составило 41.4 сек, перерегулирование – 0.821%, а установившаяся ошибка – 0.167. Эти показатели подтверждают высокую эффективность разработанной системы управления.

Следовательно, исследование представляет собой важный вклад в оптимизацию производственных процессов в молочной промышленности, повышая качество конечного продукта и снижая энергетические затраты.

Вклад авторов:

А.Б. Рахматуллина – участвовала в теоретическом обосновании и разработке модели механических процессов.

Ж.Ж. Омирбекова – внесла значительный вклад в разработку системы автоматического регулирования температурного режима вакуум-сублимационной сушки на основе идентификации параметров объекта.

М.Б. Толганбаева – провела анализ и обработку данных по оптимизации управления процессами.

Е.С. Тургынбеков – разработал методы контроля и мониторинга процессов.

Н.М. Тасмурзаев – отвечал за расчетные алгоритмы и программную реализацию.

Б.С. Амангельды – занимался интеграцией системы управления и тестированием её работоспособности.

Благодарность

Исследования, приведённые в данной статье, проводились в рамках реализации научных и научно-технических проектов ПЦФ BR21881957. Этот проект посвящен разработке технологии глубокой переработки и созданию оборудования для вакуум-сублимационной сушки кобыльего и верблюжьего молока, что является частью программы Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (МНВО РК).

Список литературы

1. M.J. Pikal, W.J. Mascarenhas, H.U. Akay, S. Cardon, C. Bhugra, F. Jameel, S. Rambhatla, The nonsteady state modeling of freeze drying: In-process product temperature and moisture content mapping and pharmaceutical product quality applications, *Pharm. Dev. Technol.* (2005) 17–32, <https://doi.org/10.1081/PDT-35869>.
2. W.M. El-Maghlany, A.-E.-R. Bedir, M. Elhelw, A. Attia, Freeze-drying modeling via multi-phase porous media transport model, *Int. J. Therm. Sci.* 135 (2019) 509–522
3. Barresi A.A., Pisano R., Fissore D., Rasetto V., Velardi S.A., Vallan A., Parvis M. & Galan M. 2009. Monitoring of the primary drying of a lyophilization process in vials. *Chemical Engineering and Processing*, 48, 408–423.
4. N. Daraoui, P. Dufour, H. Hammouri, A. Hottot, Model predictive control during the primary drying stage of lyophilisation, *Control Eng. Pract.* 18 (2010) 483–494.
5. Pardeshi, S.R., Deshmukh, N.S., Telange, D.R. et al. Process development and quality attributes for the freeze-drying process in pharmaceuticals, biopharmaceuticals and nanomedicine delivery: a state-of-the-art review. *Futur J Pharm Sci* 9, 99 (2023). <https://doi.org/10.1186/s43094-023-00551-8>
6. Srisuma, P., Barbastathis, G., & Braatz, R. D. (2024). Real-time estimation of bound water concentration during lyophilization with temperature-based state observers. *arXiv preprint arXiv:2407.13844*.
7. Vorhauer-Huget, N.; Mannes, D.; Hilmer, M.; Gruber, S.; Strobl, M.; Tsotsas, E.; Foerst, P. Freeze-Drying with Structured Sublimation Fronts—Visualization with Neutron Imaging. *Processes* 2020, 8, 1091. <https://doi.org/10.3390/pr8091091>
8. V.R. Koganti, E.Y. Shalaev, M.R. Berry, T. Osterberg, M. Youssef, D.N. Hiebert, F.A. Kanka, M. Nolan, R. Barrett, G. Scalzo, G. Fitzpatrick, N. Fitzgibbon, S. Luthra, L. Zhang, Investigation of design space for freeze-frying: Use of modeling for primary drying segment of a freeze-drying cycle, *AAPS PharmSciTech* 12 (2011) 854–861, <https://doi.org/10.1208/s12249-011-9645-7>.
9. M. Ramsák, J. Ravník, M. Zadravec, M. Hriberský, J. Iljaz, Freeze-drying modeling of vial using BEM, *Eng. Anal. Bound. Elem.* 77 (2017) 145–156, <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2017.01.011>.
10. Астром, К. Дж. и Хагглюнд, Т. (2004). Пересмотр метода пошагового отклика Циглера Николса для ПИД-регулирования // Журнал управления технологическими процессами 14.
11. Скворцов, А.В. Автоматизация управления жизненным циклом продукции: учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования / А.В. Скворцов, А.Г. Схиртладзе, Д.А. Чмырь. - М.: ИЦ Академия, 2013. - 320 с.
12. Схиртладзе, А.Г. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебник / А.Г. Схиртладзе, В.Н. Воронов, В.П. Борискин. - Ст. Оскол: ТНТ, 2013. - 600 с.
13. de Almeida Souza, G., Zanlucchi de Souza Tavares, J. J.-P., & Silva, J. R. (2020). Towards Adaptive Discrete Event Control Based on PRD, PSS and Automatic Planner. <https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1448>
14. Kubankov, A. N., & Kozlov, S. v. (2020). Innovative Ways to Ensure the Interoperability of a Complete Group of Processes in the Lifecycle of an Integrated Management System Based on their Synchronization. 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2020. <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166045>
15. Catalbas, B., Catalbas, B., & Morgul, O. (2020). Two-Legged Robot System Identification with Artificial Neural Networks. 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2020 - Proceedings. <https://doi.org/10.1109/SIU49456.2020.9302094>

А.Б. Рахматуллина¹, Ж.Ж.Омирбекова², М.Б.Толганбаева³, Н.М.Тасмурзаев⁴

¹*Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты ШЖҚ МГП*

²*Қ.Сәтбаев атындағы қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті*

³*М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті*

⁴*Әл-Фараби атындағы қазақ ұлттық университеті*

Вакуум-сублимациялық кептірудің температуралық режимін автоматты реттеу жүйесін нысан параметрлерін сәйкестендіру негізінде әзірлеу

Аңдатпа. Мақала сүтті кептіру технологиясы мен процесті басқару әдістеріне арналған. Басқару контурын сипаттауға, реттеу әдістеріне және деректер мен нысанды сәйкестендіру негізінде оңтайлы реттегішті таңдауға ерекше назар аударылды. Зерттеу барысында кептіру жүйесінің дәлдігі мен тиімділігін арттырудың әртүрлі тәсілдері қарастырылды. Температуралық деректерге негізделген параметрлік сәйкестендіруге айтарлықтай көңіл бөлініп, бұл кептіру жүйесінің динамикалық өзгерістерін дәлірек модельдеуге мүмкіндік береді. Параметрлік сәйкестендіру әдістерін қолдану процесс жағдайларына бейімделе алатын неғұрлым тиімді реттегіштерді әзірлеуге ықпал етеді. Нәтижесінде зерттеу сүт өнеркәсібіндегі өндірістік процестерді оңтайландыруға, өнімнің сапасын арттыруға және энергия шығындарын азайтуға маңызды үлес қосады.

Түйін сөздер: сүтті кептіру, басқару контуры, процесті реттеу, оңтайлы реттегіш, объектіні идентификациялау, сүт өнеркәсібі

A.B. Rakhmatullina¹, Zh.Zh.Omirbekova², M.B.Tolganbayeva³, N.M.Tasmurzaev⁴

¹*Institute of Mechanics and Engineering named after Academician U.A. Zholdasbekov*

²*Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev*

³*South Kazakhstan University named after M. Auezov*

⁴*Al-Farabi Kazakh National University*

Development of an automatic temperature control system for vacuum freeze-drying based on the identification of object parameters

Abstract. The article is devoted to the study of control methods for milk drying process, with special attention to the selection of optimal regulators based on data and parametric identification of the object. Various approaches to improve the accuracy and efficiency of the control system are considered, allowing it to be adapted to changing production conditions. The main emphasis is placed on parametric identification using temperature data to more accurately model the dynamics of the drying process. This allows the development of more efficient controllers that provide stable process control and reduced energy consumption. The presented results show that the proposed methods improve the quality of the final product and optimize the energy consumption. The study makes a significant contribution to the field of process optimization in the dairy industry, offering state-of-the-art solutions for production-specific control. These findings contribute to the competitiveness and sustainability of enterprises in this industry.

Keywords: milk drying, control loop, process regulation, optimal controller, object identification, dairy industry

References

1. Pikal M.J., Mascarenhas W.J., Akay H.U., Cardon S., Bhugra C., Jameel F., Rambhatla S. The nonsteady state modeling of freeze drying: In-process product temperature and moisture content mapping and pharmaceutical product quality applications, *Pharm. Dev. Technol.* (2005) 17–32, <https://doi.org/10.1081/PDT-35869>.
2. El-Maghlany W.M., Bedir A.-E.-R., Elhelw M., Attia A. Freeze-drying modeling via multi-phase porous media transport model, *Int. J. Therm. Sci.* 135 (2019) 509–522.
3. Barresi A.A., Pisano R., Fissore D., Rasetto V., Velardi S.A., Vallan A., Parvis M., Galan M. Monitoring of the primary drying of a lyophilization process in vials. *Chemical Engineering and Processing*, 48 (2009) 408–423.
4. Daraoui N., Dufour P., Hammouri H., Hottot A. Model predictive control during the primary drying stage of lyophilisation, *Control Eng. Pract.* 18 (2010) 483–494.
5. Pardeshi S.R., Deshmukh N.S., Telange D.R., et al. Process development and quality attributes for the freeze-drying process in pharmaceuticals, biopharmaceuticals and nanomedicine delivery: a state-of-the-art review. *Futur J Pharm Sci* 9, 99 (2023). <https://doi.org/10.1186/s43094-023-00551-8>.
6. Srisuma P., Barbastathis G., Braatz R.D. Real-time estimation of bound water concentration during lyophilization with temperature-based state observers. *arXiv preprint arXiv:2407.13844* (2024).
7. Vorhauer-Huget N., Mannes D., Hilmer M., Gruber S., Strobl M., Tsotsas E., Foerst P. Freeze-Drying with Structured Sublimation Fronts—Visualization with Neutron Imaging. *Processes* 2020, 8, 1091. <https://doi.org/10.3390/pr8091091>.
8. Koganti V.R., Shalaev E.Y., Berry M.R., Osterberg T., Youssef M., Hiebert D.N., Kanka F.A., Nolan M., Barrett R., Scalzo G., Fitzpatrick G., Fitzgibbon N., Luthra S., Zhang L. Investigation of design space for freeze-frying: Use of modeling for primary drying segment of a freeze-drying cycle, *AAPS PharmSciTech* 12 (2011) 854–861. <https://doi.org/10.1208/s12249-011-9645-7>.
9. Ramsak M., Ravnik J., Zadavec M., Hribersk M., Iljaz J. Freeze-drying modeling of vial using BEM, *Eng. Anal. Bound. Elem.* 77 (2017) 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2017.01.011>.
10. Astrom K.J., Hagglund T. Peresmotr metoda poshagovogo otklika Tsiglera-Nikolsa dlya PID-regulirovaniya, *Zhurnal upravleniya tekhnologicheskimi protsessami*, 14 (2004).
11. Skvortsov A.V., Skhirtladze A.G., Chmyr D.A. Avtomatizatsiya upravleniya zhiznennym tsiklom produktsii: Uchebnik dlya studentov uchrezhdeniy vysshego professional'nogo obrazovaniya. Moskva: ITs Akademiya, 2013. - 320 s.
12. Skhirtladze A.G., Voronov V.N., Boriskin V.P. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov v mashinostroenii: Uchebnik. Stary Oskol: TNT, 2013. - 600 s.
13. de Almeida Souza G., Zanlucchi de Souza Tavares J.J.-P., Silva J.R. Towards Adaptive Discrete Event Control Based on PRD, PSS and Automatic Planner. <https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1448> (2020).
14. Kubankov A.N., Kozlov S.V. Innovative Ways to Ensure the Interoperability of a Complete Group of Processes in the Lifecycle of an Integrated Management System Based on their Synchronization. *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO* 2020. <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166045>.
15. Catalbas B., Catalbas B., Morgul O. Two-Legged Robot System Identification with Artificial Neural Networks. *Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU* 2020. <https://doi.org/10.1109/SIU49456.2020.9302094>.

Сведения об авторах:

А.Б. Рахматуллина – PhD, доцент, Институт механики и машиноведения имени академика У.А. Жолдасбекова, отдел машиноведения и робототехники, ул. Шевченко, 28, Алматы, Казахстан, 050000; Университет Иллинойса в Урбана-Шампейн, 910 S. Пятая ул., Шампейн, Иллинойс, 61820, США.

Ж.Ж. Омирбекова – автор для корреспонденции. PhD, ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан, 050013.

М.Б. Толғанбаева – докторант, Южно-Казахстанский государственный университет имени М. Ауэзова, кафедра «Автоматизация и управление», пр. Тауке хана, 5, Шымкент, Казахстан, 160012.

Н.М. Тасмурзаев – магистр технических наук, старший преподаватель, Казахский национальный университет имени аль-Фараби.

А.Б. Рахматуллина – PhD, доцент, Академик У.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинажасау институты, машинажасау және робототехника бөлімі, Шевченко көшесі, 28, Алматы, Қазақстан, 050000; Иллинойс университеті Урбана-Шампейн, 910 S. Бесінші көше, Шампейн, Иллинойс, 61820, АҚШ.

Ж.Ж. Омирбекова – PhD, қауымдастырылған профессор, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Сәтбаев көшесі, 22, Алматы, Қазақстан, 050013.

М.Б. Толғанбаева – докторант, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан мемлекеттік университеті, «Автоматтандыру және басқару» кафедрасы, Тәуке хан даңғылы, 5, Шымкент, Қазақстан, 160012.

Н.М. Тасмұрзаев – техникалық ғылымдар магистрі, аға оқытушы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті.

A.B. Rakhmatullina – PhD, Associate Professor, Academician U.A. Zholdasbekov Institute of Mechanics and Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering and Robotics, Shevchenko St., 28, Almaty, Kazakhstan, 050000; University of Illinois at Urbana-Champaign, 910 S. Fifth St., Champaign, Illinois, 61820, USA.

Zh.Zh. Omirbekova – PhD, Associate Professor, Satbayev University, Satpayev St., 22, Almaty, Kazakhstan, 050013.

M.B. Tolganbayeva – PhD student, M. Auezov South Kazakhstan State University, Department of "Automation and Control," Tauke Khan Avenue, 5, Shymkent, Kazakhstan, 160012.

N.M. Tasmurzayev – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer, Al-Farabi Kazakh National University.



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).