ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПШЕНИЦЫ

Хайитов Азизбек Нематович

Докторант кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» Бухарского государственного технического университета, г. Бухара, Республика Узбекистан.

E-mail: azizbek.alex@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы идентификации и управления процессом измельчения пшеницы как сложного многофакторного и нелинейного технологического процесса. На основе экспериментальных данных, полученных в условиях промышленного производства, выполнен корреляционный и многофакторный регрессионный анализ, позволивший определить степень влияния технологических параметров оборудования и физико-химических свойств зерна на качество процесса измельчения. В результате идентификации разработана математическая модель процесса и предложен интегральный критерий качества, обеспечивающий комплексную оценку эффективности измельчения. Показано, что наибольшее влияние на формирование качества оказывают отношение скоростей вращения вальцов, межвальцовый зазор, а также скорости активного и пассивного вальцов. Для повышения устойчивости и адаптивности процесса предложена замкнутая система управления, включающая PID-регулятор и блок нечеткой логической адаптации. Полученные результаты могут быть использованы при автоматизации и оптимизации процессов измельчения пшеницы, направленных на повышение качества готовой продукции и снижение энергозатрат на предприятиях мукомольной промышленности.

Ключевые слова: процесс помола пшеницы, измельчение зерна, технология производства муки, идентификация процесса, идентификация системы, математическое моделирование, регрессионный анализ, корреляционный анализ, многофакторный процесс, нелинейный процесс, нечеткое управление, нечетко-PID регулятор, PID-регулятор.

Annotatsiya. Maqolada bug‘doyni maydalash jarayonini murakkab, ko‘p omilli va nolinear texnologik jarayon sifatida identifikatsiyalash va boshqarish masalalari ko‘rib chiqiladi. Sanoat ishlab chiqarishi sharoitida olingan eksperimental ma’lumotlar asosida korrelyatsion va ko‘p omilli regressiyaviy tahlil o‘tkazilib, uskunaning texnologik parametrlarining hamda donning fizik-kimyoviy xossalarining maydalash jarayoni sifatiga ta’sir darajasi aniqlangan. Identifikatsiya natijasida jarayonning matematik modeli ishlab chiqilgan va maydalash samaradorligini kompleks baholashni ta’minlovchi integral sifat mezoni taklif

ISSN 3030-3907

etilgan. Sifatni shakllantirishga eng katta ta’sirni valtslar aylanish tezliklari nisbati, valtslar orasidagi tirqish, shuningdek faol va passiv valtslarning aylanish tezliklari ko‘rsatishi aniqlangan. Jarayonning barqarorligi va moslashuvchanligini oshirish maqsadida PID-regulyator va noaniq mantiqiy moslashuv blokini o‘z ichiga olgan yopiq boshqaruv tizimi taklif etilgan. Olingan natijalar un sanoati korxonalarida bug‘doyni maydalash jarayonlarini avtomatlashtirish va optimallashtirishda, tayyor mahsulot sifatini oshirish hamda energiya sarfini kamaytirishda qo‘llanilishi mumkin.

Kalit so‘zlar: bug‘doyni maydalash jarayoni, donni maydalash, un ishlab chiqarish texnologiyasi, jarayon identifikatsiyasi, tizim identifikatsiyasi, matematik modellashtirish, regressiyaviy tahlil, korrelyatsion tahlil, ko‘p omilli jarayon, nolinear jarayon, noaniq boshqaruv, noaniq-PID regulyator, PID-regulyator.

Abstract. This paper addresses the problems of identification and control of the wheat milling process as a complex, multivariable, and nonlinear technological system. Based on experimental data obtained under industrial operating conditions, correlation and multivariate regression analyses were performed to determine the influence of technological equipment parameters and the physicochemical properties of grain on the quality of the milling process. As a result of the identification procedure, a mathematical model of the process was developed and an integral quality criterion was proposed, providing a comprehensive assessment of milling efficiency. It was shown that the most significant influence on product quality is exerted by the roller speed ratio, the inter-roller gap, as well as the rotational speeds of the active and passive rollers. To improve process stability and adaptability, a closed-loop control system incorporating a PID controller and a fuzzy logic adaptation block was proposed. The obtained results can be applied to the automation and optimization of wheat milling processes aimed at improving product quality and reducing energy consumption in flour milling enterprises.

Key words: wheat milling process, grain milling, process identification, system identification, mathematical modeling, correlation analysis, regression analysis, integral quality criterion, PID controller, fuzzy control, fuzzy-PID controller, automatic control system, multivariable technological process, optimal control, flour milling industry.

1. ВВЕДЕНИЕ.

Процесс измельчения пшеницы является одним из ключевых этапов технологии производства муки и во многом определяет качество готовой продукции. Эффективность данного процесса зависит как от физико-химических свойств зерна, так и от технологических параметров оборудования, что обусловливает его многофакторный и нелинейный

ISSN 3030-3907

характер. В условиях промышленного производства свойства исходного сырья и режимы работы оборудования подвержены значительным колебаниям, что усложняет задачу обеспечения стабильного качества продукции. Традиционные методы анализа и управления процессом измельчения не всегда позволяют адекватно учитывать влияние случайных возмущений и неопределённостей, связанных с изменчивостью свойств зерна и внешних условий. В связи с этим актуальной задачей является применение методов идентификации технологических процессов, позволяющих на основе экспериментальных данных получить математические модели, адекватно описывающие реальное поведение системы.

Идентификация процесса измельчения пшеницы основана на анализе взаимосвязей между входными, управляющими и выходными параметрами системы. Использование методов корреляционного и регрессионного анализа позволяет выявить наиболее значимые факторы, определить их количественное влияние на показатели качества и сформировать основу для построения эффективных систем автоматического управления. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью повышения качества готовой продукции, снижения энергозатрат и совершенствования систем управления технологическими процессами в мукомольной промышленности. Целью исследования является идентификация процесса измельчения пшеницы и разработка математической модели, пригодной для последующей оптимизации и автоматизации управления процессом [1,2].

2. МЕТОДЫ. Для идентификации процесса измельчения пшеницы использовался комплекс экспериментальных и аналитических методов, основанных на обработке производственных данных и применении аппарата математической статистики. Исследования проводились в условиях реального технологического процесса на вальцовых станках мукомольного предприятия.

Результаты корреляционного анализа показали наличие сильных взаимосвязей между основными показателями процесса измельчения пшеницы. Проверка коэффициентов корреляции по критерию Стьюдента подтвердила, что все основные выявленные зависимости являются статистически значимыми, что свидетельствует о корректности выбора исследуемых параметров и достаточности экспериментальных данных.

С помощью регрессионного анализа установлено, что наибольшее влияние на процесс измельчения оказывают отношение скоростей вращения вальцов и межвальцовый зазор. Данные параметры определяют

ISSN 3030-3907

интенсивность механического воздействия на зерно и, соответственно, качество получаемого продукта.

Введение интегрального критерия качества позволило получить обобщённую количественную оценку эффективности процесса измельчения. Использование данного критерия обеспечивает возможность комплексного анализа технологического процесса и может применяться в качестве целевой функции при оптимизации режимов работы оборудования.

Процесс измельчения пшеницы характеризуется стохастической и нелинейной природой, что обусловлено изменчивостью свойств исходного сырья и нестабильностью внешних условий. В связи с этим для его адекватного описания применяются методы идентификации, основанные на определении параметров модели по входным и выходным сигналам технологической системы.

Моделирование процесса измельчения пшеницы в научных исследованиях реализуется с использованием различных подходов. Сложность данного процесса определяется природной гетерогенностью зерна, неравномерным распределением влаги, механическими свойствами белково-крахмальной матрицы, а также режимами нагружения рабочих органов измельчительных машин. На первом этапе экспериментальным путём устанавливаются характеристики взаимосвязей между наблюдаемыми параметрами. Далее, на основе результатов экспериментальных исследований, формируется массив статистических данных, который обрабатывается методами корреляционного и регрессионного анализа [3,6].

Исходные данные были сформированы в виде массива случайных наблюдений, полученных в результате экспериментальных исследований. Эксперименты проводились на мукомольном предприятии ООО «Nodir imom Z», функционирующем в промышленном режиме.

В качестве исследуемых параметров рассматривались: X_1 - влажность зерна перед измельчением, %; X_2 - коэффициент сорта зерна, %; X_3 - содержание посторонних примесей, %; X_4 - коэффициент твёрдости зерна; Z_1 - линейная скорость вращения активного вальца, об/мин; Z_2 - линейная скорость вращения пассивного вальца, об/мин; U_1 - отношение скоростей вращения вальцов; U_2 - межвальцовый зазор, мм.

В ходе экспериментальных исследований были получены статистические данные, представленные в таблице 1, которые послужили основой для последующего корреляционного и регрессионного анализа.

Таблица 1.

X_1	X_2	X_3	X_4	Z_1	Z_2	U_1	U_2

ISSN 3030-3907

14.4	1.00	2.8	52	750	300	1.5	0.03
14.4	0.97	2.9	54	760	310	1.58	0.05
15.44	0.94	3.0	56	740	320	1.62	0.1
15.47	0.90	2.7	50	770	305	1.64	0.4
15.5	0.85	2.9	58	755	295	1.68	0.6
15.52	1.00	3.0	53	765	315	1.7	0.8
15.56	0.98	3.8	57	745	290	1.76	1.2
15.58	0.92	3.9	55	780	320	1.79	1.5

На основе полученных экспериментальных данных при $k=1,\ldots,n$ и $j=1,\ldots,m$ была сформирована таблица корреляционных зависимостей между исследуемыми параметрами (таблица 1). Корреляционный анализ проводился для массива данных, содержащего n наблюдений по m параметрам, что позволило количественно оценить степень взаимосвязи между отдельными показателями процесса измельчения.

Расчёт коэффициентов парной корреляции осуществлялся по следующей формуле [2,8]:

$$r_{ij}=\frac{\sum\left(X_i-\bar{X}_i\right)\left(X_j-\bar{X}_j\right)}{\sqrt{\sum\left(X_i-\bar{X}_i\right)^2\sum\left(X_j-\bar{X}_j\right)^2}} \qquad (1)$$

r_{ij} -коэффициент корреляции между i-м и j-м параметрами; X_i, X_j - текущие значения исследуемых параметров; $\bar{X}_i, \bar{X}_j$ -их средние арифметические значения.

Полученные значения коэффициентов корреляции позволили определить характер и степень взаимосвязи между входными и управляющими параметрами процесса измельчения пшеницы. На основании результатов корреляционного анализа были выявлены параметры, оказывающие наибольшее влияние на выходной показатель качества, а также исключены слабозначимые связи из дальнейшего моделирования [7,10].

Результаты расчётов представлены в таблице 2, где приведены значения коэффициентов корреляции между основными параметрами процесса измельчения.

Таблица 2.

Таблица корреляционных связей

	X_1	X_2	X_3	X_4	Z_1	Z_2	U_1	U_2

ISSN 3030-3907

X_1	1	0.82	0.89	0.78	0.91	0.88	0.92	0.95
X_2	0.82	1	0.84	0.80	0.86	0.89	0.88	0.91
X_3	0.89	0.84	1	0.90	0.87	0.92	0.94	0.93
X_4	0.78	0.80	0.90	1	0.85	0.87	0.88	0.92
Z_1	0.91	0.86	0.87	0.85	1	0.94	0.96	0.97
Z_2	0.88	0.89	0.92	0.87	0.94	1	0.98	0.96
U_1	0.92	0.88	0.94	0.88	0.96	0.98	1	0.99
U_2	0.95	0.91	0.93	0.92	0.97	0.96	0.99	1

Полученная корреляционная таблица была проверена на значимость по критерию Стьюдента.

Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Корреляционная таблица, проверенная по критерию Стьюдента

	X_1	**X_2**	**X_3**	**X_4**	**Z_1**	**Z_2**	**U_1**	**U_2**
X_1	1.00	0.82	0.89	0.78	0.91	0.88	0.92	0.95
X_2	0.82	1.00	0.84	0.80	0.86	0.89	0.88	0.91
X_3	0.89	0.84	1.00	0.90	0.87	0.92	0.94	0.93
X_4	0.78	0.80	0.90	1.00	0.85	0.87	0.88	0.92
Z_1	0.91	0.86	0.87	0.85	1.00	0.94	0.96	0.97
Z_2	0.88	0.89	0.92	0.87	0.94	1.00	0.98	0.96
U_1	0.92	0.88	0.94	0.88	0.96	0.98	1.00	0.99
U_2	0.95	0.91	0.93	0.92	0.97	0.96	0.99	1.00

$$t_{ij} = r_{ij}\sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \qquad (2)$$

$$n = 8 \rightarrow t_{krit} = 2.365$$

Значения корреляционной матрицы: все $r > 0.75$ рассчитанные значения $t_{ij} > 5$, из чего следует, что все коэффициенты являются статистически значимыми.

После этого матрица коэффициентов корреляции была повторно обработана и представлена в виде матрицы $r_{(ij)}$ (таблица 4).

ISSN 3030-3907

Таблица 4.

Модифицированная матрица коэффициентов корреляции.

	X_1	X_2	X_3	X_4	Z_1	Z_2	U_1	U_2
X_1	1	0	0.89	0	0.91	0.88	0.92	0.95
X_2	0	1	0	0	0	0.89	0.88	0.91
X_3	0.89	0	1	0.90	0.87	0.92	0.94	0.93
X_4	0	0	0.90	1	0	0	0.88	0.92
Z_1	0.91	0	0.87	0	1	0.94	0.96	0.97
Z_2	0.88	0.89	0.92	0	0.94	1	0.98	0.96
U_1	0.92	0.88	0.94	0.88	0.96	0.98	1	0.99
U_2	0.95	0.91	0.93	0.92	0.97	0.96	0.99	1

Для каждой строки корреляционной матрицы на основе R_{ij} выбирается совокупность параметров, наиболее тесно связанных $i-м$ фактором.

Затем между ними коэффициенты многомерной линейной регрессии рассчитываются по следующей формуле:

$$b_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ii}} = r_{ij} \qquad (3)$$

где b_{ij} — элемент матрицы регрессии, r_{ij} — элемент корреляционной матрицы, r_{ii} — диагональный элемент (корреляция переменной с самой собой).

Таблица 5.

Матрица регрессионных зависимостей

	X_1	X_2	X_3	X_4	Z_1	Z_2	U_1	U_2
X_1	1	0.82	0.89	0.78	0.91	0.88	0.92	0.95
X_2	0.82	1	0.84	0.80	0.86	0.89	0.88	0.91
X_3	0.89	0.84	1	0.90	0.87	0.92	0.94	0.93
X_4	0.78	0.80	0.90	1	0.85	0.87	0.88	0.92
Z_1	0.91	0.86	0.87	0.85	1	0.94	0.96	0.97
Z_2	0.88	0.89	0.92	0.87	0.94	1	0.98	0.96
U_1	0.92	0.88	0.94	0.88	0.96	0.98	1	0.99

ISSN 3030-3907

U₂	0.95	0.91	0.93	0.92	0.97	0.96	0.99	1

Полученная матрица коэффициентов регрессии затем была преобразована в матрицу безразмерных относительных зависимостей.

Данный пересчёт был выполнен с учётом логистики технологической системы (таблица 6).

Для расчёта использовалась следующая формула:

$$c_{ij} = P_{\bar{ij}} \cdot \frac{\Delta x_j^{\,0}}{\Delta x_i^{\,0}} \qquad (4)$$

Таблица 6.

Матрица безразмерных относительных зависимостей

	X₁	**X₂**	**X₃**	**X₄**	**Z₁**	**Z₂**	**U₁**	**U₂**
X₁	1	0	0.90	0	0.92	0.89	0.93	0.96
X₂	0	1	0	0	0	0.90	0.89	0.92
X₃	0.90	0	1	0.91	0.88	0.93	0.95	0.94
X₄	0	0	0.91	1	0	0	0.89	0.92
Z₁	0.92	0	0.88	0	1	0.95	0.97	0.98
Z₂	0.89	0.90	0.93	0	0.95	1	0.99	0.97
U₁	0.93	0.89	0.95	0.89	0.97	0.99	1	1.00
U₂	0.96	0.92	0.94	0.92	0.98	0.97	1.00	1

Основной целью управления процессом измельчения является обеспечение качества готовой продукции. Комплексное взаимное влияние параметров процесса было определено с использованием корреляционного, регрессионного анализа и безразмерных относительных зависимостей. На основе полученных характеристик общий критерий качества технологического процесса выражается следующим образом:

$$K = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} B_{ij} \qquad (5)$$

K - интегральный показатель качества процесса измельчения, B_{ij} - элемент матрицы безразмерных относительных зависимостей, $n = 8$ - количество параметров, характеризующих процесс.

На этой основе окончательный критерий качества процесса измельчения определяется следующим образом:

ISSN 3030-3907

$$K = 0.95X_3 + 0.92X_4 + 0.90X_1 + 0.89X_2 + 0.98Z_1 + 0.97Z_2 + 1.00U_1 + 1.00U_2$$

Чем больше значение *K*, тем выше качество процесса измельчения.

Наибольший вклад вносят отношение скоростей вальцов (U_1), межвальцовый зазор (U_2) и скорости вращения вальцов (Z_1, Z_2), что является технологически обоснованным. Физико-химические показатели зерна $(X_1 – X_4)$ также оказывают влияние, однако влияние параметров процесса является более выраженным.

Упорядочив вышеуказанные влияния, окончательный критерий в компактной форме может быть представлен следующим образом:

$$K = 1.00U_1 + 1.00U_2 + 0.98Z_1 + 0.97Z_2 + 0.95X_3 + 0.92X_4 + 0.90X_1 + 0.89X_2$$

Компактный критерий *K* обладает очень высокой корреляцией со всеми основными технологическими параметрами, $r_{KX_j} \geq 0.97$. В связи с этим критерий К является адекватным по отношению к экспериментальным данным.

Данное уравнение комплексно учитывает вклад всех параметров в процесс измельчения и служит основой для построения оптимального управления [4, 5, 9, 11, 12].

3. Результаты и обсуждение. В результате проведённых экспериментальных исследований и последующей статистической обработки данных была выполнена идентификация процесса измельчения пшеницы как сложного многофакторного технологического процесса. Полученные массивы экспериментальных данных позволили выявить количественные зависимости между основными входными, управляющими и выходными параметрами процесса.

Корреляционный анализ показал наличие устойчивых и сильных связей между большинством исследуемых параметров. Проверка коэффициентов корреляции по критерию Стьюдента подтвердила их статистическую значимость, что свидетельствует о надёжности экспериментальных данных и корректности проведённого анализа. Значения коэффициентов корреляции превышали 0,75, а расчётные значения критерия Стьюдента значительно превосходили критическое значение, что позволило признать все основные зависимости значимыми.

На основе отобранных значимых корреляционных связей был выполнен многофакторный регрессионный анализ. В результате получена регрессионная модель, отражающая влияние технологических и сырьевых параметров на интегральный показатель качества процесса измельчения.

ISSN 3030-3907

Анализ регрессионных коэффициентов показал, что наибольшее влияние на процесс оказывают отношение скоростей вращения вальцов и межвальцовый зазор, что полностью соответствует физической сущности процесса измельчения.

Для комплексной оценки эффективности процесса был введён интегральный критерий качества, сформированный на основе матрицы безразмерных относительных зависимостей. Полученный критерий позволяет учитывать совокупное влияние всех параметров и использовать его в качестве обобщённого показателя состояния технологического процесса. Высокое значение коэффициента корреляции между интегральным критерием и основными параметрами процесса подтверждает его адекватность и практическую применимость.

Обсуждение результатов показывает, что технологические параметры оборудования оказывают более существенное влияние на качество процесса измельчения по сравнению с физико-химическими характеристиками зерна. При этом параметры сырья также вносят вклад в формирование конечного качества продукта, особенно при отклонении их значений от оптимальных диапазонов.

Полученные результаты подтверждают целесообразность применения методов идентификации, корреляционного и регрессионного анализа для исследования процессов измельчения пшеницы. Разработанный подход позволяет обоснованно выбирать управляющие воздействия и может быть использован при создании адаптивных систем автоматического управления, направленных на повышение стабильности процесса, снижение энергозатрат и улучшение качества готовой продукции.

ISSN 3030-3907

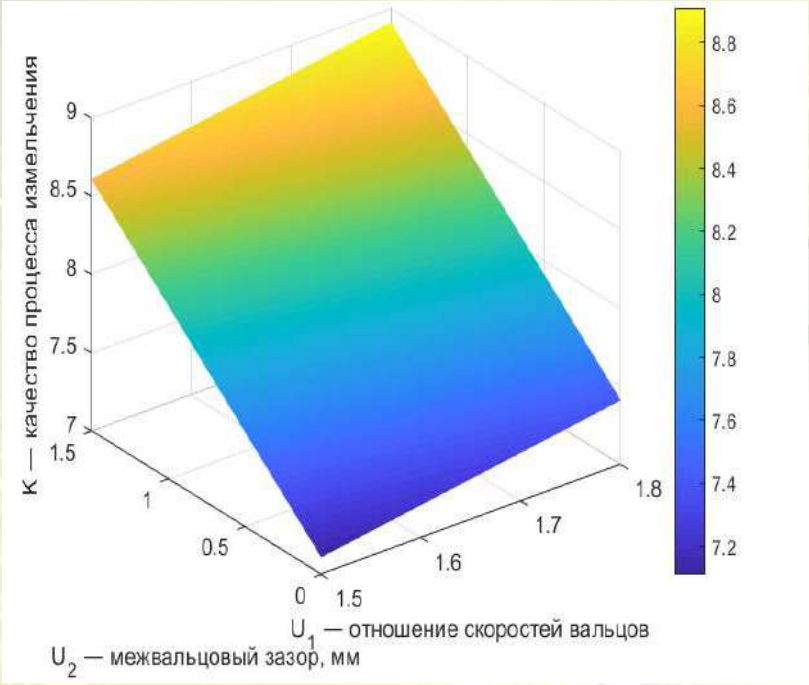


Рис. 1.

Поверхностный график зависимости интегрального показателя качества процесса измельчения от отношения скоростей вальцов U_1 и межвальцового зазора U_2 . Из графика видно, что при увеличении значений U_1 и U_2 общий критерий качества K возрастает линейным образом. Это свидетельствует о том, что отношение скоростей вращения вальцов и расстояние между вальцами играют ключевую роль в управлении процессом измельчения.

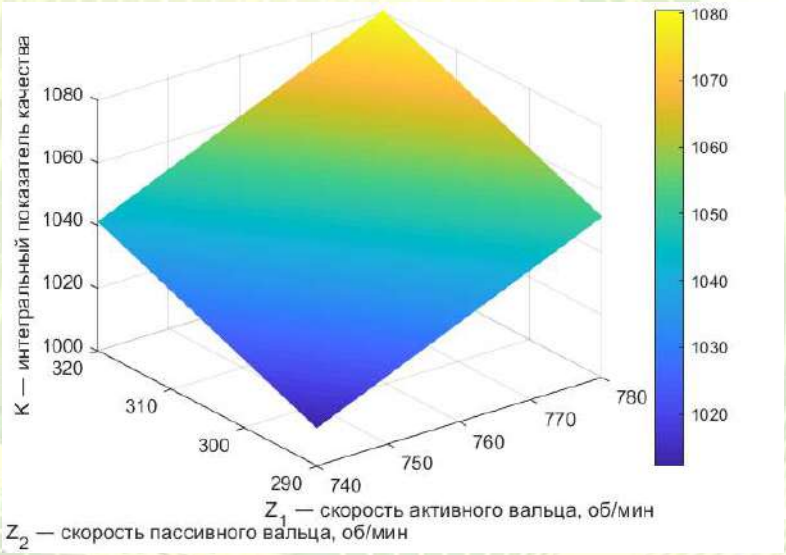


Рис. 2.

Пространственный график зависимости интегрального критерия качества процесса измельчения *K* от скорости вращения активного вальца Z_1 и скорости вращения пассивного вальца Z_2. Повышение поверхности

ISSN 3030-3907

графика свидетельствует о росте качества процесса измельчения при увеличении значений Z_1 и Z_2. Анализ графика показывает, что влияние скорости вращения активного вальца Z_1 несколько сильнее по сравнению с влиянием скорости вращения пассивного вальца Z_2.

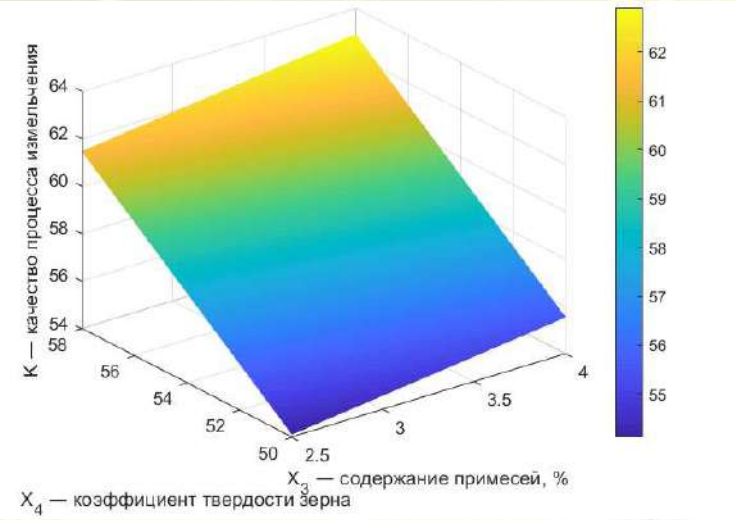


Рис. 3.

Поверхностный график зависимости критерия качества процесса измельчения K от показателей качества сырья содержания посторонних примесей X_3 и коэффициента твёрдости зерна X_4. При фиксированных средних значениях влажности зерна и коэффициента сорта наблюдается изменение K при увеличении X_3 и X_4. Из графика видно, что увеличение содержания примесей и твёрдости после определённого предела может снижать качество процесса, поэтому данные параметры необходимо регулировать в оптимальном диапазоне. Критерий принят в качестве оптимальной целевой функции, объединяющей энергетическую эффективность и производительность по выходу муки.

Система управления процессом измельчения пшеницы представляет собой замкнутую многофакторную систему и включает технологический объект, PID-регулятор и блок нечеткой логической адаптации, учитывающий неопределённости. Общая математическая модель системы сформирована на основе структурной схемы.

ISSN 3030-3907

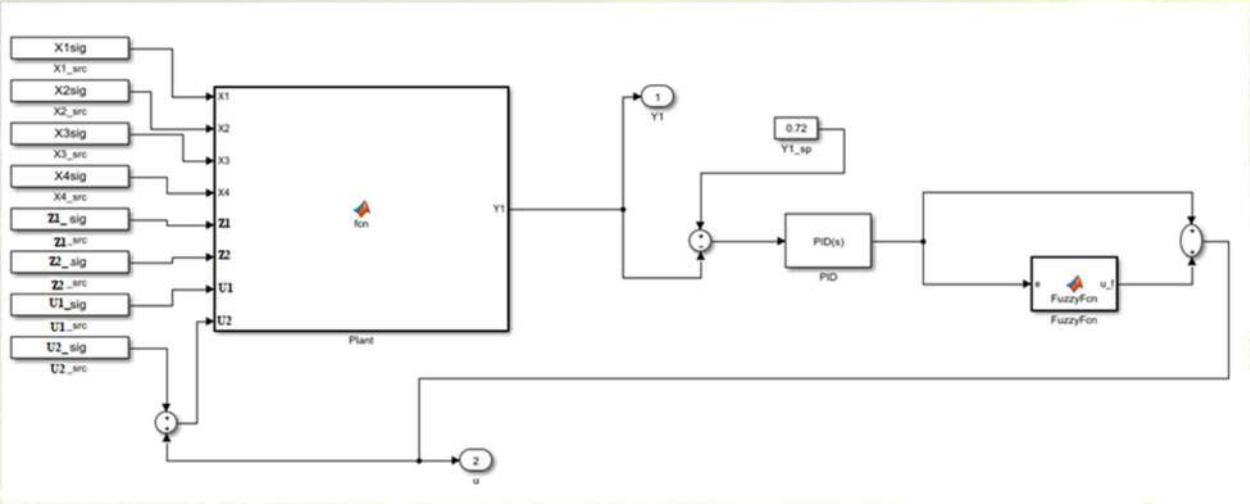


Рисунок 4. Функциональная структура управления процессом измельчения пшеницы.

На рисунке 4 представлена функциональная структурная схема, предназначенная для идентификации и управления процессом измельчения пшеницы. Схема включает технологический объект (Plant), обладающий входными параметрами, классический PID-регулятор, а также блок нечеткого логического управления, учитывающий неопределённости.

Приведённые выше математические зависимости были сформированы на основе функциональной структуры системы идентификации и управления процессом измельчения пшеницы. В структурной схеме, изображённой на рисунке 1, многофакторная модель технологического объекта, PID-регулятор и блок нечеткой логической адаптации образуют замкнутую систему управления. В соответствии с данной схемой выходная величина процесса сравнивается с эталонным значением, на основе сигнала ошибки формируется управляющее воздействие, а с помощью обратной связи обеспечивается устойчивость работы системы. Предложенная математическая модель полностью отражает взаимосвязи между всеми основными блоками структурной схемы и служит надёжной теоретической основой для исследования динамических свойств процесса измельчения и разработки оптимальных алгоритмов управления.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В работе рассмотрены вопросы идентификации и управления процессом измельчения пшеницы как сложного многофакторного технологического процесса. Показано, что стохастический и нелинейный характер процесса, а также изменчивость физико-химических свойств исходного сырья существенно осложняют применение традиционных методов анализа и управления. На основе экспериментальных данных выполнен корреляционный и многофакторный регрессионный анализ, позволивший выявить основные параметры, оказывающие

ISSN 3030-3907

наибольшее влияние на качество процесса измельчения. Установлено, что ключевую роль в формировании интегрального показателя качества играют технологические параметры оборудования, в частности отношение скоростей вращения вальцов, межвальцовый зазор, а также скорости активного и пассивного вальцов. Параметры сырья, такие как содержание примесей и твёрдость зерна, также оказывают влияние, однако их вклад является менее выраженным по сравнению с параметрами процесса.

Введённый интегральный критерий качества позволил получить обобщённую количественную оценку эффективности процесса измельчения и подтвердил свою адекватность по отношению к экспериментальным данным. Высокое значение коэффициента корреляции между критерием и основными параметрами процесса свидетельствует о корректности выбранного подхода и возможности использования критерия в задачах оптимизации и автоматического управления.

Предложенная система управления, основанная на замкнутом контуре с использованием PID-регулятора и нечеткого логического блока адаптации, обеспечивает устойчивую работу технологического процесса в условиях неопределённости и изменения свойств сырья. Разработанная математическая модель и функциональная структурная схема могут быть использованы при создании адаптивных систем автоматического управления, направленных на повышение качества готовой продукции, снижение энергозатрат и улучшение технико-экономических показателей мукомольного производства.

Полученные результаты имеют практическую значимость и могут быть применены при модернизации и автоматизации процессов измельчения пшеницы на предприятиях мукомольной промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов И.И. Технология переработки зерна. – Москва: Агропромиздат, 2018.
2. Karimov A.A. Don mahsulotlarini qayta ishlash jarayonlarini modellashtirish. – Toshkent, 2020.
3. Box G., Jenkins G. Time Series Analysis: Forecasting and Control. – Wiley, 2016.
4. Hayitov, A. N. (2023). Bug‘doydan omuxta yem ishlab chiqarish jarayonini avtomatlashtirish. Educational Research in Universal Sciences, 2(Special Issue 9), 382–385.
5. Hayitov, A. N. (2023). Don mahsulotlarini yetishtirish va qayta ishlash jarayonini avtomatlashtirish xususiyatlari. Qishloq va suv xo‘jaligining zamonaviy

ISSN 3030-3907

muammolari (XXII an'anaviy respublika ilmiy-amaliy anjumani materiallari, I jild, 1206–1211-betlar).
6. Kalandarov, P. I., & Hayitov, A. N. (2023). Agrosanoat mahsulotlarini qayta ishlash jarayonlarini avtomatlashtirish. Innovations in Technology and Science Education, 1(5), 145–149.
7. Kalandarov, P. I., Sharifov, H. S., & Hayitov, A. N. (2023). Technological Machines Diagnostics of Grain Processing Enterprises as the Object of Automation. Science and Innovation, Special Issue "Actual Issues of Agricultural Development: Problems and Solutions", 35–39. https://doi.org/10.5281/zenodo.7997047
8. Khayitov, A., Murodova, G., & Kalandarov, P. I. (2025). Application of regression analysis in moisture measurement of bulk materials. Science and Innovation - International Scientific Journal, 4(7), 40–45. https://doi.org/10.5281/zenodo.15903153
9. Yang, R., Gu, D., & Gu, Z. (2015). Cordyceps Rice Wine: A Novel Brewing Process. Journal of Food Process Engineering, 39(6), 581–590. Portico. https://doi.org/10.1111/jfpe.12251
10. Ljung, L. (1999). System identification: Theory for the user. New Jersey, NJ: Prentice Hall.
11. Kalandarov P.I., Khayitov A.N., Sharifov H.S.The Electrophysical Method of Grain Grinding is Based on Mathematical Models // Proceedings of the 10th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2024). – Springer, 2024. – P. 490–501.
12. Хайитов А.Н., Шарифов Х.Ш. Математическое моделирование процесса измельчения зерна // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 82-й междунар. науч.-техн. конф. – Магнитогорск, 2024. – Т.2. – С. 104.

ISSN 3030-3907