

Имитационное моделирование системы управления смесителями комбикорма

А. М. Трамова¹, Н. В. Мокрова^{1,2}, В. С. Артемьев^{✉1}

¹Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова
115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36

²Национальный исследовательский технологический университет МИСИС
119049, Россия, Москва, Ленинский проспект, 4, стр. 1

Аннотация. Управление смесителем комбикорма как сложным электромеханическим объектом связано с необходимостью одновременного контроля скорости вращения мешалок, уровня загрузки, предотвращения перегрузок и обеспечения требуемой однородности смеси. Существенное влияние на режимы работы оказывают переменная нагрузка, обусловленная массой и физико-механическими свойствами материала, а также инерционность системы и особенности переходных процессов при пуске и останове. Система управления, способна учитывать изменение параметров объекта в реальном времени и корректировать управляющие воздействия.

Цель исследования – разработка функциональной схемы автоматизированной системы управления электроприводом смесителя комбикорма и определение рациональных параметров регулирования электродвигателя.

Методы. Использован подход имитационного моделирования на основе представления системы в пространстве состояний с выделением каналов управления, возмущений и измерений. Модель включает электромеханическую подсистему привода, формирование переменной нагрузки и алгоритм адаптивного управления с обратной связью по скорости и моменту.

Результаты. Сформирована имитационная модель, позволяющая исследовать динамику фазных токов, электромагнитного момента и частоты вращения двигателя во времени. Установлена зависимость переходных процессов от параметров загрузки и настроек регулятора, определены условия устойчивой работы системы при изменяющихся режимах.

Выводы. Имитационное моделирование позволяет прогнозировать поведение электропривода смесителя и обоснованно выбирать параметры управления. Применение модели обеспечивает повышение точности настройки системы и достижение требуемой однородности смеси в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: смеситель комбикорма, электродвигатель, адаптивное управление, имитационная модель

Поступила 28.01.2026, одобрена после рецензирования 20.04.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Трамова А. М., Мокрова Н. В., Артемьев В. С. Имитационное моделирование системы управления смесителями комбикорма // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 107–121. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-107-121

Simulation modeling of a feed mixer control system

A.M. Tramova¹, N.V. Mokrova^{1,2}, V.S. Artemyev^{✉1}

¹Plekhanov Russian University of Economics

36, Stremyanny lane, Moscow, 115054, Russia

²National University of Science and Technology MISIS

4, Leninsky prospekt, building 1, Moscow, 119049, Russia

Abstract. Controlling a feed mixer as a complex electromechanical system requires simultaneous monitoring of mixing speed and loading level, as well as overload prevention and ensuring the required mixture uniformity. The operating modes are significantly influenced by variable loads, which depend on the material mass and physical-mechanical properties, system inertia, and transient processes during startup and shutdown. Changes in the object's parameters are taken into account in real time, and control actions are adjusted by the control system.

Aim. The study aims to develop a functional diagram of an automated control system for a feed mixer electric drive and to determine optimal motor regulation parameters.

Methods. The study employs simulation modeling based on a state-space representation of the system, defining control, disturbance, and measurement channels. This model integrates an electromechanical drive subsystem, a variable load generator, and an adaptive control algorithm with speed and torque feedback.

Results. The study develops a simulation model that evaluates the time-dependent dynamics of phase currents, electromagnetic torque, and motor speed. Our findings establish how transient processes depend on load parameters and controller settings, defining the conditions for stable system operation under variable modes.

Conclusions. Simulation modeling enables predicting the electric drive behavior of the feed mixer and justifies the selection of control parameters. Furthermore, the developed model improves tuning accuracy and ensures the target mixture homogeneity under various operating conditions.

Keywords: feed mixer, electric motor, adaptive control, simulation model

Submitted 28.01.2026,

approved after reviewing 20.04.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Tramova A.M., Mokrova N.V., Artemyev V.S. Simulation modeling of a feed mixer control system. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 107–121. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-107-121

ВВЕДЕНИЕ

Современные требования к автоматизации производственных процессов предъявляют высокие стандарты к системам управления технологическим оборудованием, в то же время сельское хозяйство требует высокой эффективности работы оборудования, минимизации затрат и обеспечения качества продукции. В существующих агропромышленных комплексах особую роль играет эффективное управление смесителями комбикорма, обеспечивающее их производительность, надежную работу, энергоэффективность и точность дозирования компонентов [1–3]. Смеситель комбикорма обеспечивает равномерное смешивание различных компонентов корма [4–6]. Для решения задач оптимизации технологии производства кормов исследуются физические основы процессов перемешивания [7], изучаются машины и оборудование в составе систем управления смесительными установками [8–15].



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Процесс перемешивания кормов осложняется разнообразием состава кормовой базы, особенно сезонным; разнообразием размеров частиц составляющих; возможным разделением на фракции при одновременном смешивании. Интенсификация процесса состоит в уменьшении времени «нахождения материала в смесителе для повышения производительности машины и снижения энергоемкости процесса». Задачи интенсификации процессов производства комбикормов исследуются достаточно широко [16–18] при разных способах их реализации. Управление смесителем комбикорма включает контроль скорости вращения мешалок, поддержание заданного уровня загрузки смеси, предотвращение перегрузок и, что особенно важно, обеспечение однородности конечного продукта. Использование гибких систем автоматического управления позволяет оптимизировать технологические процессы за счет регулирования ключевых параметров смесителя [19].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящего исследования является формализация и последующий анализ динамических режимов функционирования электропривода, смесительного оборудования, комбикормового производства на основе имитационного моделирования.

В рамках поставленной задачи выполнено построение модели, отражающей взаимосвязь электромеханических и технологических параметров процесса перемешивания, что позволяет перейти от описательного уровня к количественной оценке режимов работы привода. Сформированная имитационная модель реализует воспроизведение переходных процессов в системе анализа временных зависимостей, переменных состояния и фазные токи $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$, электромагнитный момент $M(t)$, угловую скорость вращения ротора $\omega(t)$. Нагрузка на валу двигателя рассматривается как функция технологических параметров перемешиваемой среды:

$$M_H(t) = f(\rho, \mu, k_{cm}, \omega),$$

где ρ – плотность сырья, μ – вязкость, k_{cm} – коэффициент сопротивления перемешиванию.

Анализ результатов моделирования показывает, что при изменении физико-механических характеристик сырья и режимов загрузки формируется выраженная нелинейность нагрузочных воздействий, что приводит к вариациям электромагнитных и механических параметров привода.

Адаптивная система управления в рассматриваемой постановке может быть представлена в виде функционала:

$$u(t) = F(x(t), \hat{\theta}(t)),$$

где $x(t)$ – вектор состояния системы, $\hat{\theta}(t)$ – оценка изменяющихся параметров объекта, формируемая в процессе идентификации. Такой подход обеспечивает согласование управляющего воздействия с текущими условиями функционирования, включая изменение характеристик сырья, режимов загрузки и внешних возмущений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Смесители комбикормов представляют собой сложные объекты управления, характеризующиеся нелинейностью из-за зависимости нагрузки от количества и плотности материала, значительным временем запаздывания вследствие инерционности системы ввиду значительной массы перемешиваемого материала, неопределенностью внешних воздействий в зависимости от температуры окружающей среды, влажности составляющих, свойств сырья и т.п. [20]. Анализируя смеситель как объект управления, важно учитывать такие параметры, как скорость вращения рабочего органа мешалки, плотность

смеси, мощность привода электродвигателя и стабильность процесса смешивания [21]. Для учета динамических изменений в процессе работы смесителя необходимо построение системы управления по принципу обратной связи с учетом параметров нагрузки, скорости и положения мешалки. Закономерности построения системы управления основаны на принципе обратной связи, моделировании динамических процессов и адаптации к изменениям внешних условий. Для эффективной работы системы необходимо обеспечить согласование режимов работы электродвигателя с требованиями технологического процесса. Среди основных принципов построения системы управления нужно отметить моделирование процессов с целью корректировки управляющих воздействий [22], использование основных законов регулирования, реализацию адаптивной настройки параметров системы в зависимости от текущих условий работы.

Рассмотрим структурную схему системы автоматического управления для контроля работы смесителя комбикорма (рис. 1), где УУ – управляющее устройство, ОУ – объект управления (смеситель комбикорма).

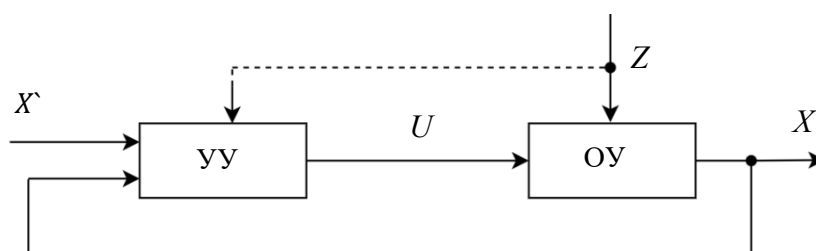


Рис. 1. Структурная схема системы управления смесителем комбикорма

Fig. 1. Structural diagram of the feed mixer control system

Выходной сигнал объекта представляет собой совокупность контролируемых параметров, таких как уровень загрузки, степень гомогенизации смеси, температура и влажность. В общем случае множество параметров можно описать вектором $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, управляющее воздействие вектором $U = (u_1, u_2, \dots, u_r)$, задающее воздействие определяет требуемые характеристики процесса смешивания и описывается вектором $X' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$. Выбор замкнутой системы управления смесителями комбикорма обусловлен возможностью учета фактического состояния объекта управления в условиях внешних возмущений в отличие от разомкнутой схемы с управлением по заранее заданному алгоритму. Замкнутый контур обеспечивает автоматическую компенсацию возмущений $Z = (z_1, z_2, \dots, z_i)$, колебания напряжения, изменение влажности компонентов или нестабильность загрузки сырья, а также ошибки алгоритмов управления, неточности обработки данных, что можно устранить совершенствованием регуляторов и их адаптацией к условиям работы смесителя [23]. Динамика объекта управления описывается зависимостью выходной величины X от управляющего воздействия U и возмущений Z как $x = F(U, Z)$, где F – оператор, определяющий реакцию системы на входные воздействия.

Важная задача – поддержание качества смешивания компонентов, стабильности дозирования и энергоэффективность процесса [7]. К данным помехам можно отнести изменение нагрузки на смеситель при подаче сырья с различной плотностью, колебания напряжения в электросети. Если помеху Z или хотя бы некоторые ее составляющие $z_1, z_2, \dots, z_i$ возможно измерить, можно говорить о компенсации возмущающих факторов – пунктирная линия на рис. 1. Комбинированные системы управления имеют преимущества,

при этом область применения компенсационных методов гораздо уже, чем методов обратной связи из-за нестабильного характера и невозможности учета всех возмущений и сложного расчета корректирующих воздействий.

Задача проектирования системы управления сводится к разработке такого управляющего устройства, которое наилучшим образом адаптируется к динамическим условиям работы смесителя. Запишем математическую модель динамики смесителя в виде системы дифференциальных уравнений, где f – вектор-функция, определяющая динамику системы, $x_i^{(0)}$ – начальные значения переменных состояния смесителя. Оператор дискретно-непрерывной системы может быть задан уравнениями в конечных разностях (1):

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= \left(\frac{dx_1}{dt}, \dots, \frac{dx_n}{dt} \right); \quad F(X, U, Z, t) = (f_1(\cdot), \dots, f_n(\cdot)) \\ x^{(0)} &= (x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}), \quad x_i^{(0)} = (x_i)_{t=0}, \quad (i = 1, \dots, n). \end{aligned} \quad (1)$$

Алгоритмы оптимального управления должны учитывать динамические изменения характеристик объекта, наличие внешних возмущений и технологические ограничения. Дискретизируем $x_i(m)$ в момент времени $t = t_m$ $X(m) = [x_1(m), \dots, x_n(m)]$ для реализации цифрового управления. Оператор дискретно-непрерывной системы в виде разностных уравнений $x_i(m+1) = g_i[x_1(m), \dots, x_n(m); u_1(m), \dots, u_r(m); z_1(m), \dots, z_i(m); m]$, $(i = 1, \dots, n)$, где g_i – нелинейная функция аргументов, связывающая значения параметров смеси и управляющих воздействий между последовательными моментами времени. В векторной форме $X(m+1) = G[X(m); U(m); Z(m); m]$. Дискретно-непрерывные методы реализуют управление в зависимости от дискретизации показаний датчиков, приводы при этом работают в непрерывном режиме. Управляющее воздействие $U(m)$ характеризует систему электропривода, влияние $Z(m)$ отражает задержки и колебания в системе электропривода, содержит колебательную составляющую, требует использования адаптивных алгоритмов управления с введением логарифмических и экспоненциальных компонент модели.

В чисто дискретных системах не только измерения выполняются в определенные моменты времени, но и значения параметров ограничены фиксированными уровнями: так, уровни мощности привода составляют 0, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %, количество подаваемых компонентов также определяется целыми числами доз. На значения параметров подобных систем накладываются дискретные ограничения $x_i(m) = aq$, где a – квантовый шаг параметра, q – целое число. При проектировании систем управления смесителями комбикорма необходимо учитывать и различные виды ограничений на управляющие воздействия, параметры состояния и характеристики процесса. В реальных условиях на управляющие воздействия накладываются ограничения в виде неравенств $|u_1| \leq U_1, \dots, |u_r| \leq U_r$. Скорость подачи сырья должна оставаться в допустимых пределах.

Возможен случай, когда ограничены функции взаимосвязи управляющих сигналов $\sum_{v=1}^r \lambda_v^2 u_v^2 \leq N$, где λ – коэффициенты нормировки, N – предельное значение. Данное ограничение может использоваться для контроля суммарного энергопотребления системы. В r -мерном пространстве управляющих воздействий U эти ограничения определяют допустимую область $\Omega(U)$, внутри которой сформированы управляющие сигналы $U \in \Omega(U)$. В реальных системах управления ограничения на обобщенные показатели эффективности, общее энергопотребление или расход сырья за цикл [24]. Подобные ограничения накладываются на параметры температуры смеси и не должны превышать заданный предел, иначе возможна потеря питательных свойств корма или же перегрев оборудования.

Общие ограничения на параметры состояния $H_\mu(x_1, \dots, x_n) = H_\mu(\bar{x}) \leq 0$ ($\mu = 1, \dots, m$), где $H_\mu(x)$ – функции или функционалы, ограничивающие параметры смеси. Если x_1 – влажность, то зададим ограничение $H_1(x) = x_1 - x_{\max} \leq 0$, в n -мерном пространстве состояний допустимая область $\Omega(x)$ и $X \in \Omega(X)$. Запишем ограничения в виде функционалов от управляющих воздействий $U(t)$, состояний $X(t)$ и возмущений $Z(t)$, $L_\mu[U(t), X(t), Z(t)] \in \Omega_\mu(L)$ ($\mu = 1, \dots, m$). Ограничение на общее энергопотребление электропривода $L = \int_0^T [\sum_{v=1}^n \alpha_v x_v^2 + \beta u^2] dt \leq N$, где α_v, β, N – положительные константы, T – время работы системы.

В процессе проектирования автоматизированных систем управления смесителями комбикорма важно учитывать ограничения на параметры системы и влияние возмущений, возникающих в ходе технологического процесса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для обеспечения эффективного управления процессом смешивания комбикорма важно не только анализировать динамику системы, но и правильно подбирать электропривод в составе системы автоматизированного управления, который сможет реализовать требуемые алгоритмы [13]. После получения численных решений разностных уравнений и анализа параметров системы становится очевидно, что выбор двигателя должен учитывать как динамические характеристики нагрузки, так и технологические ограничения [25]. Правильный выбор электродвигателя в системе управления играет ключевую роль в обеспечении эффективной работы смесителя. Важной характеристикой служит совместимость с системой управления, а именно поддержка протоколов обмена данными, возможность интеграции с ПЛК или микроконтроллерами [26].

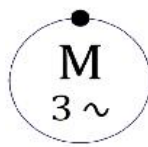
Имитационное моделирование электропривода выполнено с учетом параметров состояния смеси, возможных внешних возмущений, учтены динамические изменения момента нагрузки, возможность корректировки на основе обратной связи. Выполнено имитационное моделирование в среде SimInTech, в ходе которого исследованы параметры электропривода с учетом рассчитанных переменных состояния смеси и возможных внешних возмущений. Разработанная модель позволила проанализировать реакцию системы на изменения момента нагрузки, определить оптимальные режимы работы двигателя и скорректировать стратегию управления.

В рассматриваемой модели в качестве привода используется асинхронный электродвигатель мощностью 11 кВт, питаемый от трехфазной сети напряжением 380 В. Данный выбор обусловлен не только требуемой мощностью, но и необходимостью обеспечить устойчивую работу смесителя при переменной и зачастую неравномерной нагрузке, характерной для процессов перемешивания многокомпонентных смесей. При частоте вращения порядка 3000 об/мин. достигается достаточная интенсивность перемешивания, при этом всем двигатель не выходит на критические тепловые режимы, что очень важно при длительной эксплуатации оборудования.

Инерционные свойства ротора, описываемые моментом инерции $0,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, оказывают заметное влияние на динамику системы. При резких изменениях состава сырья или перераспределении массы внутри рабочей камеры это позволит частично сглаживать переходные процессы и избегать избыточных колебаний скорости.

При построении модели дополнительно введен коэффициент вязкого трения, принятый равным 0,002, отражающий диссипативные потери в механической части системы. Указанный параметр приобретает существенное значение при обработке смесей с повышенной

плотностью и выраженной неоднородностью компонентов [27], увеличение сопротивления вращению может приводить к локальным нарушениям кинематики потока, а в последующем к ухудшению качества перемешивания. Совокупность принятых параметров электродвигателя и их реализация в среде моделирования представлены на рис. 2.

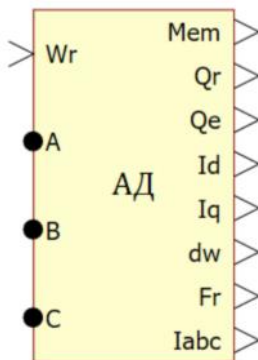


Название	Имя	Формула	Значение
Номинальные			
Номинальная мощность, кВт	Pnom		11
Номинальное напряжение, В	Unom		380
Номинальная частота питающе...	fnom		50
Номинальная частота вращени...	Nnom		3000
Число пар полюсов	p		1
Момент инерции, кг*м2	J		0.2
Схема замещения			
Сопротивления статора [Xls, Rs...	Zst		[0.011 , 0.23]
Сопротивление намагничивани...	Zm		[0.21]
Сопротивление ротора [Xlr, Rr]...	Zr0		[0.11 , 0.19]
Начальные условия			
Начальная угловая скорость [ω...	Init_M		[0]
Дополнительные			
Имя на схеме	sc_name		
Блокировать отрицательную ск...	Wlock		☐ Нет
Коэффициент вязкого трения, ...	F	0.002	0.002

Рис. 2. Основные характеристики электродвигателя

Fig. 2. Electric motor performance characteristics

При выборе параметров электродвигателя для смешивания кормов всегда важен баланс между устойчивостью системы и эффективностью процесса. Следовало подобрать значения, которые обеспечивали бы оптимальную динамику работы, исключая перегрузки и неравномерность перемешивания. Такие характеристики, как сопротивление статора и ротора, напрямую влияют на энергопотребление и тепловые потери. Авторы выбрали значения, которые позволяют минимизировать нежелательные тепловые эффекты, сохраняя при этом достаточную мощность для эффективного перемешивания (рис. 3). Индуктивности, отвечающие за процессы намагничивания и рассеяния, были выбраны с учетом требуемого уровня контроля электромагнитных процессов.



Название	Имя	Формула	Значение
Сопротивление статора [Ом]	Rs	0.23	0.23
Сопротивление ротора [Ом]	Rr	0.19	0.19
Индуктивность намагничивания [Гн]	Lm	0.21/(100...	0.000668450761
Индуктивность рассеяния ротора [Гн]	dLr	0.11/(100...	0.0003501408748
Индуктивность рассеяния статора [Гн]	dLs	0.11/(100...	0.0003501408748
Число пар полюсов двигателя	Zp	1	1

Рис. 3. Тестовые характеристики электродвигателя

Fig. 3. Electric motor test performance

Предложена функциональная схема моделирования асинхронного двигателя с трехфазным питанием, реализованная в среде динамического моделирования SimInTech (рис. 4).

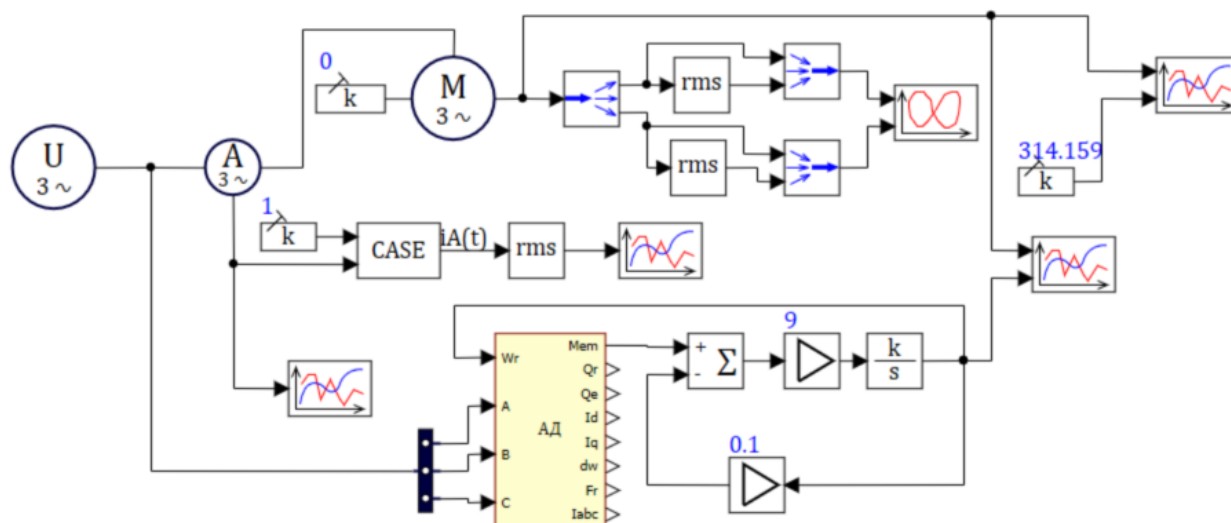


Рис. 4. Функциональная схема системы управления процессом смешивания комбикорма

Fig. 4. Functional diagram of the feed mixing control system

Схема регулирования (рис. 4) построена вокруг типовой структуры электропривода, в которой источник трехфазного напряжения U_3 обеспечивает питание асинхронного двигателя M_3 , непосредственно связанного с исполнительным механизмом смесителя. При этом двигатель рассматривается не изолированно, а как элемент системы, поведение которого определяется как параметрами питания, так и текущим состоянием нагрузки. Практически значимыми факторами всегда выступают нестабильность входного напряжения и изменчивость нагрузки в процессе перемешивания. Как показали расчеты, поведение системы получается чрезмерно сглаженным и не отражает реальных режимов работы. Контролируется форма сигналов, что дает возможность выявлять отклонения еще до возникновения перегрузки. Для оценки состояния привода используются блоки вычисления действующих значений токов и напряжений.

Регулирование скорости реализовано по замкнутой схеме, где ошибка между заданной и текущей скоростью используется для формирования управляющего воздействия:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}.$$

Подбор коэффициентов выполняется с учетом динамики системы, при изменении свойств смеси фиксированные значения оказываются недостаточными. Введение адаптивного блока позволяет корректировать параметры регулятора непосредственно в процессе работы. После первичной обработки сигналы поступают в модуль CASE – не просто передача данных, а выбор сценария работы в зависимости от текущего состояния системы. За счет этого достигается более гибкая реакция привода на изменения условий.

В качестве диагностического параметра выбран фазный ток $i_A(t)$. Его обработка выполняется через вычисление действующего значения:

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_A^2(\tau) d\tau}.$$

По этому показателю удобно оценивать загрузку двигателя. При увеличении вязкости смеси или неравномерном распределении компонентов возрастает момент сопротивления, что сразу отражается на токе. Выходные параметры двигателя – скорость ω_r и момент M_e – дополнительно сглаживаются. Мгновенные значения в ряде случаев дают избыточную вариативность и затрудняют анализ. Поддержание устойчивых значений этих величин напрямую связано с качеством процесса перемешивания.

В ходе исследований выполнено моделирование работы привода, графики (рис. 5) позволяют проанализировать ключевые характеристики, определить возможные потери и убедиться в правильности выбора параметров двигателя.

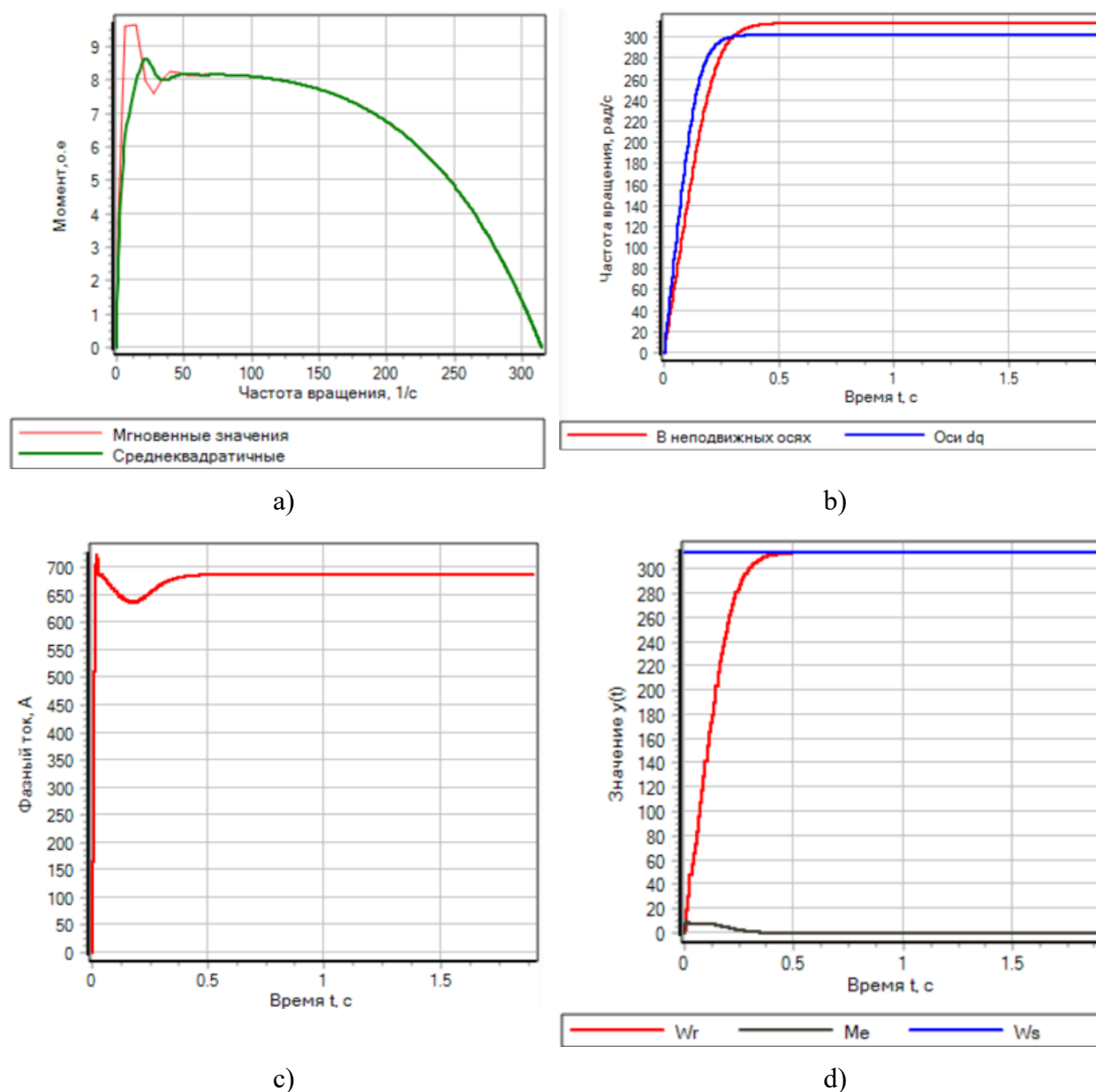


Рис. 5. Имитационное моделирование электродвигателя смесителя комбикорма:
 а) зависимость момента от частоты вращения, б) частота вращения во времени,
 в) фазный ток во времени, д) динамика угловой скорости, момента и скольжения

Fig. 5. Simulation results for the feed mixer electric motor:
 а) torque versus rotational speed; б) motor speed over time;
 в) phase current over time; д) dynamics of angular velocity, torque, and slip

Двигатель обеспечивает высокий пусковой момент около 9 Н·м (рис. 5 а), что необходимо для преодоления сопротивления неподвижной смеси в пусковом режиме. Стабилизация свидетельствует о высокой энергоэффективности двигателя, снижение крутящего момента указывает на естественные ограничения по мощности и КПД. Двигатель сохраняет достаточный запас момента в диапазоне рабочих скоростей, что важно для равномерного перемешивания кормов. Изменение частоты вращения во времени (рис. 5 б) характеризует высокую динамику разгона, быстрое достижение номинальной частоты вращения. Разница между кривыми в неподвижных осях и в осях dq демонстрирует стабильную работу системы управления двигателем. Скачок фазного тока до 700 А (рис. 5 с) и стабилизация на уровне 650 А характеризуют режим запуска и потребление повышенного тока для создания крутящего момента. Установившийся режим показывает низкий уровень потерь и отсутствие перегрева обмоток, что положительно сказывается на долговечности двигателя. Стабилизация значений угловой скорости, электромагнитного момента и скольжения (рис. 5 d) при выходе на рабочий режим указывает на завершение переходных процессов, достижение устойчивого режима функционирования привода и отсутствие перегрузочных состояний в исследуемом диапазоне работы. Низкое значение параметра скольжения указывает на высокую эффективность работы привода, при этом механическая мощность практически полностью используется для вращения вала, и тепловые потери отсутствуют. Результаты анализа подтверждают выбор оптимальных параметров электродвигателя системы смешивания кормов.

Выводы

Введение адаптивного механизма позволяет частично компенсировать указанные эффекты за счет подстройки параметров управления в процессе работы. Применение замкнутого контура регулирования скорости в сочетании с вычислением действующих значений токов и напряжений показало свою работоспособность при различных режимах загрузки. Использование rms -оценок оказалось целесообразным не столько для повышения точности измерений, сколько для стабилизации управляющих воздействий при кратковременных возмущениях. Изменение вязкости и неоднородности компонентов приводит к колебаниям момента сопротивления, что отражается на потребляемом токе. Фиксированные настройки регулятора оказываются недостаточно эффективными.

Включение блока CASE позволило реализовать переключение между различными режимами работы без существенных задержек, что в ряде сценариев предотвращает развитие аварийных состояний. Дополнительными факторами, влияющими на устойчивость системы, являются колебания питающего напряжения, а также неравномерное распределение массы внутри смесителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овечкина Л. Ю., Бузоверов С. Ю., Лобанов В. И. Повышение эффективности процесса смешивания комбикормов путем модернизации рабочего органа смесителя // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2021. № 4-1(55). С. 75–78. DOI: 10.24412/2500-1000-2021-4-1-75-78
2. Мамедов Г. Б., Камран Т. Ф. Исследование производительности экспериментального кормосмесителя // Аграрная наука. 2021. № 2. С. 90–93. DOI: 10.32634/10.32634/0869-8155-2021-345-2-90-93
3. Савиных П. А., Алешкин А. В., Турубанов Н. В., Зырянов Д. А. Определение рациональных параметров смесителя теоретическими исследованиями взаимодействия винтовой поверхности шнека с материалом // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 1(41). С. 76–84. DOI: 10.51794/27132064-2021-1-76

4. Коновалов В. В., Боровиков И. А., Гусев С. В., Терюшков В. П. Результаты экспериментальных исследований смесителя комбикормов [Смеситель комбикормов с комбинированным рабочим органом периодического действия] // Вестник Московского государственного агроинженерного университета. 2006. Вып. 3. С. 78–79.

5. Коновалов В. В., Гусев С. В., Терюшков В. П., Боровиков И. А. Обоснование параметров смесителя комбикормов периодического действия // Научные труды ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии. 2006. Т. 16. № 3. С. 47–52.

6. Савиных П. А., Турубанов Н. В., Исупов А. Ю. Определение оптимальных технологических параметров горизонтального смесителя рассыпных комбикормов // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024. Т. 25. № 2. С. 293–300. DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.2.293-300

7. Глобин А. Н., Глазков Д. Ю., Липкович И. Э. и др. Теоретические исследования процесса смешивания кормов центробежным смесителем // АгроЭкоИнфо. 2024. № 5(65). Art.id:20. DOI: 10.51419/202145504

8. Матюшев В. В., Бочкарев А. Н., Семенов А. В., Чаплыгина И. А. Исследование режимов работы центробежного смесителя сыпучих компонентов // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2021. № 4(44). С. 206–214. DOI: 10.48136/2222-0364_2021_4_206

9. Остриков А. Н., Сухарев А. И. Смешивание компонентов комбикормов в двухвальном лопастном смесителе // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2002. № 2-3. С. 53–55.

10. Проценко А. М., Денисенко Е. А. Совершенствование рабочих органов в горизонтальных смесителях // Образование. Наука. Производство: сб. докл. XV Международного молодежного форума. Белгород: Белгородский ГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. С. 104–109.

11. Николаев В. Н., Зязев Е. В. Результаты исследований процесса смешивания сыпучих кормов в аэродинамическом смесителе // АПК России. 2022. Т. 29. № 3. С. 331–335. DOI: 10.55934/2587-8824-2022-29-3-331-335

12. Джингилбаев С. С., Силин В. А. Экспериментальное обоснование оптимальных значений угла наклона и частоты вращения шнеков горизонтально шнекового смесителя // Механика и технологии. 2022. № 2(76). С. 66–72. DOI: 10.55956/YKET2568

13. Савиных П. А., Турубанов Н. В., Мошонкин А. М. Определение оптимальных конструктивно-технологических параметров молотковой дробилки с решетками в торцевых поверхностях // Агроинженерия. 2023. Том. 25. № 5. С. 17–22. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-5-17-22

14. Ханин С. И., Воронов В. П., Кикин Н. О., Мордовская О. С. Определение времени подготовки смеси в горизонтальном лопастном смесителе с установленными цилиндрическими стержневыми элементами // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. № 17-2. С. 265–272. DOI: 10.26160/2658-3305-2022-17-265-272

15. Шенцова Е. С., Панин И. Г., Гречишников В. В., Панин А. И. Оценка погрешностей содержания питательных и биологически активных веществ в комбикормовой продукции // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 4(66). С. 109–115. EDN: VKDSTD

16. Садов В. В., Сорокин С. А. Интенсификация процесса смешивания комбикормов в вертикальном шнековом смесителе // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2023. № 4(222). С. 86–92. DOI: 10.53083/1996-4277-2023-222-4-86-92

17. Кикин Н. О. Возможности повышения интенсификации процесса смешивания в смесителях с горизонтальным расположением валов // Машиностроение: инновационные аспекты развития: материалы международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2022. Т. 5. С. 13–17. DOI: 10.26160/2618-6810-2022-5

18. Рыбалкин Н. А., Лебедев А. Т., Павлюк Р. В. Совершенствование процесса смешивания кормов в лопастном смесителе // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2020. № 3(27). С. 78–84. EDN: TMTSCMM

19. Цвяк А. В., Фролов Д. В., Ганин Е. В. Оптимизация параметров процесса смешивания компонентов комбикормов в вертикальном измельчителе-смесителе // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2011. № 2(30). С. 64–65. EDN: NUUKRT
20. Карташов С. Г., Клычев Е. М. Исследование импульсного ввода жидких добавок в смеситель // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 2(27). С. 294–299. EDN: YASXSP
21. Lozhkina E.B., Vedishchev S.M., Lozhkin V.S. Classification of dry feed mixers // The World of Science without Borders: Proceedings of the 10th All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation) for young researchers, Tambov, April 21, 2023. Tambov: Izdatel'skiy tsentr FGBOU VO «Tambovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet», 2023. Pp. 97–99.
22. Шахов В. А., Белов А. Г., Соловьев С. А. и др. Построение математической модели процесса смешивания компонентов комбикормов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 4(78). С. 140–143. EDN: RBEKYP
23. Бородулин Д. М., Комаров С. С. Определение сглаживающей способности барабанного смесителя непрерывного действия с регулируемыми лопастями // Техника и технология пищевых производств. 2013. № 4(31). С. 107–112. EDN: RNIÉPR
24. Солонищников П. Н. Исследование непрерывного режима смешивания кормовых компонентов в смесительной установке // Тракторы и сельхозмашины. 2021. Т. 88. № 4. С. 71–76. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-71-76
25. Ляшенко В. С. Обзор и анализ смесителей сыпучих кормов // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2015. № 2(18). С. 56–60. EDN: TVRXMR
26. Кормановский Л. П., Тищенко М. А. Механико-технологические основы точных технологий приготовления и раздачи кормосмесей крупному рогатому скоту многофункциональными агрегатами. М.: Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический институт механизации и электрификации сельского хозяйства, 2002. 344 с.
27. Лозовой Н. М., Радинская Л. И., Лозовая С. Ю. Экспериментальные исследования зависимости коэффициента неоднородности смеси от технологических параметров в смесителе с изменяющейся рабочей камерой // Техника и технология транспорта. 2019. № S(13). С. 33. EDN: WNDLRW
28. Алексеев В. А., Григорьев А. О., Артемьев В. С. Модернизация электроприводов с реверсом поля для производственных механизмов АПК // Рациональное природопользование и социально-экономическое развитие сельских территорий как основа эффективного функционирования АПК региона: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 80-летию со дня рождения заслуженного работника сельского хозяйства Российской Федерации, почетного гражданина Чувашской Республики Айдака Аркадия Павловича, Чебоксары, 02 июня 2017 года. Чебоксары: Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, 2017. С. 63–67. EDN: ZFQOOF
29. Мокрова Н. В., Григорьев А. О., Артемьев В. С. Синтез финитного управления в агропромышленном комплексе в условиях импульсных нагрузок // Вестник Чувашского государственного аграрного университета. 2024. № 3(30). С. 189–197. DOI: 10.48612/vch/3t59-rm1b-2mte

REFERENCES

1. Ovechkina L.Yu., Buzoverov S.Yu., Lobanov V.I. Improving the efficiency of the feed mixing process by upgrading the mixer working body. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2021. Vol. 4-1(55). Pp. 75–78. DOI: 10.24412/2500-1000-2021-4-1-75-78. (In Russian)
2. Mamedov G.B., Kamran T.F. Experimental feed mixer performance study. *Agrarian Science*. 2021. No. 2. Pp. 90–93. DOI: 10.32634/10.32634/0869-8155-2021-345-2-90-93. (In Russian)

3. Savinykh P.A., Aleshkin A.V., Turubanov N.V., Zyryanov D.A. Determination of rational parameters of a mixer by theoretical studies of the interaction of the screw surface of a screw with the material. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2021. No. 1(41). Pp. 76–84. DOI: 10.51794/27132064-2021-1-76. (In Russian)
4. Konovalov V.V., Borovikov I.A., Gusev S.V., Teryushkov V.P. Results of experimental studies of a compound feed mixer [Compound feed mixer with a combined working element of periodic action]. *Vestnik of the Moscow State Agroengineering University*. 2006. Issue 3. Pp. 78–79. (In Russian)
5. Konovalov V.V., Gusev S.V., Teryushkov V.P., Borovikov I.A. Justification of the parameters of a compound feed mixer of periodic action. *Scientific Works of the All-Russian Research Institute of Animal Husbandry*. 2006. Vol. 16. No. 3. Pp. 47–52. (In Russian)
6. Savinykh P.A., Turubanov N.V., Isupov A.Yu. Determination of optimal technological parameters of a horizontal mixer of loose compound feed. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2024. Vol. 25. No. 2. Pp. 293–300. DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.2.293-300. (In Russian)
7. Globin A.N., Glazkov D.Yu., Lipkovich I.E. et al. Theoretical studies of the process of mixing feed with a centrifugal mixer. *AgroEcoInfo*. 2024. No. 5(65). Art.id:20. DOI: 10.51419/202145504. (In Russian)
8. Matyushev V.V., Bochkarev A.N., Semenov A.V., Chaplygina I.A. Study of operating modes of a centrifugal mixer for bulk components. *Bulletin of Omsk State Agrarian University*. 2021. No. 4(44). Pp. 206–214. DOI: 10.48136/2222-0364_2021_4_206. (In Russian)
9. Ostrikov A.N., Sukharev A.I. Mixing of compound feed components in a two-shaft paddle mixer. *Izvestiya vuzov. Food Technology*. 2002. No. 2-3. Pp. 53–55. (In Russian)
10. Protsenko A.M., Denisenko E.A. Improvement of working bodies in horizontal mixers. *Education. Science. Production: Collection of Reports of the XV International Youth Forum*. Belgorod: Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov, 2023. Pp. 104–109. (In Russian)
11. Nikolaev V.N., Zyazev E.V. Results of studies of the process of mixing bulk feed in an aerodynamic mixer. *Agro-industrial Complex of Russia*. 2022. Vol. 29. No. 3. Pp. 331–335. DOI: 10.55934/2587-8824-2022-29-3-331-335. (In Russian)
12. Dzhingilbaev S.S., Silin V.A. Experimental substantiation of the optimal values of the inclination angle and rotation frequency of the screws of a horizontal screw mixer. *Mechanics and Technology*. 2022. No. 2(76). Pp. 66–72. DOI: 10.55956/YKET2568. (In Russian)
13. Savinykh P.A., Turubanov N.V., Moshonkin A.M. Determination of the optimal design and technological parameters of a hammer crusher with sieves in the end surfaces. *Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 25. No. 5. Pp. 17–22. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-5-17-22. (In Russian)
14. Khanin S.I., Voronov V.P., Kikin N.O., Mordovskaya O.S. Determining the mixture preparation time in a horizontal paddle mixer with installed cylindrical rod elements. *Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production*. 2022. No. 17-2. Pp. 265–272. DOI: 10.26160/2658-3305-2022-17-265-272. (In Russian)
15. Shentsova E.S., Panin I.G., Grechishnikov V.V., Panin A.I. Evaluation of errors of nutrients and bioactive substances in animal feed production. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2015. No. 4(66). Pp. 109–115. EDN: VKDSTD. (In Russian)
16. Sadov V.V., Sorokin S.A. Intensification of compound feed mixing process in a vertical screw mixer. *Vestnik of the Altai State Agrarian University*. 2023. No. 4(222). Pp. 86–92. DOI: 10.53083/1996-4277-2023-222-4-86-92. (In Russian)
17. Kikin N.O. Possibilities of increasing the intensification of the mixing process in mixers with horizontal shafts. *Mechanical Engineering: Innovative Aspects of Development: Materials of The International Scientific and Practical Conf. St. Petersburg*, 2022. Vol. 5. Pp. 13–17. DOI: 10.26160/2618-6810-2022-5. (In Russian)

18. Rybalkin N.A., Lebedev A.T., Pavlyuk R.V. Improving the feed mixing process in a paddle mixer. *Innovations in Agrocultural Complex: Problems and Prospects*. 2020. No. 3(27). Pp. 78–84. EDN: TMTMM. (In Russian)
19. Tsvyak A.V., Frolov D.V., Ganin E.V. Parameters optimization of the process of fodder components mixing in the vertical crusher-mixer. *Bulletin of the Orenburg State Agrarian University*. 2011. No. 2(30). Pp. 64–65. EDN: NUUKRT. (In Russian)
20. Kartashov S.G., Klychev E.M. Investigation of pulsed liquid injection additives to the mixer. *Innovations in Agriculture*. 2018. No. 2(27). Pp. 294–299. EDN: YASXSP. (In Russian)
21. Lozhkina E.B., Vedishchev S.M., Lozhkin V.S. Classification of dry feed mixers. *The World of Science without Borders: Proceedings of the 10th All-Russian Scientific and Practical Conference (with International Participation) for Young Researchers, Tambov, April*. Tambov: Izdatel'skiy tsentr FGBOU VO 'Tambovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet', 2023. Pp. 97–99.
22. Shakhov V.A., Belov A.G., Soloviev S.A. et al. Construction of mathematical model of the process of mixing compound feed components. *Bulletin of the Orenburg State Agrarian University*. 2019. No. 4(78). Pp. 140–143. EDN: RBEKYP. (In Russian)
23. Borodulin D.M., Komarov S.S. Smoothing ability of a continuous action drum mixer with adjustable blades. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2013. No. 4(31). Pp. 107–112. EDN: RNIEPR. (In Russian)
24. Solonshchikov P.N. Study of the continuous mode of mixing feed components in a mixing unit. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2021. Vol. 88. No. 4. Pp. 71–76. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-71-76. (In Russian)
25. Lyashenko V.S. Review and analysis of mixers bulk feed. *Vestnik Omsk State Agrarian University*. 2015. No. 2(18). Pp. 56–60. EDN: TVRXMR. (In Russian)
26. Kormanovsky L.P., Tishchenko M.A. *Mekhaniko-tekhnologicheskiye osnovy tochnykh tekhnologiy prigotovleniya i razdachi kormosmesey krupnomu rogamu skotu mnogofunktsional'nykh agregatami* [Mechanical and technological foundations of precision technologies for the preparation and distribution of feed mixtures to cattle by multifunctional units]. Moscow: Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy i proyektno-tekhnologicheskii institut mekhanizatsii i elektrifikatsii sel'skogo khozyaystva, 2002. 344 p. (In Russian).
27. Lozovoy N.M., Radinskaya L.I., Lozovaya S.Yu. Experimental studies of the dependence of the mixture heterogeneity coefficient on the process parameters in a mixer with a variable working chamber. *Transport Engineering and Technology*. 2019. No. S(13). P. 33. EDN: WNDLRW. (In Russian)
28. Alekseev V.A., Grigoriev A.O., Artemyev V.S. Modernization of electric drives with field reversal for production mechanisms of the agro-industrial complex. Rational nature management and socio-economic development of rural areas as the basis for the effective functioning of the agro-industrial complex of the region: *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation Dedicated to the 80th Anniversary of the Birth of Honored Worker of Agriculture of the RF, Honorary Citizen of the Chuvash Republic Arkady Pavlovich Aidak, Cheboksary, June 2, 2017*. Cheboksary: Chuvashskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya, 2017. Pp. 63–67. EDN: ZFQOOF. (In Russian)
29. Mokrova N.V., Grigoriev A.O., Artemyev V.S. Synthesis of finite control in the agro-industrial complex under pulsed loads. *Vestnik Chuvash State Agrarian University*. 2024. No. 3(30). Pp. 189–197. DOI: 10.48612/vch/3t59-rm1b-2mte. (In Russian)

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:

Трамова А. М. – формирование общей идеи исследования, постановка задач, оценка практической значимости результатов и участие в формулировке выводов;

Мокрова Н. В. – руководство исследованием, методология, доработка рукописи и ее редактирование;

Артемьев В. С. – проведение исследования, формальный анализ, программное обеспечение, верификация данных, визуализация, представление результатов в научно обоснованной форме.

Contribution of the authors:

Tramova A.M. – conceptualization, methodology, formal analysis, writing – review and editing;

Mokrova N.V. – research supervision, methodology, manuscript revision and editing;

Artemyev V.S. – investigation, formal analysis, software, data curation, visualization, writing – original draft.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Трамова Азиза Мухамадияевна, д-р экон. наук, профессор, профессор кафедры информатики, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;

115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;

TramovaAM@rea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4089-6580>, SPIN-код: 8583-3592

Мокрова Наталия Владиславовна, д-р техн. наук, доцент, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС;

119049, Россия, Москва, Ленинский проспект, 4, стр. 1;

кафедра информатики, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;

115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;

nvmokrova@misis.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8444-2935>, SPIN-код: 5157-9790

Артемьев Виктор Степанович, ст. преподаватель, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;

115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;

artemev.vs@rea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0860-6328>, SPIN-код: 8912-5825

Information about the authors

Aziza M. Tramova, Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Informatics, Plekhanov Russian University of Economics;

36, Stremyanny lane, Moscow, 115054, Russia;

TramovaAM@rea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4089-6580>, SPIN-code: 8583-3592

Nataliya V. Mokrova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, National University of Science and Technology MISIS;

4, Leninsky prospekt, building1, Moscow, 119049, Russia;

Department of Informatics, Plekhanov Russian University of Economics;

36, Stremyanny lane, Moscow, 115054, Russia;

nvmokrova@misis.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8444-2935>, SPIN-code: 5157-9790

Viktor S. Artemyev, Senior Lecturer, Plekhanov Russian University of Economics;

36, Stremyanny lane, Moscow, 115054, Russia;

artemev.vs@rea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0860-6328>, SPIN-code: 8912-5825