

УДК 004.65:004.946:636.2.034

DOI: 10.18413/2518-1092-2026-11-2-0-11

Горелов С.А.¹
Клёсов Д.Н.²
Белецкая А.А.³
Афонин А.Н.³
Ядута А.З.³

**КЛАССИФИКАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ И ИНТЕРАКТИВНАЯ
ВИРТУАЛЬНАЯ СРЕДА ДЛЯ СЦЕНАРНОГО АНАЛИЗА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЖИВОТНОВОДСТВА**

¹) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина», ул. Вавилова, 1, Белгородская область, Белгородский район, п. Майский, 308503, Россия

²) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», Проспект Вернадского, 78, г. Москва, 119454, Россия

³) Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия

e-mail: d.n.klesov@yandex.ru

Аннотация

Цифровизация животноводства повышает требования к анализу регламентированных процедур, поскольку состояние процесса зависит не только от значений параметров, но и от стадии, последовательности действий и событийных нарушений. В статье предложен подход к оценке таких процессов на основе классификационной модели, связанной с интерактивной виртуальной средой. Модель объединяет стадии процесса, параметры, события нарушения регламента, нормированные отклонения и правила отнесения процесса к одному из классов состояния. Проверка выполнена на примере машинного доения на десяти тестовых сценариях, отражающих нормативные, отклоняющиеся, критические и пограничные режимы. В девяти случаях расчетный класс совпал с экспертной оценкой; расхождение возникло вблизи порога предкритического состояния, что показывает необходимость настройки весов и порогов. VR-среда рассматривается как визуально-аналитический интерфейс, отображающий стадию процесса, отклонения, события, интегральную оценку и итог сценария.

Ключевые слова: классификационная модель; виртуальная среда; технологические процессы животноводства; машинное доение; сценарный анализ; дискретно-событийное моделирование; системный анализ; поддержка принятия решений

Для цитирования: Горелов С.А., Клёсов Д.Н., Белецкая А.А., Афонин А.Н., Ядута А.З. Классификационная модель и интерактивная виртуальная среда для сценарного анализа технологических процессов животноводства // Научный результат. Информационные технологии. – Т.11, №2, 2026. – С. 135-150. DOI: 10.18413/2518-1092-2026-11-2-0-11

Gorelov S.A.¹
Klyosov D.N.²
Beletskaya A.A.³
Afonin A.N.³
Yaduta A.Z.³

**CLASSIFICATION MODEL AND INTERACTIVE VIRTUAL
ENVIRONMENT FOR SCENARIO ANALYSIS OF
TECHNOLOGICAL PROCESS IN LIVESTOCK
PRODUCTION**

¹) Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin»,

1 Vavilova St., Belgorod region, Belgorod district, village of Maisky, 308503, Russia

²) Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «MIREA – Russian Technological University», 78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia

³) Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

e-mail: d.n.klesov@yandex.ru

Abstract

Digitalization of animal husbandry increases the requirements for the analysis of regulated procedures, since the state of the process depends not only on the values of the parameters, but also on the stage, sequence of actions and event violations. The article suggests an approach to evaluating such processes based on a classification model associated with an interactive virtual environment. The model combines the stages of the process, parameters, events of violation of regulations, normalized deviations, and rules for assigning a process to one of the status classes. The check was performed on an example of machine milking based on ten test scenarios reflecting regulatory, deviant, critical and borderline regimes. In nine cases, the calculated class coincided with the expert assessment; the discrepancy occurred near the threshold of the precritical state, which indicates the need to adjust the weights and thresholds. The VR environment is considered as a visual analytical interface that displays the stage of the process, deviations, events, an integrated assessment and the outcome of the scenario.

Keywords: classification model; virtual environment; livestock technological processes; machine milking; scenario analysis; discrete-event modeling; systems analysis; decision support

For citation: Gorelov S.A., Klyosov D.N., Beletskaya A.A., Afonin A.N., Yaduta A.Z. Classification Model and Interactive Virtual Environment for Scenario Analysis of Technological Process in Livestock Production // Research result. Information technologies. – Т.11, №2, 2026. – P. 135-150. DOI: 10.18413/2518-1092-2026-11-2-0-11

ВВЕДЕНИЕ

Современные животноводческие комплексы являются киберфизическими системами, где оборудование, сенсоры, программные модули, процедуры и биологические объекты формируют параметрические и событийные данные для мониторинга, системного анализа и принятия решений [1-3].

Исследования охватывают мониторинг и поддержку принятия решений в животноводстве [4-6], классификацию состояний и выявление отклонений в технических и киберфизических системах [7-9], а также визуальную аналитику, VR/AR и цифровые двойники [10-11].

Однако эти направления недостаточно интегрированы применительно к регламентированным процессам животноводства. Традиционные интерфейсы отображают отдельные параметры, но не всегда связывают их со стадией процесса, источником отклонения, событием нарушения и итоговым классом состояния. VR-решения чаще используются для обучения и демонстрации, тогда как применение виртуальной среды как аналитического интерфейса классификационной модели разработано ограниченно [12-13].

В связи с этим целью работы является разработка классификационной модели оценки состояния регламентированных технологических процессов животноводства и ее интеграция с интерактивной виртуальной средой для сценарного анализа и визуального представления результатов. Научная новизна работы состоит в том, что интерактивная виртуальная среда рассматривается как аналитический интерфейс классификационной модели регламентированного технологического процесса, а не как самостоятельный демонстрационный или обучающий модуль. В качестве прикладного кейса для проверки предложенной постановки в работе используется процесс машинного доения.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Объектом исследования являются регламентированные технологические процессы животноводческого комплекса как элементы киберфизической системы, включающей оборудование, сенсоры, программные модули, технологические зоны и биологические объекты. Модель ориентирована на процессы со стадийной структурой, нормативными диапазонами параметров и событийными нарушениями. В качестве кейса рассматривается машинное доение с

фиксированной последовательностью операций, временными ограничениями и типовыми отклонениями.

Исходные данные включают количественные параметры и события нарушения регламента, а именно временные интервалы, режимы оборудования, длительность операций, изменение порядка действий, пропуск операции, превышение времени этапа и отказ оборудования. Апробация выполняется на тестовом наборе нормативных, отклоняющихся, комбинированных, критических и пограничных сценариев. Параметры сценариев, веса и пороги заданы экспертно для проверки логики модели и подлежат калибровке по эксплуатационным данным. Управляющие воздействия рассматриваются как сценарии типа «что-если» [14].

Для согласованного описания технологического процесса, его объектов, стадий, состояний, параметров и событийных нарушений используется классификационная модель

$$M = \langle O, P, G, S, X, E, R \rangle, \quad (1)$$

где O – множество объектов процесса; P – множество технологических процессов; G – множество стадий выполнения процесса; S – множество состояний процесса; X – множество контролируемых параметров; E – множество событийных признаков нарушения регламента; R – множество отношений между элементами модели.

Отношение R задается как объединение типизированных связей

$$R = R_{OP} \cup R_{PG} \cup R_{PS} \cup R_{PX} \cup R_{OO}, \quad (2)$$

где $R_{OP} \subseteq O \times P$ – принадлежность объекта технологическому процессу; $R_{PG} \subseteq P \times G$ – связь процесса со стадиями выполнения; $R_{PS} \subseteq P \times S$ – допустимые состояния процесса; $R_{PX} \subseteq P \times X$ – связь процесса с контролируемыми параметрами; $R_{OO} \subseteq O \times O$ – структурные и функциональные связи между объектами.

С позиций математического моделирования рассматриваемый технологический процесс описывается как гибридная дискретно-непрерывная система. Ее непрерывная часть связана с изменением контролируемых параметров во времени, а дискретная – со сменой стадий процесса и регистрацией событийных нарушений.

Вектор контролируемых параметров процесса задается выражением

$$x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)), \quad (3)$$

где $x_i(t)$ – значение i -го контролируемого параметра в момент времени t .

Управляющие воздействия описываются вектором

$$u(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)), \quad (4)$$

где $u_j(t)$ – j -й управляющий параметр, определяющий режим функционирования оборудования, временные характеристики выполнения операций или допустимые корректирующие воздействия.

Стадийная структура процесса задается множеством

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_r\}, \quad (5)$$

где g_i – элементы множества, соответствующие последовательным этапам выполнения технологической процедуры. Для процесса машинного доения в дальнейшем рассматриваются стадии подготовки, подключения аппарата, выполнения доения и контроля, завершения процедуры.

Множество состояний процесса задается как

$$S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}, \quad (6)$$

где s_1 – нормальное состояние, s_2 – допустимое состояние, s_3 – предкритическое состояние, s_4 – критическое состояние.

В модели различаются стадии процесса и состояния процесса. Стадии g_i отражают последовательность технологических операций, тогда как состояния s_i характеризуют качество и устойчивость протекания процесса. Поэтому один и тот же параметр может иметь различную интерпретацию в зависимости от текущей стадии выполнения процедуры.

Для каждого параметра $x_i(t)$ на стадии g_i стадийной структуры G задается нормативный интервал

$$I_i(g) = [a_i(g), b_i(g)] \quad (7)$$

где $a_i(g)$ и $b_i(g)$ – нижняя и верхняя допустимые границы параметра на соответствующей стадии. Такое представление позволяет учитывать стадийно-зависимый характер нормативов и не интерпретировать параметры вне контекста текущего этапа процесса.

Событийные нарушения регламента описываются бинарным вектором

$$e(t) = (e_1(t), e_2(t), \dots, e_q(t)), \quad e_k(t) \in \{0, 1\} \quad (8)$$

где $e_k(t) = 1$ означает наличие k -го события нарушения в момент времени t .

Множество событий разделяется на два подмножества:

$$E = E^{pr} \cup E^{cr}, \quad (9)$$

где E^{pr} – множество предкритических событий, E^{cr} – множество критических событий.

Для формализации их влияния вводятся индикаторы

$$\eta_{pr}(t) = \max_{k \in K_{pr}} e_k(t), \quad \eta_{cr}(t) = \max_{k \in K_{cr}} e_k(t), \quad (10)$$

где K_{pr} – множество индексов предкритических событий, K_{cr} – множество индексов критических событий. Тогда $\eta_{pr}(t) = 1$ означает наличие хотя бы одного предкритического события, а $\eta_{cr}(t) = 1$ – наличие хотя бы одного критического события.

Для приведения параметров различной размерности к сопоставимому виду используется нормированная оценка отклонения от нормативного интервала. Для параметра $x_i(t)$ вводится функция расстояния до допустимой области

$$\rho_i(x_i(t), I_i(g)) = \begin{cases} 0, & x_i(t) \in I_i(g), \\ a_i(g) - x_i(t), & x_i(t) < a_i(g), \\ x_i(t) - b_i(g), & x_i(t) > b_i(g), \end{cases} \quad (11)$$

после чего вычисляется нормированное отклонение

$$\delta_i(t) = \min \left\{ 1, \frac{\rho_i(x_i(t), I_i(g))}{\Delta_i(g)} \right\} \quad (12)$$

где $\Delta_i(g) > 0$ – нормирующая ширина отклонения для параметра x_i на стадии g .

Для интегрального учета параметрических и событийных признаков используется агрегированная оценка

$$D(t) = \sum_{i=1}^n w_i \delta_i(t) + \sum_{k=1}^q v_k e_k(t) \quad (13)$$

где w_i – вес значимости отклонения i -го параметра, v_k – вес значимости k -го события нарушения.

Для обеспечения интерпретируемости вводится условие нормировки

$$\sum_{i=1}^n w_i + \sum_{k=1}^q v_k = 1 \quad (14)$$

Текущее состояние процесса определяется по иерархическим исключающим правилам, в которых событийные нарушения имеют приоритет над пороговой оценкой параметрических отклонений:

$$s(t) = \begin{cases} s_4, & \eta_{cr}(t) = 1, \\ s_3, & \eta_{cr}(t) = 0 \text{ и } (\eta_{pr}(t) = 1 \text{ или } D(t) > \theta_2), \\ s_2, & \eta_{cr}(t) = 0, \eta_{pr}(t) = 0, \theta_1 < D(t) \leq \theta_2, \\ s_1, & \eta_{cr}(t) = 0, \eta_{pr}(t) = 0, D(t) \leq \theta_1. \end{cases} \quad (15)$$

где θ_1 – порог перехода от нормального состояния к допустимому, θ_2 – порог перехода от допустимого состояния к предкритическому, причем $0 \leq \theta_1 < \theta_2 \leq 1$.

В расчетных экспериментах пороговые значения приняты равными $\theta_1=0,30$ и $\theta_2=0,60$ (в дальнейшем подлежат уточнению).

Для сравнительной оценки сценариев управления используется интегральный риск

$$R(u) = \lambda_1 \bar{D}(u) + \lambda_2 \tau_{pr}(u) + \lambda_3 v_{cr}(u) \quad (16)$$

где $\bar{D}(u)$ – среднее значение интегральной оценки отклонения при реализации сценария u , $\tau_{pr}(u)$ – доля времени нахождения процесса в неблагоприятном режиме, $v_{cr}(u)$ – нормированное число критических событий, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – коэффициенты значимости, удовлетворяющие условию

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1 \quad (17)$$

причем $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \geq 0$.

Итоговая оценка сценария определяется целевой функцией

$$J(u) = \alpha R(u) + \beta C(u) \quad (18)$$

где $C(u)$ – нормированная оценка затрат на реализацию сценария, α и β – коэффициенты значимости риска и затрат, $\alpha + \beta = 1$.

Предпочтительный сценарий определяется как

$$u^* = \arg \min_{u \in U} J(u), \quad (19)$$

Поскольку множество U является конечным множеством сценариев типа «что-если», выбор предпочтительного сценария может выполняться путем полного перебора альтернатив и их последующего ранжирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе предложенного математического аппарата сформирована прикладная модель оценки состояния процесса машинного доения. Ее структура представлена на рис. 1 и включает стадии процедуры, контролируемые параметры, событийные признаки нарушения регламента, модуль расчета интегральной оценки и блок сценарной оценки управляющих воздействий.

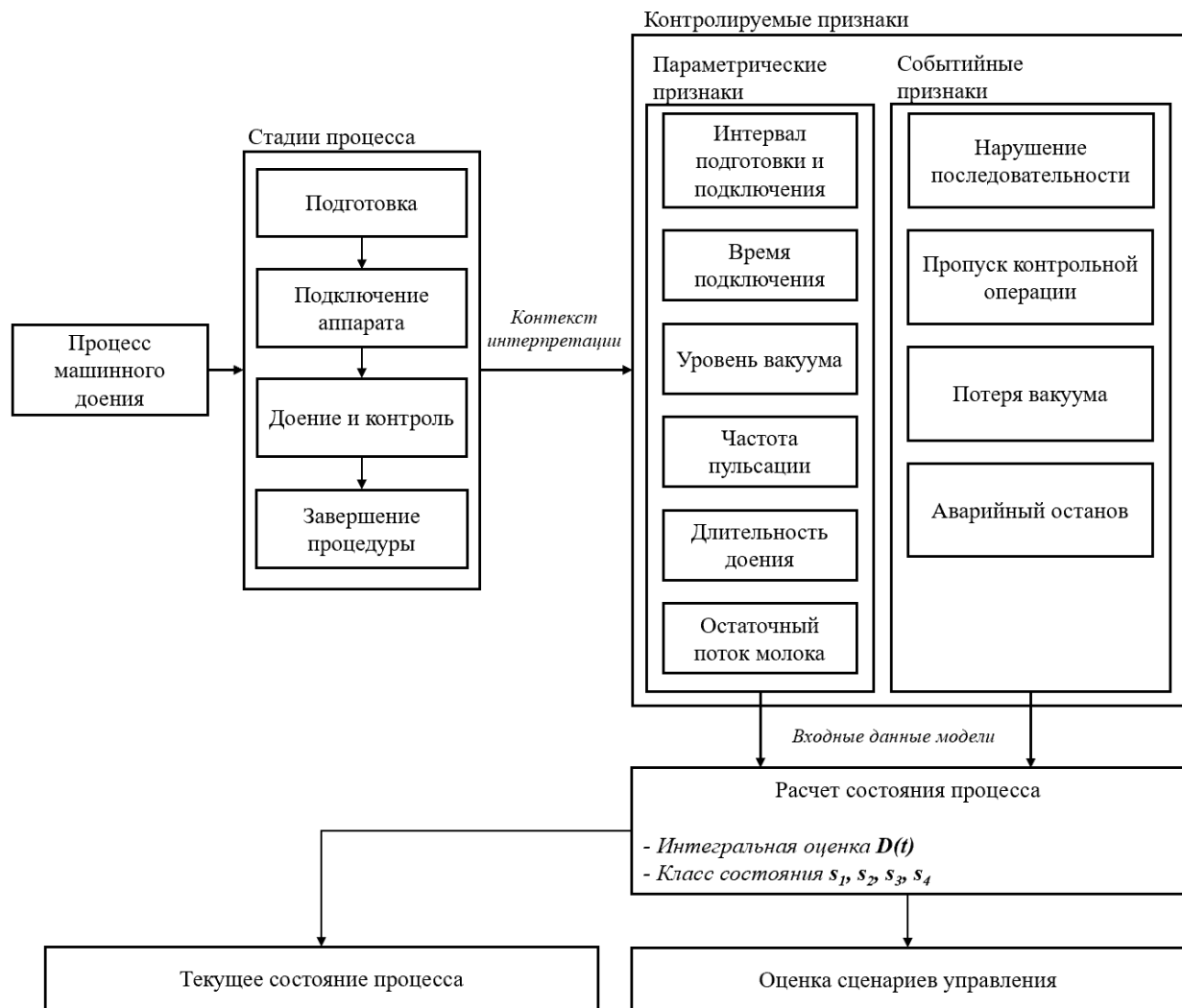


Рис. 1. Структура модели процесса машинного доения

Fig. 1. Structure of the machine milking process model

Система признаков приведена в табл. 1. Нормативные диапазоны заданы с учетом регламентной логики процесса и требований к доильному оборудованию [15-17]. Веса признаков рассматриваются как экспертные значения, подлежащие дальнейшей калибровке.

Таблица 1

Система признаков для расчета состояния процесса машинного доения

Table 1

Feature set for calculating the machine milking process state

Обозначение признака	Наименование признака	Тип признака	Стадия учета	Нормативный диапазон / условие срабатывания	Весовой коэффициент
x_1	Интервал между подготовкой вымени и подключением аппарата, с	Параметрический	g_1-g_2	60–120 с	0,14
x_2	Время подключения доильного аппарата, с	Параметрический	g_2	5–20 с	0,08
x_3	Уровень вакуума, кПа	Параметрический	g_2	44–48 кПа	0,16
x_4	Частота пульсации, цикл/мин	Параметрический	g_2	55–65 цикл/мин	0,10
x_5	Общая длительность доения, мин	Параметрический	g_2-g_3	4–8 мин	0,12
x_6	Остаточный поток молока перед завершением процедуры, кг/мин	Параметрический	g_3	$\leq 0,20$ кг/мин	0,08
e_1	Нарушение последовательности операций	Событийный, предкритический	g_1-g_4	1 при нарушении регламента действий	0,10
e_2	Пропуск контрольной операции	Событийный, предкритический	g_3-g_4	1 при отсутствии обязательной проверки	0,06
e_3	Потеря вакуума	Событийный, критический	g_2	1 при отказе вакуумного контура	0,10
e_4	Аварийный останов установки	Событийный, критический	g_2	1 при аварийном завершении процедуры	0,06

Алгоритм вычислительной идентификации состояния процесса приведен на рис. 2. Он включает определение текущей стадии, выбор нормативных интервалов, расчет нормированных

отклонений параметров, учет событийных нарушений, вычисление интегральной оценки и отнесение процесса к одному из классов состояния.

Результаты алгоритма используются также для отображения в интерактивной виртуальной среде. Передаются текущая стадия процедуры, значение $D(t)$, признаки событийных нарушений и итоговый класс состояния.

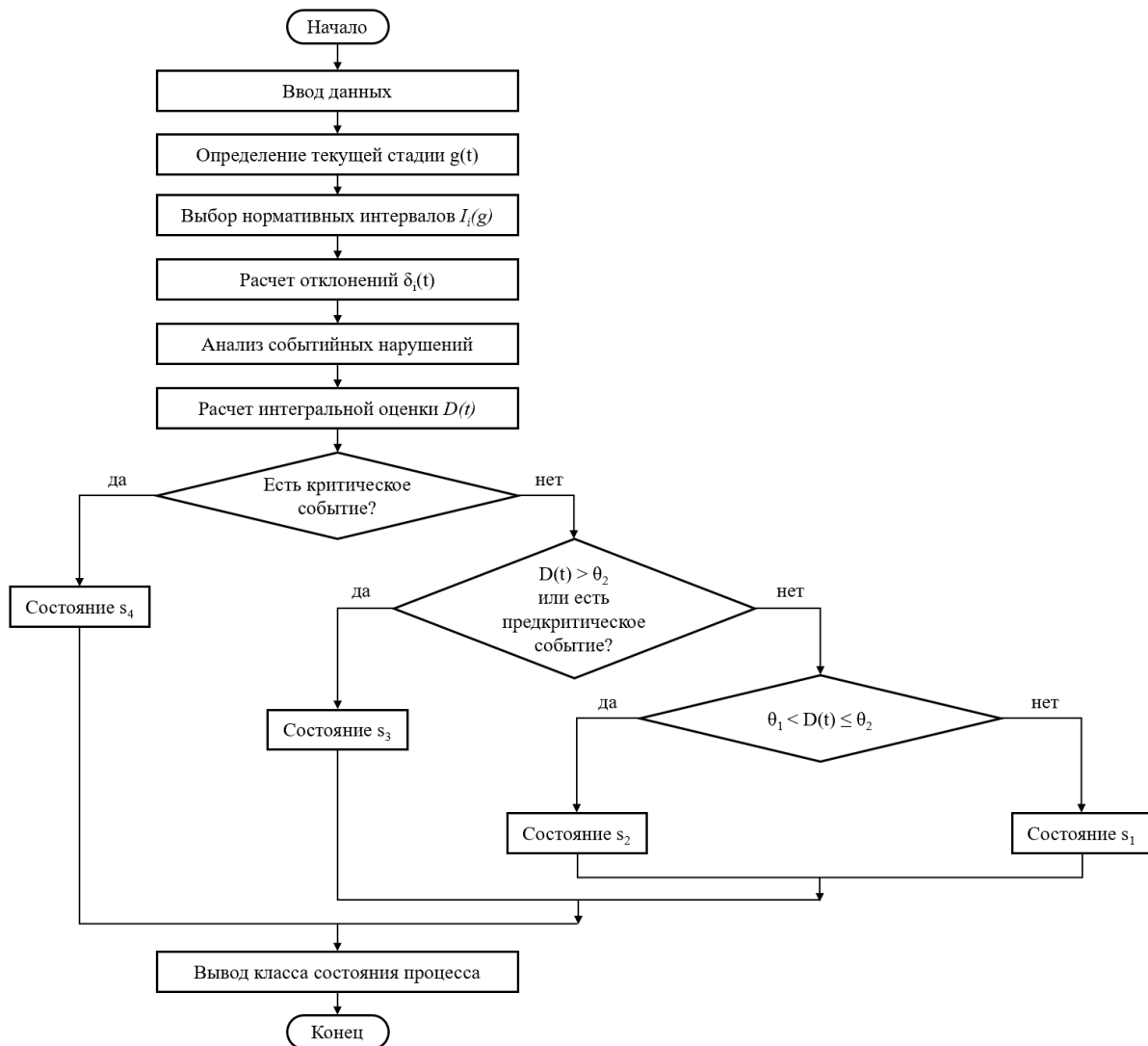


Рис. 2. Алгоритм вычислительной идентификации состояния процесса
Fig. 2. Algorithm for computational identification of the process state

Для проверки модели сформирован тестовый набор из десяти сценариев машинного доения (табл. 2), включающий нормативные, отклоняющиеся, комбинированные, критические и пограничные режимы. Эталонные классы заданы экспертно и используются для сопоставления с расчетной классификацией.

Таблица 2

Сценарии тестовой оценки классификационной модели процесса машинного доения

Table 2

Test scenarios for evaluating the classification model of the machine milking process

№ сценария	Наименование сценария	Стадия процесса	Тип отклонения	Изменяемые параметры / события	Ожидаемый класс состояния
S1	Нормативное выполнение процедуры	g1-g4	Нет отклонения	Параметры в норме, событий нет	S1
S2	Незначительная задержка подключения аппарата	g1-g2	Параметрическое, слабое	Рост интервала подключения	S1
S3	Увеличение интервала подключения аппарата	g1-g2	Параметрическое	Превышение интервала подключения	S2
S4	Нестабильность вакуума	g2	Параметрическое	Отклонение уровня вакуума и частоты пульсации	S2
S5	Пограничная длительность доения	g2-g3	Пограничное параметрическое	Длительность у верхней границы	S3
S6	Превышение длительности доения	g2-g3	Параметрическое, выраженное	Значительное превышение длительности доения, отклонение завершающих параметров	S3
S7	Нарушение порядка действий	g3-g4	Событийное, предкритическое	Пропуск контроля / нарушение порядка	S3
S8	Потеря вакуума	g2	Событийное, критическое	Отказ вакуумного контура	S4
S9	Комбинированное нарушение режима	g1-g3	Комбинированное	Задержка подключения + нестабильность вакуума + пропуск контроля	S3
S10	Аварийный останов	g2	Комбинированное, критическое	Останов установки и прерывание процедуры	S4

Сценарии S1-S10 охватывают нормативные, параметрические, событийные, критические, комбинированные и пограничные режимы, включая ситуацию S9 с одновременным влиянием временного отклонения, нестабильности оборудования и пропуска контроля.

Результаты расчетной классификации приведены в табл. 3, а распределение интегральной оценки по сценариям - на рис. 3. Совпадение расчетного и экспертного классов получено в 9 из 10 случаев, что соответствует доле совпадений 0,90.

Таблица 3

Результаты классификации тестовых сценариев

Table 3

Classification results for test scenarios

№ сценария	Значение интегральной оценки (D)	Наличие предкритических событий	Наличие критических событий	Расчетный класс состояния	Эталонный класс состояния	Совпадение / расхождение
S1	0,08	0	0	s1	s1	Совпадение
S2	0,27	0	0	s1	s1	Совпадение
S3	0,34	0	0	s2	s2	Совпадение
S4	0,46	0	0	s2	s2	Совпадение
S5	0,59	0	0	s2	s3	Расхождение
S6	0,67	0	0	s3	s3	Совпадение
S7	0,24	1	0	s3	s3	Совпадение
S8	0,21	0	1	s4	s4	Совпадение
S9	0,53	1	0	s3	s3	Совпадение
S10	0,71	0	1	s4	s4	Совпадение

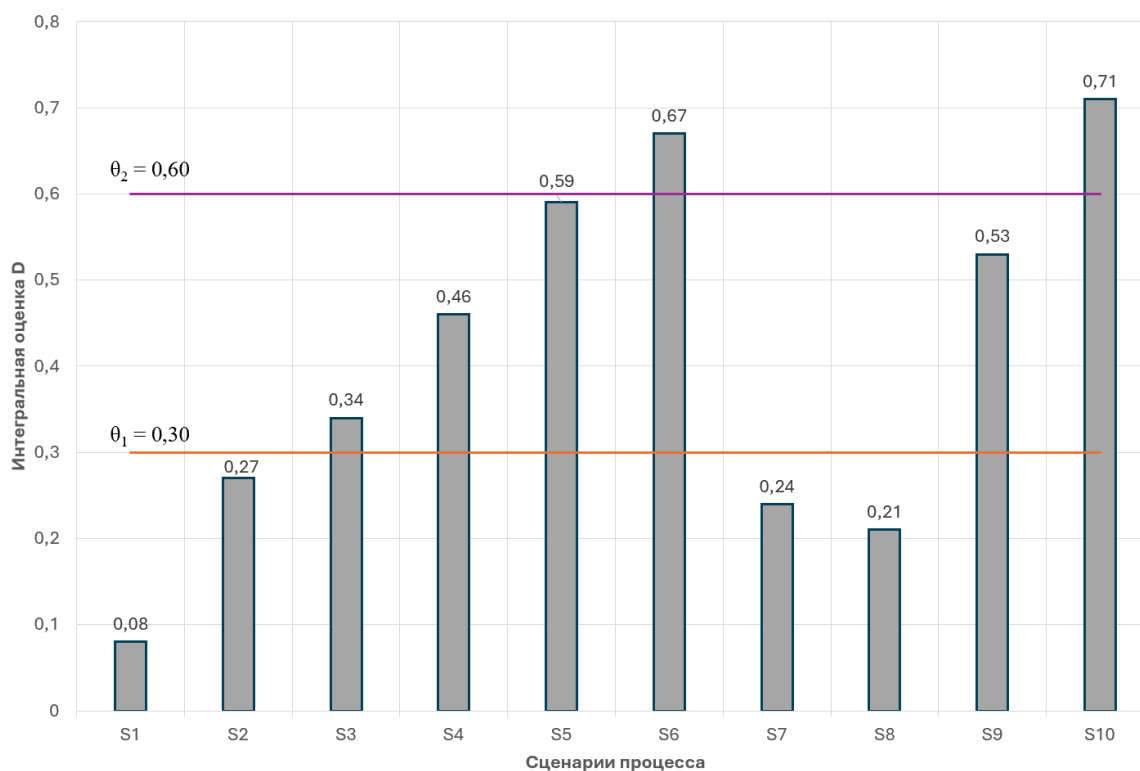


Рис. 3. Изменение интегральной оценки состояния по сценариям процесса машинного доения
Fig. 3. Change in the integral state score across machine milking scenarios

Сценарии S6 и S9 отнесены к предкритическим из-за выраженных отклонений, S7 - из-за событийного нарушения при низком D, а S8 и S10 - к критическим вследствие критических событий. Расхождение выявлено только для S5. При $D = 0,59$ модель относит его к s_2 , экспертная оценка - к s_3 , что требует калибровки порогов и весов.

VR-среда на рис. 4 отображает действия, подсказки, параметры, события, $D(t)$, класс состояния и итоговый отчет, выступая визуально-аналитическим интерфейсом модели.

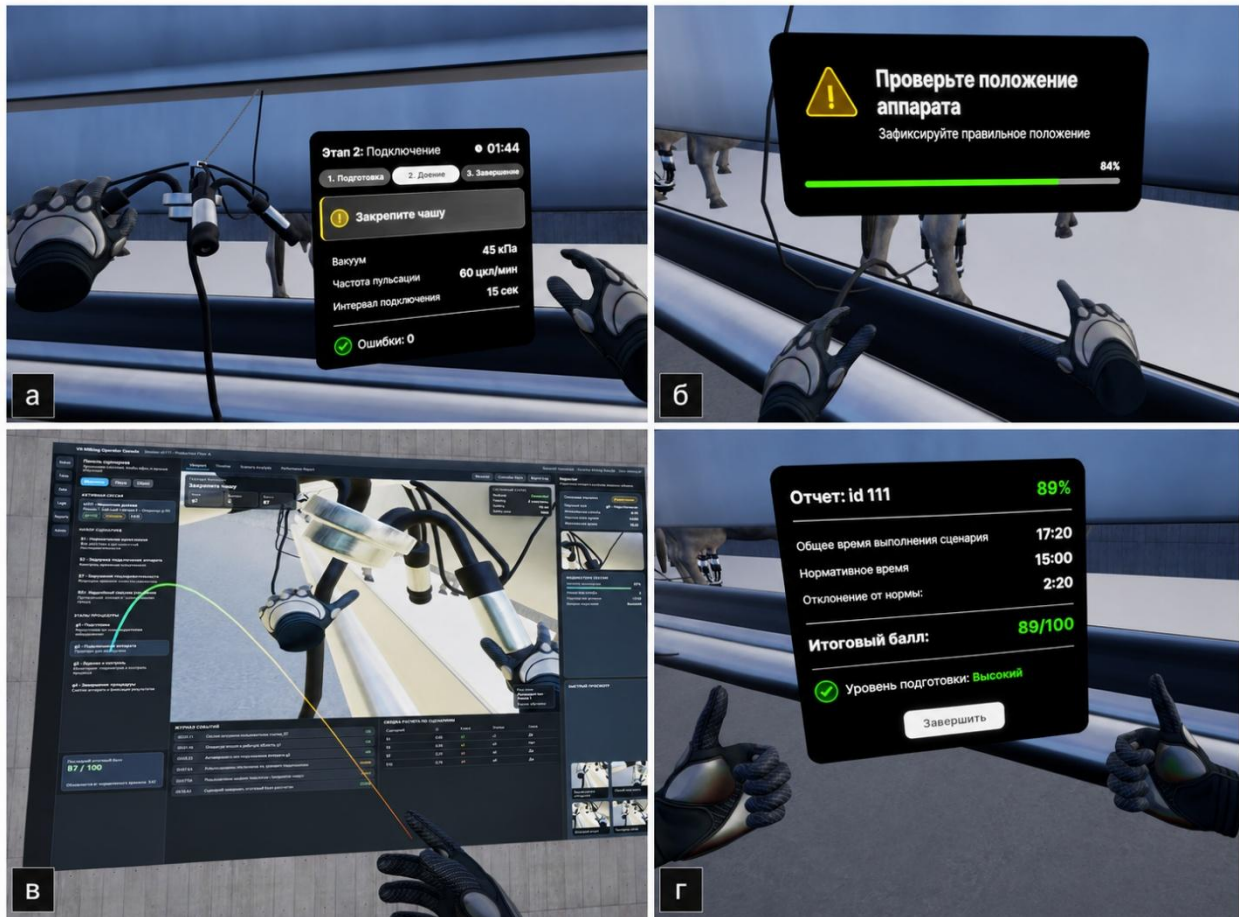


Рис. 4. Функциональная композиция интерфейса интерактивной VR-среды для анализа процесса машинного доения: а – выполнение технологической операции; б – сценарная подсказка и контроль действия; в – аналитическая панель состояния процесса; г – итоговый отчет по сценарию

Fig. 4. Functional composition of the interactive VR environment interface for machine milking process analysis: а – execution of a technological operation; б – scenario prompt and action control; в – analytical dashboard of the process state; г – final scenario report

Для демонстрации сценарного анализа сформировано множество управленческих воздействий $U = \{U_0, U_1, U_2, U_3, U_4\}$, отражающих возможные корректирующие действия для проблемной ситуации S9. Значения средней интегральной оценки, доли времени в предкритическом состоянии и нормированной оценки критических событий рассматриваются как расчетные показатели сценариев типа «что-если» и подлежат дальнейшему уточнению по эксплуатационным данным. Результаты ранжирования приведены в табл. 4; при расчете использованы коэффициенты $\lambda_1 = 0,5$, $\lambda_2 = 0,3$, $\lambda_3 = 0,2$, $\alpha = 0,7$, $\beta = 0,3$.

Таблица 4

Ранжирование сценариев управления по интегральному риску и затратам

Table 4

Ranking of management scenarios by integral risk and cost

№ сценария управления	Краткое описание воздействия	Средняя интегральная оценка отклонения $\bar{D}(u)$	Доля времени в предкритическом состоянии $\tau_{pr}(u)$	Нормированное число критических событий $\nu_{cr}(u)$	Интегральный риск $R(u)$	Оценка затрат $C(u)$	Целевая функция $J(u)$	Ранг сценария
U ₀	Без воздействия	0,62	0,60	0,20	0,53	0,00	0,371	5
U ₁	Сокращение интервала подключения	0,48	0,40	0,10	0,38	0,20	0,326	4
U ₂	Стабилизация вакуума	0,41	0,30	0,10	0,315	0,28	0,305	3
U ₃	Дополнительный контроль	0,37	0,22	0,05	0,261	0,18	0,237	2
U ₄	Интервал + вакуум + контроль	0,19	0,05	0,00	0,110	0,42	0,203	1

Наибольшее значение целевой функции получено для U₀, соответствующего отсутствию корректирующего воздействия. Частичные меры U₁-U₃ последовательно снижают интегральный риск и J(u). Минимальное значение целевой функции имеет комплексный сценарий U₄, сочетающий коррекцию временного интервала, стабилизацию вакуумного режима и дополнительный контроль. Сценарий U₃ может рассматриваться как компромиссный вариант, поскольку обеспечивает снижение риска при меньшей оценке затрат. Следовательно, модель пригодна не только для классификации состояния, но и для сравнительной оценки управленческих воздействий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен подход к классификационному моделированию регламентированных процессов животноводства на основе стадийного, параметрического и событийного описания. В качестве кейса рассмотрено машинное доение. Модель включает нормированные отклонения, интегральную оценку и иерархические правила классификации четырех состояний.

Апробация на десяти сценариях дала совпадение расчетного и экспертного классов в 9 из 10 случаев. Расхождение для S5 при D = 0,59 показало необходимость калибровки весов и порога $\theta_2 = 0,60$. Ранжирование воздействий для S9 выявило минимальное значение целевой функции для U₄, а U₃ может рассматриваться как компромисс при ограниченных затратах.

Практическая значимость связана с VR-средой, отображающей стадию, параметры, события, интегральную оценку и класс состояния. Дальнейшая работа предполагает калибровку по эксплуатационным данным и проверку подхода на других процессах животноводства.

Список литературы

1. Айндинов Р.Р., Садыков М.Р., Зиннатуллина А.Н. Автоматизация управления технологическими процессами на базе цифровых двойников // Повышение эффективности эксплуатации мобильных машин: Научные труды Всероссийской научно-практической конференции преподавателей, студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 80-летию Победы в Великой отечественной войне. Казань: Казанский ГАУ, 2025. – С. 369-378.
2. Скворцова Е.Г., Скворцов Е.А. Доля работников животноводства, взаимодействующих с технологиями искусственного интеллекта и киберфизическими системами // Проблемы взаимодействия публичного и частного права при регулировании цифровизации экономических отношений: Материалы V Международной научно-практической конференции. Екатеринбург: Уральский государственный экономический университет, 2022. – С. 123-126.
3. Цифровизация агропромышленного комплекса / П.П. Гамаюнов, Ю.А. Славина, С.А. Алексеев, Куверин И.Ю., Кобиашвили Е.И. // Научная жизнь. – 2023. – Т. 18, № 6(132). – С. 878-887. – DOI 10.26088/1991-9476-2023-18-6-878-887.
4. Сапрыкин И.А., Гусева Ю.Д. Перспективные направления применения цифровых технологий в агропромышленном комплексе // Цифровизация агропромышленного комплекса: Сборник научных статей III Международной научно-практической конференции. Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО Тамбовский государственный технический университет, 2022. – С. 487-490.
5. Коробской Р.А., Савинская Д.Н. Система поддержки принятия решений для отрасли животноводства // Цифровизация экономики: направления, методы, инструменты: Сборник материалов II всероссийской научно-практической конференции. Краснодар: Кубанский ГАУ имени И.Т. Трубилина, 2020. – С. 391-393.
6. Гринченков Д.В., Романенко И.В., Профатило В.К. Цифровые технологии в системах поддержки принятия решений для животноводства // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 6(126). – С. 627-643.
7. Патент № 2800740 С1 Российская Федерация, МПК G06F 21/00. Система и способ выявления аномалий в киберфизической системе: № 2022123995: заявл. 09.09.2022; опубл. 27.07.2023 / А. Б. Лаврентьев, А.М. Воронцов, А.М. Нечипорук [и др.]; заявитель Акционерное общество "Лаборатория Касперского".
8. Горелова Г.В. Киберфизические системы и когнитивное моделирование сложных систем // Проблемы управления безопасностью сложных систем: Материалы XXVII международной конференции. Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 299-304. – DOI: 10.25728/pubss.2019.299.
9. Вторый В.Ф., Вторый С.В. метод диагностики доильных установок с использованием цифровых технологий // Таврический вестник аграрной науки. – 2020. – № 4(24). – С. 20-28. – DOI 10.33952/2542-0720-2020-4-24-20-28.
10. Кудряшов К.С. Использование цифровых двойников для прогнозирования сбоев и повышения живучести автоматизированных систем // Цифровая экономика и безопасность: вызовы и перспективы: Сборник научных трудов по итогам II Всероссийской студенческой научно-практической конференции. Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2025. – С. 99-102.
11. Кудрявцева А.С. Киберфизическая система как развитие автоматизации на всех этапах жизненного цикла деятельности предприятия на основе внедрения цифровых // Системный анализ в проектировании и управлении: Сборник научных трудов XXIII Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург: ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019. – С. 312-320.
12. Семантическая интерпретация эффекта погружения в виртуальную реальность / И.А. Розанов, К.А. Грунчева, В.Ю. Ратникова, А.М. Житенёва // Экспериментальная психология в социальных практиках: Материалы 4-ой международной научно-практической конференции. Москва: Универсум, 2024. – С. 153-169.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667437 Российская Федерация. Модуль анализа поведения человека в среде виртуальной и дополненной реальности: № 2021665218: заявл. 29.09.2021; опубл. 29.10.2021 / С.С. Чаплыгин, С.В. Ровнов, Е.О. Монин [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО Самарский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации.
14. Decision support for choosing VR technologies / Klyosov D., Gorelov S., Voinash S., Zagidullin R., Litvina P. // Conference: Proceedings of the IV International Conference on Advances in Science, Engineering and

Digital Education: ASEDU-IV 2024. AIP Conference Proceedings, 3268 (1), art. no. 070014. – DOI: 10.1063/5.0257303.

15. Загороднев Ю.П. Основы технологии машинного доения коров: учебное пособие для вузов. Санкт-Петербург: Лань, 2024. – 120 с.

16. Андрианов Е.А., Бугаков Е.Е. Современные технологии машинного доения // Ветеринарно-санитарные аспекты качества и безопасности сельскохозяйственной продукции: Материалы IX международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения профессора, доктора ветеринарных наук Н.М. Алтухова. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2025. – С. 291-294.

17. Панин А.А. Обеспечение эффективного машинного доения коров // Совершенствование инженерно-технического обеспечения производственных процессов и технологических систем: Материалы национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 75-летию основания инженерного факультета ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ. Оренбург: Оренбургский ГАУ, 2025. – С. 385-387.

18. Influence of dairy farms' characteristics and technological level on attitude towards augmented reality / Pinna D., Sara G., Cresci R., Petronella A., Todde G., Atzori A.S., Caria M. // Sci Rep. 2026. – 16(1). – 7437. – DOI: 10.1038/s41598-026-38898-6.

19. Patrick B., Kanjo E., Kaiwartya O. Review of movement sensor applications in livestock animal activity recognition: Communications, data collection practices, and edge-AI solutions // Smart Agricultural Technology, 2026. 14. – Art. no. 101986. – DOI: 10.1016/j.atech.2026.101986.

20. IoT based tracking cattle health monitoring system using wireless sensors / Rajendran J.G., Alagarsamy M., Seva V., Dinesh P.M., Rajangam B., Suriyan K. // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 12 (5), 2026. – pp. 3086-3094. – DOI: 10.11591/eei.v12i5.4610.

21. Smart Monitoring of Livestock Health and Behavior with Sensor-based Deep Learning Optimized System / Pokkuluri K.S., Bhardwaj R., Sunil M.P., Kadam K., Mishra A., Patel G.M. // Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications, 2026, 16(3). – pp. 219-240. – DOI: 10.58346/JOWUA.2025.I3.013.

22. Precision Livestock Farming and Cattle Health Management / Singh D., Singh R., Gehlot A., Pandey P.S., Yamsani N. // Lecture Notes in Networks and Systems, 1506 LNNS, 2026. – pp. 323-333. – DOI: 10.1007/978-981-96-8694-0_24.

23. Nassar N. Applications of Digital Twins in Agriculture. Digital Twin Technology for Sustainable // Agriculture: Applications, Implementation and Future Trends, 2026. – pp. 135-154. – DOI: 10.1007/978-981-95-5915-2_8.

24. Pinto A., Donoso Y., Gutierrez J.A. Balancing the trilemma: a survey of federated anomaly detection for secure cyber-physical systems // Cybersecurity, 2026. – 9 (1). – art. no. 135. – DOI: 10.1186/s42400-026-00567-6.

25. Cyber-physical anomaly detection a deep adversarial fusion of sensor and network data / Pinto A., Herrera L.-C., Donoso Y., Gutierrez J.A. // Discover Computing, 2026. – 29(1). – art. no. 183. DOI: 10.1007/s10791-026-10064-6.

26. An Immersive AI-Driven Virtual Reality Training for Accessible Agricultural Education in a Unity-Based VR Environment / Pendem A., Jawahar B., Challa K., AlHmoud I.W., Gokaraju B., Liang C.L. // Lecture Notes in Computer Science, 16446 LNCS, 2026. – pp. 77 - 91. – DOI: 10.1007/978-3-032-18474-0_6.

27. Digital Twins, Extended Reality, and Artificial Intelligence in Agriculture: Emerging Trends and Insights / Lokhande P., Mali S., Jadhav N., Khan M., Ayasrah F.T., Cengiz K. // The Convergence of Extended Reality and Metaverse in Agriculture, 2025. – pp. 77-100. – DOI: 10.4018/979-8-3373-2797-6.ch004.

28. Data-Driven Decision Making and Virtual Farming in the Agricultural Metaverse / Palanivel N., Balaji V.S., Priya V.R., Murugan M.S., Senthil K.M., Alagarsamy M. // The Convergence of Extended Reality and Metaverse in Agriculture, 2025. – pp. 161-185. – DOI: 10.4018/979-8-3373-2797-6.ch007.

29. Niu Y., Chai S.S. Design and optimization of a test case generation algorithm for real-time embedded systems based on adaptive Q-Learning // Automated Software Engineering, 2026. – 33(2). – art. no. 50. – DOI: 10.1007/s10515-026-00598-w.

30. Yang T., Choi I., Luo H. Interacting and reflecting together in VR-mediated group learning: Immersive and observational experiences in shared mixed reality // Computers and Education, 2026. – 251. – art. no. 105644. – DOI: 10.1016/j.compedu.2026.105644.

References

1. Aindinov R.R., Sadykov M.R., Zinnatullina A.N. Automation of Technological Process Management Based on Digital Twins // Improving the Efficiency of Mobile Machine Operation: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Teachers, Students, Postgraduate Students, and Young Scientists Dedicated to the 80th Anniversary of Victory in the Great Patriotic War. Kazan: Kazan State Agrarian University, 2025. – Pp. 369-378.
2. Skvortsova E.G., Skvortsov E.A. The Share of Livestock Workers Engaging with Artificial Intelligence Technologies and Cyber-Physical Systems // Problems of Interaction between Public and Private Law in Regulating the Digitalization of Economic Relations: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference. Yekaterinburg: Ural State University of Economics, 2022. – Pp. 123-126.
3. Gamayunov P.P., Slavina Yu.A., Alekseyev S.A., Kuverin I.Yu., Kobiashvili E.I. Digitalization of the Agro-Industrial Complex // Scientific Life. – 2023. – Vol. 18, No. 6(132). – Pp. 878-887. – DOI 10.26088/1991-9476-2023-18-6-878-887.
4. Saprykin I.A., Guseva Yu.D. Promising Directions for the Application of Digital Technologies in the Agro-Industrial Complex // Digitalization of the Agro-Industrial Complex: Collection of Scientific Articles from the III International Scientific and Practical Conference. Tambov: Publishing Center of the Tambov State Technical University, 2022. – Pp. 487-490.
5. Korobskoy R.A., Savinskaya D.N. Decision Support System for the Livestock Industry // Digitalization of the Economy: Directions, Methods, and Tools: Collection of Materials from the II All-Russian Scientific and Practical Conference. Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 2020. – Pp. 391-393.
6. Grinchenkov D.V., Romanenko I.V., Profatilo V.K. Digital Technologies in Decision Support Systems for Animal Husbandry // Engineering Bulletin of the Don. – 2025. – No. 6(126). – Pp. 627-643.
7. Patent No. 2800740 C1 Russian Federation, IPC G06F 21/00. System and method for detecting anomalies in a cyber-physical system: No. 2022123995: filed on 09.09.2022: published on 27.07.2023 / A.B. Lavrentiev, A.M. Vorontsov, A.M. Nechiporuk [et al.]; applicant: Kaspersky Lab Joint-Stock Company.
8. Gorelova G.V. Cyber-Physical Systems and Cognitive Modeling of Complex Systems // Problems of Safety Management of Complex Systems: Proceedings of the XXVII International Conference. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, 2019. – Pp. 299-304. – DOI: 10.25728/pubss.2019.299.
9. Vtoroy V.F., Vtoroy S.V. Method for Diagnosing Milking Machines Using Digital Technologies // Tavrichesky Bulletin of Agrarian Science. – 2020. – No. 4(24). – Pp. 20-28. – DOI 10.33952/2542-0720-2020-4-24-20-28.
10. Kudryashov K.S. Using Digital Twins to Predict Failures and Improve the Survivability of Automated Systems // Digital Economy and Security: Challenges and Prospects: Collection of Scientific Papers Based on the Results of the II All-Russian Student Scientific and Practical Conference. Moscow: MIREA - Russian Technological University, 2025. – P. 99-102.
11. Kudryavtseva A.S. Cyber-physical system as the development of automation at all stages of the enterprise's life cycle based on the introduction of digital technologies // System Analysis in Design and Management: Collection of Scientific Papers of the XXIII International Scientific and Practical Conference. St. Petersburg: FGAOU VO St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, 2019. – P. 312-320.
12. Semantic interpretation of the effect of immersion in virtual reality / I.A. Rozanov, K.A. Gruncheva, V.Yu. Ratnikova, A.M. Zhitenyova // Experimental Psychology in Social Practices: Materials of the 4th International Scientific and Practical Conference. Moscow: Universum, 2024. – P. 153-169.
13. Certificate of State Registration of the Computer Program No. 2021667437, Russian Federation. Module for analyzing human behavior in virtual and augmented reality environments: No. 2021665218: applied on September 29, 2021: published on October 29, 2021 / S.S. Chaplygin, S.V. Rovnov, E.O. Monin [et al.]; applicant: Samara State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation.
14. Decision support for choosing VR technologies / Klyosov D., Gorelov S., Voinash S., Zagidullin R., Litvina P. // Conference: Proceedings of the IV International Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education: ASEDU-IV 2024. AIP Conference Proceedings, 3268 (1), art. no. 070014. – DOI: 10.1063/5.0257303.
15. Zagorodnev Yu.P. Fundamentals of Machine Milking Technology for Cows: A Textbook for Universities. St. Petersburg: Lan, 2024. – 120 p.
16. Andrianov E.A., Bugakov E.E. Modern Technologies of Machine Milking // Veterinary and Sanitary Aspects of the Quality and Safety of Agricultural Products: Proceedings of the IX International Scientific and

Practical Conference Dedicated to the 90th Anniversary of Professor N.M. Altukhov, Doctor of Veterinary Sciences. Voronezh: Emperor Peter the Great Voronezh State Agrarian University, 2025. – Pp. 291-294.

17. Panin A.A. Ensuring Efficient Machine Milking of Cows // Improving Engineering and Technical Support for Production Processes and Technological Systems: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference with International Participation Dedicated to the 75th Anniversary of the Engineering Department of the Orenburg State Agrarian University. Orenburg: Orenburg State Agrarian University, 2025. – Pp. 385-387.

18. Influence of dairy farms' characteristics and technological level on attitude towards augmented reality / Pinna D., Sara G., Cresci R., Petronella A., Todde G., Atzori A.S., Caria M. // Sci Rep. 2026. – 16(1). – 7437. – DOI: 10.1038/s41598-026-38898-6.

19. Patrick B., Kanjo E., Kaiwartya O. Review of movement sensor applications in livestock animal activity recognition: Communications, data collection practices, and edge-AI solutions // Smart Agricultural Technology, 2026. 14. – Art. no. 101986. – DOI: 10.1016/j.atech.2026.101986.

20. IoT based tracking cattle healthmonitoring system using wireless sensors / Rajendran J.G., Alagarsamy M., Seva V., Dinesh P.M., Rajangam B., Suriyan K. // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 12 (5), 2026. – pp. 3086-3094. – DOI: 10.11591/eei.v12i5.4610.

21. Smart Monitoring of Livestock Health and Behavior with Sensor-based Deep Learning Optimized System / Pokkuluri K.S., Bhardwaj R., Sunil M.P., Kadam K., Mishra A., Patel G.M. // Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications, 2026, 16(3). – pp. 219-240. – DOI: 10.58346/JOWUA.2025.I3.013.

22. Precision Livestock Farming and Cattle Health Management / Singh D., Singh R., Gehlot A., Pandey P.S., Yamsani N. // Lecture Notes in Networks and Systems, 1506 LNNS, 2026. – pp. 323-333. – DOI: 10.1007/978-981-96-8694-0_24.

23. Nassar N. Applications of Digital Twins in Agriculture. Digital Twin Technology for Sustainable // Agriculture: Applications, Implementation and Future Trends, 2026. – pp. 135-154. – DOI: 10.1007/978-981-95-5915-2_8.

24. Pinto A., Donoso Y., Gutierrez J.A. Balancing the trilemma: a survey of federated anomaly detection for secure cyber-physical systems // Cybersecurity, 2026. – 9 (1). – art. no. 135. – DOI: 10.1186/s42400-026-00567-6.

25. Cyber-physical anomaly detection a deep adversarial fusion of sensor and network data / Pinto A., Herrera L.-C., Donoso Y., Gutierrez J.A. // Discover Computing, 2026. – 29(1). – art. no. 183. DOI: 10.1007/s10791-026-10064-6.

26. An Immersive AI-Driven Virtual Reality Training for Accessible Agricultural Education in a Unity-Based VR Environment / Pendem A., Jawahar B., Challa K., AlHmoud I.W., Gokaraju B., Liang C.L. // Lecture Notes in Computer Science, 16446 LNCS, 2026. – pp. 77 - 91. – DOI: 10.1007/978-3-032-18474-0_6.

27. Digital Twins, Extended Reality, and Artificial Intelligence in Agriculture: Emerging Trends and Insights / Lokhande P., Mali S., Jadhav N., Khan M., Ayasrah F.T., Cengiz K. // The Convergence of Extended Reality and Metaverse in Agriculture, 2025. – pp. 77-100. – DOI: 10.4018/979-8-3373-2797-6.ch004.

28. Data-Driven Decision Making and Virtual Farming in the Agricultural Metaverse / Palanivel N., Balaji V.S., Priya V.R., Murugan M.S., Senthil K.M., Alagarsamy M. // The Convergence of Extended Reality and Metaverse in Agric. ulture, 2025. – pp. 161-185. – DOI: 10.4018/979-8-3373-2797-6.ch007.

29. Niu Y., Chai S.S. Design and optimization of a test case generation algorithm for real-time embedded systems based on adaptive Q-Learning // Automated Software Engineering, 2026. – 33(2). – art. no. 50. – DOI: 10.1007/s10515-026-00598-w.

30. Yang T., Choi I., Luo H. Interacting and reflecting together in VR-mediated group learning: Immersive and observational experiences in shared mixed reality // Computers and Education, 2026. – 251. – art. no. 105644. – DOI: 10.1016/j.compedu.2026.105644.

Горелов Сергей Александрович, аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина», Белгородская область, Белгородский район, п. Майский, Россия

Клёсов Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры индустриального программирования, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва, Россия

Белецкая Анастасия Анатольевна, старший преподаватель кафедры трудового и предпринимательского права Юридического института, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Афонин Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Ядута Анна Зауровна, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и компьютерного моделирования, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Gorelov Sergey Alexandrovich, Postgraduate Student, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», Belgorod region, Belgorod district, village of Maisky, Russia

Klyosov Dmitry Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Programming, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «MIREA – Russian Technological University», Moscow, Russia

Beletskaya Anastasia Anatolyevna, Senior Lecturer of the Department of Labor and Entrepreneurial Law, Law Institute, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Afonin Andrey Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information and Robotic Systems, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Yaduta Anna Zaurvna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Computer Modeling, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia