

## Контроль и управление в сложной биотехнической системе молочной фермы

© 2020. В. В. Кирсанов, Р. А. Баишева ✉

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Российская Федерация

Целью исследования данной работы является углубленное изучение влияния «машинного» фактора (М) в системе «человек-машина-животное» («Ч-М-Ж») с детализацией функций, выполняемых «М», с учетом передачи «М» функций контроля и управления от подсистем «человек-оператор» (ЧО) и «животное» (Ж). Представлены: схема трансформации и расширения машинного функционала в биотехнической системе; математическое моделирование зависимости технологических сигналов, контролируемых функционалами локальных биотехнологических систем (ЛБТС); математическая модель диагностических сигналов о соответствующих параметрах технических блоков ЛБТС. Алгоритмизация и цифровизация процессов на молочной ферме включает расширенный перечень контролируемых показателей: технологические сигналы, диагностические сигналы и «тревожные» сигналы, представленные в статье в матричной форме. Контроль параметров важнейшей подсистемы «М» сложной биотехнической системы «Ч-М-Ж» молочной фермы позволяет повысить уровень автоматизации, цифровизации и интеллектуализации соответствующих процессов доения, кормления, навозоудаления и других, что создает предпосылки для улучшения их работы и обслуживания животных, а также повышения уровня автономности их функционирования. Развитие «машинного» фактора системы целесообразно на основе машиноцентрической модели ЛБТС, которая будет постепенно расширять свои функции за счет передаваемых функций контроля и управления от соответствующих подсистем «ЧО» и «Ж». Определены параметры управления в характерных реперных точках почасовых кривых молокоотдачи для разработки уточнённых алгоритмов управления процессами доения отдельных долей вымени в автоматизированных и роботизированных доильных аппаратах нового поколения. Показана графически-числовая модель колесного робота-пододвигателя корма в среде Matlab/Simulink. Созданная математическая модель управления движением колесным роботом-пододвигателем корма обеспечивает эффективное взаимодействие системы позиционирования и привода колесного робота при цифровом управлении автономным движением.

**Ключевые слова:** функционал, «машинный» фактор, локальные подсистемы обслуживания животных, диагностические сигналы, технологические сигналы

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № 0581-2019-0009).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Кирсанов В. В., Баишева Р. А. Контроль и управление в сложной биотехнической системе молочной фермы. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020;21(5):625-632. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.5.625-632>

Поступила: 30.06.2020

Принята к публикации: 29.09.2020

Опубликована онлайн: 22.10.2020

## Control and management in a complex biotechnical system of a dairy farm

© 2020. Vladimir V. Kirsanov, Ravza A. Baisheva ✉

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The research is aimed at profound study of the influence of the "machine" factor (M) in the "human-machine-animal" system ("H-M-A") with the detailed description of the functions performed by "M", taking into account the convey of "M" control and control functions from the subsystems "human-operator" (HO) and "animal" (A). The paper presents the scheme of transformation and expansion of machine functionality in a biotechnical system; mathematical modeling of the dependence of technological signals controlled by the functions of local biotechnological systems (LBTS); mathematical model of diagnostic signals about the corresponding parameters of technical blocks of LBTS. Algorithmization and digitalization of processes on a dairy farm include an extended list of control indicators: technological signals, diagnostic signals and "alarm" signals presented in the article in matrix form. Monitoring the parameters of the most important subsystem "M" of the complex biotechnical system "H-M-A" of a dairy farm provides an increase in the level of automation, digitalization and intellectualization of the corresponding processes of milking, feeding, manure removal and others which creates prerequisites for improving their work and servicing animals as well as increasing the level of autonomy of their functioning. The development of the "machine" factor of the system is advisable on the basis of the machine-centric model of the LBTS, which will gradually expand its functions due to the transferred control and management functions from the corresponding subsystems "HO" and "A". The control parameters are determined at the characteristic reference points of the quarter curves of milk output for the development of refined algorithms for controlling the milking processes of individual udder shares in automated and robotic milking machines of the new generation. A graphical and numerical model of a wheeled feed-pusher robot in

*the Matlab/Simulink environment is shown. The created mathematical model of motion control by a wheeled feed-pusher robot provides effective interaction of the positioning system and the wheeled robot drive in digital of autonomous movement.*

**Keywords:** functional, «machine» factor, local subsystems of animal care, diagnostic signals, technological signals

**Acknowledgements:** the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. 0581-2019-0009).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

**Conflict of interest:** the authors stated that there was no conflict of interest.

**For citation:** Kirsanov V. V., Baisheva R. A. Control and management in a complex biotechnical system of a dairy farm. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2020;21(5):625-632. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.5.625-632>

Received: 30.06.2020

Accepted for publication: 29.09.2020

Published online: 22.10.2020

Рассматриваемая проблема относится к классу сложных биотехнических систем «человек-машина-животное» («Ч-М-Ж»), какими, безусловно, являются современные молочные фермы [1]. По мере усложнения технологий обслуживания животных возрастают требования к их диагностике, контролю параметров работы технологического оборудования, поскольку от этого зависит физиологическое состояние и продуктивное долголетие обслуживаемого поголовья.

С развитием технологий содержания молочного скота растет влияние «машинного» фактора («М») в системе «Ч-М-Ж» [2]. Машина вследствие повышения уровня автоматизации и интеллектуализации производства «забирает» все больше функций человека-оператора (ЧО), с одной стороны, а, с другой, контролируя определенные показатели животного своими датчиками и сенсорами, «старается» контролировать и подсистему «животное» («Ж»). Таким образом, формируется машиноцентрическая модель локальной биотехнической системы (ЛБТС), какими, например, являются подсистемы доения, кормления, поения и др. При этом передаваемые «машине» функции «ЧО» по мере развития «М» повышают уровень автоматизации и интеллектуализации производства последнего, автономности его использования, достигая своего максимума при роботизированном обслуживании животных [3].

В наших исследованиях впервые рассмотрен комплексный подход к контролю и управлению «М» с детализацией его функций применительно к технологическим процессам на молочной ферме.

**Цель исследования** – углубленное изучение влияния «машинного» фактора в системе «человек-машина-животное» с детализацией функций, выполняемых «М», с учетом переда-

чи «М» функций контроля и управления от подсистем «человек-оператор» и «животное».

**Материал и методы.** Общий функционал развития «М» в системе «Ч-М-Ж» можно представить следующим образом:

$$Z_M^n = f[M, X_{1a} \dots X_{1n}] + f[\text{ЧО}, y_{1u} \dots y_{nu}] + f[\text{Ж}, \vartheta_1 \dots \vartheta_n], \quad (1)$$

где  $Z_M^n$  – полный функционал «М»;

$f[M, X_{1a} \dots X_{1n}]$  – собственный существующий функционал выполняемых механизированных и автоматизированных операций;

$f[\text{ЧО}, y_{1u} \dots y_{nu}]$  – функционал части простых интеллектуальных видеоаналитических функций, переданных машине «ЧО»;

$f[\text{Ж}, \vartheta_1 \dots \vartheta_n]$  – функционал части контролируемых параметров подсистемы «Ж».

Реализация полного функционала  $Z_M^n$  наиболее целесообразна в ЛБТС, где машина и животное функционируют в виде единой системы «М-Ж». К таким подсистемам можно отнести практически все технологии «Ж», а именно подсистемы кормления, доения, поения, микроклимата и др. [4].

Очевидно, что функционалы, представленные в выражении (1), могут реализовываться лишь через конкретные ЛБТС обслуживания животных.

Собственный функционал «М» можно представить в следующем виде:

$$f[M, X_{1a} \dots X_{1n}] = f_1[M_d, X_{1d} \dots X_{nd}] + f_2[M_k, X_{1k} \dots X_{nk}] + f_4[M_n, X_{1n} \dots X_{nn}] + f_5[M_m, X_{1m} \dots X_{nm}], \quad (2)$$

где  $f_1[M_d, X_{1d} \dots X_{nd}]$  – функционал локальной биотехнической подсистемы доения;

$f_2[M_k, X_{1k} \dots X_{nk}]$  – функционал локальной биотехнической подсистемы кормления;

$f_3[M_e, X_{1e} \dots X_{ne}]$  – функционал локальной биотехнической подсистемы водоснабжения и

автопоения;  $f_4[M_n, X_{1n} \dots X_{nn}]$  – функционал локальной биотехнической подсистемы навозоудаления;  $f_5[M_m, X_{1m} \dots X_{nm}]$  – функционал локальной биотехнической подсистемы обеспечения микроклимата.

В выражении (2) представлены основные функционалы, выполненные подсистемой «М» на ферме. В последствии можно составить расширенную матричную модель, в строках которой будут записаны выполняемые ЛБТС функционалы, а в столбцах расшифровка функций ( $X_1 \dots X_n$ ), входящих в соответствующий функционал [5].

Теперь рассмотрим более подробно входящие в выражение (2) функционалы локальных биотехнических подсистем доения, кормления и др.

$$f_1[M_d, X_{1d} \dots X_{nd}] = f_d[M_d, t_{d1} \dots t_{dn}, q_1 \dots q_n, V_1 \dots V_n, i_{m1} \dots i_{mn}, P_{e1} \dots P_{en}, \Pi_{n1} \dots \Pi_{nn}, j_1 \dots j_n], \quad (3)$$

где  $t_{d1} \dots t_{dn}$  – функции параметров продолжительности доения коров;  $q_1 \dots q_n$  – функции параметров удоев животных;  $V_1 \dots V_n$  – функции параметров скорости молокоотдачи;  $i_{m1} \dots i_{mn}$  – функции параметров электропроводности молока;  $P_{e1} \dots P_{en}$  – функции параметров вакуумметрического давления;  $\Pi_{n1} \dots \Pi_{nn}$  – функции параметров частоты пульсаций пульсатора;  $j_1 \dots j_n$  – функции параметров соотношения тактов.

Также приведены основные параметры существующих функционалов локальной биотехнической подсистемы доения. От человека-оператора данная подсистема может дополнительно «принять»: контроль припуска молокаотдачи с операциями санитарной обработки и стимуляции рефлекса молокоотдачи ( $C_{m1} \dots C_{mn}$ ), сдаивание первых струек ( $C_{nc1} \dots C_{ncn}$ ), отбор контрольных проб для анализа качества молока ( $K_{m1} \dots K_{mn}$ ), отделение

аномального молока в потоке по признакам мастита, примесям крови и др. ( $O_{m1} \dots O_{mn}$ ), подключение доильных стаканов в роботизированных системах ( $\Pi_{dc1} \dots \Pi_{dcn}$ ) и др.

Запишем дополнительный функционал, передаваемый подсистеме «М» от «ЧО»,

$$f[ЧО, y_{1u} \dots y_{nu}] = f_d[M_d, C_{m1} \dots C_{mn}, C_{nc1} \dots C_{ncn}, K_{m1} \dots K_{mn}, O_{m1} \dots O_{mn}, \Pi_{dc1} \dots \Pi_{dcn}]. \quad (4)$$

Совершенно очевидно, что данный дополнительный функционал подсистемы доения, включающий на первом этапе простые интеллектуальные функции, выполняемые человеком-оператором, также будет расширяться и развиваться в сторону углубления контроля параметров в ЛБТС доения, предупреждения нежелательных последствий сухого доения, создания щадящих оптимальных режимов по четвертям доения и др. Будет также расширяться перечень контролируемых показателей качества молока в потоке с использованием технологии микрофлюидного отбора с созданием «лабораторий на чипе». Это технологии будущего для применения на молочных фермах, однако они позволят существенно поднять автономность функционирования ЛБТС доения, одновременно повысив его интеллектуальные и цифровые возможности.

Дополнительными функциями контролируемых показателей в подсистеме «Ж» и передаваемых подсистеме «М» может служить показатель импеданса вымени животного, позволяющий контролировать секреторную способность лактирующего органа и его опорожнение ( $i_{e1} \dots i_{en}$ ) в процессе доения [6, 7]:

$$f_d[Ж, \vartheta_1 \dots \vartheta_n] = f_d[M_d, i_{e1} \dots i_{en}]. \quad (5)$$

Таким образом, полный функционал локальной биотехнической подсистемы доения можно представить в виде:

$$Z_M^d = f_d[M_d, t_{d1} \dots t_{dn}, q_1 \dots q_n, V_1 \dots V_n, i_{m1} \dots i_{mn}, P_{e1} \dots P_{en}, \Pi_{n1} \dots \Pi_{nn}, j_1 \dots j_n] + f_d[M_d, C_{m1} \dots C_{mn}, C_{nc1} \dots C_{ncn}, K_{m1} \dots K_{mn}, O_{m1} \dots O_{mn}, \Pi_{dc1} \dots \Pi_{dcn}] + f_d[M_d, i_{e1} \dots i_{en}]. \quad (6)$$

Данное выражение включает существующий функционал, принятый функционал от «ЧО» и часть показателей от подсистемы «Ж».

Расширение перечня контролируемых показателей будет происходить постепенно

по мере повышения уровней автоматизации и интеллектуализации соответствующего технологического процесса. Общая направленность этого процесса будет заключаться в выполнении замещаемых «машиной» функций подсистемы «ЧО» и «Ж».

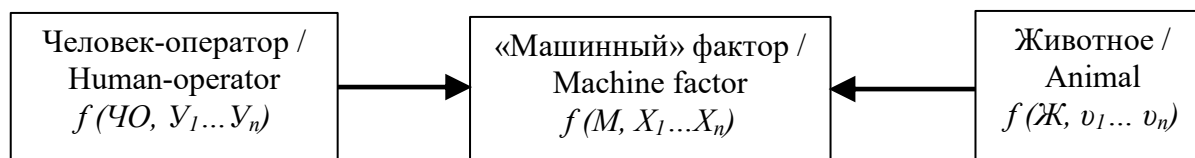


Рис. 1. Схема трансформации и расширения машинного функционала в биотехнической системе «ЧО-М-Ж» /

Fig 1. Scheme of transformation and expansion of machine functionality in the bio-technical system HO-M-A

Следующей важной подсистемой является подсистема кормления, от которой зависит реализация продуктивного потенциала животного. По аналогии с выражениями (1), (6) полный функционал подсистемы кормления можно представить в виде

$$Z_M^K = f_K[M_K, X_{1K} \dots X_{n_K}] + f_K[\text{ЧО}, y_{1K} \dots y_{n_K}] + f_K[\text{Ж}, \vartheta_{1K} \dots \vartheta_{n_K}], \quad (7)$$

где  $f_K[M_K, X_{1K} \dots X_{n_K}]$  – собственный существующий функционал ЛБТС кормления;

$f_K[\text{ЧО}, y_{1K} \dots y_{n_K}]$  – передаваемый «ЧО» функционал части простых интеллектуальных функций;  $f_K[\text{Ж}, \vartheta_{1K} \dots \vartheta_{n_K}]$  – функционал части параметров подсистемы «Ж», передаваемых подсистеме «М».

Рассмотрим более подробно составляющие выражения (7). Собственный «машинный» функционал ЛБТС кормления очевидно должен включать такие показатели, как кратность кормления животных в сутки ( $n_{K1} \dots n_{Kn}$ ), количество корма, раздаваемого на 1 погонный метр кормушки ( $q_{nM1} \dots q_{nMn}$ ), неравномерность раздачи корма ( $v_{K1} \dots v_{Kn}$ ), качество смешивания кормовой смеси ( $\Theta_{Kc1} \dots \Theta_{Kcn}$ ), продолжительность раздачи корма (производительность) ( $t_{pK1} \dots t_{pKn}$ ) и другие [7, 8]:

$$f_K[M_K, X_{1K} \dots X_{n_K}] = f_K[M_K, n_{K1} \dots n_{Kn}, q_{nM1} \dots q_{nMn}, v_{K1} \dots v_{Kn}, \Theta_{Kc1} \dots \Theta_{Kcn}]. \quad (8)$$

$$Z_M^K = f_K[M_K, n_{K1} \dots n_{Kn}, q_{nM1} \dots q_{nMn}, v_{K1} \dots v_{Kn}, \Theta_{Kc1} \dots \Theta_{Kcn}] + f_K[M_K, q_{1p} \dots q_{np}, k_{1u} \dots k_{1n}, q_{ocm1} \dots q_{ocmn}]. \quad (11)$$

В дальнейшем при развитии процессов алгоритмизации и цифровизации производства [11] данное выражение также можно представить в матричной форме.

Выражение (8) также может быть расширено по перечню выполняемых подсистемой «М» функций и контролируемых показателей.

К функции контролируемых «передаваемых» человеком-оператором подсистеме кормления можно отнести такие функции, как контроль рационов кормления ( $q_{1p} \dots q_{np}$ ), качество смешиваемых ингредиентов корма ( $k_{1u} \dots k_{1n}$ ), количество остатков корма на кормовом столе ( $q_{ocm1} \dots q_{ocmn}$ ):

$$f_K[\text{ЧО}, X_{1K} \dots X_{n_K}] = f_K[M_K, q_{1p} \dots q_{np}, k_{1u} \dots k_{1n}, q_{ocm1} \dots q_{ocmn}]. \quad (9)$$

Выражение (9) также может расширяться и дополняться по мере развития процессов цифровизации и автоматизации производства. И, наконец, от подсистемы «Ж» машина может «принять» такие функции, как контроль жвачки (пережевывание корма) ( $k_{ж1} \dots k_{жn}$ ), количество подходов к кормовому столу ( $n_{Kc1} \dots n_{Kcn}$ ), продолжительность разового кормления (присутствия животного у кормового стола) ( $t_{pc1} \dots t_{pcn}$ ) и другие [9, 10]:

$$f_K[\text{Ж}, \vartheta_{1K} \dots \vartheta_{n_K}] = f_K[M_K, k_{ж1} \dots k_{жn}, n_{Kc1} \dots n_{Kcn}, t_{pc1} \dots t_{pcn}]. \quad (10)$$

С учетом выражений (8), (9), (10) полный функционал подсистемы «кормление» может быть записан в виде:

По аналогии с выражениями (6), (11) можно записать полные функционалы подсистем водоснабжения и автопоения  $Z_M^g$ , подсистем навозоудаления  $Z_M^H$  и микроклимата  $Z_M^M$  [12, 13]:

$$\left[ \begin{aligned} Z_{\mathcal{M}}^{\mathcal{E}} &= f_{\mathcal{E}}[M_{\mathcal{E}}, q_{\mathcal{E}_1} \dots q_{\mathcal{E}_n}, k_{\mathcal{E}_1} \dots k_{\mathcal{E}_n}, t_{\mathcal{E}_1} \dots t_{\mathcal{E}_n}, n_{\mathcal{E}_1} \dots n_{\mathcal{E}_n}] \\ Z_{\mathcal{M}}^{\mathcal{H}} &= f_{\mathcal{H}}[M_{\mathcal{H}}, n_{\mathcal{K}\mathcal{Y}_1} \dots n_{\mathcal{K}\mathcal{Y}_n}, t_{\mathcal{Y}\mathcal{O}_1} \dots t_{\mathcal{Y}\mathcal{O}_n}, \vartheta_{\mathcal{Z}\mathcal{K}_1} \dots \vartheta_{\mathcal{Z}\mathcal{K}_n}] \\ Z_{\mathcal{M}}^{\mathcal{M}} &= f_{\mathcal{M}}[M_{\mathcal{M}}, n_{\mathcal{CO}_2\ 1} \dots n_{\mathcal{CO}_2\ n}, n_{\mathcal{H}_2\mathcal{O}\ 1} \dots n_{\mathcal{H}_2\mathcal{O}\ n}, n_{\mathcal{Q}_1} \dots n_{\mathcal{Q}_n}; t_{\mathcal{E}\mathcal{Z}_1} \dots t_{\mathcal{E}\mathcal{Z}_n}; V_{\mathcal{E}\mathcal{Z}_1} \dots V_{\mathcal{E}\mathcal{Z}_n}, \\ &\quad \omega_{\mathcal{E}\mathcal{Z}_1} \dots \omega_{\mathcal{E}\mathcal{Z}_n}; v_{\mathcal{NH}_3}, v_{\mathcal{H}_2\mathcal{S}}] \end{aligned} \right. \quad (12)$$

где  $q_{\mathcal{E}_1} \dots q_{\mathcal{E}_n}$  – водопотребление одним животным в сутки, л;  $k_{\mathcal{E}_1} \dots k_{\mathcal{E}_n}$  – показатели качества воды;  $t_{\mathcal{E}_1} \dots t_{\mathcal{E}_n}$  – температура воды в поилке;  $n_{\mathcal{E}_1} \dots n_{\mathcal{E}_n}$  – число подходов к автопоилке;  $n_{\mathcal{K}\mathcal{Y}_1} \dots n_{\mathcal{K}\mathcal{Y}_n}$  – кратность уборки навоза в сутки;  $t_{\mathcal{Y}\mathcal{O}_1} \dots t_{\mathcal{Y}\mathcal{O}_n}$  – продолжительность разовой уборки, мин;  $\vartheta_{\mathcal{Z}\mathcal{K}_1} \dots \vartheta_{\mathcal{Z}\mathcal{K}_n}$  – коэффициент заполнения навозного канала;  $n_{\mathcal{CO}_2}, n_{\mathcal{H}_2\mathcal{O}}, n_{\mathcal{Q}}$  – кратности воздухообменов по углекислому газу  $\text{CO}_2$ , водяным парам  $\text{H}_2\text{O}$ , количеству теплоты  $Q$ ;  $t_{\mathcal{E}\mathcal{Z}_1} \dots t_{\mathcal{E}\mathcal{Z}_n}$  – температура воздуха в помещении, °C;  $V_{\mathcal{E}\mathcal{Z}_1} \dots V_{\mathcal{E}\mathcal{Z}_n}$  – скорость движения воздуха в помещении, м/с;  $\omega_{\mathcal{E}\mathcal{Z}_1} \dots \omega_{\mathcal{E}\mathcal{Z}_n}$  – относительная влажность воздуха, %;  $v_{\mathcal{NH}_3}, v_{\mathcal{H}_2\mathcal{S}}$  – концентрация вредных газов (аммиак, сероводород) в зоне расположения животных.

**Результаты и их обсуждение.** Управление подсистемами кормления, поения, доения, микроклимата и др. осуществляется через соответствующие ЛБТС. При этом основная часть сигналов поступает в результате контакта подсистем «Ж» и «М» и по соответствующим радиоканалам передается через базовые станции (БС) в автоматизированные рабочие места (АРМ) специалистов (зоотехник, ветврачей, селекционер и др.).

Часть сигналов может непосредственно передаваться от одной ЛБТС к другой без «захода» в АРМ, когда не требуется знание специалистов и работа соответствующей ЛБТС может быть скорректирована автономно (автоматически). Более сложные случаи (заболевание и лечение животных, начало родов и родовспоможение) происходят с участием профильных специалистов.

Сигналы, поступающие от ЛБТС, можно разделить на технологические (нормальные), диагностические (о параметрах функционирования «машины») и «тревожные» аномальные (травма, заболевание животных и др.) Технологически нормальные сигналы – это информация о надоях, скорости молокоотдачи, времени доения, количестве подходов к кормово-

му столу и т.д. Они формируются в соответствующих блоках управления и рабочих местах обслуживания животных и составляют основу информационных потоков, поступающих от животных [14, 15].

Таким образом, технологические сигналы составляют часть соответствующих параметров, контролируемых функционалами ЛБТС:

$$i_{\mathcal{M}} = f[M_{\mathcal{O}}, i_{\mathcal{T}\mathcal{O}_1} \dots i_{\mathcal{T}\mathcal{O}_n}; M_{\mathcal{K}}, i_{\mathcal{T}\mathcal{K}_1} \dots i_{\mathcal{T}\mathcal{K}_n}; M_{\mathcal{H}}, i_{\mathcal{T}\mathcal{H}_1} \dots i_{\mathcal{T}\mathcal{H}_n}; M_{\mathcal{E}}, i_{\mathcal{T}\mathcal{E}_1} \dots i_{\mathcal{T}\mathcal{E}_n}; M_{\mathcal{M}}, i_{\mathcal{T}\mathcal{M}_1} \dots i_{\mathcal{T}\mathcal{M}_n}, \quad (13)$$

где  $i_{\mathcal{T}\mathcal{O}}, i_{\mathcal{T}\mathcal{K}}, i_{\mathcal{T}\mathcal{H}}, i_{\mathcal{T}\mathcal{E}}, i_{\mathcal{T}\mathcal{M}}$  – соответственно нормальные технологические сигналы, формирующиеся в подсистемах доения ( $M_{\mathcal{O}}$ ), кормления ( $M_{\mathcal{K}}$ ), навозоудаления ( $M_{\mathcal{H}}$ ), водоснабжения ( $M_{\mathcal{E}}$ ), микроклимата ( $M_{\mathcal{M}}$ ).

Следующую группу показателей составляют диагностические сигналы о соответствующих параметрах технических блоков ЛБТС:

$$i_{\mathcal{O}\mathcal{C}} = f[M_{\mathcal{O}}, i_{\mathcal{O}\mathcal{C}_1}^{\mathcal{O}} \dots i_{\mathcal{O}\mathcal{C}_n}^{\mathcal{O}}; M_{\mathcal{K}}, i_{\mathcal{O}\mathcal{C}_1}^{\mathcal{K}} \dots i_{\mathcal{O}\mathcal{C}_n}^{\mathcal{K}}; M_{\mathcal{H}}, i_{\mathcal{O}\mathcal{C}_1}^{\mathcal{H}} \dots i_{\mathcal{O}\mathcal{C}_n}^{\mathcal{H}}; M_{\mathcal{E}}, i_{\mathcal{O}\mathcal{C}_1}^{\mathcal{E}} \dots i_{\mathcal{O}\mathcal{C}_n}^{\mathcal{E}}; M_{\mathcal{M}}, i_{\mathcal{O}\mathcal{C}_1}^{\mathcal{M}} \dots i_{\mathcal{O}\mathcal{C}_n}^{\mathcal{M}}], \quad (14)$$

где  $i_{\mathcal{O}\mathcal{C}}^{\mathcal{O}}, i_{\mathcal{O}\mathcal{C}}^{\mathcal{K}}, i_{\mathcal{O}\mathcal{C}}^{\mathcal{H}}, i_{\mathcal{O}\mathcal{C}}^{\mathcal{E}}, i_{\mathcal{O}\mathcal{C}}^{\mathcal{M}}$  – соответствующие диагностические сигналы технических параметров ЛБТС: доения ( $M_{\mathcal{O}}$ ), кормления ( $M_{\mathcal{K}}$ ), навозоудаления ( $M_{\mathcal{H}}$ ), водоснабжения ( $M_{\mathcal{E}}$ ), микроклимата ( $M_{\mathcal{M}}$ ).

Перечень этих сигналов формируется по показателям соответствующих функционалов и подсистем технического обслуживания и диагностики (ТО) на основе соответствующих паспортов, инструкций по эксплуатации и другой научно-технической документации. Здесь же производится расчет трудоемкости ТО и ремонтов по соответствующим ЛБТС доения, кормления, автопоения и др. Основная информация содержится в базе данных АРМ инженера.

К последней группе относятся «тревожные» сигналы о сбоях и отклонениях в работе подсистемы («М-Ж»), снизившихся надоях, воспалениях четвертой вымени, наличии анти-

биотиков, примесей крови, сгустков в молоке и других:

$$i_{mc} = f[M_{\partial}, i_{mc1}^{\partial} \dots i_{mcn}^{\partial}; M_K, i_{mc1}^K \dots i_{mcn}^K; M_H, i_{mc1}^H \dots i_{mcn}^H; M_{\theta}, i_{mc1}^{\theta} \dots i_{mcn}^{\theta}; M_M, i_{mc1}^M \dots i_{mcn}^M], \quad (15)$$

где  $i_{mc}^{\partial}$ ,  $i_{mc}^K$ ,  $i_{mc}^H$ ,  $i_{mc}^{\theta}$ ,  $i_{mc}^M$  – соответствующие тревожные сигналы, поступающие от ЛБТС доения ( $M_{\partial}$ ), кормления ( $M_K$ ), навозоудаления ( $M_H$ ), водоснабжения ( $M_{\theta}$ ), микроклимата ( $M_M$ ).

Данный перечень контролируемых показателей может расширяться и дополняться.

Для моделирования процессов управления в доильном аппарате по четвертям вымени рассмотрены соответствующие кривые скорости молокоотдачи по каждой четверти вымени (рис. 2) [7]. Проведена статистическая обработка экспериментальных данных на примере

процесса с доильных роботов фирмы Lely «astronaut» (164 коровы). Для получения информации по продолжительности доения отдельных долей вымени коровы сформированы в семь интервальных групп.

Для управления временем процесса додаивания ( $\Delta t_d \leq 30$  сек) необходимо выполнение следующих условий:

$$\begin{cases} (t_d - t_{2'}) \geq \Delta t_{d, \text{ср}} \rightarrow \Delta t_{d, \text{ср}} = 30 \text{ сек} \\ (t_d - t_{2'}) < \Delta t_{d, \text{ср}} \rightarrow \Delta t_{d, \text{ср}} = (t_d - t_{2'}) \end{cases} \quad (16)$$

где  $\Delta t_{d, \text{ср}}$  – средняя продолжительность машинного додаивания на исходной четверти ( $t_{d, \text{ср}} \leq 30$  сек.);

$t_d$  – время доения коровы;  $t_{2'}$  – время доения, соответствующее окончанию периода действия установившегося режима доения.

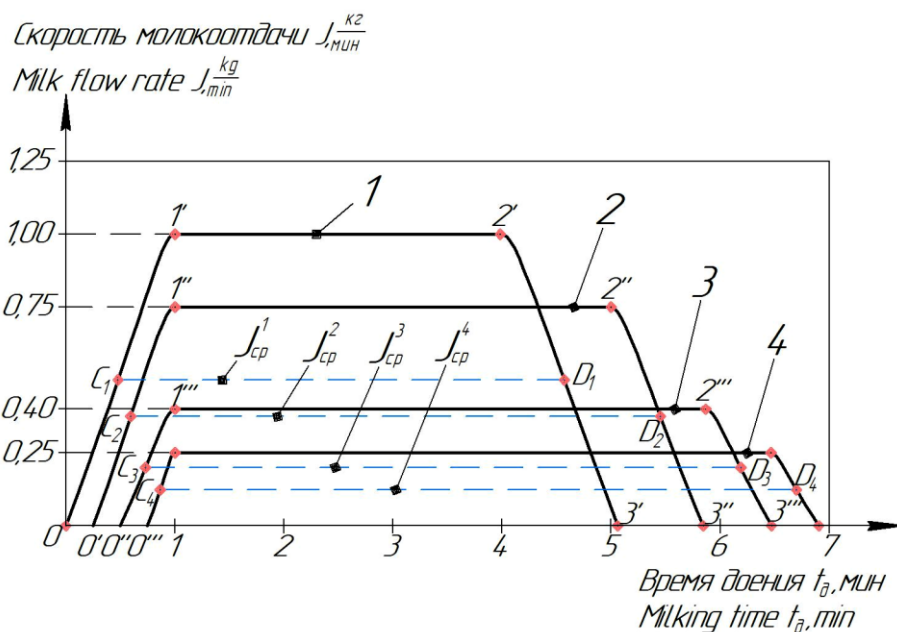


Рис. 2. Почетвертные кривые молокоотдачи коров: 1 – с высокой скоростью молокоотдачи (4...5 л/мин по вымени в целом); 2 – со средневысокой скоростью (3 л/мин); 3 – с нормальной скоростью (2,0 л/мин); 4 – с низкой скоростью (1,0 л/мин); 1'; 2'; 3' – реперные точки молокоотдачи; C1...C4 – переход со стимулирующего режима на основной; D1...D4 – начало машинного додаивания /

Fig. 1. Quarter milk flow rate curves of cows: 1 – with a high milk flow rate (4...5 l/min for the udder as a whole); 2 – with an average high milk flow rate (3 l/min); 3 – with a normal milk flow rate (2.0 l/min); 4 – with a low milk flow rate (1.0 l/min) 1' ; 2' ; 3' – reference points of milk yield; C1...C4 – transition from the stimulating mode to the main one; D1...D4 – the beginning of milking finishing

При этом режим додаивания желательно начать как можно раньше на участке (2'-3'), чтобы не допустить наполнение доильных стаканов и механического сдерживания извлечения молока из соответствующих долей вымени коровы. Первое условие характерно для животных с нормальной и низкой скоростью молокоотдачи, а второе для животных с высокой скоростью, у которых продолжительность нисходящей ветви молокоотдачи  $\leq 30$  сек.

Разработанные модели позволяют определить параметры управления в характерных реперных точках почетвертных кривых молокоотдачи для разработки уточнённых алгоритмов управления процессами доения отдельных долей вымени в автоматизированных и роботизированных доильных аппаратах нового поколения.

Симуляция математической модели технологического процесса кормления рассмот-



рена на примере колесного робота-пододвигателя корма, смоделирована элементная

база с двумя независимыми приводными колесами в среде Matlab/Simulink (рис. 3) [16].

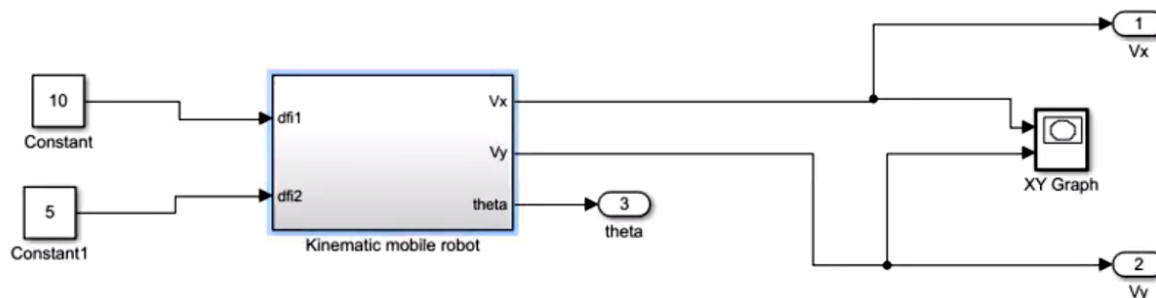


Рис. 3. Графически-числовая модель колесного робота-пододвигателя корма в среде Matlab/Simulink /  
Fig. 3. Graphical and numerical model of a wheeled feed-pusher robot in the Matlab/Simulink environment

Результатом симуляции математической модели колесного робота-пододвигателя корма с двумя независимыми приводными колесами является построение графика в среде Matlab/Simulink, который получен путем описания центра масс робота в плоскости (x, y), причем показатели Constant = 5, Constant1 = 10, что характеризует уровень подачи напряжения на привод колеса. Созданная математическая модель управления движением колесного робота-пододвигателя корма позволит обеспечить эффективное взаимодействие систем электропривод и позиционирования с центральной платой управления, которая регулирует количество подаваемых импульсов на привод колесного робота при цифровом управлении автономным движением.

**Выводы.** Контроль параметров важнейшей подсистемы «машина» сложной биотехнической системы «Ч-М-Ж» молочной фермы позволяет повысить уровень автоматизации, цифровизации и интеллектуализации соответствующих ЛБТС доения, кормления, навозоудаления и других, что создает предпосылки для улучшения их работы и обслуживания животных, а также повышения уровня автоном-

ности их функционирования. Развитие «машинного» фактора системы целесообразно на основе машиноцентрической модели ЛБТС, которая будет постепенно расширять свои функции за счет передаваемых функций контроля и управления от соответствующих подсистем «ЧО» и «Ж».

Разработанные модели позволяют определить параметры управления в характерных реперных точках почетвертных кривых молокоотдачи для разработки уточнённых алгоритмов управления процессами доения отдельных долей вымени в автоматизированных и роботизированных доильных аппаратах нового поколения. Результатом симуляции математической модели колесного робота-пододвигателя корма с двумя независимыми приводными колесами является построение графика в среде Matlab/Simulink. Созданная математическая модель управления движением колесным роботом-пододвигателем корма обеспечивает эффективное взаимодействие системы позиционирования и привода колесного робота при цифровом управлении автономным движением.

### References

1. Карташов Л. П., Зубкова Т. М. Параметрический и структурный синтез технологических объектов на основе системного подхода и математического моделирования. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 225 с.  
Kartashov L. P., Zubkova T. M. *Parametricheskiy i strukturnyy sintez tekhnologicheskikh ob"ektov na osnove sistemnogo podkhoda i matematicheskogo modelirovaniya*. [Parametric and structural synthesis of technological objects based on the system approach and mathematical modeling]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2009. 225 p.
2. Черноиванов В. И., Судаков С. К., Толоконников Г. К. Биомашсистемы, функциональные системы, категорная теория систем. М.: НИИ нормальной физиологии им. П. К. Анохина РАН, ФНАЦ ВИМ РАН, 2018. 446 с.  
Chernoivanov V. I., Sudakov S. K., Tolokonnikov G. K. *Biomashsistemy, funktsional'nye sistemy, kategor'naya teoriya sistem*. [Biomachine systems, functional systems, categorical systems theory]. Moscow: NII normal'noy fiziologii im. P. K. Anokhina RAN, FNATs VIM RAN, 2018. 446 p.
3. Meena Hans, Chaudhary Shalini, Meena Brajendra, Kadain K. S. Farmers' perception towards dairy farm automation in north India. Indian Journal of Dairy Science. 2020;73(2):167-174.  
DOI: <https://doi.org/10.33785/IJDS.2020.v73i02.012>

4. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019. The World of Organic Agriculture Statistics and Emerging Trends. Available at: <https://shop.fibl.org/CHen/mwdownloads/download/link/id/1202/?ref=1> (accessed: 20.03.2020).
5. Prabhakar Maurya, Angom Binita, Dharmendra Kumar. Animal Husbandry Sector and Global Climate Change. Conference: International Conference on "Role of Agri-Science, Forestry, Food Technology & Participatory Natural Resource Management for Mitigation of Climate Change (AF-Nature 2015)". At: New Delhi, Jawahar Lal University. 2015;2(1):40-44.  
URL: [https://www.researchgate.net/publication/314151949\\_Animal\\_Husbandry\\_Sector\\_and\\_Global\\_Climate\\_Change](https://www.researchgate.net/publication/314151949_Animal_Husbandry_Sector_and_Global_Climate_Change)
6. Biotechnology in animal husbandry. Journal for the Improvement of Animal Husbandry. 2016;32(2). Available at: <https://istocar.bg.ac.rs/wp-content/uploads/2016/07/BNT-2-za-sajt.pdf> (accessed: 15.04.2020).
7. Измайлов А. Ю., Цой Ю. А., Кирсанов В. В. Технологические основы алгоритмизации и цифрового управления процессами молочных ферм. М.: Научная мысль, 2019. С. 84-93.  
Izmaylov A. Yu., Tsoy Yu. A., Kirsanov V. V. *Tekhnologicheskie osnovy algoritimizatsii i tsifrovogo upravleniya protsessami molochnykh ferm*. [Technological bases of algorithmization and digital control of dairy farm processes]. Moscow: *Nauchnaya mysl'*, 2019. pp. 84-93.
8. Van De Gucht T., Saeys W., Van Nuffel A., Pluym L., Piccart K., Lauwers L., Vangeyte J., Van Weyenberg S. Farmers' preferences for automatic lameness-detection systems in dairy cattle. Journal of Dairy Science. 2017;100(7):5746-5757. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12285>
9. Schütz Christoph G., Schausberge Simon, Schrefl Michael. Building an active semantic data warehouse for precision dairy farming. Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce. 2018;28(2):122-141. DOI: <https://doi.org/10.1080/10919392.2018.1444344>
10. Sundarraj A. A., Rajathi A. A., Vishaal S. C., Prakash M. S., Sam A. A., Seihenbalg S. S. Food Biotechnological Applications in Dairy and Dairy Products. Journal of Pharmacy Research. 2018;12(4):1-6. URL: [https://www.researchgate.net/publication/324167849\\_FOOD\\_BIOTECHNOLOGICAL\\_APPLICATIONS\\_IN\\_DAIRY\\_AND\\_DAIRY\\_PRODUCTS](https://www.researchgate.net/publication/324167849_FOOD_BIOTECHNOLOGICAL_APPLICATIONS_IN_DAIRY_AND_DAIRY_PRODUCTS)
11. Alphonse Chapanis, William K. Holstein. Human-factors engineering. BioEngineering. Available at: <https://www.britannica.com/topic/human-factors-engineering> (accessed: 25.06.2020).
12. Цой Ю. А., Баишева Р. А. Технологические аспекты создания «умной» молочной фермы. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019;20(2):192-199. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.2.192-199>
13. Tsoy Yu. A., Baisheva R. A. *Tekhnologicheskie aspekty sozdaniya «umnoy» molochnoy fermy*. [Technological aspects of smart dairy farm development]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2019;20(2):192-199. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.2.192-199>
14. Ron Berger, Anat Hovav. Using a Dairy Management Information System to Facilitate Precision Agriculture: The Case of the AfiMilk® System. Information Systems Management. 2013;30(1):21-34.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/10580530.2013.739885>
15. Sorensen C. G., Fountas S., Nash E., Personen L., Bochtis D., Pedersen S. M., Basso B., Blackmore S. B. Conceptual model of a future farm management information system. Computers and Electronics in Agriculture. 2010;72(1):37-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.02.003>
16. Schönfeld M., Heil R., Bittner L. Big Data on a Farm – Smart Farming. In: Hoeren T., Kolany-Raiser B. (eds) Big Data in Context. SpringerBriefs in Law. Springer, Cham. 2018. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62461-7\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62461-7_12)
17. Nikitin E., Pavkin D. Modeling the motion processes of a multifunctional robot for animal units. E3S Web Conf. 2020;164:06023. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016406023>

#### **Сведения об авторах**

**Кирсанов Владимир Вячеславович**, доктор техн. наук, профессор, заведующий отделом, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2549-4070>, e-mail: [femaks@bk.ru](mailto:femaks@bk.ru)

✉ **Баишева Равза Анваровна**, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9145-4478>, e-mail: [rozamamedova@mail.ru](mailto:rozamamedova@mail.ru)

#### **Information about authors**

**Vladimir V. Kirsanov**, DSc in Engineering, professor, Head of the Department, «Federal Scientific Agroengineering Center VIM», 5, 1st Institutsky proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9837-282X>, e-mail: [femaks@bk.ru](mailto:femaks@bk.ru)

✉ **Ravza A. Baisheva**, PhD in Engineering, «Federal Scientific Agroengineering Center VIM», 5, 1st Institutsky proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9145-4478>, e-mail: [rozamamedova@mail.ru](mailto:rozamamedova@mail.ru)

✉ – Для контактов / Corresponding author