

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171; 636.2

DOI: 10.26897/2687-1149-2021-2-32-38

**СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ МОЛОЧНЫХ ФЕРМ****КИРСАНОВ ВЛАДИМИР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**, *д-р техн. наук, главный научный сотрудник*

kirvv2014@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5

**Аннотация.** Создание типоразмерного ряда цифровых автоматизированных и роботизированных молочных ферм нового поколения различной конфигурации и вместимости (25-50-100...1200...2400 гол.) предполагает их структурную типизацию и модульное построение на основе методологии конечно-элементного анализа и создания структурно-функциональных моделей, включающих в себя законченные технологические модули и модульные единицы. Разработаны структурно-функциональные модели построения цифровых технологических модулей и модульных единиц автоматизированных и роботизированных молочных ферм нового поколения. Предложили создание и формализацию построения модульных структурно-функциональных единиц, включающих в себя пассивные накопительно-регулирующие модули неодушевленных материальных технологических и одушевленных биологических потоков (животных), активные машинно-технологические модули перемещения и трансформации материальных технологических и производственных потоков, направленных к животным или получаемых от них, информационно-аналитические модули экспресс-оценки качества производственных потоков, системы приема-передачи, обработки и хранения информационных потоков (сигналов), получаемых от машинно-технологических модулей (доения, кормления, навозоудаления и др.) и с датчиков животных. Проанализированы и получены формализованные структурно-функциональные модели цифровых модульных единиц: автоматизированных и роботизированных доильных залов, систем автоматизированного и роботизированного кормления животных, автоматизированных систем для дифференцированного обеспечения микроклимата, энергосберегающих аэробных или анаэробных модулей переработки навоза как законченных структур, включающих в себя объемно-планировочные накопительно-регулирующие технологические модули пассивного и машинно-технологические модули активного типа, осуществляющие перемещение и трансформацию материальных технологических потоков, экспресс-диагностику их качества и прием-передачу, обработку и хранение информационных потоков. Реализация разработанных структурно-функциональных моделей цифровых технологических модулей и модульных единиц позволит создать новые проекты цифровых автоматизированных и роботизированных молочных ферм нового поколения с повышенными функциональными возможностями и адаптивными функциями по отношению к биологическим объектам.

**Ключевые слова:** структурно-функциональная модель, пассивный технологический модуль, активный машинно-технологический модуль, модульная единица, локальная биотехническая система.

**Формат цитирования:** Кирсанов В.В. Структурно-функциональные модели построения цифровых технологических модулей современных молочных ферм // Агроинженерия. 2021. № 2 (102). С. 32-38. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-2-32-38.

© Кирсанов В.В., 2021



## ORIGINAL PAPER

**STRUCTURAL-AND-FUNCTIONAL MODELS FOR CONSTRUCTING DIGITAL TECHNOLOGICAL MODULES OF MODERN DAIRY FARMS****VLADIMIR V. KIRSANOV**, *DSc (Eng), Chief Research Engineer*

kirvv2014@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1<sup>st</sup> Institutsky Proezd Str., bld 5

**Abstract.** Establishing a standard series of digital automated robotic dairy farms of a new generation with different configurations and capacity (25-50-100...1200...2400 goals) implies their structural typing and modular building based on the methodology of finite element analysis and structural-functional models, including complete modular units. The author has developed structural and functional models for building digital technological modules and modular units of modern automated and robotic dairy farms of a new generation. Modular structural and functional units are proposed. They include passive accumulative and regulating modules of inanimate (material, technological) and animate biological flows (animals), active machine-technological modules for moving and transforming material technological and production flows to/from animals,

information and analytical modules for rapid assessment of the quality of production flows, systems for receiving, transmitting, processing and storing information flows (signals) received from machine-technological modules (milking, feeding, manure removal, etc.) and from animal sensors. The author analyzed and obtained formalized structural and functional models of digital modular units: automated and robotic milking parlors, automated and robotic animal feeding systems, automated systems for differentiated microclimate provision, energy-saving aerobic and (or anaerobic) modules for manure processing as complete structures, including space-planning accumulative-regulating technological modules of the passive type and machine-technological modules of the active type to move and transform material technological flows, as well as carry out express diagnostics of their quality and storage of information flows. The implementation of the developed structural and functional models of digital technological modules and modular units will provide for designing new projects of digital automated and robotic dairy farms of a new generation with increased functionality and adaptive functions to be applied to biological objects.

**Key words:** structural-and-functional model, passive technological module, active machine-technological module, modular unit, local biotechnical system.

**For citation:** Kirsanov V.V. Structural-and-functional models for constructing digital technological modules of modern dairy farms. *Agroengineering*, 2021; 2 (102): 32-38. (In Rus.). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-2-32-38.

**Введение.** Создание типоразмерного ряда цифровых автоматизированных и роботизированных молочных ферм нового поколения различной конфигурации и вместимости (25-50-100...1200...2400 гол.) предполагает их структурную типизацию и модульное построение на основе методологии конечно-элементного анализа и создания структурно-функциональных моделей, включающих в себя законченные модульные единицы (МЕ): помещения для животных (коровники, телятники), автоматизированные и роботизированные доильно-молочные блоки, секционные хранилища кормов и отходов, выгульные площадки и др. [1]. Они в свою очередь содержат пассивные и активные машинно-технологические модули, преобразующие материальные потоки, направляемые к животным или получаемые от них и информационно-аналитические модули, обрабатывающие информационные потоки, поступающие от машинно-технологических модулей и животных в АСУ фермы и обратно [2]. Информационные компоненты могут базироваться на машинно-технологических модулях в качестве бортовых контроллеров, информационно-аналитических устройств экспресс-оценки качества продукции, систем приема-передачи информации (базовые станции), а также представлять информационно-накопительные ресурсы (программы, базы данных и др.), используемые в автоматизированных рабочих местах главных специалистов АСУ фермы. В активных машинно-технологических модулях происходит перемещение и трансформация соответствующих материальных потоков (молоко в доильных залах, корма в кормораздающих агрегатах, навоз в навозоуборочных транспортерах, потоки воздуха в модулях обеспечения микроклимата, потоки воды в оборудовании для автопоения и др.) [3]. К пассивным технологическим модулям следует отнести стойловое оборудование для содержания животных, ограждение кормового стола, накопительные начальные, конечные и регулирующие емкости (секционные кормохранилища, навозохранилища, водонапорные башни и др.), накопительные и регулирующие площадки для движения поголовья животных в доильных залах, выгульных площадках, эстакадах погрузки животных, пастбищах и др. [4].

**Цель исследований:** разработка структурно-функциональных моделей построения цифровых технологических модулей и модульных единиц автоматизированных и роботизированных молочных ферм нового поколения.

**Материал и методы.** Объектами исследования являются структурно-функциональные модульные единицы,

включающие в себя пассивные накопительно-регулирующие модули неодушевленных материальных технологических и одушевленных биологических потоков (животных), активные машинно-технологические модули перемещения и трансформации материальных технологических и продукционных потоков, направленных к животным или получаемых от них, информационно-аналитические модули экспресс-оценки качества продукционных потоков, системы приема-передачи, обработки и хранения информационных потоков (сигналов), получаемых от машинно-технологических модулей (доения, кормления, навозоудаления и др.) и с датчиков животных. При взаимодействии машинно-технологических модулей с биологическими объектами образуются локальные биотехнические системы (ЛБТС): доения, кормления, навозоудаления и другое, обслуживающие животных. Структурно-логистические модели и схемы этого взаимодействия представляют основной научный и практический интерес [5].

Модульные единицы, обладающие структурно-функциональной и объемно-планировочной законченностью, могут включать в себя несколько одноименных и машинно-технологических модулей, к которым следует отнести автоматизированные или роботизированные модули доения, роботы-загрузчики-подъемники-раздатчики кормовой смеси животным [6], раздатчики подстилки и проталкивания навоза через щелевой пол, приточно-вытяжные вентиляционные модули для создания дифференцированного микроклимата в помещении, содержащем различные половозрастные группы животных, энергосберегающие аэробные и (или анаэробные) модули переработки с разделением навоза на фракции, с очисткой газообразной фракции до состояния газообразного топлива, жидкой фракции до состояния технической воды для подачи на рециркуляционный гидросмыв в навозные каналы, а твердой фракции – до компостных удобрений и (или) сменяемой подстилки для животных. При подогреве анаэробного биореактора могут использоваться тепловые потоки от других машинно-технологических модулей, вырабатывающих тепловую энергию и снабженных ее рекуператорами: охладители молока, водокольцевые вакуумные установки и др.

**Результаты и обсуждение.** Авторами [7] была показана целесообразность дифференцированного подхода к построению и функционированию сложных биотехнических

систем (Ч-М-Ж) животноводческих ферм на основе создания и развития локальных биотехнических подсистем (ЛБТС) доения, поения, кормления, навозоудаления, микроклимата, обладающих функциями частичного или полностью автономного функционирования, с передачей части простых механических и интеллектуальных визуально-аналитических функций от человека-оператора (ЧО) машине-роботу (автомату), что повышает производительность и качество труда, степень его интеллектуализации и цифровизации. Важной задачей является разработка и оптимизация структурно-логистических схем функционирования этих подсистем по оптимальному контролю и управлению потребляемыми материальными и получаемыми производственными потоками и отходами жизнедеятельности. При этом необходимо обеспечить комфортную среду обитания в ограниченном пространстве производственного помещения для различных половозрастных групп животных (микроклимат, кормление, содержание), максимально исключить перенос различных инфекций среди поголовья: маститов при доении через доильный аппарат или при отдыхе в боксах через загрязненную подстилку, инфекций пищеварительной и дыхательной систем при раздаче корма через загрязнения, попадающие в корм на кормовом столе (с колес трактора и кормораздатчика), через воду в автопоилках и воздух в плохо вентилируемых помещениях. Необходимо также ограничить контакт конечностей (копыт) с навозной массой в кормонавозных проходах. С другой стороны, необходимо защитить окружающую среду от фермских отходов жизнедеятельности и вредных вентиляционных выбросов, обеспечив эффективную переработку навозных стоков, минимизировать количество жидких отходов, разделяя их на твердую и жидкую фракции с глубоким очищением последней до состояния технической воды и последующим ее использованием в системах рециркуляционной очистки навозных каналов или безопасным сливом в канализацию. Для обеспечения дифференцированного микроклимата в помещениях, содержащих различные половозрастные группы животных, целесообразно использовать приточно-вытяжные установки с рекуперацией теплоты вентилируемого воздуха, частичной конденсацией и улавливанием парниковых газов (CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S и др.), и водоиспарительным охлаждением приточного воздуха в жаркий летний период [8]. Особое внимание следует уделить модернизации подсистем доения и кормления как ключевых технологических линий, определяющих эффективное функционирование животноводческой фермы [9].

Таким образом, используя алгебру логики<sup>1</sup> [10], целесообразно формализовать представление модульных единиц как законченных структур, включающих в себя объемно-планировочные накопительно-регулирующие технологические модули пассивного типа и машинно-технологические модули активного типа, осуществляющие перемещение и трансформацию материальных технологических потоков, экспресс-диагностику их качества и прием-передачу, обработку и хранение информационных потоков.

<sup>1</sup> Гуров С.И. Булевы алгебры, упорядоченные множества, решетки: Определения, свойства, примеры. Серия «Основы защиты информации». М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2013. 352 с.

Структурно-функциональная модель модульной единицы (ME<sub>д</sub>) – автоматизированного доильного зала – в предпочтительном воплощении может выглядеть следующим образом:

$$ME_{д} = [\Pi_{тм} : F_p \wedge \Pi_{ж}] \wedge [A_{ад}^a : [E_{д} (2 \times 3 \dots 2 \times 16) \vee \vee \Pi_{д} (2 \times 16 \dots 2 \times 48) \vee K_{д} (24 \dots 72) \wedge M_{ам} \wedge M_{ду}^{пр} \wedge \wedge I_{ж}^a]] \wedge [A_{пом}^a : f_m \wedge T_{охл} (2,0 \dots 20,0) \wedge M_{км} \wedge M_{пт}^{пр}] \wedge C_{вых}, \quad (1)$$

где ME<sub>д</sub> – модульная единица (автоматизированный доильный зал с технологией почетверного доения);  $[\Pi_{тм} : F_p \wedge \Pi_{ж}]$  – пассивно-активный технологический модуль с преддоильной накопительной площадкой (F<sub>p</sub>) и автоматизированным пододвигателем животных  $\Pi_{ж}$ ; A<sub>ад</sub><sup>a</sup> – активный автоматизированный машинно-технологический модуль доения, включающий в себя доильный зал с почетвертным доением типа «Елочка» (E<sub>д</sub>) вместимостью (2×3...2×16) или доильный зал «Параллель» (Π<sub>д</sub>) вместимостью (2×16...2×48), или доильный зал «Карусель» (K<sub>д</sub>) [11] вместимостью 24...72 станко-мест, модуль отделения аномального молока в потоке (M<sub>ам</sub>), модуль промывки доильной установки (M<sub>ду</sub><sup>пр</sup>), информационно-аналитический модуль обработки, накопления и передачи информации о продуктивности и физиологическом состоянии животных (I<sub>ж</sub><sup>a</sup>); A<sub>пом</sub><sup>a</sup> – активный автоматизированный машинно-технологический модуль первичной обработки молока, включающий в себя подсистемы фильтрации (f<sub>m</sub>), охлаждения и кратковременного хранения (T<sub>охл</sub>) соответствующей вместимости 2,0...20,0 т, информационно-аналитический модуль экспресс-оценки качества молока M<sub>км</sub> и модуль промывки танка охладителя молока (M<sub>пт</sub><sup>пр</sup>); C<sub>вых</sub> – выходные селекционные ворота, "\wedge", "\vee" – соответственно логические операторы конъюнкции («и») и исключительной дизъюнкции («или...или»).

При необходимости модуль первичной обработки в варианном исполнении может быть дополнен комплектом оборудования для переработки молока.

По аналогии с автоматизированной модульной единицей роботизированный доильный модуль предпочтительно может быть записан в двух вариантах: с добровольным доением в монобоксах (групповых боксах) или роботизированных залах (типа «Карусель», «Веер», «Елочка», «Параллель»). При этом для запрета на посещение бокса (менее 3 ч после дойки) и выделения заболевших коров маститом селекционные ворота могут быть установлены как на входе, так и на выходе с доильного робота. При этом входные селекционные ворота в случае роботизированного доильного зала могут быть оснащены роботизированным санпунктом для очистки вымени коров перед доением, чтобы сократить его капиталоемкость [12]:

$$ME_{рд}^м = [\Pi_{тм} : F_p \wedge C_{вх}] \wedge [A_{рд}^м : [M_{рд}^м (1 \dots 5) \wedge \wedge M_{ам} \wedge M_{км}^м \wedge f_m \wedge M_{охл}^{пр} \wedge M_{да}^{пр} \wedge M_{др}^{пр} \wedge M_{кк}^м]] \wedge [A_{пом}^{рм} : T_{дохл} (2,0 \dots 10,0) \wedge M_{км}^{сб} \wedge M_{пт}^{пр}] \wedge C_{вых} \quad (2)$$

$$ME_{др}^з = [\Pi_{тм} : F_p \wedge \Pi_{ж} \wedge C_{вх}^{ср}] \wedge [A_{рд}^з : [[V_{рд}^з (5 \dots 12) \vee \vee E_{рд}^з (2 \times 3 \dots 2 \times 8) \vee \vee \Pi_{рд}^з (2 \times 6 \dots 2 \times 12) \vee K_{рд}^з (24 \dots 40)] \wedge \wedge M_{ам} \wedge M_{км}^м \wedge f_m \wedge M_{охл}^{пр} \wedge M_{да}^{пр} \wedge M_{рдз}^{пр} \wedge M_{кк}^м]] \wedge [A_{пом}^{рз} : T_{дохл} (2,0 \dots 20,0) \wedge M_{км}^{сб} \wedge M_{пт}^{пр}] \wedge C_{вых}, \quad (3)$$

где ME<sub>рд</sub><sup>м</sup>, ME<sub>рд</sub><sup>з</sup> – соответственно модульные единицы для добровольного роботизированного доения в монобоксе

и добровольно организованного доения в доильном зале;  $C_{вх}^{сп}$ ,  $C_{вх}^{ср}$  – соответственно входные селекционные ворота без санпункта и с роботизированным санпунктом для очистки вымени перед доением;  $A_{рд}^м$ ,  $A_{рд}^з$  – соответственно активные машинно-технологические модули роботизированного доения в монобоксах и групповых залах;  $M_{рд}^м$  – модуль роботизированного добровольного доения (монобокс) вместимостью от 1 до 5 мест;  $V_{рд}^з$ ,  $E_{рд}^з$ ,  $P_{рд}^з$ ,  $K_{рд}^з$  – модульные роботизированные доильные залы типа «Веер» вместимостью 5...12 боксов или «Елочка» ( $E_{рд}^з$ ) вместимостью 2x3...2x8 боксов, или «Параллель» ( $P_{рд}^з$ ) вместимостью 2x6...2x12 боксов, или «Карусель» ( $K_{рд}^з$ ) 24...48 боксов;  $M_{км}^и$ ,  $M_{км}^б$  – соответственно информационно-аналитические модули экспресс-оценки качества индивидуальных надоев молока и сборного охлажденного молока;  $M_{охл}^{пр}$  – модуль предварительного охлаждения молока в потоке;  $M_{да}^{пр}$ ,  $M_{др}^{пр}$ ,  $M_{рдз}^{пр}$  – соответственно модули индивидуальной промывки доильных аппаратов, всей системы доильного робота-монобокса и роботизированного доильного зала;  $M_{кк}^и$  – модуль индивидуального кормления концентрированными кормами;  $A_{пом}^{рм}$ ,  $A_{пом}^{рз}$  – соответственно активные машинно-технологические модули первичной обработки молока в доильных роботах-монобоксах и роботизированных залах;  $T_{дохл}$  (2,0...10,0),  $T_{дохл}$  (2,0...20,0) – танки для доохлаждения и кратковременного хранения сборного молока соответствующего типоразмера и вместимости, т;  $M_{т}^{пр}$  – модуль промывки танка-охлаждителя молока.

Аналогичным образом можно рассмотреть структурно-функциональные модели модульных единиц и технологических модулей автоматизированного и роботизированного кормления животных. Автоматизированная технология включает в себя, как правило, кормомиксер с функциями самозагрузки компонентов корма, доизмельчения, смешивания и последующей дифференцированной раздачи кормовой смеси на кормовой стол. В данной технологии вместе с кормомиксером могут работать автоматизированный или роботизированный пододвигатель корма с функциями дополнительного перемешивания и подсыпки кормовых добавок для улучшения качества и балансирования сухого вещества кормосмеси [13].

Таким образом, полная автоматизированная модульная единица линии приготовления и раздачи кормов ( $ME_{корм}^а$ ) будет включать в себя пассивные технологические модули (секционные хранилища кормов различных типов) и активные технологические модули: многофункциональный кормомиксер и роботизированный пододвигатель-улучшатель корма на кормовом столе. Структурно-функциональная формула которой может быть представлена следующим образом:

$$ME_{корм}^а = [П_{тм}^{ак} : F^{(1...n)}_{корм} \wedge M_{корм}^к] \wedge [A_{корм}^а : (M_{корм}^{сз}) \wedge (M_{корм}^{вз}) \wedge (M_{корм}^{исм}) \wedge (M_{корм}^р)] \wedge [A_{корм}^{рп} : (M_{корм}^{см}) \wedge (M_{корм}^{п}) \wedge (M_{корм}^к) \wedge (M_{корм}^н)] \wedge [П_{тм}^{кст} : (F^{(1...n)}_{кр}) \wedge (F^{(2(1...n))}_{сан}) \wedge (F^{(2(1...n))}_{ксм}) \wedge M_{кст}^о], \quad (4)$$

где  $[П_{тм}^{ак} : F^{(1...n)}_{корм} \wedge M_{корм}^к]$  – пассивный технологический модуль автоматизированного кормления, включающий в себя секционные накопительные хранилища кормов ( $F^{(1...n)}_{корм}$ ) и информационно-аналитический модуль экспресс-оценки качества компонентов корма  $M_{корм}^к$ ;

$A_{корм}^а$  – активный автоматизированный машинно-технологический модуль кормомиксер, включающий в себя модули самозагрузки ( $M_{корм}^{сз}$ ), взвешивания ( $M_{корм}^{вз}$ ), доизмельчения и смешивания компонентов корма ( $M_{корм}^{исм}$ ), информационно-аналитический модуль экспресс-оценки качества рациона кормления ( $M_{корм}^р$ ) группы животных;  $A_{корм}^{рп}$  – активный роботизированный машинно-технологический модуль обслуживания кормового стола, включающий в себя модуль пододвигания и смешивания ( $M_{корм}^{см}$ ), модуль подмешивания кормовых добавок ( $M_{корм}^{п}$ ), модуль навигации и автоматического управления ( $M_{корм}^н$ ), информационно-аналитический модуль оценки качества и количества корма на кормовом столе ( $M_{кст}^к$ );  $[П_{тм}^{кст} : (F^{(1...n)}_{кр}) \wedge (F^{(2(1...n))}_{сан}) \wedge (F^{(2(1...n))}_{ксм}) \wedge M_{кст}^о]$  – пассивный технологический модуль для проезда кормораздатчика и размещения кормового стола ( $П_{тм}^{кст}$ ), включающий в себя площадку для проезда кормораздатчика ( $F^{(1...n)}_{кр}$ ), санитарные зоны между колеёй раздатчика и кормовым столом ( $F^{(2(1...n))}_{сан}$ ), накопительно-регулирующие площадки для выгрузки кормовой смеси ( $F^{(2(1...n))}_{ксм}$ ) и модуль ограждения кормового стола ( $M_{кст}^о$ ).

По аналогии может быть записана структурно-функциональная модель модульной единицы автоматической (роботизированной) системы многократного кормления ( $ME_{корм}^р$ ), включающей в себя удаленные секционные хранилища основных компонентов корма с прифермской кормокухней и оперативным запасом кормов (на 1-3 сут.) или заблокированные с фермой секционные хранилища кормов, а также кормораздающие роботы ограниченной мобильности подвешенного (монорельс) или наземного размещения:

$$ME_{корм}^р = [П_{тм}^{рк} : (F^{(1...n)}_{корм} \wedge F^{(1...3)}_{ркорм}) \vee (F^{(1...n)}_{корм} \wedge M_{корм}^к)] \wedge [A_{корм}^р : (M_{корм}^{сз}) \wedge (M_{корм}^{вз}) \wedge (M_{корм}^{исм}) \wedge (M_{корм}^р) \wedge (M_{корм}^{исм}) \wedge (M_{корм}^{подв}) \wedge (M_{кст}^к) \wedge (M_{кст}^н)] \wedge [П_{тм}^{кст} : (F^{(1...n)}_{кр}) \wedge (F^{(2(1...n))}_{сан}) \wedge (F^{(2(1...n))}_{кст}) \wedge M_{кст}^о], \quad (5)$$

где  $[П_{тм}^{рк} : (F^{(1...n)}_{корм} \wedge F^{(1...3)}_{ркорм}) \vee (F^{(1...n)}_{корм} \wedge M_{корм}^к)]$  – пассивный технологический модуль роботизированного кормления  $П_{тм}^{рк}$ , включающий в себя удаленные секционные хранилища кормов ( $F^{(1...n)}_{корм}$ ) с регулирующей прифермской накопительной площадкой-кормокухней с оперативным запасом кормов на 1-3 сут. ( $F^{(1...3)}_{ркорм}$ ) или заблокированные секционные накопительные емкости-хранилища (без кормокухни), информационно-аналитический модуль экспресс-оценки качества компонентов корма  $M_{корм}^к$ ;  $A_{корм}^р$  – активный роботизированный машинно-технологический модуль (кормомиксер) многократного обслуживания, включающий в себя модули самозагрузки ( $M_{корм}^{сз}$ ), взвешивания ( $M_{корм}^{вз}$ ), доизмельчения и смешивания компонентов корма ( $M_{корм}^{исм}$ ), информационно-аналитический модуль экспресс-оценки качества рациона кормления ( $M_{корм}^р$ ) группы животных, интегрированный модуль пододвигания и смешивания ( $M_{корм}^{исм}$ ), информационно-аналитический модуль оценки качества и количества корма на кормовом столе ( $M_{кст}^к$ ), модуль навигации и автоматического управления ( $M_{кст}^н$ ).

Наиболее предпочтительным в выражении (5) является вариант заблокированных с фермой секционных хранилищ кормов и роботизированных раздатчиков ограниченной мобильности с функциями пододвигания



корма и обслуживания кормового стола. Получается один многофункциональный роботизированный раздатчик-поддвижитель вместо двух агрегатов в автоматизированном варианте (кормомиксер и пододвижитель). К тому же практически исключается необходимость кормокухни для промежуточного оперативного хранения запасов корма. Существенно упрощается логистика, отсутствует необходимость подвоза корма из удаленных хранилищ, сокращаются протяженность и время цикла раздачи его животным, исключаются выезд раздатчика за пределы фермы и контакт колес с загрязненным покрытием фермы, возрастают кратность обслуживания животных и доступность корма, существенно снижается риск попадания загрязнений в корм с колес кормораздатчика [14].

Автоматизированный приточно-вытяжной модуль для дифференцированного обеспечения микроклимата представляет собой приточно-вытяжную шахту с вентиляторами и рекуператором теплоты воздуха и обслуживает определенную зону животноводческого помещения. Регулируя соотношение приточного и вытяжного воздуха изменением производительности вентиляторов, можно обеспечить требуемые параметры локального микроклимата в определенной части помещения, что бывает необходимо при содержании различных половозрастных групп животных [15]. Выражение для модульной единицы микроклимата ( $ME_{мкм}$ ) может быть представлено следующим образом:

$$ME_{мкм} = [ \Pi_{мкм}^{мкм} : A_{пом}^n \wedge M_{мкм}^n \wedge N_{зон}^{лок} ] \wedge [ A_{мкм}^a : M_{пр}^a \wedge M_{рек}^n \wedge M_{выт}^a \wedge M_{темп}^a \wedge M_{рец}^a \wedge M_{пром}^a \wedge M_{окл}^b \wedge M_{NH3CO2}^a \wedge M_{упр}^n ], \quad (6)$$

где  $[ \Pi_{мкм}^{мкм} : A_{пом}^n \wedge M_{мкм}^n \wedge N_{зон}^{лок} ]$  – пассивный технологический модуль контроля параметров микроклимата ( $\Pi_{мкм}^{мкм}$ ), включающий в себя «начальную накопительную емкость» воздушного объема вентилируемого помещения ( $A_{пом}^n$ ), информационно-аналитический блок оценки параметров микроклимата в помещении ( $M_{мкм}^n$ ), количество локально контролируемых зон микроклимата в одном помещении ( $N_{зон}^{лок}$ );  $A_{мкм}^a$  – активный машинно-технологический модуль приточно-вытяжной вентиляции, включающий в себя активный приточный вентиляционный модуль  $M_{пр}^a$ , пассивный модуль рекуперативного теплообмена  $M_{рек}^n$  приточного и вытяжного воздуха, активный вытяжной вентиляционный модуль  $M_{выт}^a$ , модуль контроля температуры приточного и вытяжного воздуха  $M_{темп}^a$ , модуль рециркуляции вытяжного воздуха  $M_{рец}^a$ , модуль промывки и оттаивания пластин рекуператора  $M_{пром}^a$ , модуль водоиспарительного охлаждения воздуха  $M_{окл}^b$ , модуль частичной абсорбции вредных газов  $M_{NH3CO2}^a$ , модуль интеллектуального управления  $M_{упр}^n$ .

Энергосберегающие аэробные и (или анаэробные) модули переработки навоза в наиболее предпочтительном воплощении могут представлять варианты с аэробным или анаэробным биореакторами [16, 17] с входной регулирующей емкостью, модулем разделением навоза на фракции, модулями очистки: газообразной фракции до состояния газообразного топлива, жидкой фракции до состояния жидких органических удобрений или состояния технической воды [18] для подачи на рециркуляционный гидросмыв в навозные каналы, или безопасной

утилизации в водоемы, накопительно-регулирующей площадкой для компостирования твердой фракции и получения органо-минеральных удобрений или сменяемой подстилки для животных, модулем рекуперативного подогрева анаэробного биореактора от других источников, вырабатывающих тепловую энергию и снабженных ее рекуператорами (охладители молока, водокольцевые вакуумные установки и др.).

Таким образом, соответствующая модульная единица переработки навоза ( $ME_n$ ) запишется следующим образом:

$$ME_n = [ \Pi_{tm}^n : A_n^p \wedge M_n^n \wedge M_{пер}^n ] \wedge [ A_{бр}^{анэ} : M_{бр}^t \wedge M_{зн}^n \wedge M_{пер}^n \wedge M_{упр}^n \wedge M_{выт}^n \wedge M_{рн}^f \wedge M_{жф}^o \wedge (A_{жн}^k \vee A_{тв}^k) \wedge M_{р}^{тв} \wedge M_{газ}^o \wedge M_{CH4}^o \wedge M_{рек}^n \wedge M_{эн}^n ] \vee [ A_{бр}^{аэ} : M_{рн}^f \wedge M_{жф}^o \wedge (A_{жн}^k \vee A_{тв}^k) \wedge M_{р}^{тв} \wedge M_{зн}^n \wedge M_{см}^n \wedge M_{азр}^n \wedge M_{упр}^n \wedge M_{кн}^n \wedge M_{выт}^n \wedge F_{р}^{тф} ], \quad (7)$$

где  $[ \Pi_{tm}^n : A_n^p \wedge M_n^n \wedge M_{пер}^n ]$  – технологический модуль подготовки навоза к сбрасыванию ( $\Pi_{tm}^n$ ), включающий в себя «начальную накопительно-регулирующую емкость» ( $A_n^p$ ), информационно-аналитический блок оценки параметров поступающих навозных стоков ( $M_n^n$ ), модуль подготовки и перемешивания навозной массы ( $M_{пер}^n$ );  $A_{бр}^{анэ}$  – анаэробный модуль переработки навоза, включающий в себя обогреваемый биореактор  $M_{бр}^t$ , модуль загрузки навоза  $M_{зн}^n$ , модуль перемешивания  $M_{пер}^n$ , интеллектуальный модуль контроля биотермической реакции и управления  $M_{упр}^n$ , модуль выгрузки сброженной массы навоза  $M_{выт}^n$ , модуль разделения навоза на фракции  $M_{рн}^f$ , модуль очистки жидкой фракции  $M_{жф}^o$ , конечные секционные хранилища жидкой фракции навоза  $A_{жн}^k$  (или технической воды  $A_{тв}^k$ ), модуль рециркуляции технической воды для уборки помещений  $M_{р}^{тв}$ , газолдер  $M_{газ}^o$  [19], модуль очистки и хранения очищенного биогаза  $M_{CH4}^o$ , модуль рекуперативного подогрева биореактора  $M_{рек}^n$ , модуль энергетической газопоршневой установки  $M_{эн}^n$ ;  $A_{бр}^{аэ}$  – аэробный модуль переработки навоза, включающий в себя модуль разделения навоза на фракции  $M_{рн}^f$ , модуль очистки жидкой фракции  $M_{жф}^o$ , конечные секционные хранилища жидкой фракции навоза  $A_{жн}^k$  (или технической воды  $A_{тв}^k$ ), модуль рециркуляции технической воды для уборки помещений  $M_{р}^{тв}$ , модуль загрузки твердой фракции и компостируемых материалов  $M_{зн}^n$ , модуль смешивания  $M_{см}^n$ , модуль аэрации  $M_{азр}^n$ , интеллектуальный модуль контроля биотермической реакции и управления  $M_{упр}^n$ , информационный модуль экспресс-оценки качества подготовленного к использованию навоза  $M_{кн}^n$ , модуль выгрузки подготовленного навоза  $M_{выт}^n$ , модуль оперативного хранения твердой фракции  $F_{р}^{тф}$ .

### Выводы

Реализация разработанных структурно-функциональных моделей цифровых технологических модулей и модульных единиц позволит создать новые проекты цифровых автоматизированных и роботизированных молочных ферм нового поколения с повышенными функциональными возможностями и адаптивными функциями по отношению к обслуживаемым биологическим объектам (животным) и окружающей среде.

## Библиографический список

1. Rong L., Nielsen P.V., Bjerg B. et al. Summary of best guidelines and verification of CFD modeling in livestock buildings to ensure quality forecasting. *Computers and electronics in agriculture*, 2016; 121: 180-190. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.12.005>
2. Ерохин М.Н., Кирсанов В.В., Цой Ю.А. и др. Структурно-технологическое моделирование процессов и функциональных систем в молочном скотоводстве // *Научные труды ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии*. 2007. Т. 17. № 1. С. 19-31.
3. Иванов Ю.А., Скоркин В.К., Гриднев П.И. и др. Интеллектуальная система управления и обеспечения эффективного производства продукции молочного скотоводства умной фермы // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2019. Т. 20. № 1. С. 57-67. DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.1.57-67
4. Simensen E., Østerås O., Bøe K.E. et al. Housing system and herd size interactions in Norwegian dairy herds; associations with performance and disease incidence. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 2010; 52:14. DOI: 10.1186/1751-0147-52-14.
5. Черноиванов В.И., Толоконников Г.К., Федотов А.В. Биомашсистемы энергосберегающих технологий переработки отходов АПК // *Техника и оборудование для села*. 2020. № 2 (272). С. 2-7. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-2-2-7
6. Khmelovskiy V., Rogach S., Tonkha O. et al. Quality evaluation of mixing fodder by mobile combined units. 18<sup>th</sup> International Scientific Conference Engineering For Rural Development. Book series: Engineering for Rural Development, 2019; 18(468): 299-304. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N468.
7. Кирсанов В.В., Цой Ю.А. Тенденции развития биотехнических систем в животноводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. № 3. С. 27-32. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-27-32.
8. Игнаткин И.Ю. Оптимизация эффективности утилизации теплоты воздухо-воздушного рекуператора // *Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина»*. 2018. № 1 (83). С. 34-39. DOI: 10.26897/1728-7936-2018-1-34-39.
9. Иванов Ю.А., Скоркин В.К., Аксенова В.П. Оптимизация и модернизация технологических процессов молочных ферм // *Международный технико-экономический журнал*. 2020. № 4. С. 7-15. DOI: 10.34286/1995-4646-2020-73-4-7-15.
10. Bottani E., Gentilotti M.C. & Rinaldi M. A Fuzzy Logic-Based Tool for the Assessment of Corporate Sustainability: A Case Study in the Food Machinery Industry. *Sustainability*, 2017; 9: 583. DOI: 10.3390/su9040583.
11. Кирсанов В.В., Филонов Р.Ф., Тареева О.А. Алгоритм управления доильными установками типа «Карусель» // *Техника и оборудование для села*. 2012. № 10. С. 20-22.
12. Рузин С.С., Владимиров Ф.Е., Юрочка С.С. и др. Обоснование технологических схем и параметров роботизированных доильных залов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. № 3. С. 20-26. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-2-20-26.
13. Tanveer M.H., Recchiuto C.T., Sgorbissa A. Analysis of path following and obstacle avoidance for multiple wheeled robots in a shared workspace. Cambridge University Press, 2018; 37(1): 1-29. DOI: 10.1017/S0263574718000875.
14. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Михайличенко С.М. Технологическая линия приготовления и раздачи кормосмесей

## References

1. Rong L., Nielsen P V, Bjerg B. et al. Summary of best guidelines and verification of CFD modeling in livestock buildings to ensure quality forecasting. *Computers and electronics in agriculture*, 2016; 121: 180-190. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.12.005>
2. Erokhin M.N., Kirsanov V.V., Tsoi Yu.A. et al. Strukturno-tehnologicheskoe modelirovanie protsessov i funktsional'nykh sistem v molochnom skotovodstve [Structural and technological modeling of processes and functional systems in dairy cattle breeding]. *Nauchnye trudy GNU VNI-IMZH Rossel'khozakademii*, 2007; 17(1): 19-31. (In Rus.)
3. Ivanov Yu.A., Skorkin V.K., Gridnev P.I., et al. Intellectuall'naya sistema upravleniya i obespecheniya effektivnogo proizvodstva produktsii molochnogo skotovodstva umnoy fermy [Intelligent management system and ensuring efficient production of dairy cattle products of a smart farm]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*, 2019; 20(1): 57-67. (In Rus.)
4. Simensen E., Østerås O., Bøe K.E. et al. Housing system and herd size interactions in Norwegian dairy herds; associations with performance and disease incidence. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 2010; 52: 14. DOI: 10.1186/1751-0147-52-14
5. Chernoiivanov V.I., Tolokonnikov G.K., Fedotov A.V. Biomashsistemy energosberegayushchikh tekhnologiy pererabotki otkhodov APK [Biomash systems of energy-saving technologies for processing agricultural waste]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*, 2020; 2 (272): 2-7. DOI: 10.33267 / 2072-9642-2020-2-2-7 (In Rus.)
6. Khmelovskiy V., Rogach S., Tonkha O., Rosamaha Y. Quality evaluation of mixing fodder by mobile combined units. 18<sup>th</sup> International Scientific Conference Engineering For Rural Development. Book series: Engineering for Rural Development, 2019; 18(468): 299-304. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N468
7. Kirsanov V.V., Tsoi Yu.A. Tendentsii razvitiya biotekhnicheskikh sistem v zhivotnovodstve [Trends in the development of biotechnical systems in animal husbandry]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*, 2020; 14(3): 27-32. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-27-32 (In Rus.)
8. Ignatkin I.Yu. Optimizatsiya effektivnosti utilizatsii teploty vozdukhovo-vozdushnogo rekuperatora [Optimizing utilization efficiency of heat developed by an air-to-air recuperator]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*, 2018; 1(83): 34-39. DOI: 10.26897/1728-7936-2018-1-34-39 (In Rus.)
9. Ivanov Yu.A., Skorkin V.K., Aksenova V.P. Optimizatsiya i modernizatsiya tekhnologicheskikh protsessov molochnykh ferm [Optimization and modernization of technological processes of dairy farms]. *Mezhdunarodniy tekhniko-ekonomicheskiy zhurnal*, 2020; 4: 7-15. DOI: 10.34286/1995-4646-2020-73-4-7-15. (In Rus.)
10. Bottani E., Gentilotti M.C. & Rinaldi M. A Fuzzy Logic-Based Tool for the Assessment of Corporate Sustainability: A Case Study in the Food Machinery Industry. *Sustainability*, 2017. 9: 583. DOI: 10.3390/su9040583
11. Kirsanov V.V., Filonov R.F., Tareeva O.A. Algoritm upravleniya doil'nymi ustanovkami tipa "Karusel'" [Algorithm for controlling milking machines of the "merry-go-round" type]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*, 2012; 10: 20-22. (In Rus.)

на базе автоматического кормового вагона // Сельский механизатор. 2020. № 1. С. 14-15.

15. Новиков Н.Н., Кольчик И.Е. Современное оборудование и технические средства обеспечения микроклимата на животноводческих фермах // Техника и технологии в животноводстве. 2020. № 1 (37). С. 81-88.

16. Briukhanov A., Shalavina E., Vasilev E. et al. Behaviour of acidity, total nitrogen and total phosphorus in fermented solid organic waste from pig-rearing complex. *Engineering for rural development*, 2020: 645-652. DOI: 10.22616/ERDev.2020.19.TF144.

17. Njuguna A., Mbohwa C., Ntuli F. et al. Waste to choose bio-energy digest and design model for organic solid waste fraction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018; 82: 1113-1121. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.051>.

18. Попов В.Д., Ерохин М.Н., Брюханов А.Ю. и др. Перспективы создания экологических центров промышленной переработки органических отходов животноводства // Агроинженерия. 2020. № 3 (97). С. 4-11. DOI: 10.26897/2687-1149-2020-3-4-11.

19. Kovalev D.A., Katraeva I.V., Mikheeva E.R. et al. Two-phase anaerobic treatment of highly concentrated wastewater of confectionary industry to produce hydrogen and methane-containing biogas. *International conference «Actual scientific & technical issues of chemical safety» (astics-2020)*. Book of Abstracts, 2020: 125-126.

12. Ruzin S.S., Vladimirov F.E., Yurochka S.S. et al. Obosnovanie tekhnologicheskikh skhem i parametrov robotizirovannykh doil'nykh zalov [Justification of technological schemes and parameters of robotic milking parlors]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*, 2020; 14(3): 20-26. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-2-20-26 (In Rus.)

13. Tanveer M.H., Recchiuto C.T., Sgorbissa A. Analysis of path following and obstacle avoidance for multiple wheeled robots in a shared workspace. *Cambridge University Press*, 2018; 37(1): 1-29. DOI: 10.1017/S0263574718000875

14. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Mikhaylichenko S.M. Tekhnologicheskaya liniya prigotovleniya i razdachi kormosmesey na baze avtomaticheskogo kormovogo vagona [Technological line for preparing and distributing feed mixtures based on an automatic feed wagon]. *Sel'skiy mekhanizator*, 2020; 1: 14-15. (In Rus.)

15. Novikov N.N., Kolchik I.E. Sovremennoe oborudovanie i tekhnicheskie sredstva obespecheniya mikroklimate na zhivotnovodcheskikh fermakh [Modern equipment and technical means for providing microclimate on livestock farms]. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve*, 2020; 1(37): 81-88. (In Rus.)

16. Bryukhanov A., Shalavina E., Vasilev E. et al. Behaviour of acidity, total nitrogen and total phosphorus in fermented solid organic waste from pig-rearing complex. *Engineering for rural development*, 2020: 645-652. DOI: 10.22616/ERDev.2020.19.TF144.

17. Njuguna A., Mbohwa C., Ntuli F. et al. Waste to choose bio-energy digest and design model for organic solid waste fraction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018; 82: 1113-1121. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.051>

18. Popov V.D., Erokhin M.N., Bryukhanov A.Yu. et al. Perspektivy sozdaniya ekologicheskikh tsentrov promyshlennoy pererabotki organicheskikh otkhodov [Prospects for establishing ecological centers for industrial processing of organic animal waste]. *Agroinzheneriya*, 2020; 3 (97); 4-11. DOI: 10.26897/2687-1149-2020-3-4-11. (In Rus.)

19. Kovalev D.A., Katraeva I.V., Mikheeva E.R. et al. Two-phase anaerobic treatment of highly concentrated wastewater of confectionary industry to produce hydrogen and methane-containing biogas. *International conference «Actual scientific & technical issues of chemical safety» (astics-2020)*. Book of Abstracts, 2020: 125-126.

### Критерии авторства

Кирсанов В.В. выполнил теоретические исследования, на основании полученных результатов провёл обобщение и подготовил рукопись. Кирсанов В.В. имеет на статью авторские права и несёт ответственность за плагиат.

### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.12.2020 г.

Одобрена после рецензирования 15.01.2021 г.

Принята к публикации 21.01.2021 г.

### Contribution

V.V. Kirsanov performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. V.V. Kirsanov has author's rights and bear responsibility for plagiarism.

### Conflict of interests

The author declares no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received 04.12.2020

Approved after reviewing 15.01.2021

Accepted for publication 21.01.2021