

На правах рукописи



Антонов Лев Васильевич

Методы и алгоритмы диагностики и прогнозирования функционального состояния животных в дойном стаде на основе анализа временных рядов показателей их жизнедеятельности

Специальность

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (приборостроение, биотехнические системы и технологии)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Муром 2017

Работа выполнена на кафедре физики и прикладной математики в Муромском институте (филиале) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (МИВлГУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Орлов Алексей Александрович

Официальные оппоненты: **Приоров Андрей Леонидович**
доктор технических наук, доцент,
Ярославский государственный университет им.
П.Г. Демидова, доцент кафедры «Динамика
электронных систем» (г. Ярославль)

Кузьмин Александр Алексеевич, кандидат
технических наук, доцент,
Юго-Западный государственный университет»,
доцент кафедры «Биомедицинская инженерия»
(г. Курск)

Ведущая организация: **Рязанский государственный радиотехнический университет** (г. Рязань)

Защита состоится 23 марта 2018 г. в 15⁰⁰ на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.099.03 созданного на базе Юго-Западного государственного университета, Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева, Белгородского государственного национального исследовательского университета, адрес: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета и на сайте

<https://www.swsu.ru/newfmn/diss/d999.099.03/diss%20Antonov.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Милостная Наталья Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Качественное и оперативное управление дойным стадом на животноводческих предприятиях является необходимым условием достижения высокого уровня выпускаемой продукции. В настоящее время компьютеризация позволяет значительно повысить эффективность управления производством молока. Благодаря компьютеризации животноводства страны Европы, США, Индия стали мировыми лидерами по производству сырого молока. Компьютеризация животноводства осуществляется на основе разработки и внедрения биотехнических систем управления животноводческими предприятиями (в частности молочного скотоводства). Основными лидерами в области разработки биотехнических систем управления предприятиями молочного скотоводства являются: Afimilk (Израиль); DeLaval (Швеция); Westfalia Landtechnik (Германия); S. A. Christensen & Co (Дания). В настоящее время происходит интенсивное внедрение подобных АИС на российских животноводческих предприятиях.

Компьютеризация процесса мониторинга на животноводческом предприятии позволяет решать задачи, связанные с управлением процессов доения, кормления, контроля качества молока, учета и хранения ключевых показателей состояния животных и другое. Основными источниками данных, поступающих в биотехнические системы для последующего хранения и обработки, являются данные с разнообразных сенсоров, размещаемых как на животных, так и на объектах предприятия. Решение научно-технических задач, состоящих в разработке новых и совершенствовании существующих методов и средств обработки сенсорных данных с целью повышения эффективности работы указанных систем, имеет важное значение.

Степень разработанности темы исследования.

Исследования для создания методов и средств обработки информации в биотехнических системах сейчас ведутся следующими авторами:

- в области автоматической диагностики заболеваний коров маститом известны работы следующих ученых Голобоких П.И., Дайбова Л.А., Kamphuis C., de Mol R.M., Cavero D., Chagunda M.G.G и др.;

- вопросами применения систем сенсоров для управления молочными фермами занимались: Steeneveld W., Chapinal N., A. M. de Passille и др.;

- в области статистического анализа данных систем автоматизированного доения известны работы Elischer M. F. и Lovendahl P и др.

Однако, применение данных методов и средств не позволяет решить следующие проблемы: несвоевременное выявление животных с отклонениями в здоровье (в результате снижается оперативность принимаемых мер по изоляции и лечению животных); большие трудозатраты на диагностику функционального состояния каждого животного; недостаточная степень достоверности получаемых результатов анализа состояния животных в результате использования неинвариантных ко времени данных с сенсоров, применяемых для оценки состояния животных; отсутствие возможности настройки существующих автоматизированных биотехнических систем с учетом особенностей конкретного фермерского хозяйства (т.е. показатели с сенсоров не инвариантны к условиям содержания стада); отсутствие экрана мониторинга для визуализации состояния всего поголовья жи-

вотноводческого комплекса для выявления групп животных, находящихся в определенных состояниях.

Перечисленные проблемы негативно влияют на качество молока и эффективность работы животноводческого комплекса в целом.

Таким образом, существует проблемная ситуация, связанная с отсутствием оперативного и достоверного мониторинга состояния животных на фермерских предприятиях и требующая разработки новых методов и алгоритмов обработки и анализа данных с биологических датчиков, позволяющих эффективно управлять функциональными состояниями животных в дойном стаде.

Для разрешения указанной проблемной ситуации предлагается использование ряда методов, связанных с выделением и агрегированием признаков.

В частности, в областях компьютерного зрения и анализа данных в микробиологии, успешно применяли методы агрегирования данных различной природы следующие авторы: Vohra A., Jong-Hann J., Jourde K., Gibert D., Zena Hira M., Duncan F.

Применение методов, разработанных указанными авторами, обеспечивает высокий уровень надежности получаемых результатов анализа данных.

Тем не менее, рассмотренные методы очень специфичны и не позволяют анализировать данные с сенсоров на животноводческих предприятиях. В связи с этим требуется разработка новых методов и алгоритмов, основанных на существующих подходах и методах.

Таким образом, повышение оперативности и достоверности мониторинга состояний животных на основе применения методов выделения признаков и агрегирования данных с сенсоров является актуальной научно-технической задачей.

Объект исследований – методы и биотехнические системы управления функциональным состоянием животного.

Предмет исследования - методы и алгоритмы автоматического мониторинга состояния животных на предприятиях молочного производства.

Цель работы - обеспечение оперативности и достоверности диагностики и прогнозирования функционального состояния животных в дойном стаде на основе анализа временных рядов показателей их жизнедеятельности.

Задачи исследования.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Анализ технологического процесса животноводческого предприятия, средств обеспечения автоматического мониторинга и процесса управления функциональным состоянием животных дойного стада.

2. Построение математической модели формирования сигналов с датчиков функционального состояния животных.

3. Разработка методов преобразования временных данных, поступающих с сенсоров, установленных на животных предприятия, для выявления наличия выбросов.

4. Разработка методов выделения комплексных показателей состояния здоровья животных.

5. Создание биотехнической системы поддержки принятия решений о функциональном состоянии животных на основе предложенных методов.

6. Экспериментальное исследование разработанных методов и системы.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует п.9 «Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических, экономических, биологических, медицинских и социальных объектов» паспорта научной специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации».

Научная новизна работы:

1. Предложен метод преобразования временных рядов с датчиков биологической информации о животных в дойном стаде, отличающийся использованием z-нормализации и временного сдвига данных и позволяющий обнаруживать выбросы во временных рядах, аппроксимируемых функцией Вейбулла.

2. Разработан метод оценки функциональных состояний животных, отличающийся использованием предложенного метода преобразования временных рядов с датчиков биологической информации и агрегирования выделенных признаков, обеспечивающий более достоверную и оперативную идентификацию состояний животных.

3. Предложен метод и его реализация для прогнозирования наступления охоты животного на основе анализа спектра Фурье сигнала с датчиков активности, обеспечивающий более достоверное планирование перехода особи в состояние охоты.

Теоретическая значимость исследования.

Предложенные новые методы обработки временных рядов, отображающих параметры функционального состояния животных, и выделения признаков могут быть использованы в смежных областях животноводства и ветеринарии в качестве методов предварительного анализа состояния животных.

Практическая значимость:

- разработана и внедрена биотехническая система поддержки принятия решений о функциональном состоянии животных в дойном стаде, обеспечивающая заданную достоверность и оперативность распознавания нехарактерных изменений в состоянии здоровья животного на животноводческом предприятии;

- определена область практического использования разработок для создания систем поддержки принятия решений о функциональном состоянии животных в дойном стаде;

- представлены методические рекомендации по настройке разработанной системы поддержки принятия решений.

Методы исследования. Применительно к задаче диссертации результативно использованы методы математической статистики, выявления выбросов и прогнозирования во временных рядах, численные методы и методы обработки сигналов.

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод преобразования входного сигнала, поступающего с датчика биологической информации, позволяющий обнаружить выбросы во временных рядах.

2. Метод оценки функциональных состояний животных, обеспечивающий более достоверную и оперативную идентификацию состояний животных.

3. Метод и его реализация прогнозирования наступления охоты животного, обеспечивающий более достоверное планирование перехода особи в состояние охоты.

4. Биотехническая система поддержки принятия решений о функциональном состоянии животных в дойном стаде, обеспечивающая оперативное управление молочным стадом.

5. Результаты экспериментальных исследований разработанных методов и системы.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью применения математического аппарата, методов исследования и соответствием характеристик измерителей заявленным требованиям и подтверждена результатами экспериментальных исследований.

Результаты работы получены автором в результате выполнения двух грантов:

1. УМНИК 2013-2015 №262ГУ1/2013, 4716ГУ2/2014 “Разработка интеллектуальной системы управления молочным хозяйством на основе совмещения мониторинговых и родословных данных”.

2. Грант администрации Владимирской области “Интеллектуальная автоматизированная информационная система управления животноводческим комплексом”.

Диссертационная работа и отдельные ее части докладывались и обсуждались на международной конференции “КрыМиКо 2015” (СевГУ, г. Севастополь, 2015), международной конференции “ICIE-2015” (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2015), международной конференции “Stability and Control Processes” in Memory of V.I. Zubov” (СПбГУ, г. Санкт-Петербург, 2015), международной конференции “Распознавание-2017” (ЮЗГУ, г. Курск, 2017), Всероссийской конференции “Зворыкинские чтения” (МИ ВлГУ, г. Муром, 2015, 2016, 2017), на научно-технических семинарах кафедры “Физика и прикладная математика” (МИ ВлГУ, г. Муром, 2014, 2015, 2016, 2017).

Практические результаты диссертационной работы успешно внедрены на животноводческом предприятиях ООО “Борисоглебское” Муромского района, ООО “Агровизор” г. Саров, а также используются в учебных курсах “Теория принятия управленческих решений”, “Математические методы обработки информации” и “Имитационное моделирование” по направлениям подготовки 01.03.02, 01.04.02 “Прикладная математика и информатика” МИВлГУ г. Муром

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 17 научных работ, из которых 7 опубликовано в научных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ, 4 работы опубликованы в научных журналах, входящих в системы цитирования Scopus и WoS. Получено 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад. Все выносимые на защиту положения разработаны соискателем лично. В основных научных работах по теме диссертации, опубликованных в соавторстве, лично соискателем разработаны в [1, 3, 8, 9, 12-14] – методы преобразования временных рядов с сенсоров биологической информации и выделения признаков на основе выполненной обработки, [4, 5, 10, 11] – методика распознавания состояний животных по выделенным признакам и методы выявления охоты животных, [2, 7, 15] – экспериментальные исследования разработанных методов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и библиографического списка, включающего 96 зарубежных и

116 отечественных наименований. Работа изложена на 178 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков и 30 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы научная задача, цель и задачи исследования, приведены результаты, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ технологий диагностики и прогнозирования функционального состояния животных в дойном стаде животноводческого комплекса и описаны используемые современные средства компьютеризации подобных предприятий. Выявлены несоответствия между потребностями предприятия и качеством автоматического мониторинга состояния процесса производства, обеспеченного существующими программными инструментами. Подробно рассмотрены возможности использования методов и алгоритмов обработки временных рядов применительно к задаче анализа информации с биологических сенсоров, установленных на животных. Приведен сравнительный анализ методов обработки временных рядов.

Определены цель и задачи диссертационной работы, направленные на обеспечение качественного автоматического мониторинга состояний животных на основе разработки и использования новых методов обработки временных рядов биологической информации и выделения информативных признаков.

Во второй главе предлагаются: метод преобразования временных рядов с датчиков биологической информации, метод оценки состояний животных, метод прогнозирования наступления охоты животного.

Математическая модель формирования сигналов с датчиков функционального состояния животных. Для создания методов и алгоритмов обработки производственной информации животноводческого предприятия, дающих более достоверный результат, проанализирована структура данных, получаемых с сенсоров биологической информации и построена их математическая модель.

Разработанная математическая модель сигнала молокоотдачи характеризуется следующими признаками:

- взрывное увеличение значений функции в начале наблюдаемого интервала;
- плавное затухание функции к концу наблюдаемого интервала;
- наличие случайной составляющей на всем отрезке наблюдения сигнала;
- наличие резких перепадов значений функции в начале наблюдаемого интервала.

Схематически график функции молокоотдачи (лактационной кривой) представлен на рис. 1. На основании статистического анализа временных рядов с сенсоров биологической информации представим математическую модель входного сигнала с датчиков молокоотдачи животного следующим образом:

$$Y_{\text{мол}}(t) = \sigma_{\text{мол}}(t - t_0)(\varepsilon + s_{\text{мол}}(t)) + m_{\text{мол}}(t - t_0), \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{мол}}(t)$ - функция, учитывающая уровень колебаний параметра молочной продуктивности; ε - нормально распределенная случайная величина, где $m(t) = 0$ и $\sigma(t) = 1$; $s_{\text{мол}}(t)$ - полезный сигнал, содержащий информацию о нехарактерном изменении состояния животного; $m_{\text{мол}}(t)$ - функция молокоотдачи.

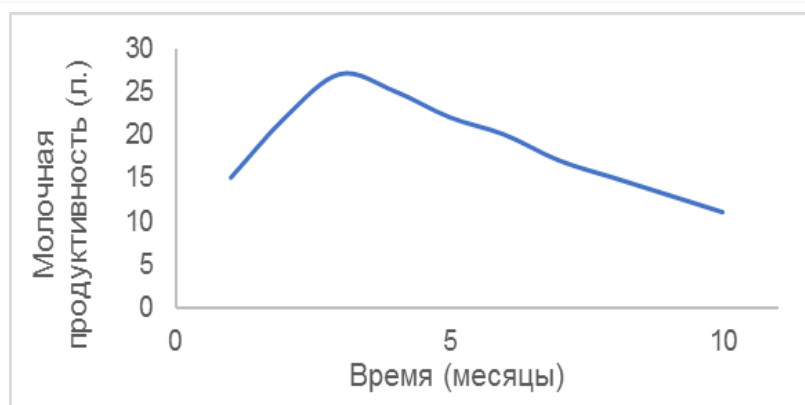


Рис. 1. Схематичный график функции молокоотдачи

Так как поведение функции молокоотдачи, график которой представлен на рис.1, аналогично поведению функции Вейбулла, то в качестве $m_{\text{мол}}(t)$ возьмем функцию Вейбулла:

$$m_{\text{мол}}(t) = a \frac{k}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^k}, \quad (2)$$

где a — амплитуда, k — коэффициент формы, λ — коэффициент масштаба.

Результат аппроксимации лактационной кривой с помощью функции Вейбулла представлен на рис. 2. При этом $k = 1.23$, $\lambda = 286.21$, $a = 7.6 \cdot 10^6$. Параметры модели определены на основании результатов аппроксимации, с помощью метода наименьших квадратов. Показано, что предложенная модель позволяет аппроксимировать функцию молокоотдачи с наименьшей ошибкой.

Структура выходных сигналов с сенсоров животноводческого предприятия приведена в таблице 1.

Метод преобразования временных рядов с датчиков биологической информации.

Основной принцип преобразования данных состоит в приведении временных рядов исследуемых биологических признаков к единой форме. Данные операции необходимы для дальнейшего агрегирования и выделения новых признаков с помощью обработки временных рядов соразмерных величин. Для решения этой задачи разработан метод на основе временного сдвига данных и z-нормализации.

Пусть τ — последовательность моментов времени, в которые получены дан-

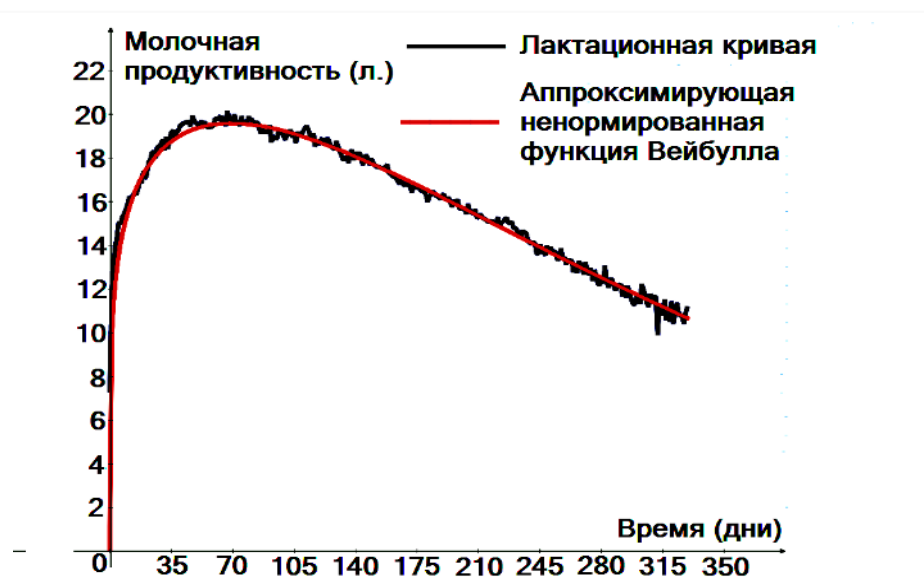


Рис. 2. Результат аппроксимации лактационной кривой с помощью функции Вейбулла

ные с биологического сенсора,

$\tau = \{t_1, t_2, \dots, t_L\}$, где L — количество дней, в течение которых получены данные; $\{\mu_i(t)\}$ — множество временных рядов, полученных с датчиков биологической информации, где $i = 1, \dots, n$, n — количество животных предприятия. Тогда разработанный метод можно представить в виде следующих последовательных ша-

ГОВ.

Так как значения t_1 для каждого временного ряда $\mu_i(t)$ различно, то есть каждый ряд имеет разную точку начала на оси OX , **на первом этапе** осуществим временной сдвиг рядов $\mu_i(t)$, таким образом, чтобы точка начала снятия показаний с датчиков совпадала с началом координат $\mu_i(t - t_1)$, где $i = 1, \dots, n$.

На **втором этапе** находится математическое ожидание $m(t)$ случайных функций $\mu_i(t)$, биологических датчиков.

$$m(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_i(t). \quad (3)$$

После этого, в соответствии с математической моделью (1), значения $m(t)$ аппроксимируются функцией Вейбулла (2).

Табл. 1. Структура выходных сигналов с сенсоров животноводческого предприятия

Входные параметры	Полезный сигнал	Стандартная случайная величина	Математическое ожидание	Колебания параметра в начале периода наблюдения
Молокоотдача	$S_{\text{мол}}(t)$	$\varepsilon_{\text{мол}}$	$m_{\text{мол}}(t)$	$\sigma_{\text{мол}}(t)$
Электропроводность	$S_{\text{эн}}(t)$	$\varepsilon_{\text{эн}}$	$m_{\text{эн}}(t)$	$\sigma_{\text{эн}} = \text{const}$
Время доения	$S_{\text{вд}}(t)$	$\varepsilon_{\text{вд}}$	$m_{\text{вд}}(t)$	$\sigma_{\text{вд}}(t)$
Вес	$S_{\text{вес}}(t)$	$\varepsilon_{\text{вес}}$	$m_{\text{вес}}(t)$	$\sigma_{\text{вес}} = \text{const}$
Активность	$S_{\text{акт}}(t)$	$\varepsilon_{\text{акт}}$	$m_{\text{акт}} = \text{const}$	$\sigma_{\text{акт}} = \text{const}$

На третьем этапе выполняется z-нормализация (центрирование и нормирование) совокупности функций $\mu_i(t)$ согласно формулам:

$$R_i(t) = \mu_i(t) - m(t), \quad (4)$$

$$\hat{\mu}_i(t) = \frac{R_i(t)}{\sigma}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

где $\sigma(t) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [R_i(t)]^2}$.

Метод оценки состояний животных.

Результатом работы методов является выделение новых признаков на основе агрегирования данных для оценки состояния животных предприятия. Анализ ряда работ и производственной деятельности предприятия показал, что наибольшая достоверность выявления ряда заболеваний животных и чрезвычайных ситуаций достигается при совокупном анализе нескольких факторов одновременно. Таким образом, для решения этой задачи разработан метод анализа нескольких производственных признаков на основе их агрегирования.

При идентификации мастита у животного используются два признака: объем полученного молока и его электропроводность. Пусть n – количество животных предприятия; $\mu_i(t)$ – значение показателя молокоотдачи для i -ого животного в день наблюдения t ; $\eta_i(t)$ – значение показателя электропроводности для i -ого жи-

вотного в день наблюдения t ; $v_i(t) = \{0, 1\}$ – наличие или отсутствие, по мнению эксперта, у животного мастита.

На *первом этапе* случайные функции $\mu_i(t)$ и $\eta_i(t)$ преобразуются к единой форме, применив метод преобразования временных рядов согласно формулам (1)-(5).

На *втором этапе* ведется расчет на основе модели, использующей агрегирование признаков $\hat{\mu}_i(t)$ и $\hat{\eta}_i(t)$. В общем виде математическая регрессионная модель выглядит следующим образом:

$$\hat{v}_i(t) = k_1 \hat{\mu}_i(t) + k_2 \hat{\eta}_i(t) + b, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

Используя метод наименьших квадратов, определены коэффициенты k_1 , k_2 , и параметра b уравнения (6). В результате, уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$\hat{v}_i(t) = -0,0493 \cdot \hat{\mu}_i(t) + 0,1933 \cdot \hat{\eta}_i(t) + 0,1022, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Адекватность представленной регрессионной модели была подтверждена с помощью критерия Фишера.

В отличие от $v(t)$ функция $\hat{v}(t)$ не является бинарной. Для распознавания состояния животного на основе анализа выделенного признака далее выполняется бинаризация функции $\hat{v}(t)$.

Таким образом, был выделен новый полезный признак, на основе применения метода обработки временных рядов и агрегирования двух производственных факторов, для идентификации мастита животных.

Практической задачей мониторинга является распознавание мастита по пороговому значению выделенного признака $\hat{v}(t)$. Порог распознавания (P) рассчитывается исходя из ряда значений, заданных параметров:

L – количество дней в лактации (по умолчанию - 305 дней, как общепринятое значение);

n – количество животных на предприятии;

R – уровень значимости отклонений выделенного признака от нулевого значения.

На *третьем этапе* вычисляется оценка линейной плотности признака. Пусть $x_1 < x_2 < \dots < x_j < \dots < x_J$ - разбиение числовой прямой $\hat{v}_i(t)$ на $J - 1$ интервалов, $y(x)$ – функция оценки линейной плотности признака $\hat{v}_i(t)$, Y – массив значений функции $y(x)$ в точках $x_1, \dots, x_j, \dots, x_J$. Для каждого i -животного ($i = 1, 2, \dots, n$), определим значение элементов массива Y . Для этого заполним массив Y нулями.

Далее для каждого $l = 1, 2, \dots, L$ и $j = 1, 2, \dots, J$ будем увеличивать Y_j на единицу, если

$$x_j < \hat{v}_i(t) \leq x_{j+1}, \quad (8)$$

где $x_j = x_1 + (j - 1) \cdot \Delta x$, x_1 – минимальное значение функции $\hat{v}_i(t)$, $x_{j+1} - x_j = \Delta x$.

В дальнейшем значения массива Y нормируются (выполняется деление на сумму $\sum_{j=1}^J Y_j$).

Для определения порога распознавания находится такое значение P , что

$$\sum_{j=1}^P Y_j \leq R, \quad (9)$$

где $\sum_{i=1}^P Y_i$ является максимальным. При максимальном значении суммы

$$\sum_{j=1}^P Y_j \approx R \quad (10)$$

Нахождение порога распознавания связано с выполнением следующего условия:

$$\int_1^P y(x) dx = R, \quad (11)$$

На четвертом этапе осуществляется сравнение текущего значения выделенного признака с рассчитанным порогом распознавания P :

- если $\hat{v}_i(t) > P$, то значение временного ряда считается выпадом;
- если $\hat{v}_i(t) \leq P$, то значение выделенного признака находится в пределах нормы.

С помощью изменения параметров n , R предоставляется возможность варьирования объема итоговой выборки животных с опасным статусом и достоверности идентификации. Тем самым обеспечивается оптимальное распределение нагрузки между ветеринарами, зоотехниками и менеджерами в ходе мониторинга производственного процесса.

Для идентификации функциональных состояний: тугодойкости, легкодойкости, пониженной живой массы, низкой двигательной активности, повышенной электропроводности молока, низкой молочной продуктивности применяется аналогичная последовательность шагов, представленная на общей схеме преобразования данных и выделения признаков для идентификации состояний животных предприятия (рис. 3).

Метод прогнозирования наступления охоты животного.

На современных животноводческих предприятиях остро стоит проблема определения послеродовой охоты (течки) животных, характеризующейся ярко выраженными скачками двигательной активности животного в первой четверти лактации.

Для решения задачи прогнозирования наступления охоты животного на основе анализа данных с датчика об активности особи используется математический аппарат преобразования Фурье для разложения исследуемого сигнала.

Пусть $Y_{акт}(t)$ – признак активности, τ – последовательность моментов времени, в которые получены данные с биологического сенсора, $\tau = \{t_0, t_1, \dots, t_L\}$, где L – количество дней, в течение которых получены данные, T – искомый период между ожидаемыми всплесками активности животного в процессе его перехода в состояние охоты, p – число всплесков активности животного в течение лактационного периода (всплеск определяется в соответствии с общей схемой преобразования данных и выделения признаков для идентификации состояний животных предприятия, приведенной на рис. 3.).

Схема вычисления и агрегирования признаков

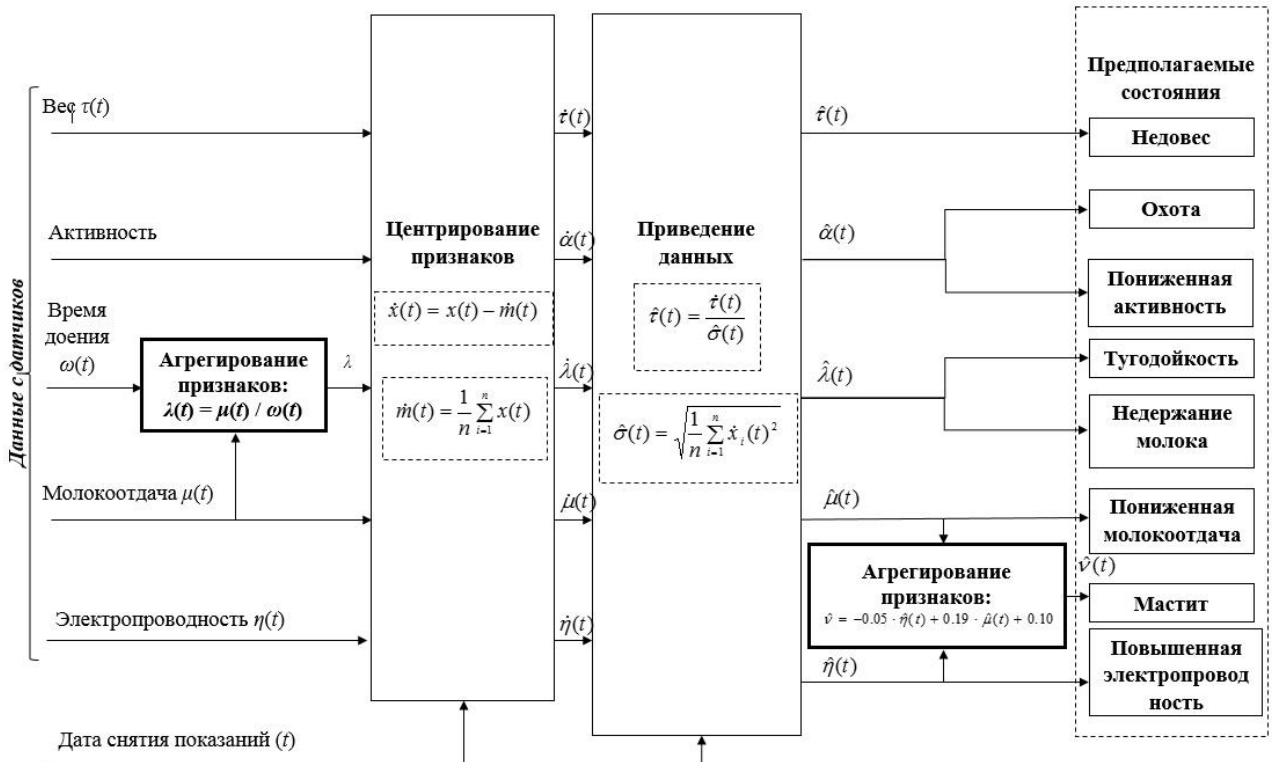


Рис. 3. Общая схема преобразования данных и выделения признаков для идентификации состояний животных предприятия

Метод реализован на основе следующего алгоритма:

1. Если $p < 2$ (в начале лактационного периода существует недостаток данных об особенности изменения случайной функции активности животного), то $T = 21$, $t_{\text{прогноз}} = T \cdot (p + 1)$. Данная величина считается средним общепринятым значением, где вероятность наступления охоты животного максимальна.

2. Если $p = 2$, прогнозное значение рассчитывается по формуле (12):

$$t_{\text{прогноз}} = t_{2\text{max}} + T, \quad (12)$$

где $T = \frac{(t_{2\text{max}} - t_{1\text{max}})}{2}$.

3. Если $p > 2$, имеется достаточное количество информации для разложения исходного сигнала с помощью преобразования Фурье.

Для исследуемого сигнала $Y_{акт.к}(t)$ применяется дискретное преобразование Фурье согласно формуле:

$$\hat{Y}_{акт.к} = \sum_{j=1}^L Y_{акт.к} \cdot e^{-\frac{2\pi ijk}{L}}, \quad i = \sqrt{-1}, \quad j = 1, \dots, L, \quad k = 1, \dots, L. \quad (13)$$

Получив амплитудный и фазовый спектры исследуемого сигнала активности животного, находится максимум амплитудного спектра и соответствующие ему значения $T = t_{\text{max}}$, где $t_{\text{max}} \in [17, 25]$ (так как стадия охоты наступает в среднем на 21 день от начала лактации, то рассматриваем только часть спектра в промежутке [17, 25]). Границы интервала для нахождения амплитудного максимума характе-

ризуют допустимое отклонение от нормального периода между всплесками повышенной активности животного.

Соответствующая определенным параметрам функция будет задана следующим образом:

$$Y_{акт.}(t) = \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi(v_{max})\right), \quad (14)$$

где $\varphi(v_{max})$ – значение фазового спектра для частоты $v_{max} = \frac{1}{t_{max}}$.

Функция принимает максимальное значение в случае выполнения равенства:

$$\frac{2\pi}{T} \cdot t_{прогноз} + \varphi(v_{max}) = \frac{\pi}{2} + 2\pi p \quad (15)$$

Из которого получаем:

$$t_{прогноз} = \left(\frac{\pi}{2} + 2\pi p - \varphi(v_{max})\right) \cdot \frac{T}{2\pi}, \quad (16)$$

где $t_{прогноз} \geq t_{текущее}$, при минимальном p .

Предложенный метод позволяет выполнить прогноз следующего всплеска активности особи, учитывая индивидуальные особенности ее поведения.

В третьей главе проводится экспериментальное исследование разработанных методов. Осуществлен сравнительный анализ методов выделения признаков состояния животных с существующими и используемыми аналогами на современных животноводческих предприятиях.

Результаты исследования метода выделения признака и распознавания состояния мастита животного были получены в реальных производственных условиях. В исследовании обрабатывались данные, полученные для более чем 800 животных в течение 305 дней лактации с датчиков измерения параметров электропроводности и молочной продуктивности. В качестве аналога был выбран наиболее известный непрямой способ идентификации мастита животных, основанный на пороговых значениях признака электропроводности молока. Согласно принятым нормам здоровым считается вымя, для которого электропроводность молока составляет менее 5,5 мСм/см; подозрение на мастит возникает при электропроводности молока в пределах от 5,6 до 6,4 мСм/см; субклинический мастит наступает, как правило, при значении проводимости 6.5 мСм/см; клинический мастит диагностируется при значении электропроводности молока более 8 мСм/см, в этом случае животное нуждается в срочной медицинской помощи, а молоко не подлежит дальнейшей переработке.

Объективные количественные результаты экспериментальных исследований методов применительно к данным о ежедневной молочной продуктивности и электропроводности сведены в таблицы 2, 3. Примеры графиков признаков для идентификации мастита представлены на рис. 4. Результаты работы методов сопоставлены с выводами экспертов. Экспертные оценки, в соответствии с которыми животные считаются больными, являются на 100% достоверными, так как диагностика проводилась на поздней стадии развития болезни.

Результаты сравнительного анализа достоверности работы методов показали, что предложенный подход позволяет снизить ошибку первого рода на 6,5%,

что привело к увеличению количества верно найденных заболевших животных на 10 особей.

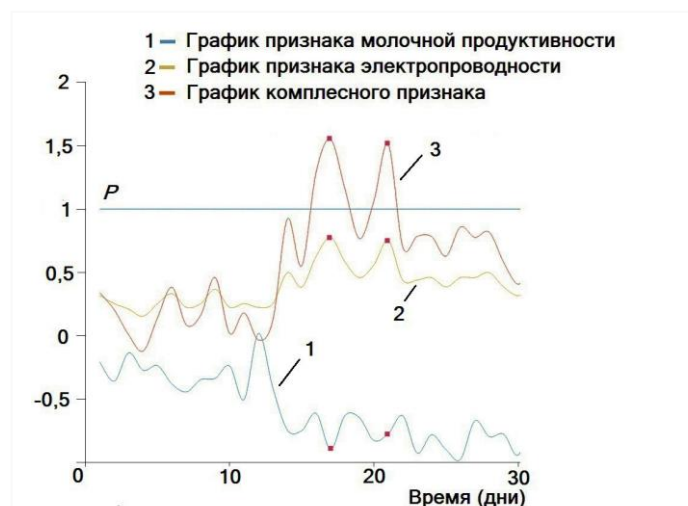


Рис. 4. Примеры графиков признаков для идентификации мастита (значения выделенного признака (1) превышают порог P и позволяет верно идентифицировать присутствие мастита. Значения признака, основанного на электропроводности (2), не превышают порог P и приводит к ложному заключению о том, что животное здорово.)

Ошибка второго рода сократилась на 3%. Таким образом, удалось достичь меньшего числа ошибочных срабатываний при идентификации, сигнализирующих о возникновении проблемы в состоянии животного.

Для экспериментального исследования метода прогнозирования наступления охоты особей были получены данные с 687 животных. Для каждого из них ежедневно регистрировалось значение среднесуточной активности. Измерения проводились в течение первых 128 дней лактации, когда степень возникновения повышенной нехарактерной активности животного максимальна. Результаты работы предложенного метода были сопоставлены экспертными данными (Рис. 5). Существующие современные системы также имеют возможность идентификации дней охоты животных, но из-за большой задержки поступления данных в базу решение

подобных систем уже не является актуальным. На рис. 5 визуально наблюдается отличие в результате работы предложенного метода и оценки зоотехника предприятия. Экспериментальное исследование показало, что эксперты предприятия верно идентифицируют охоту животных в 22% случаев. Разработанный метод прогнозирования наступления охоты животного дал более достоверное прогнозное значение всплесков активности, свидетельствующих о наступлении охоты у животного.

Табл. 2. Сопоставление выявления больных и здоровых животных методом, использующим порог электропроводности молока 6 мСм/см, по отношению к мнению эксперта (ветеринара)

Процент найденных с помощью метода животных	Животные, отнесенные экспертом:	
	к больным, %	к здоровым, %
больных	89,5	9
здоровых	10,5	91

Табл. 3. Сопоставление выявления больных и здоровых животных разработанным методом оценки состояния животного, по отношению к мнению эксперта (ветеринара)

Процент найденных с помощью метода животных	Животные, отнесенные экспертом:	
	к больным, %	к здоровым, %
больных	96	6
здоровых	4	94

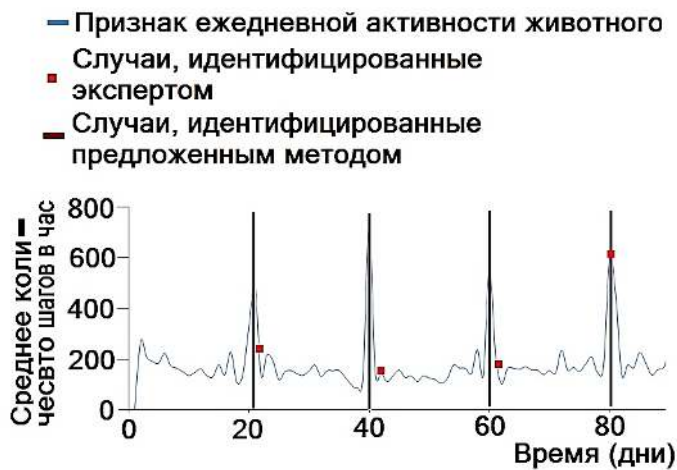


Рис. 5. Результаты сравнения прогнозирования охоты животных с помощью предложенного метода и ветеринаром предприятия

На рис. 5 представлены результаты сравнения прогнозирования охоты животных с помощью предложенного метода и ветеринаром предприятия. Достоверность идентификации охоты с помощью предложенного методом составила 65% (подсчитано на основании сравнения априорного вывода эксперта и результатов работы метода оценки состояния мастита для всего стада).

Выполнено исследование метода оценки состояний животных для идентификации затрудненного доения на основе агрегирования признаков молочной продуктивности и времени молокоотдачи

(согласно общей схеме преобразования данных и выделения признаков для идентификации состояний животных предприятия, приведенной на рис. 3.). Экспериментальное исследование метода показало практически полное совпадение работы метода с результатом оценки экспертов предприятия. Так, процентная разность между предложенной автоматической идентификацией и ручной экспертной составила: в случае с тугодойкостью - 0,5%, для недержания молока – 0,4%.

Выполнено исследование метода оценки состояний животных, для ежедневного мониторинга заболеваний обмена веществ у животного на основе анализа выделенного признака живой массы молокоотдачи (согласно общей схеме, приведенной на рис. 3.). По данным исследования, результаты идентификации заболеваний обмена веществ животного совпадает с экспертным диагнозом с разницей 0,24% при регистрации недовеса у животного; 0,06% для случаев обнаружения излишней массы животного.

В четвертой главе описываются: разработанная биотехническая система поддержки принятия решений о функциональном состоянии животных, основанная на программной реализации метода выделения признаков; исследование оперативности, разработанной системы.

Биотехническая система поддержки принятия решений о функциональном состоянии животных. В ходе проведения диссертационной работы на основе разработанных методов была реализована биотехническая система поддержки принятия решений о функциональном состоянии животных. Предложенная система была внедрена в производственный процесс животноводческого комплекса ООО «Борисоглебское». Место предложенных методов и разработанной на их основе биотехнической системы в структуре производственной деятельности предприятия представлено на рис. 6. Программная часть разработанной биотехнической системы представляет собой несколько модулей, последовательно преобразующих данные исходных признаков и позволяющая менеджеру стада (оператору) осуществлять управленческие воздействия.

Биотехническая система была разработана на основе использования среды программной разработки “MS Visual Studio 2010” и языка программирования С#. В качестве системы управления базой данных была использована MS SQL “Server 2008”. Операционной системой, поддерживающей стабильную работу предложенной биотехнической системы, является MS Windows 7 (и выше).

Оператор биотехнической системы поддержки принятия решений осуществляет управление стадом и принимает решения о процедурах индивидуального обслуживания каждого животного на основании данных о текущем их состоянии, представленных на экране мониторинга. Для изменения величины выборки идентифицируемых животных оператор имеет возможность изменять ряд параметров разработанных методов и алгоритмов в соответствии с загруженностью кадровых ресурсов предприятия.

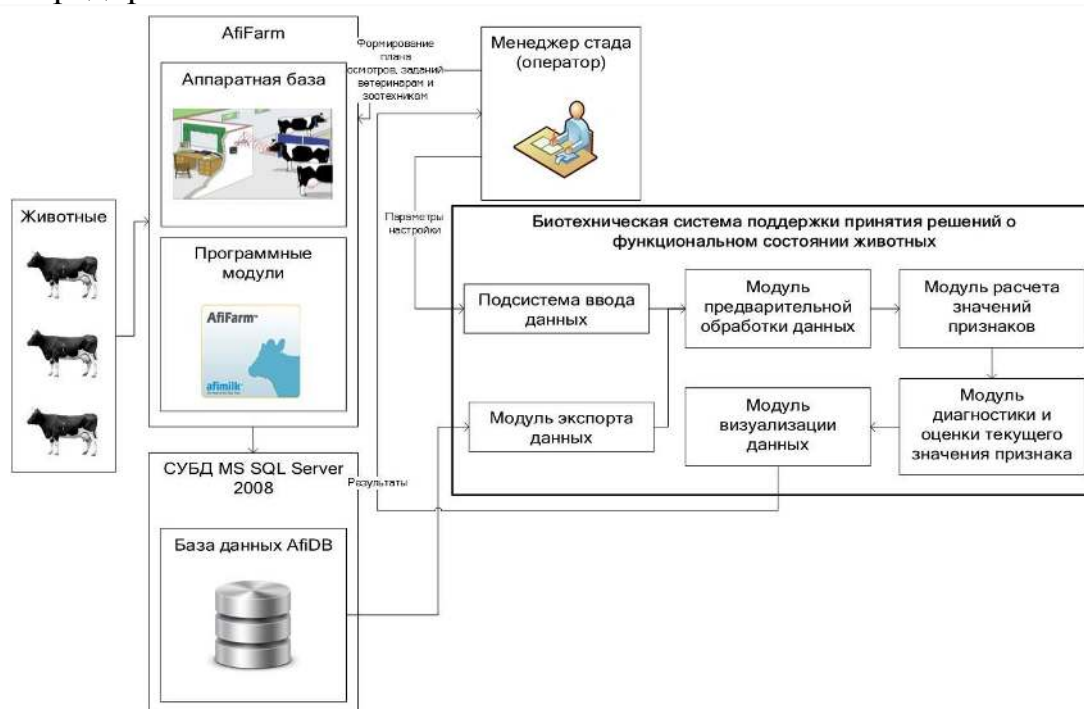


Рис. 6. Общая структурная схема биотехнической системы поддержки принятия решений о функциональном состоянии животных

Исследование оперативности биотехнической системы поддержки принятия решений о функциональном состоянии животных. Исследование практического применения биотехнической системы поддержки принятия решений о функциональном состоянии животных для решения задачи выявления мастита показало, что с использованием разработанной системы на основе экрана мониторинга удастся уменьшить среднее время обследования каждого животного стада с 3 минут до 25 секунд (таблица 4). При этом, для 1000 проверяемых животных значение доверительной вероятности было уставлено на уровне 97%.

Исследование практического применения биотехнической системы поддержки принятия решений о функциональном состоянии животных для решения задачи выявления тугодойкости / легкодойкости животного установило, что оперативность идентификации увеличилась с 12,5 минут для каждой особи до 7 секунд по всей совокупности животных предприятия. Достоверность идентификации затрудненного доения с помощью предложенной биотехнической системы состави-

ла 96% и сопоставима с достоверностью ручной идентификации – 98%. Значение доверительной вероятности было уставлено на уровне 91,5%.

Исследование практического применения биотехнической системы поддержки принятия решений о функциональном состоянии животных для решения задачи идентификации нарушений обмена веществ у животного позволило уменьшить время анализа данных с 3 минут в ручном режиме, до 5 секунд в автоматическом. Автоматическая идентификация позволила также повысить достоверность обнаружения нарушений, связанных с нехарактерным изменением веса животного, с 22% в режиме ручного осмотра до 90% в автоматическом. Результаты сопоставления оперативности работы ручных методов, существующих биотехнических систем и разработанной системы сведены в таблицу 4.

Табл. 4. Сопоставление оперативности работы ручных методов, существующих биотехнических систем и разработанной системы.

Способы идентификации / Идентифицируемые состояния	Ручная идентификация	С помощью существующих автоматизированных биотехнических систем (Delaval, Westfalia, Afifarm)	С помощью разработанной биотехнической системы
Мастит	от 3 до 5 мин.	от 2 до 4 мин.	до 25 с
Охота	до 7 час.	от 30 мин. до 1 час.	до 45 мин.
Перепады живой массы	3 мин.	от 1 до 2 мин.	до 5 с
Тугодойкость / легкодойкость	12,5 мин.	от 2 до 7 мин.	до 5 с
Пониженная молокоотдача	6,5 час.	от 3 до 5 мин.	до 7 с
Пониженная двигательная активность	6,5 час.	от 6 до 8 мин.	до 4 мин.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена решению научно-технической задачи повышения оперативности и достоверности мониторинга состояний животных на основе применения методов выделения признаков и агрегирования данных с сенсоров.

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Выполнен анализ технологического процесса животноводческого предприятия и средств компьютеризации мониторинга и процесса управления функциональным состоянием животных дойного стада. Анализ показал необходимость разработки новых методов и алгоритмов, позволяющих обеспечить качественный мониторинг для диагностики и прогнозирования функционального состояния животных в дойном стаде на фермерских предприятиях.

2. Построена математическая модель формирования сигналов с датчиков биологической информации, поступающей от животных, позволяющая получить значения ряда параметров, характеризующий данные сигналы.

3. Разработан метод преобразования временных рядов с датчиков биологической информации, отличающийся использованием z-нормализации и временного сдвига данных и позволяющий обнаруживать выбросы во временных рядах, аппроксимируемых функцией Вейбулла.

4. Предложен метод оценки функциональных состояний животных, отличающийся использованием разработанного метода преобразования временных рядов с датчиков биологической информации и агрегирования выделенных признаков, обеспечивающий достоверную и оперативную идентификацию состояний животных.

5. Разработан метод и его реализация для прогнозирования наступления охоты животного на основе анализа спектра Фурье сигнала с датчиков активности, обеспечивающий достоверное планирование перехода особи в состояние охоты.

6. На основе данных, полученных в производственных условиях, установлено, что метод выделения признаков и распознавания состояния мастита животных позволил увеличить достоверность идентификации на 6% за счет уменьшения ошибок первого и второго рода по сравнению с существующими методами.

7. На основе анализа результатов работы метода прогнозирования наступления охоты животного в производственных условиях зарегистрировано повышение достоверности нахождения повышенной активности животных с 22% до 65%.

8. Разработана биотехническая система поддержки принятия решений о функциональном состоянии животных на предприятии. Система внедрена на предприятие г. Муром ООО “Борисоглебское”, г. Саров ООО “Агровизор”. Биотехническая система позволила увеличить оперативность идентификации мастита с 3 минут до 7 секунд (по каждой особи).

Рекомендации. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при построении биотехнических систем для диагностики и прогнозирования функционального состояния животных в дойном стаде на предприятиях, ориентированных на мясо-молочное производство, и на фермах селекционной направленности.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Создание систем поддержки принятия решений для диагностики и прогнозирования функционального состояния животных в дойном стаде на предприятиях различного типа.

В приложении приведены: копии актов о внедрении и копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях перечня ВАК

1. Антонов Л.В. Разработка адаптивного алгоритма отслеживания отклонений параметров животных в системе управления животноводческим предприятием [Текст] / Л.В. Антонов, А.Д. Варламов, А.А. Орлов А.А. // Динамика сложных систем. – 2015. – №2. – С. 44-49.

2. Орлов А.А. Разработка и экспериментальное исследование алгоритма мониторинга ежедневной активности животного для автоматизированной системы управления молочным хозяйством [Текст] / А.А. Орлов, Л.В. Антонов, К.В. Макаров // Вестник ЧГУ. – 2015. – №8. – С. 19-21.

3. **Антонов Л.В.** Разработка и апробация алгоритмов выделения комплексных показателей состояния здоровья вымени животных на основе анализа данных с сенсоров предприятия молочного животноводства [Текст] // Вестник ЧГУ. – 2017. – №1. – С. 19-21.

4. **Антонов Л.В.** Разработка алгоритма идентификации скрытого мастита коров на основе комплексирования данных с датчиков на животноводческом предприятии [Электронный ресурс] // АгроЭкоИнфо. – 2016. – №2. – Режим доступа: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/СТАТУИ/2016/2/st_210.doc.

5. Антонов Л.В. Разработка алгоритмов автоматической идентификации состояний животных на основе комплексирования данных с датчиков на предприятиях молочного животноводства [Текст] / Л.В. Антонов, А.Д. Варламов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – №1. – С. 19-21

6. Орлов А.А. Обзор и анализ современных информационных решений автоматизации животноводческих хозяйств [Электронный ресурс] / А.А. Орлов, **Л.В. Антонов** // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – Режим доступа: www.science-education.ru/pdf/2013/6/242.pdf.

7. **Антонов Л.В.** Автоматизация процесса мониторинга животноводческого предприятия на основе исследования временных рядов параметров крупного рогатого скота [Электронный ресурс] / **Л.В. Антонов**, А.Д. Варламов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – Режим доступа: www.science-education.ru/pdf/2013/6/221.pdf.

Публикации в других изданиях.

8. **Antonov L.V.** Development and experimental research on production data analysis algorithm in livestock enterprises [Текст] / **L.V. Antonov**, K.V. Makarov, A.A. Orlov. Procedia Engineering (ICIE-2015): Proceedings of International Conference of Industrial Engineering (22-23 October 2015, Chelyabinsk, Russia). – Netherlands: Elsevier, 2015. - Vol.129. – Pp. 664-669.

9. **Antonov L.** Development and experimental research of data analysis algorithm of animal's daily activities in automated information management system for livestock enterprises [Текст] / **L. Antonov**, D. Privezentsev, A. Orlov. Proceedings of International Conference on “Stability and Control Processes” in Memory of V.I. Zubov (SCP 2015), St. Petersburg, 2015, – Pp. 510-512.

10. **Antonov L.** Developing an Algorithm for Identifying Bovine Latent Mastitis Based on Data Complexing from Livestock Enterprise Sensors [Текст] / **L.V. Antonov**, A.A. Orlov. Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Optoelectronic Equipment and Devices in Systems of Pattern Recognition, Image and Symbol Information Processing, Kursk, 2017, – Pp. 8-16.

11. **Antonov L.** Identification of the main parameters for animal performance assessment in decision support system of a livestock enterprise [Текст] / **L. Antonov**, D. Privezentsev, A. Orlov. Proceedings of International Conference on “Stability and Control Processes” in Memory of V.I. Zubov (SCP 2015), St. Petersburg, 2015, – Pp. 508-509.

12. **Антонов Л.В.** Применение факторного и корреляционного анализа данных для выделения существенных факторов оценки состояния животных для интеллектуальной системы управления животноводческим предприятием / **Л.В. Антонов**, А.А. Орлов [Текст] // СВЧ-техника и телекоммуникационные С255

технологии (КрыМиКо'2015): материалы 25-ой Международная Крымская конференция. – Севастополь, 2015. – Т. 1. – С. 309-311.

13. **Антонов Л.В.** Разработка адаптивного алгоритма отслеживания критических изменений параметров животных в информационной системе управления животноводческим предприятием [Текст] // СВЧ-техника и телекоммуникационные С255 технологии (КрыМиКо'2015): материалы 25-ой Международная Крымская конференция. – Севастополь, 2015. – Т. 1. – С. 411-413.

14. **Антонов Л.В.** Разработка метода отслеживания внеплановых всплесков значений производственных характеристик в условиях животноводческого производства [Электронный ресурс] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – №10. - Режим доступа: <http://research-journal.org/wp-content/uploads/2014/11/10-2-29.pdf>.

15. **Антонов Л.В.** Алгоритм мониторинга критических изменений параметров производственного процесса животноводческого предприятия [Электронный ресурс] // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2014. – № 29. – С. 3-12. – Режим доступа: files.amisod.ru/mediacontent/vipuski/2014/4/amisod-2014-04-29-antonov.pdf.

16. **Антонов Л.В.** Использование метрик при интеллектуальном мониторинге состояний крупного рогатого скота [Электронный ресурс] / **Л.В. Антонов, А.Д. Варламов** // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2015. – №4. – С. 3-9. – Режим доступа: <http://files.amisod.ru/mediacontent/vipuski/2015/4/amisod-2015-04-33-antonov-varlamov.pdf>

17. **Антонов Л.В.** Разработка автоматического алгоритма мониторинга мастита коров на основе обработки данных с сенсоров молочного предприятия / **Л.В. Антонов, А.А. Орлов** [Текст] // Распознавание – 2017: материалы 8-ой научно-технической конференции. – Курск, 2017. – С. 48-50.

СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ

18. **Антонов Л.В.** Программа отслеживания отклонений параметров животных в системе управления животноводческим предприятием/ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2015 №2015662264 от 19.10.2015.

19. **Антонов Л.В.** Информационно-аналитическая система селекционирования крупного рогатого скота / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2015 №2015662345 от 20.10.2015.