

Раздел 3. Инженерное обеспечение

УДК 697.1

НАУЧНО-ОБОСНОВАННЫЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ ПО ОПТИМИЗАЦИИ МИКРОКЛИМАТА В ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПОМЕЩЕНИЯХ НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРООБОГРЕВА ПОЛА С РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭНЕРГОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

Топорен С.С., Федюшко Ю.М.

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского. Институт «Академия строительства и архитектуры»
295493, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 181.
E-mail: toporen1987@gmail.com; fedushko26@rambler.ru

Аннотация. Научное обоснование и разработка инженерных решений по применению многоуровневой системы электрообогрева пола (МСЭОП) для оптимизации микроклимата в животноводческих помещениях, обеспечивающих энергосбережение и повышение продуктивности животных.

Предмет исследования: предметом исследования является разработка и научное обоснование энергоэффективной многоуровневой системы электрообогрева пола для животноводческих помещений, обеспечивающей оптимизацию микроклимата и повышение продуктивности животных за счёт автоматизированного управления тепловыми режимами.

Материалы и методы: в основе исследования лежит математическое моделирование процессов теплопередачи в многослойной структуре ограждающей конструкции с дискретными источниками энергии. Для анализа режимов работы системы и управления энергопотоками применялись методы теории автоматического регулирования, включая построение передаточных функций и анализ устойчивости системы по критерию Найквиста.

Результаты: предложена конструкция и математическая модель многоуровневой системы электрообогрева пола, позволяющая за счет перераспределения мощности между тремя ярусами нагревательных элементов обеспечивать заданный температурный режим на поверхности пола. Доказана устойчивость системы автоматического регулирования.

Выводы: инженерно-технологические решения являются научно обоснованными и эффективными для внедрения в современное строительство и реконструкцию животноводческих комплексов. Использование многоуровневой системы электрообогрева пола позволяет снизить удельное энергопотребление на 25-30% по сравнению с системами общего обогрева, а также поддерживать нормативы температуры в зоне технологической активности, что в конечном итоге повышает экономическую эффективность производства продукции животноводства.

Ключевые слова: микроклимат, электрообогрев пола, многоуровневая система отопления, математическое моделирование оптимизация параметров.

ВВЕДЕНИЕ

Современное животноводство как отрасль сельскохозяйственного производства представляет собой энергоёмкий сектор экономики, играющий ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности. Одной из наиболее актуальных проблем при промышленном содержании животных является создание и поддержание оптимального микроклимата в помещениях, особенно в зонах размещения молодняка.

Традиционные системы общего отопления и вентиляции часто являются затратными и не всегда способны обеспечить требуемые зоотехнические и зооветеринарные параметры, что приводит к повышенной заболеваемости, снижению продуктивности и значительным экономическим потерям. Снизить затраты энергии на создание температурно-влажностного режима и создать оптимальные условия для молодняка можно за счет применения местного обогрева животных.

Сравнение общих технических характеристик и эксплуатационных затрат различных систем обеспечения микроклимата с учетом перспективы их усовершенствования приводит к выводу об эффективности внедрения установок с электрическим обогревом полов, которые работают

в период спада электрической нагрузки энергосистем.

В связи с этим разработка энергоэффективных и высокоточных систем локального обогрева, в частности, с использованием электрообогрева пола, является своевременной и значимой задачей.

Данное исследование направлено на решение этой проблемы путем разработки и теоретического обоснования инженерных решений для оптимизации микроклимата [1-4].

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Анализ литературных источников показывает, что проблема отрицательного воздействия неоптимального микроклимата на продуктивное здоровье животных, в частности теплового стресса, изучена достаточно глубоко.

Работы таких ученых, как Г. Селье [1], заложили основы понимания физиологических последствий стресса. Установлено, что нарушения температурно-влажностного режима приводят к угнетению ферментативной активности, снижению усвояемости питательных веществ и подавлению иммунитета.

В области инженерного обеспечения микроклимата существуют разработки,

посвященные системам вентиляции и общего отопления. Однако вопросы, связанные с многопараметрическим моделированием и оптимизацией работы систем электрообогрева пола, изучены недостаточно.

Работы П. Г. Круковского, Д. И. Розинского и других авторов [2,3], заложили основы компьютерного моделирования теплового состояния полов, но задача создания комплексной системы, интегрирующей традиционные и возобновляемые источники энергии с алгоритмами адаптивного управления, требует дальнейших исследований.

Существующие решения часто не учитывают необходимость динамического перераспределения энергопотоков для аккумулирования тепла и минимизации затрат.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для увлажнения и снижения температуры воздуха животноводческих и птицеводческих помещений используют увлажнители, входящие в состав вентиляционного оборудования, или отдельное оборудование увлажнения.

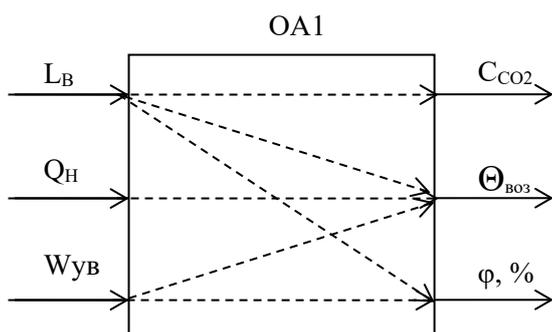


Рис. 1. Структурная схема объекта регулирования микроклимата: L_B - вентиляция; Q_H - обогрев; $W_{ув}$ - увлажнение; C_{CO_2} - концентрация CO_2 ; $\Theta_{воз}$ - температура воздуха в помещении; $\phi, \%$ - влажность воздуха в помещении

Fig. 1. Structural diagram of the microclimate regulation facility: L_B - ventilation; Q_H - heating; $W_{ув}$ - humidification; C_{CO_2} - CO_2 concentration; $\Theta_{воз}$ - indoor air temperature; $\phi, \%$ - indoor air humidity.

В вентиляционных системах, работающих по принципу избыточного давления воздуха, свежий воздух подается в помещение под давлением. Воздух из помещения удаляется через вентиляционные отверстия в стенах или по вытяжным каналам, расположенным под полом. В комбинированной вентиляционной системе воздух оттягивается и под давлением подается в помещение [4]. Системы общего отопления даже при высоких затратах энергии не всегда способны обеспечить надлежащие параметры микроклимата, особенно при содержании в одном помещении взрослых животных и молодняка, для которых по зоотехническим требованиям необходимы

различные условия места существования (температура, влажность и т. д.).

Структурная схема объекта регулирования микроклимата приведена на рис. 1.

Эту проблему можно решить, применяя устройства местного (локального) электрообогрева, которые обычно дополняют систему общего отопления. Местный электрообогрев используют главным образом для молодняка животных и птиц, но его можно применять и для взрослых животных, а также для обеспечения нормальной производственной деятельности людей.

Исходя из проведенного анализа, только при применении регулирования температуры за счет обогрева пола появляется возможность достаточно эффективно реализовать основную цель энергоменеджмента: минимизации удельного потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в расчете на единицу продукции, которое определяется из выражения:

$$P = \frac{E}{\Pi} \quad (1)$$

где P - объем производства;

E - потребление топливно-энергетических ресурсов на единицу продукции;

Π - удельные затраты топливно-энергетических ресурсов в расчете на единицу продукции.

Из-за многопараметричности проблем электроотопления, сложности получения решения таких задач в аналитическом виде, трудоемкости и дороговизны экспериментальных исследований отсутствует необходимый объем данных о названных системах обогрева, даже для случая стационарного режима.

Построение электротехнологических комплексов, которые бы обеспечивали стандарты теплового режима микроклимата производственных сооружений, связано с проблемой создания и поддержания оптимально стимулирующего влияния теплового режима микроклимата на биообъекты в течение производственного цикла в технологически активных зонах (ТАЗ) с учетом внутренних факторов, вида и типа животных или птиц и внешних метеорологических условий [5,11]. Эффективное решение указанной проблемы может быть за счет использования предложенной многоуровневой электротеплоаккумуляционной системы отопления (МЭТАСО). Применение такой системы предоставляет возможность не только заметно улучшить эффективность использования электроэнергии в режиме автономного отопления, но и позволяет эффективно функционировать в режиме комбинированного использования имеющегося потенциала мощностей традиционных и нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (НВИЭ). МЭТАСО не только обеспечивает нормативные тепловые режимы обогреваемого пола и воздуха в ТАЗ производственного сооружения АПК, но и обеспечивает регулируемое аккумулирование «излишка» энергии того или

инного источника, работая как «потребитель-регулятор». Одним из путей решения этой проблемы является применение специального электротехнологического комплекса на базе многоуровневой электротепло-аккумулирующей локальной системы отопления. В её состав входит ряд систем, которые обрабатывают вычислительно-логические алгоритмы и программы для определения структурно-функциональной суперпозиции полученных эмпирических формул, моделирующих связи между стандартами нагрева участков пола и энергокомпонентами,

обеспечивающими минимальные отклонения термостабилизации от заданных уровней. Прогнозирование теплового состояния, контроль и регулируемый обогрев помещений объектов АПК с МЭТАСО должно быть эффективно реализовано при одновременном использовании традиционных источников энергии и НВИЭ. Конструкция МЭТАСО, представляющая собой прямоугольную N - слойную, ограниченную по ширине область с пассивными и активными (с подводом энергии) слоями (рис. 2).

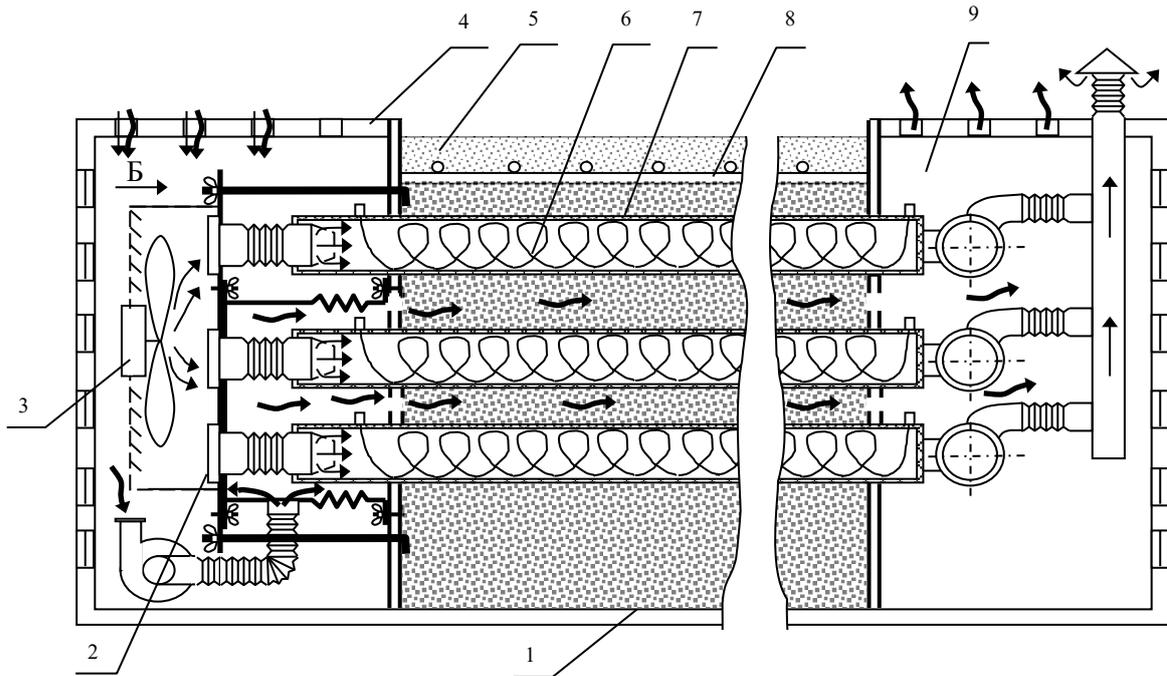


Рис. 2. Схематический вид конструкции комбинированного унифицированного трехъярусного устройства для обогрева пола: 1 - теплоизоляционная подушка; 2 - специальные трубчатые электронагреватели; 3 - вентилятор низкого давления; 4 - входной монтажный колодец; 5 - поверхность пола; 6 - нагревательный элемент; 7 - трубчатый электронагреватель; 8 - экранная сетка; 9-выходной монтажный колодец

Fig. 2. Schematic view of the design of a combined unified three-tier floor heating device: 1 - thermal insulation cushion; 2 - special tubular electric heaters; 3 - low-pressure fan; 4 - inlet mounting well; 5 - floor surface; 6 - heating element; 7 - tubular electric heater; 8 - screen grid; 9-outlet mounting well

Исходя из определенных физических обоснований относительно характера теплообмена на граничных поверхностях, приведена модель тепловых процессов в такой структуре с дискретным подводом энергопотоков. Исследование режимов перераспределения энергопотоков рассмотрим на модели МЭТАСО с тремя ярусами специальных трубчатых электронагревателей (СТЭН), размещенных по глубине траншеи в многослойной структуре теплоаккумулирующего наполнителя, при питании их от традиционного источника – электросети (Рс) и от любого НВИЭ (Ри).

Анализ такой нагревательной системы достаточно подробно представлен в [6 - 9], где установлены математически точные линейные соотношения между температурными характеристиками системы и мощностными

параметрами энергопотоков в нагревательной системе (НС). За счет этого получены точные обратные соотношения, которые позволяют установить для заданной слоистой активной структуры зависимости требуемого распределения мощностей от определенного набора температурных параметров. Это позволяет определить такие перераспределения питания по ярусам НС, которые обеспечивают нормативно заданные температурные режимы поверхности пола в ТАЗ производственного сооружения. В соответствии с решением задачи о теплопередаче в многослойной одномерной структуре МЭТАСО с распределенными источниками энергии, температура нагрева поверхности пола t_n , является линейной функцией мощностей, распределенных по ярусам, и для 3-ярусной модели МЭТАСО определяется по выражению:

$$t_n = t^* + \sum_{j=1}^3 k_j P_j \quad (2)$$

где P_j – значения мощностей энергопотоков на входе нагревательных элементов 1 - го, 2 - го и 3 - го ярусов МЭТАСО.

Суммарная мощность энергопотоков на входе нагревательных элементов равна мощности всех имеющихся источников в соответствии с выражением:

$$P = P_C + P_{II}, \quad \sum_{j=1}^3 P_j = P \quad (3)$$

где $t^* = a_0 t_0 + a_c t_c$ – приведенное значение температуры внешней среды, которое, в данной модели, определяется температурой воздуха помещения t_c , в непосредственной близости от поверхности пола и температурой грунта t_0 , на глубине дна траншеи МЭТАСО;

a_0, a_c, k_j – параметры, которые определяются геометрическими размерами обогревательных секций МЭТАСО, а именно толщиной слоев структуры и их теплофизическими характеристиками.

Следует отметить, что температура t_c , определяется многими параметрами помещения (зависит от ограждающих конструкций, вентиляции, заполнения животными, работающим оборудованием и т.д.).

Уравнение (2) отражает принцип суперпозиции относительно внутренних источников энергии и внешнего окружения МЭТАСО как следствие линейности принятой модели. Наличие в системе 2-го и 3-го ярусов электронагревателей (по глубине траншеи) позволяет за счет перераспределения подведенной энергии не только реализовать обеспечение заданного теплового режима поверхности пола в течение производственного цикла, но и осуществлять экономию энергоресурсов за счет регулируемого аккумулирования части энергии во внутренних слоях НС.

В процессе исследования было рассмотрено несколько вариантов распределения входных энергопотоков в МЭТАСО, но выбор, с позиции наиболее эффективного режима энергосбережения, рассматривался, когда ближний к поверхности пола, ярус блока электронагревателей НС, должен первым получать технологически необходимый уровень потребляемой энергии, а после этого имеющийся излишек перераспределяется на следующий нижний ярус.

Таким образом, в зависимости от функционального назначения производственного сооружения, соответственно для каждого

технологически заданного (нормативного) значения температуры на поверхности его пола $t_n = t_n^H$ и с учетом внешних условий (t_0, t_c, α) и величины имеющегося энергоресурса P , оптимальное распределение энергии по трем ярусам нагревателей P_1, P_2, P_3 может быть выполнено предложенным методом. Следует также заметить, что в случае роста величины энергии, которая будет поступать от НВИЭ, потребление энергии от основного источника (электросети) предполагается уменьшать. При изменении величины P система структурно-функционального управления предполагает такое перераспределение энергопотоков по ярусам, чтобы не нарушить термостабилизацию теплового режима (в определенных пределах) на поверхности пола.

Полученную информацию можно использовать при числовом анализе температурного распределения в помещении на основе решения общей трехмерной математической модели, однако получаемые таким путем объемы численной дискретной информации очень велики, равно как и требования к вычислительным характеристикам компьютеров.

В этом случае наиболее приемлемый подход заключается в распараллеливании дискретной выходной информации от датчиков КВС по дифференцированным параметрам, что приводит к распараллеливанию решения общей трехмерной математической модели на решение групп однотипных одномерных задач без нарушения адекватности получаемой такой заменой модели теплового процесса реального трехмерного объекта.

Учитывая зависимость регулируемых параметров микроклимата, при управлении отопительным и вентиляционным оборудованием используют: двух-, трехпозиционные релейные регуляторы температуры с биметаллическими, манометрическими датчиками и терморезисторами, реже непрерывные и импульсные регуляторы температуры, а при управлении увлажнением используют двухпозиционные регуляторы влажности с гигроскопическими и гисторическими датчиками [6,12,13].

Автоматизация систем микроклимата позволяет создавать и поддерживать оптимальные условия воздушной среды в животноводческих и птицеводческих помещениях. Расчеты показывают, что использование даже простейших устройств поддержания температурных режимов позволяет экономить до 30% электроэнергии.

Функциональная схема системы автоматизация систем микроклимата приведена на рис. 3.

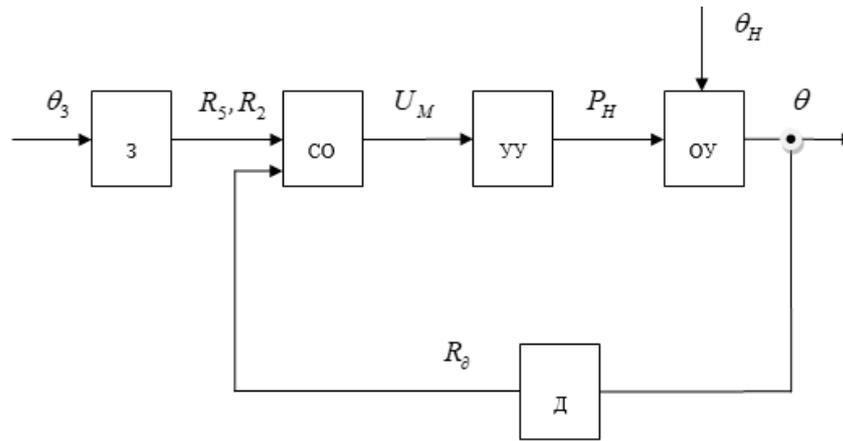


Рис. 3. Функциональная схема САР температуры в животноводческом помещении : З – задатчик СО – сравнивающий орган; УУ – усилительное устройство; ОУ – орган управления; Д – первичный преобразователь (датчик)
Fig. 3. Functional diagram of the temperature control system in a livestock room : З – setter, СО – comparing body; УУ – amplifying device; ОУ – control body; Д – primary converter (sensor)

В установившемся режиме при равенстве температуры в помещении с заданным значением температуры мост, СО, сбалансирован и его выходное напряжение равно 0. При отклонении температуры воздуха от заданного, например, благодаря изменению внешней температуры, сопротивление датчика изменяется, мост разбалансируется. Напряжение разбаланса моста является сигналом возникновения ошибки системы, усиливается усилителем и подается на нагревательные элементы. Электронагреватели пола начинают работать, тем самым изменяя степень величины ошибки. При снижении температуры нагревательные элементы повышают мощность, при повышении – уменьшают. В системе реализован принцип управления по отклонению (по значению ошибки). Система является стабилизирующей.

Передаточные функции элементов структурной схемы САР температуры в животноводстве, как

объекта управления, является уравнение аperiodического звена второго порядка

$$T_1 \cdot T_2 \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} + (T_1 + T_2) \cdot \frac{d\theta}{dt} + \theta = K_1 \cdot P_H + K_2 \cdot \theta_H, \quad (4)$$

где θ_H - температура внешнего воздуха, °С;
 θ - температура воздуха в помещении, °С;
 P_H - электрическая мощность, подаваемая на электрокалорифер, кВт

Задатчик системы является безынерционным. Его коэффициент передачи K_3 должен быть равен коэффициенту передачи K_d датчика. Заданная θ_3 и действительная θ температуры должны быть в одном масштабе.

Конечный вид структурной схемы САР температуры воздуха в животноводческом помещении будет иметь вид (рис. 4):

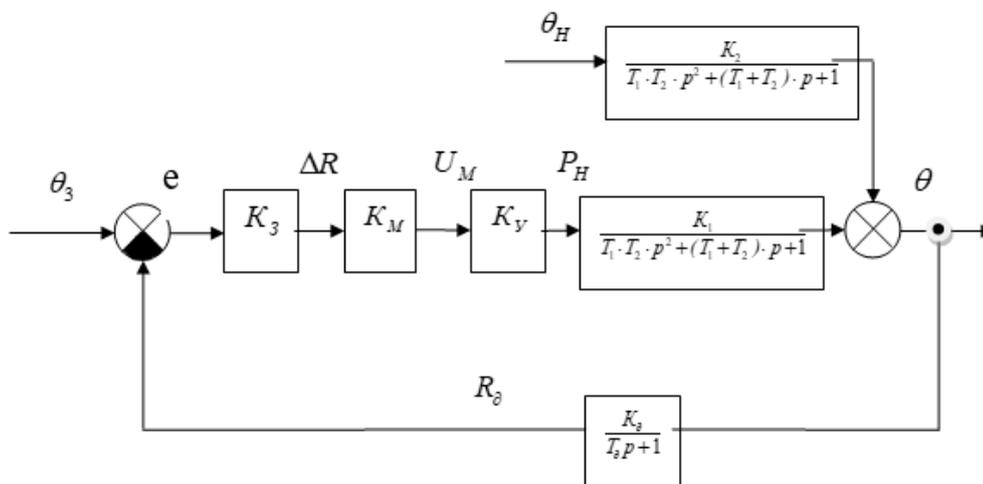


Рис. 4. Структурная схема САР температуры воздуха в животноводческом помещении

Fig. 4. Block diagram of the SAR of air temperature in a livestock room.

После подстановки численных значений параметров и некоторых преобразований получим:

$$W_p(p) = \frac{\theta(p)}{\theta_s(p)} = \frac{0,2 \cdot 0,1 \cdot 400 \cdot 1 \cdot (12p+1)}{(16500p^2 + 533p+1) \cdot (12p+1) + 0,2 \cdot 0,1 \cdot 400 \cdot 1} = \frac{96p+8}{198000p^3 + 22896p^2 + 545p+9}; \quad (5)$$

Для анализа устойчивости воспользуемся условиями устойчивости для уравнения четвертой степени. Все коэффициенты характеристического уравнения положительны. Полученный результат показывает, что система устойчива. Анализ устойчивости выполняли по критерию Найквиста, который основан на использовании амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ) разомкнутой системы. Формально частотную передаточную функцию можно найти заменой переменной p на переменную $j\omega$. Разомкнем систему.

Передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$W_p(p) = \frac{K_o \cdot K_u \cdot K_y \cdot K_1}{(T_1 \cdot T_2 \cdot p^2 + (T_1 + T_2) \cdot p + 1) \cdot (T_o \cdot p + 1)}. \quad (6)$$

Все звенья разомкнутой системы устойчивы, поскольку три звена имеют третий порядок, их характеристические коэффициенты положительны.

АФЧХ разомкнутой системы (рис. 5), получена путем расчета значений $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$, где $A(\omega)$ - модуль частотной передаточной функции, $\varphi(\omega)$ - аргумент частотной передаточной функции в пакете компьютерной математики MATHCAD.

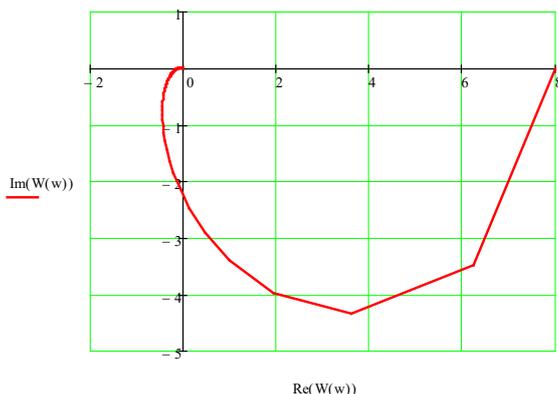


Рис. 5. Амплитудно - фазово частотная характеристика разомкнутой системы

Fig. 5. Amplitude- phase-frequency response of an open system

Анализ АФЧХ (по критерию Найквиста) показывает, что система устойчива, потому что АФЧХ разомкнутой системы не охватывает отрезок $(-\infty; -1)$, то есть не охватывает критическую точку $(-1; j0)$.

Управляющим воздействием на объект является степень смешивания холодного и регулирующего воздуха, число перерегулирований $N = 1$, что

удовлетворяет требованиям и свидетельствует о достаточном запасе устойчивости. Время регулирования 341 с, максимальное отклонение регулируемой величины от ее установившегося режима, приходящееся на единицу ступенчатого возмущения, равно $14 \cdot 10^{-3}$, колебательность системы равна 0,083. Качество системы следует считать удовлетворительным.

ВЫВОДЫ

На основании проведенного исследования можно сделать следующие общие выводы:

Разработана и научно обоснована конструкция многоуровневой электротеплоаккумулирующей системы отопления (МЭТАСО) для локального обогрева пола в животноводческих помещениях. Ключевым отличием является возможность перераспределения мощности между тремя ярусами нагревательных элементов, что позволяет не только поддерживать заданный температурный режим на поверхности, но и аккумулировать излишки тепла в нижних слоях.

Теоретические расчеты и математическое моделирование подтверждают, что применение МЭТАСО позволяет снизить удельное энергопотребление на 25–30% по сравнению с традиционными системами общего обогрева за счет целевого подвода энергии и использования режима теплоаккумуляции.

Методами теории автоматического регулирования доказана устойчивость разработанной системы автоматического регулирования температуры. Анализ по критерию Найквиста показал, что система обладает удовлетворительным качеством переходных процессов и достаточным запасом устойчивости для практической реализации.

Внедрение МЭТАСО обеспечивает поддержание зоотехнических нормативов микроклимата в зонах технологической активности, что снижает стрессовую нагрузку на животных и способствует повышению их продуктивности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селье Г. Стресс без дистресса / Г. Селье. – М.: Прогресс, 1979. – 123 с.
2. Круковский П.Г. Оптимизация теплового режима многослойных ограждающих конструкций с распределенными источниками теплоты // Вестник Белорусской госуд. сельскохозяйственной академии / П.Г. Круковский. - 2016. - № 3. - С. 115 - 120.
3. Розинский Д.И. Совершенствование систем микроклимата на основе локального обогрева технологических зон // Зоотехническая наука Беларуси / Д.И. Розинский. - 2017. - Т. 52, № 1. - С. 121–130.
4. Розинский Д.И. Влияние параметров микроклимата, создаваемого системами локального обогрева, на физиологическое состояние молодняка сельскохозяйственных животных // Ветеринарная

медицина и животноводство: сб. науч. тр. / Д.И. Розинский, А.С. Дмитриченко. – Витебск: - 2021. - С. 74–78.

5. Беляев В.И. Микроклимат животноводческих помещений / В.И. Беляев. – СПб.: Лань, 2017. – 288 с.

6. Иванов П.П. Теория автоматического регулирования: учебник для вузов / П.П. Иванов. – М.: Высшая школа, 2018. – 432 с.

7. Тихомиров Д.А. Теплотехнический расчет ограждающих конструкций / Д.А. Тихомиров. – М.: АСВ, 2016. – 248 с.

8. Волков А.А. Автоматизация систем микроклимата сельскохозяйственных объектов // Механизация и электрификация сельского хозяйства / А.А. Волков. – 2020. – № 5. – С. 29–32.

9. Шалимов М.Г. Математическое моделирование тепловых процессов: монография / М.Г. Шалимов. – К.: Наукова думка, 2017. – 183 с.

10. Paton B. The use of underfloor heating for piglets: energy consumption and animal behavior // Biosystems Engineering / B. Paton, J. Frost. – 2020. – Vol. 198. – P. 119-129.

11. Besharat M. Energy efficiency and automation in livestock farming // Smart Agricultural Technology / M. Besharat, H. Ahamed. – 2022. – Vol. 3. – P. 100-108.

12. Zhang, Q. A review on heating technologies for floor-localized heating system in swine buildings // Computers and Electronics in Agriculture / Q. Zhang, G. Zhang. – 2022. – Vol. 194. – P. 106-115.

REFERENCES

1. Selye, H. (1979). Stress without distress (G. Selye, Trans.). Progress. (Original work published in Russian; 123 pp.)

2. Krukovskii, P. G. (2016). Optimization of the thermal regime of multilayer enclosing structures with distributed heat sources. Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy, (3), 115–120.

3. Rozinskii, D. I. (2017). Improvement of microclimate systems based on localized heating of technological zones. Zootechnical Science of Belarus, 52(1), 121–130.

4. Rozinskii, D. I., & Dmitriichenko, A. S. (2021). Influence of microclimate parameters generated by localized heating systems on the physiological status of young livestock. In Veterinary Medicine and Animal Husbandry: Collection of Scientific Papers (pp. 74–78). Vitebsk.

5. Beliaev, V. I. (2017). Microclimate in livestock buildings (V. I. Beliaev). Lan'. (288 pp.)

6. Ivanov, P. P. (2018). Theory of automatic regulation: A textbook for higher education institutions (P. P. Ivanov). Vysshaya Shkola. (432 pp.)

7. Tikhomirov, D. A. (2016). Thermal calculation of enclosing structures (D. A. Tikhomirov). ASV. (248 pp.)

8. Volkov, A. A. (2020). Automation of microclimate systems in agricultural facilities. Mechanization and Electrification of Agriculture, (5), 29–32.

9. Shalimov, M. G. (2017). Mathematical modeling of thermal processes (M. G. Shalimov). Naukova Dumka. (183 pp.)

10. Paton B. The use of underfloor heating for piglets: energy consumption and animal behavior // Biosystems Engineering / B. Paton, J. Frost. – 2020. – Vol. 198. – P. 119-129.

11. Besharat M. Energy efficiency and automation in livestock farming // Smart Agricultural Technology / M. Besharat, H. Ahamed. – 2022. – Vol. 3. – P. 100-108.

12. Zhang, Q. A review on heating technologies for floor-localized heating system in swine buildings // Computers and Electronics in Agriculture / Q. Zhang, G. Zhang. – 2022. – Vol. 194. – P. 106-115.

SCIENTIFICALLY BASED ENGINEERING SOLUTIONS FOR OPTIMIZING THE
MICROCLIMATE IN LIVESTOCK FACILITIES BASED ON A MULTI-LEVEL ELECTRIC FLOOR
HEATING SYSTEM WITH CONTROLLED POWER DISTRIBUTION

Toporen S.S., Fedyushko Yu.M.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Institute "Academy of Construction and Architecture"
181, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea 295050
E-mail: toporen1987@gmail.com, fedushko26@rambler.ru

Abstract. Scientific substantiation and development of engineering solutions for the use of a multi-level electric floor heating system (MSEOP) to optimize the microclimate in livestock facilities, ensuring energy conservation and increasing animal productivity.

Subject of the study the subject of research is the development and scientific justification of an energy-efficient multi-level electric floor heating system for livestock facilities, which optimizes the microclimate and increases animal productivity through automated control of thermal conditions.

Materials and methods: the research is based on mathematical modeling of heat transfer processes in a multilayer enclosing structure with discrete energy sources. To analyze the operating modes of the system and control energy flows, methods of the theory of automatic regulation were used, including the construction of transfer functions and the analysis of the stability of the system according to the Nyquist criterion.

Results: the design and mathematical model of a multilevel electric floor heating system are proposed, which makes it possible to ensure a set temperature regime on the floor surface by redistributing power between three tiers of heating elements. The stability of the automatic control system has been proven.

Conclusions: engineering and technological solutions are scientifically sound and effective for implementation in modern construction and reconstruction of livestock complexes. The use of a multi-level electric floor heating system makes it possible to reduce specific energy consumption by 25-30% compared to general heating systems, as well as maintain temperature standards in the zone of technological activity, which ultimately increases the economic efficiency of livestock production.

Key words: microclimate, electric floor heating, multi-level heating system, mathematical modeling, optimization of parameters.