

## МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ СЕЛЬХОЗПРОДУКЦИИ КАК ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

Алексей Николаевич Васильев<sup>1</sup>  
Алексей Семенович Дорохов<sup>1</sup>  
Ирина Георгиевна Ершова<sup>1</sup>  
Александр Иванович Учеваткин<sup>1</sup>  
Елена Валентиновна Косолапова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ

<sup>2</sup>Нижегородский государственный инженерно-экономический университет

Разрабатывается методология исследования и формирования технологических систем обработки сельскохозяйственной продукции и системы электрооборудования (СЭ) как объектов управления. В основу авторской разработки положен методологический подход, в соответствии с которым технологические системы и СЭ рассмотрены как сложные объекты, представляющие собой совокупность взаимодействующих технологических, энергетических, эксплуатационных факторов, влияющих на их технико-экономические, экологические, энергетические и качественные показатели. Основными задачами исследования системы как объекта управления являются изучение ее технологических и энергетических параметров, динамических и статических характеристик звеньев, возмущающих и управляющих воздействий, ожидаемой реакции системы на эти воздействия, определение комплекса контролируемых и регулируемых параметров, аварийных ситуаций, временных режимов и условий работы оборудования, затрат рабочего времени на управление и обслуживание, а также выявление зависимости качества получаемой продукции от различных факторов и технологических параметров системы. Математические модели, устанавливающие количественные взаимосвязи между параметрами контроля, регулирования и управления автоматизированными звеньями и режимами работы энергосберегающих технологических систем, позволяющие на стадии разработки и проектирования обосновывать требуемые режимы работы СЭ автоматизированных звеньев (АЗ), регулировать потоки энергии в системах охлаждения и обеспечивать максимальную эффективность технологического процесса обработки сельскохозяйственной продукции. Предложенная методология дает возможность выявить и обработать всю необходимую информацию, характеризующую технологическую систему, обосновать параметры процесса обработки, режимы ее функционирования, определить структуру СЭ и комплекс технических средств для получения информации о состоянии объекта управления, выявить их влияние на показатели качества продукции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: методология исследования, объект управления, параметры, процесс обработки, система, факторы, хладоноситель.

## RESEARCH METHODOLOGY OF ENERGY-SAVING TECHNOLOGICAL SYSTEMS OF AGRICULTURAL PRODUCTS PROCESSING AS CONTROLLED OBJECTS

Aleksey N. Vasilyev<sup>1</sup>  
Aleksey S. Dorokhov<sup>1</sup>  
Irina G. Ershova<sup>1</sup>  
Aleksandr I. Uchevatkin<sup>1</sup>  
Elena V. Kosolapova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal Scientific Agroengineering Center VIM

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics

The authors present the methodology of research and the formation of technological systems for agricultural products processing and of the electrical equipment system (EES) as control objects. The proposed approach is based on a methodological technique. According to the presented technique technological systems and EES are considered as complex objects that represent a set of interacting technological, energy, and operational factors

that affect their technical, economic, environmental, energy, and quality indicators. Main objectives of the research of the system as a control object is the study of its technological and energy parameters, dynamic and static characteristics of links, disturbing and control actions expected system response to the effects of the complex controlled and regulated settings, emergency situations, temporary modes and conditions of operation of equipment, working time on management and maintenance, as well as the dependence of the quality of the products obtained from the various factors and technological parameters of the system. Mathematical models that establish quantitative relationships between the parameters of control, regulation and management of automated links and modes of operation of energy-saving technological systems allow the authors at the stage of development and design to justify the required modes of operation of the EES of automated links (AL), to regulate energy flows in cooling systems, to ensure maximum efficiency of the technological process of agricultural products processing. Using the proposed methodology specialists can identify and process all the necessary information that characterizes the technological system, justify the parameters of the processes, modes of its operation, determine the structure of the EES and technical means for obtaining information on the status of the control object, to define their impact on the quality indicators of the processed products.

KEYWORDS: research methodology, control object, parameters, processing process, system, factors, cooling agent.

### **В**ведение

В современных экономических условиях каждый сельхозтоваропроизводитель для повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции неизбежно сталкивается с необходимостью модернизации, ключевой целью которой является повышение производительности и снижение энергоемкости, так как повышение энергоэффективности и грамотная организация энергосбережения позволят существенно сократить энергозатраты на единицу произведенной продукции.

В настоящее время в российском АПК активно применяются энергосберегающие технологические способы обработки сельскохозяйственной продукции [1–5, 7, 8].

Структура теплохолодильных систем (ТХС) предполагает наличие технологического оборудования (машин и агрегатов) для обработки продукции и систем управления (СУ), включающих совокупность технических средств для осуществления контрольных мероприятий, регулирования и управления технологическим процессом, которые, в свою очередь, составляют системы электрооборудования (СЭ) объекта. Данная система состоит из низковольтных комплектных устройств управления (НКУ) отдельными подсистемами, комплекта датчиков и преобразователей. СЭ и технологические системы обработки сельскохозяйственной продукции являются сложными системами, представляющими собой совокупность отдельных звеньев, участвующих в технологическом процессе обработки и взаимодействующих между собой по определенным законам. Они включают различные машины и агрегаты, которые насчитывают один или несколько рабочих органов и могут рассматриваться как автономные объекты управления, поэтому их структура определяется количеством звеньев, способами их соединения и особенностями функционирования [9–12].

Методологический подход исследования технологических систем обработки сельскохозяйственной продукции как объектов управления разрабатывается с целью:

- сбора и обработки информации, необходимой для создания гибких энергосберегающих систем и СЭ;
- обоснованного выбора их контролируемых, регулируемых и управляемых параметров;
- синтеза и анализа энергетического и материального баланса;
- определения уровня автоматизации и быстродействия, плавности работы, диапазона изменения и регулирования потоков подачи, расхода продукта и хладоносителя, их случайного или детерминированного характера.

Реализация такого подхода позволит выполнить моделирование и оптимизацию эффективных режимов работы автоматизированных звеньев (АЗ) и систем в целом. Кроме того, это даст возможность разработать гибкие алгоритмы функционирования

СУ и определить комплекс контролируемых, регулируемых и управляемых параметров, а также установить пределы их регулирования, разработать энергоэффективный рабочий цикл действий АЗ и системы их взаимосвязи в целом.

### **Материалы и методы**

В основу разработки методологических подходов исследования энергосберегающих технологических систем обработки сельскохозяйственной продукции как объектов управления заложен методологический прием, согласно которому данные системы и СЭ представляют собой сложные объекты, в которых взаимодействуют различные факторы – технологические, энергетические, эксплуатационные, оказывающие значительное влияние на основные технико-экономические, экологические, энергетические и качественные показатели.

Решение поставленных задач осуществляется с позиции системного подхода с применением методов системотехники, теории операций, теории вероятностей и математической статистики, теории автоматического регулирования, теории случайных функций.

Для описания нелинейных процессов использованы методы гармонической линеаризации, математического и физического моделирования.

При разработке программы экспериментальных исследований применены методы статистического анализа и планирования эксперимента.

### **Результаты и их обсуждение**

Системы электрооборудования, непосредственно влияя на качество обрабатываемой сельхозпродукции, на технико-экономические показатели, требуют учета не только энергетических, эксплуатационных, организационных факторов функционирования системы, но и системного подхода, заключающегося в формировании и оценке оптимального решения, устанавливающего и учитывающего все существенные взаимосвязи и степень влияния параметров на поведение всей системы в целом [6, 11–13].

Объектами управления в каждой системе обработки являются:

- аккумулятор холода;
- хладоноситель;
- трубопровод;
- поток продукта и охлаждаемого продукта;
- накопительно-регулирующая емкость (НРЕ).

На рисунке 1 представлен алгоритм исследования технологических энергосберегающих систем обработки сельскохозяйственной продукции как объектов управления. Если параметры являются случайными величинами, то они могут быть заданы законами распределения или моментами случайных величин. Параметры системы как функции случайных величин также будут случайными.

Исследование технологических систем и СЭ как объектов управления для описания и анализа параметров процессов функционирования осуществляется на основании построения математических моделей, так как они отображают взаимодействие факторов, оказывающих значительное влияние как на выбор, так и на обоснование основных параметров работы системы управления технологическим процессом.

С методической точки зрения исследуемую технологическую систему обработки можно разделить на отдельные звенья, представляющие собой рабочие машины и исполнительные механизмы и выполняющие одну или несколько технологических операций. Их признаками являются специфика выполнения функционально-структурной схемы, уровень ее автоматизации и агрегации звеньев. Признаки вариантов звена связаны с особенностями его исполнительного органа, регулятора, электропривода и других элементов.

## ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

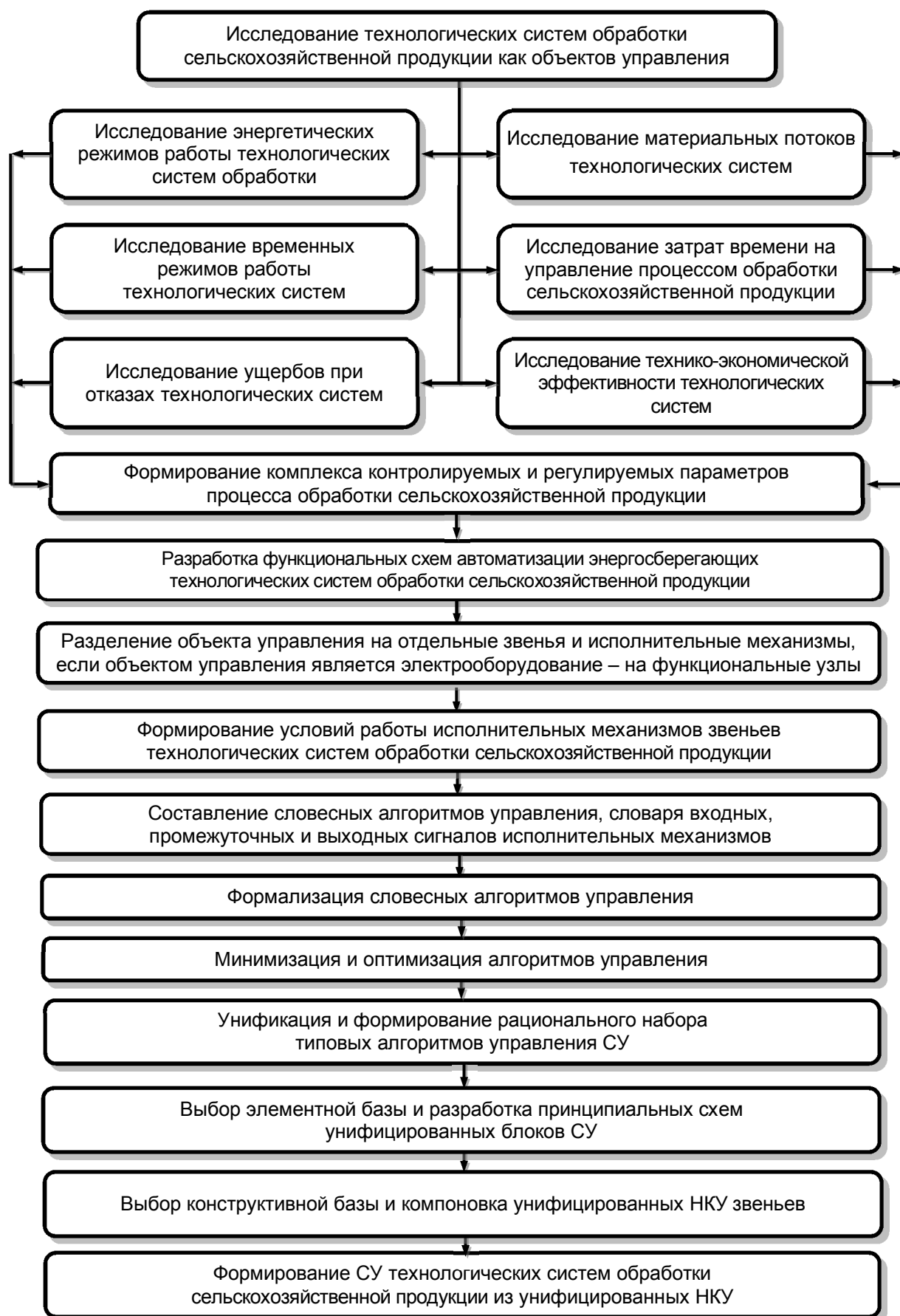


Рис. 1. Алгоритм исследования энергосберегающих технологических систем обработки сельскохозяйственной продукции как объектов управления

Обработка количественной информации осуществляется с использованием математических моделей, устанавливающих детерминированные и статистические зависимости между факторами одной природы. Данные модели содержат выражения, которые позволяют установить как рекомендуемые или граничные значения рассматриваемых показателей технических требований исследуемой системы, так и ее отдельные регулируемые звенья [11–13].

Функциональной моделью исследуемой системы является записанный в виде прямоугольной матрицы  $M$  размером  $[A_m \cdot B_n]$  ранжированный набор альтернативных вариантов выполнения энергосберегающей системы с регулируемыми звеньями охлаждения, например,

$$M = [A_m \cdot B_n]; A_m = \sum_{k=1}^m \psi [D_k L_k]; 1 \rightarrow k \rightarrow m; B_n = \sum_{k=1}^m \psi [D_k L_k]; 1 \rightarrow k \rightarrow m, \quad (1)$$

где  $A_m \cdot B_n$  – число столбцов и строк матрицы;

$m, n$  – количество вариантов выполнения звеньев энергосберегающих охлаждающих систем  $D_k$  и системы электрооборудования  $L_k$  [9–11].

Технологические факторы характеризуются высокой степенью неопределенности исходных данных. Поэтому техническое решение, принимаемое для детерминированных исходных данных, может оказаться неоптимальным или ошибочным. Методы теории операций позволяют выбрать наилучшее для данных условий решение.

Структура и влияние независимых факторов на технологический процесс представлены на рисунке 2.

Формализация принципиально новых технологий включает выбор эффективных технологий, технических средств и их параметров, обеспечивающих выполнение предъявляемых требований. Задача заключается в определении целевой функции и критериев при выборе технических средств при минимизации затрат энергии и удельных затрат на обработку сельхозпродукции, а также в обосновании приемов и методов снижения до минимально возможного или допустимого уровня воздействующих параметров.

В математическом представлении это означает выбор определенного оператора  $A_i$  из набора  $A_n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots, n$ ), который бы отвечал поставленным требованиям [9–13], т. е.

$$\Psi(Y_k) = A_k \cdot \sum_{i=1}^k f_k \cdot (x_k; z_k) \rightarrow \min(\max). \quad (2)$$

Предполагается, что при определенном значении  $A_k$  каждому варианту однозначно соответствует требуемый результат  $\Psi(Y_k)$ , выраженный количественно. При этом  $Y_k$  представляет собой количественную оценку одного из качественных показателей системы (температура хладоносителя, температура окружающего воздуха, время охлаждения, аккумулирующая способность системы, хладовосприятие и т. п.).

Значения переменных операторов  $A_k \dots A_n$  соответствуют исследуемым вариантам технического решения и могут быть заданы в виде пределов изменения показателей или в виде параметров закона распределения вероятностей рассматриваемого показателя.

Для получения количественной оценки ТХС, в том числе автоматизированной аккумуляции естественного и искусственного холода, предложен перечень показателей, отдельных звеньев и системы в целом [11–13].

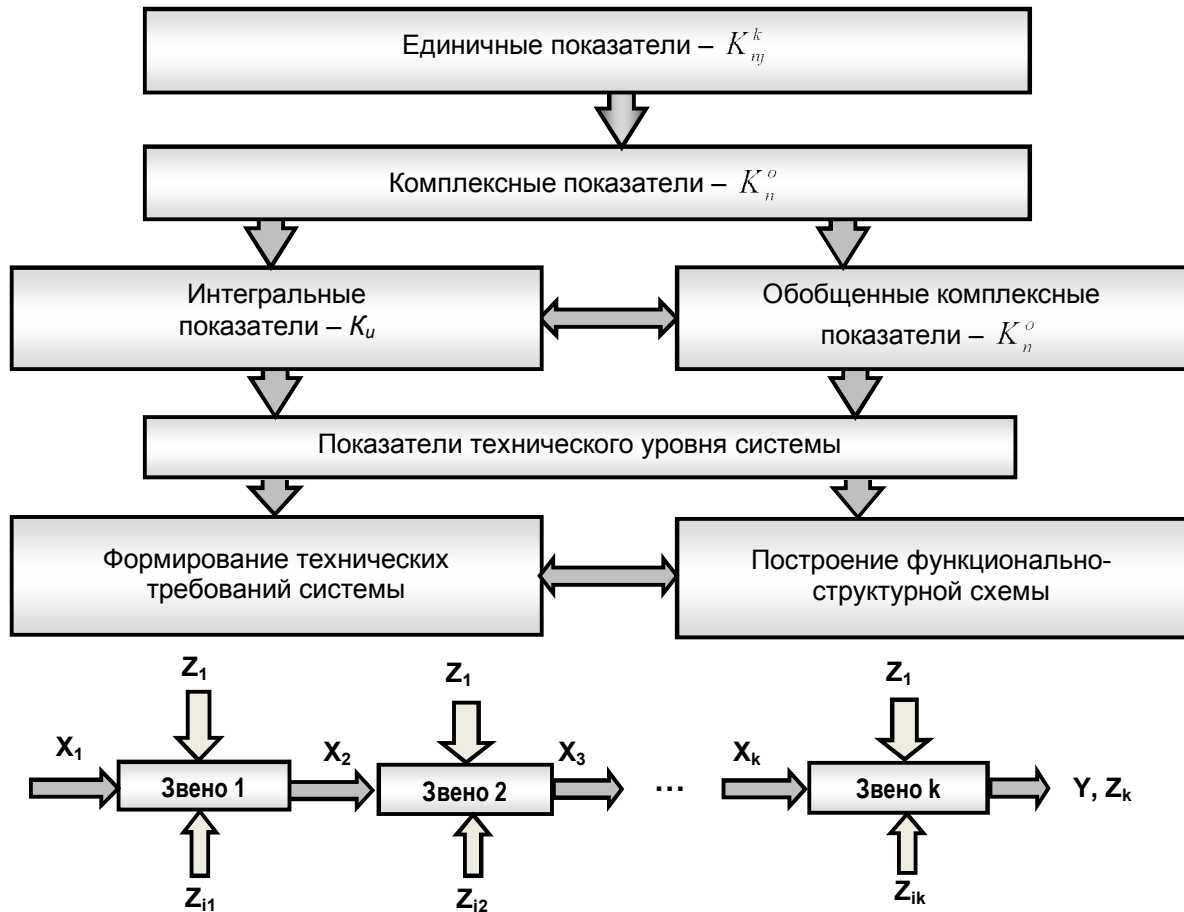


Рис. 2. Действие различных факторов на технологический процесс охлаждения

Методологический подход основан на использовании системы единичных  $K_{ijn}^e$ , комплексных  $K_n^o$  и обобщенных комплексных  $K_n^o$  показателей (ОКП), характеризующих различные свойства исследуемой системы [11].

К единичным показателям  $K_{ijn}^e$  относятся интенсивность потока подачи продукта  $Q_n$  и хладоносителя  $Q_x$ , температура продукта  $t_{n1}$ , хладоносителя  $t_{x1}$  и окружающего воздуха  $t_o$ , аккумулирующая способность  $W_a$  и хладовосприятие  $W_x$  системы, т. е. совокупность таких показателей, которые изменяются в процессе работы системы по случайному закону.

Единичный показатель количественно характеризует какое-то определенное свойство звеньев [11]

$$K_{ijn}^e = \frac{K_{nj}}{K_{nj}^b}, \quad (3)$$

где  $K_{ijn}^e$  – единичный  $i$ -й показатель  $j$ -го звена  $n$ -го варианта системы;

$K_{nj}$  – численная характеристика  $i$ -го показателя  $j$ -го звена  $n$ -го варианта системы;

$K_{nj}^b$  – базовый показатель  $j$ -го звена  $n$ -го варианта системы.

Данные показатели характеризуют одно из свойств сравниваемых исследуемых систем по таким основным видам оценок, как энергетическая, технологическая, экс-

платационная, технико-экономическая и эргономическая. Эти оценки отражают первостепенные свойства системы, а также предъявляемые к ней специальные требования, учитывающие специфику сельскохозяйственного производства. Этот вид оценки, а также весомость отдельных показателей определяются расчетным путем или при помощи экспертных методов.

Энергетические показатели, в роли которых используются холодильные коэффициенты системы, представляют собой отношение полученной холодопроизводительности  $q_0$  к затраченной работе  $A_l$  [11–13]

$$\varepsilon = \frac{q_0}{A_l} . \quad (4)$$

При оценке ТХС используется также дифференциал энтропии  $dS$  охлаждающей среды [11–13]

$$dS = \frac{dQ}{T^*} , \quad (5)$$

где  $dS$  – дифференциал энтропии («поворот», «превращение», т. е. функция состояния термодинамической системы, определяющая меру необратимого рассеивания энергии);

$dQ$  – бесконечно малое количество сообщенного среде тепла;

$T^*$  – абсолютная температура, К.

К единичным показателям энергосберегающих систем обработки сельскохозяйственной продукции относятся удельные затраты энергии на охлаждение продукции, а также следующие коэффициенты:

- коэффициент размещения  $P$ , характеризующий уровень централизации СУ и СЭ в целом [11–13]

$$P = \frac{1}{\sum P_1} , \quad (6)$$

где  $\sum P_1$  – количество автономных управляющих устройств, включая централизованное устройство управления;

- коэффициент аккумуляции  $A$  системы [11–13]

$$A = \frac{W}{\sum W} , \quad (7)$$

где  $W$  – количество энергии холода, накапливаемое аккумулирующими звеньями системы, кВт·ч;

$\sum W$  – требуемое количество энергии холода, кВт·ч;

- коэффициент интеграции  $I$  системы [4–9]

$$I = \frac{\sum I^1}{\sum I} , \quad (8)$$

где  $\sum I^1$  – количество интегральных элементов СУ;

$\sum I$  – общее количество элементов;

- коэффициент хладовосприятия  $W_x$  системы [11–13]

$$W_x = \frac{W}{T} , \quad (9)$$

где  $T$  – время рабочего цикла намораживания, ч.

Регулируемые звенья характеризуются таким коэффициентом, как диапазон регулирования  $D$  [11–13]

$$D = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}}, \quad (10)$$

где  $Q_{\max}$ ,  $Q_{\min}$  – максимальные и минимальные значения потоков продукта или потоков хладоносителя, м<sup>3</sup>/ч.

К числу единичных показателей АЗ, действующих в случайных потоках подачи продукта и хладоносителя, относятся:

- математическое ожидание;
- среднеквадратическое отклонение;
- автокорреляционная функция;
- график спектральной плотности (интенсивности) случайных потоков подачи и хладоносителя, и продукта [9–13].

Для дискретно управляемых регулируемых звеньев, функционирующих в случайных потоках продукта и хладоносителя, в качестве единичных показателей выступают коэффициенты передачи, представляющие собой частоту и относительную продолжительность включений [6, 11–13]:

- для время-импульсной модуляции (ВИМ) потока – оценка математического ожидания относительной продолжительности включений  $\tilde{m}[\varepsilon]$

$$\tilde{m}[\varepsilon] = \frac{\tilde{m}[Q_n]}{Q_j}, \quad (11)$$

где  $\tilde{m}[Q_n]$  – оценка математического ожидания потока подачи хладоносителя, м<sup>3</sup>/ч;

$Q_j$  – производительность звена  $j$ , м<sup>3</sup>/ч;

- для широтно-импульсной модуляции (ШИМ) потока при ограничении  $Q_j > Q_n$  – оценка математического ожидания числа включений  $\tilde{m}[Z]$

$$\tilde{m}[Z] = \frac{Q_j \cdot \tilde{m}[Q_n] - \tilde{m}[Q_n]^2}{V_p \cdot Q_j}, \quad (12)$$

где  $V_p$  – средняя величина эффективной вместимости аккумулятора холода, м<sup>3</sup>.

К интегральным показателям относится комплекс единичных показателей, характеризующих несколько звеньев энергосберегающих систем по какому-то одному из их свойств [11–13]

$$K_u = \sum_{i=1}^j [K_1^e, \dots, K_i^e, \dots, K_j^e], \quad (13)$$

где  $K_u$  – интегральный показатель;

$K_i^e$  – единичные показатели;

$j$  – количество оцениваемых звеньев.

Комплексный показатель  $K_{nj}^k$  характеризует энергетические  $K_w$  и технико-экономические  $K_s$  свойства системы, а также количественно характеризует звено системы по  $m$ -параметрам и несколько единичных показателей [11–13]

$$K_{nj}^k = \sum_{i=1}^L \frac{K_{ijn}^e}{L}, \quad (14)$$

где  $K_{ijn}^k$  – комплексный показатель  $j$ -го звена  $n$ -варианта технологической системы;

$L$  – количество оцениваемых параметров.

Комплексные показатели рассчитываются при помощи единичных и интегральных показателей. В качестве комплексных показателей системы охлаждения, отража-



ющих надежность и технико-экономические свойства системы, выбраны коэффициент готовности  $K_g$  и коэффициент технико-экономической эффективности  $K_э$ , оценивающий прибыль на единицу вложенных средств.

Обобщенный комплексный показатель (ОКП) количественно характеризует абсолютный технический уровень энергосберегающей системы в целом и отражает все существенные взаимосвязи и характеристики системы, влияющие на ее качество или потребительские свойства, и может быть чисто экономическим, энергетическим, эксплуатационным показателем.

К ОКП относятся также удельные приведенные затраты, интегральные показатели  $K_u$ , отражающие соотношения суммарного эффекта  $\Delta Э$  и суммарных затрат на создание и эксплуатацию системы  $\Delta З$ .

Выбор и обоснование оптимальных параметров и режимов функционирования технологических систем обработки сельскохозяйственной продукции являются задачей, которая формулируется следующим образом: найти решение при заданных условиях, с учетом неопределенных факторов, которое обращало бы в максимум (минимум) принятое за критерий значение показателя эффективности.

Целевые функции, обеспечивающие обоснование и выбор энергосберегающих технологий и технических средств, заданы на основании двух критериев: энергетического  $K_w$  и экономического  $K_э$  [11–13]:

$$K_w = K_{nw}^o \rightarrow \min; K_э = K_{nэ}^o \rightarrow \min, \text{ при } K_{nw}^o, K_{nэ}^o \leq K_{don}, \quad (15)$$

где  $K_{nw}^o, K_{nэ}^o$  – значения обобщенных показателей;

$K_{don}$  – допустимые значения единичного показателя.

По первому критерию целевая функция строится для проверки намеченной стратегии энергосбережения, по второму – тогда, когда по функции  $K_w$  выбрано несколько стратегий и необходимо определить наиболее эффективную. В качестве  $K_{nw}^o$  рекомендуется использовать холодильный коэффициент системы [11–13].

Целевую функцию при количественном анализе системы целесообразно реализовывать в виде минимизации (максимизации) обобщенного комплексного показателя, отражающего экономические показатели  $K_э^o$  [5–9]

$$K_э^o = \frac{З_1}{З_2} \rightarrow \min(\max), \quad (16)$$

где  $K_э^o$  – обобщенный экономический комплексный показатель;

$З_1, З_2$  – приведенные затраты соответственно на традиционный и предлагаемый варианты, руб.

Для определения ряда единичных показателей системы – временных характеристик и режимов работы отдельных звеньев и системы в целом, работающих в случайных режимах, необходимо проанализировать случайные возмущающие воздействия, для чего в течение рабочего цикла снимают  $n$  реализаций всего исследуемого процесса, которые разбиваются по времени на  $m$  интервалов при помощи сечений, сделанных в определенные моменты времени  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_m$ .

По полученным реализациям рассчитываются оценки для математического ожидания исследуемого возмущающего воздействия  $\tilde{m}[t]$ , среднеквадратического отклонения  $\sigma_x$ , дисперсии  $D_x$  и нормированных корреляционных моментов  $K_x$ .

В общем виде расчет для временных сечений трубопроводов  $t_k$  и  $t_e$  проводится по следующим выражениям [6, 11–13]:

$$\tilde{m}_x[t_k] = \frac{\sum_{i=1}^n x_i(t_k)}{n-1}; \sigma_x(t_k) = \sqrt{D_x(t_k)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [x_i(t_k) - \tilde{m}_x[t_k]]^2}{n-1}}; \quad (17)$$

$$K_x(t_k, t_e) = \frac{\sum_{i=1}^n \{x_i(t_k) - \tilde{m}_x[t_k]\} \cdot \{x_i(t_e) - \tilde{m}_x[t_e]\}}{(n-1) \cdot \sigma_x(t_k) \cdot \sigma_x(t_e)},$$

где  $x_i(t_k), x_i(t_e)$  – значения параметра  $x$  в  $i$ -ой реализации в моменты времени  $t_k$  и  $t_e$ .

После вычисления и построения вероятностных характеристик случайного процесса выносится суждение о его стационарности. Случайная функция  $x_i(t)$  называется стационарной, если все ее вероятностные характеристики не зависят от момента времени  $t$ . При этом должны соблюдаться следующие условия [9, 10–13]:

$$\tilde{m}_x(t) = \tilde{m}_x = Const; \sigma_x^2(t) = D_x(t) = D_x = Const; K_x(t+\tau) = K_x(\tau), \quad (18)$$

где  $\tilde{m}_x, D_x, K_x$  – постоянные оценки математического ожидания, дисперсии и автокорреляционной функции (АКФ) стационарного процесса;

$\tau$  – временной сдвиг автокорреляционной функции, ч.

Для случайных процессов АКФ  $K_x(\tau)$  случайной функции (потока подачи продукта и хладоносителя) имеет вид [9–13]

$$K_x(\tau) = \tilde{m}[Q_i(t) \cdot Q_i^*(t-\tau)], \quad (19)$$

где  $\tilde{m}[Q_i(t) \cdot Q_i^*(t-\tau)]$  – оценка математического ожидания потока подачи, м<sup>3</sup>/ч (звездочка означает комплексное сопряжение).

Автокорреляционная функция  $K_x(\tau)$  аппроксимируется выражением [9–13]

$$K_x(\tau) = \sigma_x^2 \cdot e^{-\alpha(\tau)} \cdot \cos \omega \tau, \quad (20)$$

где  $\alpha$  – коэффициент;

$\omega$  – частота спектрального разложения случайной функции.

Используя выражение (20), получим в общем виде уравнение для расчета графика спектральной плотности  $S_x(\omega)$  случайного потока продукта и хладоносителя [9–13]:

$$S_x(\omega) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} K_x(\tau) \cdot \cos \omega \tau \cdot d\tau; S_x(\omega) = f(D_x; \alpha; \omega). \quad (21)$$

По полученным выражениям определяется диапазон преобладающих частот  $\omega_n$ , которые лежат на отрезке, ограниченном значениями частоты [9–13]:

$$\omega_{n_1} < \omega_n < \omega_{n_2}; S_x(\omega_{n_2}) < S_x(\omega_n) < S_x(\omega_{n_1}); \omega_{n_1} < \omega_n < \omega_{n_2}; \quad (22)$$

$$S_x(\omega_{n_2}) < S_x(\omega_n) < S_x(\omega_{n_1}); S_x(\omega_{n_1}); S_x(\omega_{n_2}) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot S_x(\omega)_{\min, \max}.$$

Передаточная функция АЗ с двухпороговым решающим элементом (ДРЭ)  $W_9(p)$  описывается выражением (23) [11–13]

$$W_9(p) = e^{-p-\tau_1} \cdot \frac{K_9}{T_{9p} + 1}, \quad (23)$$

где  $K_9$  – коэффициент усиления звена.

Представленные выражения позволяют получить в общем виде требуемое значение диапазона регулирования звена  $D_r^m$  [9–13]

$$D_r^m = \frac{m_x + 3\sqrt{D_x}}{m_x - 3\sqrt{D_x}}. \quad (24)$$

Требуемая величина быстродействия определяется анализом синусоидального возмущающего воздействия на АЗ с ДРЭ.

На качественное функционирование системы оказывают влияние различные связи между возмущающими факторами (могут быть как случайными, так и детерминированными), которые находятся в корреляционной зависимости и характеризуются корреляционным моментом [19–13]

$$K_m = M[K_g \cdot K_o] = M[(K_g - \tilde{m}K_g) \cdot (K_o - \tilde{m}K_o)], \quad (25)$$

где  $K_m$  – корреляционный момент;

$M[K_g, K_o]$  – центрированные значения случайных возмущающих показателей и показателей отклика потока продукта и хладоносителя.

Если отсутствует зависимость между возмущающими показателями отклика, то корреляционный момент равен нулю.

Из приведенных выражений следует, что корреляционный момент  $K_m$  представляет собой важнейшую характеристику системы случайных величин потоков продукта и хладоносителя, которая описывает связь возмущающих показателей и показателей отклика системы. Поэтому при исследовании баланса материальных потоков системы основными уравнениями, описывающими потоки подачи продукта и хладоносителя  $Q_{ni}$  на любом  $i$ -ом участке системы как стационарную случайную функцию времени, являются [9–13]:

$$Q_n(t)_i = \sum \left[ \sum_{i=1}^i \tilde{m}[Q_n](t) + Q_{ny}(t) \right]; \quad \int_0^T Q_{i-1}(t)dt - \int_0^T Q_i(t)dt \leq V_p, \quad (26)$$

где  $\tilde{m}[Q_n](t)$  – оценка математического ожидания потока подачи обрабатываемого продукта, м<sup>3</sup>/ч;

$Q_{ny}(t)$  – центрированное значение сплошного случайного потока подачи, м<sup>3</sup>/ч;

$Q_{i-1}(t), Q_i(t)$  – средние значения потоков расхода на двух соседних ступенях регулирования, м<sup>3</sup>/ч;

$T$  – время цикла обработки продукта, ч;

$V_p$  – вместимость НРЕ, м<sup>3</sup>.

На основании анализа уравнения, описывающего потоки подачи продукта и хладоносителя  $Q_{ni}$  в рамках математических моделей функционирования и материальных потоков, устанавливаются зависимости, определяющие основные единичные показатели исследуемой системы.

Оценка математического ожидания потока подачи  $\tilde{m}[Q_{ni}]$  [1, 5–8]

$$\tilde{m}[Q_{ni}] = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot P_i, \quad (27)$$

где  $\tilde{m}[Q_{ni}]$  – оценка математического ожидания случайной величины потока подачи продукта и хладоносителя на  $i$ -ом участке системы, м<sup>3</sup>/ч;

$P_i$  – вероятность того, что случайная величина потока примет значение  $Q_i$ .

Дисперсия  $D_{Q_i}$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{Q_i}$  потока подачи определяются как:

$$D_{Q_i} = \sum_{i=1}^n (Q_i - \tilde{m}[Q_n])^2 \cdot P_i; \quad \sigma_{Q_i} = \frac{\sqrt{D_{Q_i}}}{n}. \quad (28)$$

Для оценки следящих регулируемых звеньев по быстродействию при работе в случайных потоках продукта на основе анализа спектральной плотности и стационарной, случайной функции определяется диапазон частот, гармонических составляющих потока подачи в различных сечениях системы.

Автокорреляционная функция потока подачи  $K_{Q_n}(t)$  аппроксимируется экспоненциальной кривой вида [1, 5–9]

$$K_{Q_n}(t) = \sigma_{Q_n}^2 \cdot \exp[-\alpha(\tau)], \quad (29)$$

где  $\sigma_{Q_n}^2$  – среднеквадратическое отклонение случайной величины потока подачи;  
 $\tau$  – текущая величина временного сдвига АКФ;  
 $\alpha$  – коэффициент.

Так как поток подачи продукта на фермах является стационарным случайным процессом и подчиняется закону нормального распределения, то выражение плотности вероятности для случайной величины потока подачи имеет вид [10]

$$f(Q_n) = \frac{1}{\sigma_{Q_i} \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(Q_i - \tilde{m}[Q_n])^2}{2\sigma_{Q_i}^2}\right]. \quad (30)$$

АКФ для случайных потоков строятся путем расчета и нанесением на график корреляционных моментов  $K_{Q_n}(t_k; t_e)$  для моментов времени  $t_k$  и  $t_e$ . Корреляционные моменты определяются по выражению (31) [11, 13]

$$K_{Q_n}(t_k; t_e) = \frac{\sum \{Q_i(t_k) - \tilde{m}[Q_n](t_k)\} \cdot \{Q_i(t_e) - \tilde{m}[Q_n](t_e)\}}{(n-1) \cdot \sigma_{Q_i}(t_k) \cdot \sigma_{Q_i}(t_e)}, \quad (31)$$

где  $m[Q_n](t_k)$ ,  $m[Q_n](t_e)$  – оценки математических ожиданий случайной функции  $Q_i$  в моменты времени  $t_k$  и  $t_e$ ;

$Q_i(t_k)$ ,  $Q_i(t_e)$  – реализации величины потоков подачи в моменты времени  $t_k$  и  $t_e$ ;

$\sigma_{Q_i}(t_k)$ ,  $\sigma_{Q_i}(t_e)$  – среднеквадратические отклонения потоков подачи в моменты времени  $t_k$  и  $t_e$ .

Используя комплексную форму преобразования Фурье и подставляя значения  $\alpha$  АКФ в соотношение, связывающее АКФ и спектральную плотность, получим выражение для спектральной плотности потока [11, 13]

$$S_{Q_n}(\omega) \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} K_{Q_n}(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} \cdot d\tau = \frac{\alpha(\sigma_{Q_n}^2)}{\pi \cdot (\alpha^2 + \omega^2)}, \quad (32)$$

где  $\omega$  – частота переменной составляющей  $Q_i$ ;

$K_{Q_n}(\tau)$  – АКФ потока подачи.

Для повышения качества функционирования звеньев и системы в целом, надежности процесса обработки продукции необходимо смоделировать оптимальные временные режимы работы звеньев с последующим обоснованием алгоритмов управления и технических средств и сокращением непроизводительных или трудоемких операций по управлению системой в целом. Таким образом, конечная цель исследований может быть сформулирована как оценка времени и характера рабочего цикла СУ, регулируемых звеньев и системы в целом в их взаимосвязи.

Оценка математического ожидания времени обработки продукта  $\tilde{m}[T_j]$  на участке звена  $\tilde{m}[T_j]$  и на всей линии  $\tilde{m}[T_n]$  [1, 5–10]:

$$\tilde{m}[T_j] = \sum_{i=1}^j (\tilde{m}[T_m]; \tilde{m}[T_3]; \tilde{m}[T_n]) = \sum_{j=1}^n \tilde{m}[T_j], \quad (33)$$

где  $\tilde{m}[T_m]$ ,  $\tilde{m}[T_3]$  – оценки математического ожидания времени транспортировки обрабатываемого продукта и емкостного запаздывания на участке звена  $j$ ;

$n$  – число последовательно расположенных участков в линии.

Временной режим работы системы в целом определяется временным циклом работы главного звена, выполняющего основную операцию обработки – охлаждение. Эта операция определяет производительность всей линии в целом и время рабочего цикла  $\tilde{m}[T]$  [6, 12, 13]

$$\tilde{m}[T] = \frac{M_u}{Q_z}, \quad (34)$$

где  $\tilde{m}[T]$  – оценка математического ожидания времени рабочего цикла, ч;

$M_u$  – количество продукта, обработанного за рабочий цикл, т;

$Q_z$  – производительность главного звена, м<sup>3</sup>/ч.

Режимы работы АЗ с двухпороговым решающим элементом (например, перекачка продукта на охлаждение, аккумулярование естественного и искусственного холода), характеризуются частотой и относительной продолжительностью включений их исполнительных механизмов.

Оценка математического ожидания времени работы  $\tilde{m}[T_p]$  и паузы  $\tilde{m}[T_n]$  в рабочем цикле АЗ с ДРЭ [6, 11–13]:

$$\tilde{m}[T_p] = \frac{V_{нре}}{Q_j - \tilde{m}[Q_n]}; \quad \tilde{m}[T_n] = \frac{V_{нре}}{\tilde{m}[Q_n]}, \quad (35)$$

где  $V_{нре}$  – средняя величина эффективной вместимости НРЕ, м<sup>3</sup>;

$Q_j$  – производительность звена  $j$ , м<sup>3</sup>/ч;

$\tilde{m}[Q_n]$  – оценка математического ожидания потока подачи продукта, м<sup>3</sup>/ч.

Оценка математического ожидания времени рабочего цикла АЗ с двухпороговым решающим элементом:

$$\tilde{m}[T_{рч}] = \frac{V_{нре} \cdot Q_j}{Q_j \cdot \tilde{m}[Q_n] - \tilde{m}[Q_n]^2}. \quad (36)$$

Оценка математического ожидания числа включений  $\tilde{m}[Z]$  и относительной продолжительности включений  $\tilde{m}[\varepsilon]$  АЗ [11–13]:

$$\tilde{m}[Z] = \frac{Q_j \cdot \tilde{m}[Q_n] - \tilde{m}[Q_n]^2}{V_p \cdot Q_j}; \quad \tilde{m}[\varepsilon] = \frac{\tilde{m}[Q_n]}{Q_j}. \quad (37)$$

На рисунке 3 представлены временные графики функционирования АЗ с двухпороговым решающим элементом по случайному закону (в частности, реакция широтно-импульсных (ШИ) и время-импульсных (ВИ) систем на ступенчатое изменение потока подачи в теплообменник) [6, 12].

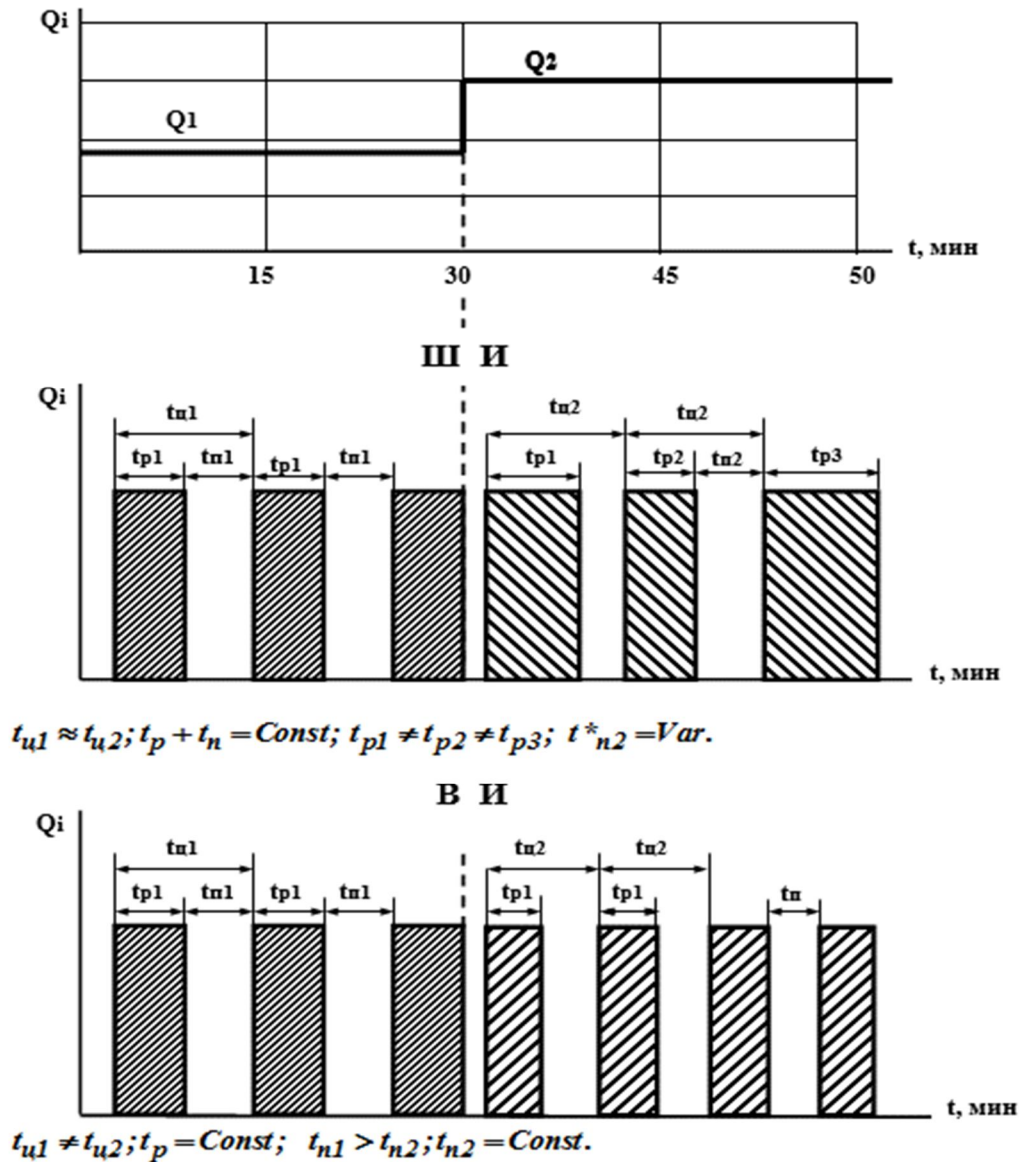


Рис. 3. Реакция на единичное воздействие широтно-импульсной (ШИ) и время-импульсной (ВИ) систем на ступенчатое изменение потока подачи продукта и хладоносителя из аккумулирующих устройств

Для систем с ШИМ регулируемого потока оценка математического ожидания интенсивности включений  $\tilde{m}[Z]_{шим}$  [10]

$$\tilde{m}[Z]_{шим} = \frac{Q_j \cdot \tilde{m}[Q_n] - \tilde{m}[Q_n]^2}{V_{пре} \cdot Q_j}. \quad (38)$$

Для измерительных систем с ВИМ регулируемого потока оценка математического ожидания интенсивности включений  $\tilde{m}[Z]_{вим}$  [10]

$$\tilde{m}[Z]_{вим} = \frac{\tilde{m}[Q_n]}{V_{оя}}, \quad (39)$$

где  $V_{оя}$  – объем дозирующей (измерительной) ячейки,  $m^3$ .

Расчетная частота включений АЗ с ДРЭ с достаточной для практических задач точностью может быть определена по формулам [6, 11–13]:

$$0 < \omega_n < \frac{1}{T_n}; Z_p = \tilde{m}[Z] + 3\sigma_z, \quad (40)$$

где  $\omega_n$  – основная частота вынужденных колебаний потока подачи;  
 $T_n$  – постоянная времени (тепловая) звена.

$$\text{При условии } \omega_n > \frac{1}{T_n} \quad Z_p = \tilde{m}[Z] + 3\sigma_z \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}, \text{ а при } \omega_n = \frac{1}{T_n} \quad Z_p = \tilde{m}[Z] \quad (41)$$

Для этой системы уравнение материального баланса запишется в следующем виде [6, 12, 13]:

$$\sum_{i=1}^n Q_n \cdot \tilde{m}[t_n] = \sum_{i=1}^n \left[ \int_{t_1}^{t_2} Q_p(t) \cdot dt \right], \quad (42)$$

где  $Q_n$  – поток подачи холода хладоносителя насосным агрегатом, м<sup>3</sup>/ч;  
 $\tilde{m}[t_n]$  – математическое ожидание длительности импульса;  
 $n$  – количество импульсов;  
 $Q_p(t)$  – мгновенные значения потока расхода, м<sup>3</sup>/ч.

Для системы с емкостным теплообменником непрерывно-регулируемого действия уравнение материального баланса запишется следующим образом:

$$\int_{t_1}^{t_2} Q_n(t) \cdot dt = \sum_{i=1}^n \left[ \int_{t_1}^{t_2} Q_p(t) \cdot dt \right]. \quad (43)$$

Анализ представленных уравнений и моделируемых потоков энергии позволяет получить данные для расчета АЗ дискретного и непрерывного действия, регулирующих потоки подачи продукта и хладоносителя из аккумулирующих звеньев в теплообменники для охлаждения. При дискретном регулировании  $Q_n \geq 2Q_p$ . В реальных системах диапазон регулирования звеньев достигает значений  $d_p \geq 20$  [6, 12, 13].

Установлено, что стоимость непрерывно регулируемых звеньев более чем в 15 раз превосходит стоимость аналогичных звеньев дискретного регулирования, действующих по принципу ШИМ потока [6, 12, 13].

Качественное функционирование системы в оптимальных режимах связано с вместимостью НРЕ, определяющей поточность процесса обработки.

Эффективная вместимость НРЕ  $V_{нре}$  АЗ с ДРЭ определяется из условия

$$V_{нре} > V_p, \quad (44)$$

где  $V_p$  – регулирующая масса продукта, хладоносителя, м<sup>3</sup>.

АЗ с ДРЭ работают в режиме следящей системы. Входная величина системы – поток продукта, поступающего на обработку  $Q_{nj}(t)$ , а выходная – поток обработанного охлажденного продукта  $Q_{pj}(t)$ . В этом случае регулирующая масса для каждого звена за время  $t$  определяется по выражению (45) [1, 7, 8]

$$V_{pj} = \int_0^T Q_{nj}(t) \cdot dt - \int_0^T Q_{pj}(t) \cdot dt = \tilde{m}[Q_{nj}] \cdot t - \int_0^T Q_{pj}(t) \cdot dt, \quad (45)$$

где  $V_{pj}$  – регулирующая масса продукта или хладоносителя  $j$ -го звена, м<sup>3</sup>;  
 $Q_{nj}(t)$ ,  $Q_{pj}(t)$  – потоки подачи и расхода продукта, хладоносителя  $j$ -го звена, м<sup>3</sup>/ч;

$T$  – продолжительность рабочего цикла, ч;  
 $\tilde{m}[Q_{nj}]$  – оценка математического ожидания потока подачи продукта, хладоносителя, м<sup>3</sup>/ч.

Способы уменьшения регулирующей массы продукта или хладоносителя  $V_p$  и вместимости НРЕ  $V_{нре}$  при использовании АЗ с ДРЭ могут быть определены как расчетным путем, так и экспериментально [9–13].

Регулирующая масса  $V_p$  звеньев зависит от следующих параметров АЗ с ДРЭ [6, 12, 13]:

$$V_p = f(Z, \varepsilon, \omega_p, T_\varepsilon), \quad (46)$$

где  $Z, \varepsilon$  – соответственно частота и относительная продолжительность включений звена;

$\omega_p$  – частота вращения рабочего органа АЗ;

$T_\varepsilon$  – электромеханическая постоянная времени электродвигателя.

При обосновании параметров АЗ с ДРЭ регулирующую массу  $V_p$  представляют в виде составляющих [9–13]

$$V_p = V_o + V_\delta + V_c, \quad (47)$$

где  $V_o$  – основная составляющая при дискретном регулировании звеньев;

$V_\delta, V_c$  – составляющие соответственно при динамических и статических ошибках системы.

Составляющая  $V_o$  определяется по выражению (48) [6, 12, 13]

$$V_o = \frac{\tilde{m}[Q_n](1 - \tilde{m}[\varepsilon])}{\tilde{m}[Z]}, \quad (48)$$

где  $\tilde{m}[Z], \tilde{m}[\varepsilon]$  – оценки математического ожидания соответственно частоты и относительной продолжительности включений АЗ с ДРЭ.

Составляющая  $V_\delta$  определяется временем разбега АЗ с ДРЭ, поэтому

$$V_{\delta \max} \approx Q_{n \max} \cdot T_{II} - \int_0^{T_{II}} Q_p(t) \cdot dt; \quad (49)$$

$$Q_p = Q_{p \max} \cdot (1 - e^{-t/T_{II}}); \quad Q_{p \max} = K_p \cdot k \cdot \omega_p, \quad (50)$$

где  $Q_{n \max}$  и  $Q_{p \max}$  – максимальные потоки подачи продукта или хладоносителя в регулируемое звено и его расхода, м<sup>3</sup>/ч;

$K_p$  – передаточное отношение редуктора;

$k$  – коэффициент пропорциональности;

$T_{II}$  – время переходного процесса;

$\omega_p$  – частота вращения рабочего органа АЗ.

Для существующих АЗ с ДРЭ  $T_{II} < 1$  с, поэтому максимальное значение  $V_{\delta \max}$  не превышает 0,3 дм<sup>3</sup>. Это составляет не более 1% общего объема регулирующей массы, что позволяет при практических расчетах пренебречь данной величиной [6, 12, 13].

Составляющая  $V_c$  определяется статическим режимом работы АЗ [13]

$$V_c = \tilde{m}[Q_n] \cdot t - K_p \cdot k \cdot \int_0^t \omega_p(t) \cdot dt. \quad (51)$$

Максимальный поток расхода АЗ с ДРЭ  $Q_{p \max}$  выбирается из условия

$$Q_{p \max} > Q_{n \max}, \quad (52)$$

поэтому принимается, что  $V_c = 0$  [9].

Таким образом, вместимость НРЕ АЗ с ДРЭ  $V_p$  может быть рассчитана по выражению (47) с учетом общей вместимости резервуаров НРЕ для хладоносителя или молока  $V_x$  [13]

$$V_x = V_p + V_x, \quad (53)$$

где  $V_x$  – вместимость резервуаров (резервуаров-охладителей или резервуаров-термосов) линии для хранения молока, м<sup>3</sup>.



Диапазон регулирования  $n$  звена системы  $D_r^n$  [6, 12, 13]

$$D_r^n = \frac{\tilde{m}[Q_n]_{\max}}{\tilde{m}[Q_n]_{\min}}, \quad (54)$$

где  $\tilde{m}[Q_n]_{\max}$ ,  $\tilde{m}[Q_n]_{\min}$  – максимальная и минимальная величина математического ожидания потоков подачи, м<sup>3</sup>/ч.

Быстродействие звена  $D_e$  [6, 12, 13]:

$$D_e = \frac{V_p \cdot \omega_z - A(Q_n)}{\tilde{m}[Q_n] \cdot \omega_z}, \quad (55)$$

где  $\omega_z$  – граничное значение частоты переменной составляющей  $Q_n$ ;

$A(Q_n)$  – амплитудное значение переменной составляющей  $Q_n$ .

Плавность работы  $D_e^n$  звена и системы [6, 12, 13]:

$$D_e^n = \frac{Q_i(t) \cdot T - V_p}{Q_i(t) \cdot T}; \quad D_{npe}^n = \frac{V_p}{M_{rc}^n}; \quad D_{npe}^\Sigma = \frac{V_z}{M_{rc}^\Sigma}, \quad (56)$$

где  $D_{npe}^n$ ,  $D_{npe}^\Sigma$  – коэффициент НРЕ звена и системы;

$M_{rc}^n$ ,  $M_{rc}^\Sigma$  – объем продукта, обработанный за рабочий цикл соответственно звеном и системой, м<sup>3</sup>;

$V_z$  – объем главной НРЕ, м<sup>3</sup>.

Уровень автоматизации звена  $D_a^n$  или системы  $D_a^\Sigma$  [1, 7, 8, 10]:

$$D_a^n = \frac{\sum T_a}{\sum T_u}; \quad D_a^\Sigma = \sum_{i=1}^n M_a^n \cdot D_a^n, \quad (57)$$

где  $M_a^n$  – весомость уровня автоматизации звена системы;

$\sum T_a$ ,  $\sum T_u$  – время работы в автоматическом режиме и время цикла, ч.

Количественный показатель уровня автоматизации относится к основным единичным показателям и его оптимальные значения определяются при численном анализе целевой функции вида [5, 12, 13]

$$\lambda[D_a^n]_{D_i L_k} = f \sum \left[ K(D_a^\Sigma)_{D_i L_i} \cdot E_n; 3(D_a^\Sigma)_{D_i L_i} \right] \rightarrow \min, \quad (58)$$

где  $\lambda[D_a^n]_{D_i L_k}$  – относительные удельные приведенные затраты на обработку сельскохозяйственной продукции при уровне автоматизации  $D_a^\Sigma$  в варианте  $D_i L_i$ ;

$K(D_a^\Sigma)_{D_i L_i}$ ,  $3(D_a^\Sigma)_{D_i L_i}$  – капитальные и эксплуатационные затраты в варианте  $D_i L_i$  при уровне автоматизации  $D_a^\Sigma$ ;

$E_n$  – нормативный коэффициент.

Повышение уровня автоматизации характеризуется коэффициентом  $d_a$ , который определяется из выражения [6, 12, 13]

$$d_a = 1 - \sum_{j=1}^f \tilde{m}[T_{ла}] / \sum_{j=1}^f \tilde{m}[T_{л}], \quad (59)$$

где  $\tilde{m}[T_{л}]$ ,  $\tilde{m}[T_{ла}]$  – оценки математического ожидания суммарных затрат рабочего времени оператора на управление соответственно до и после автоматизации рабочих операций.

Повышение производительности труда оператора оценивается коэффициентом  $d_t$ , который отражает соотношение количества выпущенной продукции с суммарными затратами рабочего времени оператора, необходимыми для ее выпуска за определенный интервал времени [12, 13]

$$d_t = 1 - \tilde{m}[T] / T_u, \quad (60)$$

где  $\tilde{m}[T]$  – оценка математического ожидания суммарных затрат рабочего времени оператора на управление линией, ч;

$T_u$  – продолжительность рабочего цикла, ч.

### Выводы

Предложенная методология исследования энергосберегающих технологических систем обработки сельхозпродукции как объектов управления позволяет:

- выявить и обработать всю необходимую информацию, характеризующую технологическую систему как объект исследования;
- обосновать контролируемые и регулируемые параметры процесса обработки, режимы функционирования системы (режимы работы);
- определить структуру системы электрооборудования и комплекс технических средств для получения информации о состоянии объекта управления, а также их влияние на показатели качества продукции, энергетические, экологические и эксплуатационные характеристики.

Математические модели, устанавливающие количественные взаимосвязи между параметрами контроля, регулирования и управления автоматизированными звеньями и режимами работы энергосберегающих технологических систем, используются на стадии разработки и проектирования для обоснования требуемых режимов работы системы электрооборудования автоматизированного звена, регулирования потоков энергии в системах охлаждения и обеспечения максимальной эффективности технологического процесса обработки сельхозпродукции.

Предложенная система единичных, интегральных и обобщенных комплексных показателей позволяет количественно оценить влияние различных технологических факторов среды и режимов работы оборудования на процесс обработки и качество сельхозпродукции, подобрать эффективную структуру энергосберегающих технологических систем для различных агроклиматических регионов страны. Применение автоматизированного звена с двухпороговым решающим элементом для обработки сельхозпродукции существенно упрощает структуру технологических линий и обеспечивает повышение хладопроизводительности охлаждающих систем не менее чем в 2 раза.

Установлено, что автоматизированные звенья с двухпороговым решающим элементом, действующие по принципу время-импульсной и широтно-импульсной модуляции потоков хладоносителя, по технико-экономическим показателям более чем в 15 раз эффективнее звеньев с непрерывным регулированием, работающих по аналоговому принципу.

### Библиографический список

1. Автоматизированная система обеспечения микроклимата в птичниках / И.М. Довлатов, Л.Ю. Юферев, В.В. Кирсанов, Д.Ю. Павкин, В.Ю. Матвеев // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 7 (86). – С. 7–18.
2. Альт В.В. Перспективы автоматизации в агропромышленном комплексе / В.В. Альт // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2006. – № 6. – С. 59–66.
3. Бекмухамбетов Р.Н. Методы расчета многосвязных объектов управления на примере вакуумного деаэратора / Р.Н. Бекмухамбетов // Наука и образование: сохраняя прошлое, создаем будущее : сб. статей X Международной науч.-практ. конф. (Россия, г. Пенза, 10 июня 2017 г.). – Пенза : Изд-во «Наука и просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.), 2017. – С. 63–68.
4. Белов А.А. Моделирование оценки факторов влияния на процесс электрогидравлической обработки воды / А.А. Белов // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 11 (90). – С. 103–112.

5. Васильев А.Н. Моделирование процесса нагрева зерна в СВЧ-поле универсального электро-технического модуля при различных алгоритмах работы электрооборудования / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, А.А. Васильев // Вестник аграрной науки Дона. – 2016. – Т. 1, № 33. – С. 12–17.
6. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – Москва : Высшая школа, 2003. – 479 с.
7. Разработка системы автоматического управления электрооборудованием для реализации энергосберегающих электротехнологий / Н.П. Кондратьева, И.Р. Владыкин, И.А. Баранова, С.И. Юран, А.И. Батулин, Р.Г. Большин, М.Г. Краснолуцкая // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 6 (85). – С. 36–49.
8. Родионова А.В. Обоснование выбранной частоты электромагнитных излучений при физиопрофилактике крольчат / А.В. Родионова, М.С. Боровков, М.А. Ершов // Нива Поволжья. – 2012. – № 1 – С. 108–110.
9. Славин Р.М. Автоматизация на животноводческих фермах / Р.М. Славин. – Москва : Сельхозиздат, 1963. – 343 с.
10. Славин Р.М. Автоматизация производственных процессов животноводческих ферм / Р.М. Славин. – Москва : Машиностроение, 1965. – 395 с.
11. Славин Р.М. Научные основы автоматизации производства в животноводстве и птицеводстве / Р.М. Славин. – Москва : Колос, 1974. – 464 с.
12. Учеваткин А.И. Алгоритмы управления дискретно-регулируемых электроприводов в системе охлаждения на технологических линиях обработки с.-х. продукции / А.И. Учеваткин, В.М. Богоявленский, В.А. Лавров // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». Тема выпуска: Агроинженерия. – 2007. – № 1 (21). – С. 40–47.
13. Учеваткин А.И. Метод расчета материальных потоков технологической линии первичной обработки молока с энергосберегающей технологией / А.И. Учеваткин, Ф.Г. Марьяхин // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве : труды 4-й Международной научно-технической конференции (Россия, г. Москва, ГНУ ВИЭСХ, 12–13 мая 2004 г.). – Т. 3. Энергосберегающие технологии в животноводстве и стационарной энергетике. – Москва : ГНУ ВИЭСХ, 2004. – С. 134–139.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Алексей Николаевич Васильев – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Россия, г. Москва, e-mail: [vasilev-viesh@inbox.ru](mailto:vasilev-viesh@inbox.ru).

Алексей Семенович Дорохов – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научно-организационной работе ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Россия, г. Москва, e-mail: [dorokhov@rgau-msha.ru](mailto:dorokhov@rgau-msha.ru).

Ирина Георгиевна Ершова – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории электрофизического воздействия на сельскохозяйственные объекты и материалы ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Россия, г. Москва, e-mail: [eig85@yandex.ru](mailto:eig85@yandex.ru).

Александр Иванович Учеваткин – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Россия, г. Москва, e-mail: [uai1953@yandex.ru](mailto:uai1953@yandex.ru).

Елена Валентиновна Косолапова – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Информационные системы и технологии» ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», Россия, г. Княгинино, e-mail: [K-art-inka@yandex.ru](mailto:K-art-inka@yandex.ru).

Дата поступления в редакцию 11.11.2019

Дата принятия к печати 23.12.2019

### AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Aleksey N. Vasilyev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Scientific Researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Russia, Moscow, e-mail: [vasilev-viesh@inbox.ru](mailto:vasilev-viesh@inbox.ru).

Aleksey S. Dorokhov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Scientific and Organizational Work, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Russia, Moscow, e-mail: [dorokhov@rgau-msha.ru](mailto:dorokhov@rgau-msha.ru).

Irina G. Ershova, Candidate of Engineering Sciences, Senior Scientific Researcher, Electrophysical Action on Agricultural Objects and Materials Laboratory, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Russia, Moscow, e-mail: [eig85@yandex.ru](mailto:eig85@yandex.ru).

Aleksandr I. Uchevatkin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Scientific Researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Russia, Moscow, e-mail: [uai1953@yandex.ru](mailto:uai1953@yandex.ru).

Elena V. Kosolapova, Candidate of Agricultural Sciences, Docent, the Dept. of Information Systems and Technologies, Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Russia, Knyaginino, e-mail: [K-art-inka@yandex.ru](mailto:K-art-inka@yandex.ru).

Received November 11, 2019

Accepted after revision December 23, 2019