

## КАЛМАНОВСКАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ РАСТИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА К ОБЕЗВОЖИВАНИЮ

В.М. Жилкин, А.Н. Грибков, Ю.Л. Муромцев

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

**Ключевые слова и фразы:** энергосберегающее управление; оперативный контроль; показатель результативности; фильтр Калмана.

**Аннотация:** Сформулирована задача энергосберегающего управления процессом непрерывной подготовки растительного материала к обезвоживанию. Рассмотрены вопросы управления и оперативного контроля показателя результативности процесса подготовки растительного материала к обезвоживанию при наличии помех по каналам управления и измерения. Предложен алгоритм энергосберегающего управления с использованием фильтра Калмана, который позволяет существенно снизить вариацию показателя результативности и повысить качество контроля над процессом.

### Введение

Существующие тепловые технологии обезвоживания свежесобраных растительных материалов (РМ) являются весьма энергоемкими и дорогими. Доля энергетических затрат на их тепловое обезвоживание доходит до 80 % от общего объема всех производственных затрат. Для решения этой проблемы могут быть использованы специальные технологии предварительной подготовки РМ к тепловому обезвоживанию путем снижения влагоудерживающей способности тканей РМ. Влагоудерживающая способность ткани РМ определяется наличием полупроницаемых внутриклеточных оболочек-мембран: плазмалеммы – внешней мембраны, прижатой к клеточной стенке, и тонопласта – мембраны, окружающей вакуоль с соком. Направленное технологическое повреждение структуры и функций полупроницаемых мембран клеток приводит к самопроизвольному выделению в межклеточное пространство и на поверхность РМ части внутриклеточной влаги, находящейся под избыточным внутриклеточным давлением.

При этом существенно изменяются электрические характеристики РМ, которые могут быть использованы для оперативной оценки показателей подготовленности РМ к обезвоживанию [1–3].

При оценке этих показателей в непрерывных технологических потоках значения измеряемых электрических характеристик материала подвержены влиянию различных шумов. Шумы измерения возникают при деформации РМ валками-электродами проточного датчика, из-за неоднородности фракционного состава и проводимости РМ, засоренности материала другими культурами, при вариации толщины слоя РМ, из-за различных вариантов его укладки, неоднородной влажности и других внутренних шумов РМ [3].

В статье рассматриваются вопросы энергосберегающего управления процессом подготовки РМ и оперативного контроля показателя подготовленности (результативности процесса) РМ к обезвоживанию при наличии внутренних помех в деформируемом РМ и в каналах измерения и управления. Рассмотрено влияние помех на значение показателя подготовленности РМ к обезвоживанию и на значение энергетического функционала затрат.

### Постановка задачи энергосберегающего управления в условиях помех

Динамику процесса подготовки РМ к обезвоживанию можно представить в виде уравнений состояния и наблюдения. Математически уравнение состояния на выходе устройства подготовки РМ к обезвоживанию можно записать в следующем виде:

$$x_{i+1}^{e2M} = F_{22M} x_i^{e2M} + G I_i + w_i^{e2M}, \quad i = \overline{0, N-1}, \quad (1)$$

где  $x_i^{эзк}, I_i$  – значения фазовой координаты на выходе устройства и величины управляющего воздействия (скалярного) на  $i$ -ом шаге;  $w_i^{эзк}$  – шум в канале управления;  $F_{эзк}, G$  – параметры модели;  $N$  – число шагов на временном интервале управления.

Уравнение наблюдения за выходом устройства подготовки РМ к обезвоживанию может быть представлено в следующем виде:

$$y_i^{эзк} = Hx_i^{эзк} + v_i^{эзк}, \quad (2)$$

здесь  $y_i^{эзк}$  – значение выходного измерительного сигнала на  $i$ -ом шаге;

$v_i^{эзк}$  – шум в канале измерения выходного параметра состояния;  $H$  – параметр измерительного блока.

Известны концы траектории изменения значений выходного сигнала

$$x_0^{эзк} = x^0, x_N^{эзк} \in X_{ном}, \quad (3)$$

которая при подготовке РМ к обезвоживанию должна стремиться от начального состояния материала к номинальному на выходе  $X_{ном}$ .

При этом в установленных пределах

$$\forall i \in [0, N-1], I_i \in [I_n, I_e] \quad (4)$$

регулируется величина электрического тока  $I_j$  в РМ;  $I_n, I_e$  – границы изменения управляющего воздействия.

Предварительными исследованиями в каналах управления и измерения определены величины помех  $w_i^{эзк}$  и  $v_i^{эзк}$  типа белый шум. Математическое ожидание помех определяется формулой:

$$E[w_i^{эзк}] = R_{эзк} \cdot \delta(i), E[v_i^{эзк}] = Q_{эзк} \cdot \delta(i), \quad (5)$$

где  $E[\cdot]$  – знак математического ожидания;  $R_{эзк}, Q_{эзк}$  – значения дисперсий шумов в каналах управления  $w_i^{эзк}$  и измерения  $v_i^{эзк}$ .

Минимизируемый функционал – затраты энергии – задается условием

$$J_s = \delta t \sum_{i=0}^{N-1} I_i^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

где  $\delta t$  – временной шаг дискретизации.

Задачу энергосберегающего управления можно сформулировать следующим образом: объект, динамика которого описывается уравнениями состояния (1) и наблюдения (2), требуется перевести из начального состояния в конечное (3) с учетом ограничений на управляющее воздействие в каждый момент времени (4) при наличии помех в каналах управления и измерения с известными статистическими характеристиками (5), обеспечив при этом минимум энергетического функционала (6).

Для численного решения поставленной задачи задается массив реквизитов  $\mathfrak{R}_{эзк}$ , который имеет вид:

$$\mathfrak{R}_{эзк} = (F_{эзк}, G, H_{эзк}, X_{ном}, I_n, I_e, Q_{эзк}, R_{эзк}, \delta t, N). \quad (7)$$

Для решения задачи (1)–(6) необходимо разработать алгоритм синтеза оптимального управления  $I_i$ , обеспечивающий достижение цели управления для заданного массива реквизитов  $\mathfrak{R}_{эзк}$ .

### Постановка задачи оперативного контроля показателя подготовленности РМ к обезвоживанию в условиях помех

Уравнение состояния на входе в устройство подготовки РМ к обезвоживанию имеет вид:

$$x_{i+1}^{эн} = F_{эн} x_i^{эн} + w_i^{эн}, \quad (8)$$

уравнение наблюдения на входе

$$y_i^{эн} = Hx_i^{эн} + v_i^{эн}. \quad (9)$$

Дополнительный массив реквизитов задачи контроля имеет вид:

$$\mathfrak{R}_{эн} = (F_{эн} = 1, H_{эн}, X_{ном}, Q_{эн}, \delta t, N). \quad (10)$$

Показатель результативности процесса (подготовленности РМ к обезвоживанию) определяется по формуле:

$$S_i = \frac{y_i^{ex} - y_i^{ex*}}{y_i^{ex} - x_{ном}^{ex}} \quad (11)$$

Задача оперативного контроля показателя подготовленности материала к обезвоживанию при наличии помех в каналах управления и измерения формулируется следующим образом: требуется обеспечить непрерывный контроль показателя подготовленности РМ к обезвоживанию, определенного выражением (11), в реальном времени с учетом измерений входного (9) и выходного (2) сигналов при заданном качестве процесса на выходе  $x_{ном}^{ex}$ .

### Реализация контроля и оптимального управления процессом

Оптимальное позиционное управление  $I_i^*$  на каждом шаге рассчитывается в зависимости от текущего значения  $y_i^{вых}$  и остаточного числа шагов  $N-i$ , алгоритм расчета задается синтезирующей функцией  $\Phi$  [4], т.е.

$$I_i^* = \Phi(y_i, N-i, x_{ном}) \quad (12)$$

Для снижения влияния помех в каналах управления и измерения предлагается при реализации оптимального управления и контроля показателя результативности процесса  $S_i$  применять оптимальную фильтрацию входного  $y_i^{ex}$  и выходного  $y_i^{ex*}$  сигналов.

Оптимальные оценки измеряемых сигналов, полученные при помощи фильтров Калмана, определяются следующим образом:

$$\hat{x}_i^{ex} = F_{ex} \hat{x}_{i-1}^{ex} + K_i^{ex} (y_{i-1}^{ex} - F_{ex} \hat{x}_{i-1}^{ex}); \quad (13)$$

$$\hat{x}_i^{ex*} = F_{ex*} \hat{x}_{i-1}^{ex*} + G I_{i-1} + K_i^{ex*} (y_{i-1}^{ex*} - F_{ex*} \hat{x}_{i-1}^{ex*} - G I_{i-1}). \quad (14)$$

Значения  $K_i$  (коэффициента усиления фильтра Калмана) определяются следующими формулами [4]:

$$K_i^{ex} = \frac{F_{ex}^2 P_{i-1}^{ex} + R_{ex}}{F_{ex}^2 P_{i-1}^{ex} + R_{ex} + Q_{ex}}; \quad (15)$$

$$P_i^{ex} = \frac{R_{ex} F_{ex}^2 P_{i-1}^{ex} + R_{ex}}{F_{ex}^2 P_{i-1}^{ex} + R_{ex} + Q_{ex}}; \quad (16)$$

$$K_i^{ex*} = \frac{F_{ex*}^2 P_{i-1}^{ex*} + R_{ex*}}{F_{ex*}^2 P_{i-1}^{ex*} + R_{ex*} + Q_{ex*}}; \quad (17)$$

$$P_i^{ex*} = \frac{R_{ex*} F_{ex*}^2 P_{i-1}^{ex*} + R_{ex*}}{F_{ex*}^2 P_{i-1}^{ex*} + R_{ex*} + Q_{ex*}}, \quad (18)$$

где  $P_i^{ex}$  и  $P_i^{ex*}$  – дисперсии ошибок фильтрации.

### Система контроля и энергосберегающего управления процессом

Обработка РМ осуществляется переменным электрическим током промышленной частоты при номинальном значении напряжения на электродах. Величина тока в РМ и, следовательно, энергетические затраты на процесс зависят от времени пребывания РМ в зоне электрической обработки (линейной скорости подачи РМ). Структурная схема системы контроля и управления процессом подготовки приведена на рис. 1.

Двухканальная система измерений получает информацию об электрофизических характеристиках РМ от двух проточных датчиков Д1 и Д2, на которые накладываются помехи двух видов:

- шумы состояния  $W_i^{ex}$  вследствие неоднородности РМ на входе и неравномерности обработки  $W_i^{ex*}$  на выходе процесса, соответственно;

- шумы измерения  $V_i^{ex}$  и  $V_i^{ex*}$ , которые возникают, в основном, из-за деформации материала в проточных датчиках при захвате его вращающимися валками-электродами.

Датчик Д1 измеряет свойства исходного, а Д2 – подготовленного материала. По каналам измерения электрические сигналы, искаженные помехами, подаются на управляющую вычислительную машину (УВМ). УВМ, используя массивы реквизитов  $\mathfrak{R}_{ex}$  и  $\mathfrak{R}_{вых}$ , определенных по характеристикам применяемого оборудования, осуществляет программную оптимальную фильтрацию сигналов отдельно для входного и выходного каналов измерения.



Рис. 1. Структурная схема системы контроля и энергосберегающего управления процессом подготовки РМ к обезвоживанию

Расчет оптимального управляющего воздействия проводится УВМ с учетом исправленных значений измерительных сигналов второго канала и массива реквизитов управления  $\mathfrak{R}_{вых}$ , включающего в себя дополнительно ряд требований к процессу и ограничения на управление  $I_i \in [I_N, I_E]$ .

Расчет показателя  $S_i$  подготовленности РМ к обезвоживанию проводится по исправленным значениям сигналов первого и второго каналов с учетом требования к качеству процесса  $\chi_{ном}^{ex}$ .

**Моделирование процесса управления в условиях помех**

Целью моделирования является визуализация и анализ результатов управления при различных шагах дискретизации времени и разной интенсивности помех в каналах управления и измерения. При этом исследованы следующие ситуации:

- интенсивность шумов состояния и измерения одинакова;
- интенсивность шумов состояния на порядок больше, чем шумов измерения;
- интенсивность шумов измерения на порядок больше, чем шумов состояния.

Моделирование проводилось на временном интервале  $\Delta t = [t_0, t_n] = [0, 20]$  при ограничении на управление

$$I(t) \in [I_N = 1,0A; I_E = 5,0A] \tag{19}$$

Объект требуется перевести из начального состояния  $x^{ex}(t_0) = x_0^{ex} = 1 \text{ В}$  в конечное  $x^{ex}(t_k) = x_k^{ex} = x_{ном}^{ex} = 0,2 \text{ В}$ ,  $x(t_n) \in [0,95x_{ном}^{ex}; 1,05x_{ном}^{ex}] \text{ В}$  при минимизируемом функционале

$$J_3 = \delta t \sum_{i=0}^{N-1} I_i^2 \rightarrow \min$$

$$\alpha_{\text{взх}} = -0,004 \frac{1}{c}; \quad (20)$$

$$b_{\text{взх}} = 0,1 \frac{O_{\text{М}}}{c}; \quad (21)$$

$$P_0^{\text{вх}} = 0; \quad P_0^{\text{взх}} = 0; \quad \delta t = 1; \quad (22)$$

$$x_i^{\text{вх}} = x_{i-1}^{\text{вх}} + w_i^{\text{вх}}; \quad (23)$$

$$y_i^{\text{вх}} = x_i^{\text{вх}} + v_i^{\text{вх}}; \quad (24)$$

$$y_i^{\text{взх}} = x_i^{\text{взх}} + v_i^{\text{взх}}; \quad (25)$$

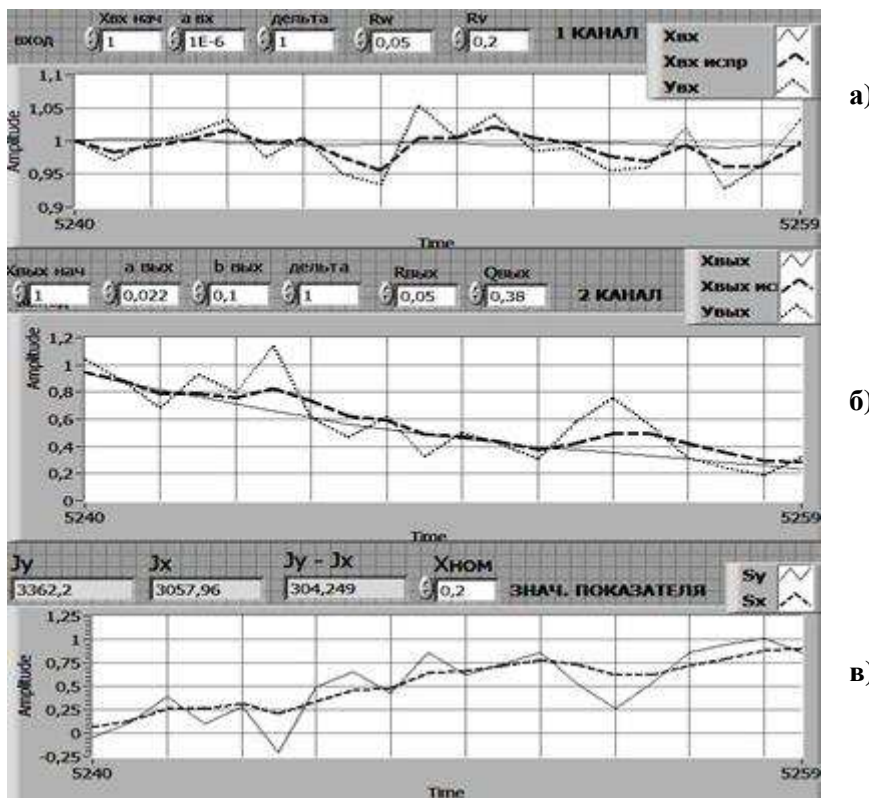
$$J_s = \sum_{i=0}^{19} I_i^2; \quad (26)$$

$$\forall i \in [0, 20] \quad I_i \in [1, 5]. \quad (27)$$

Для поставленной задачи и заданного выше вида минимизируемого функционала оптимальное управление в частном случае рассчитывается по формуле [4]:

$$I_i^* = \frac{2a_{\text{взх}} x_i^{\text{взх}}}{b_{\text{взх}} (e^{-2a_{\text{взх}}(\Delta t - i\delta t)} - 1)}, \quad (28)$$

где  $\Delta t = N\delta t$ ;  $a_{\text{взх}}$ ,  $b_{\text{взх}}$  – параметры объекта на выходе.



**Рис. 2. Осциллограммы фактических ( $x_{\text{вх}}$  и  $x_{\text{вых}}$ ) и измеренных сигналов ( $y_{\text{вх}}$ ) и ( $y_{\text{вых}}$ ) и их оценок после фильтрации ( $x_{\text{вх испр}}$ ) и ( $x_{\text{вых испр}}$ ) для первого и второго каналов измерительной системы:**

- а) – фактические, измеренные и исправленные сигналы первого канала;
- б) – фактические, измеренные и исправленные сигналы второго канала;
- в) – графики значений показателя результативности процесса, рассчитанные по измеренным  $S_y$  и исправленным  $S_x$  значениям сигналов.

В качестве модели динамики устройства подготовки РМ к обезвоживанию принято стохастическое аperiodическое звено. Параметры  $F$  и  $G$  можно получить, решая задачу Коши для аperiodического звена:

$$F_{\text{ЭЭК}} = e^{-a_{\text{ЭЭК}} \cdot \Delta t}, \quad G = -\frac{b_{\text{ЭЭК}}}{a_{\text{ЭЭК}}} (1 - e^{-a_{\text{ЭЭК}} \cdot \Delta t}) \quad (29)$$

На рис. 2 приведен один из вариантов реализации численного моделирования процесса в программной среде Lab VIEW с выводом осциллограмм сигналов измерения первого  $y_1^{\text{ЭЭК}}$  (рис. 2а) и второго  $y_2^{\text{ЭЭК}}$  (рис. 2б) каналов измерительной системы и их оценок  $\hat{y}_1^{\text{ЭЭК}}$  и  $\hat{y}_2^{\text{ЭЭК}}$  после фильтрации. При этом число шагов при управлении составило 20, шаг дискретизации 1, интенсивность помех в канале управления  $R_w = 0,05$ , в канале измерения  $Q_v = 0,38$ , значение минимизируемого функционала затрат энергии при управлении без фильтрации равно  $J(y) = 33622$  и с фильтрацией  $J(\hat{y}) = 3057,96$ .

Экономия энергии составила  $\Delta J = J(y) - J(\hat{y}) = 304249$ . Использование фильтров Калмана существенно снизило вариацию показателя результативности процесса подготовки растительного материала к обезвоживанию (рис. 2в).

### Выводы

1. При значительной интенсивности помех в каналах измерения и управления использование оптимальной фильтрации позволяет снизить затраты энергии на технологический процесс подготовки растительных материалов к обезвоживанию.
2. В случае малой интенсивности помех в канале измерения применение фильтров Калмана не ведет к ощутимой экономии энергозатрат.
3. Использование фильтров Калмана существенно снижает вариацию показателя результативности процесса (показателя подготовленности растительного материала к обезвоживанию).
4. Снижение вариации показателя качества уменьшает риски контроля первого и второго рода и приводит в целом к повышению качества контроля над процессом.

### Список литературы

1. Жилкин, В.М. Автоматизированная компьютерная система для определения показателя изменения влагоудерживающих свойств свежесобранного растительного материала / В.М. Жилкин // Контроль. Диагностика, 2007. – №7(109). – С. 60–61.
2. Жилкин, В.М. Система показателей для контроля процесса подготовки растительного материала к обезвоживанию / В.М. Жилкин, С.В. Мищенко, С.В. Пономарев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского, 2009. – №1. – С. 122–128.
3. Жилкин, В.М. Анализ погрешностей при определении показателя снижения влагоудерживающих свойств зеленых трав в процессе их подготовки к обезвоживанию / В.М. Жилкин // Вестник ТГТУ, Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – Т.12. – №4А. – С. 963–968.
4. Артемова, С.В. Влияние интенсивности помех на минимизируемый функционал при энергосберегающем управлении с оптимальной фильтрацией / С.В. Артемова, Д.Ю. Муромцев, А.Н. Грибков // Вестник ТГТУ, Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, – 2002. – Т. 8. – №3. – С. 402–409.

### Kalman Filtration in Tasks of Management and Control of Productivity of Preparation Process of Vegetative Material for Dehydration

V.M. Zhilkin, A.N. Gribkov, Ju.L. Muromtsev

Tambov State Technical University, Tambov

**Key words and phrases:** energy-saving control; operative control; productivity indicator; Kalman filter.

**Abstract:** The problem of energy-saving control by process of continuous preparation of a vegetative material to dehydration is formulated. The questions of management and the operative control of the productivity indicator of preparation process of vegetative material for dehydration in the presence of hindrances on control paths and measurements are considered. The algorithm of power saving up management using Kalman filter which allows lowering productivity indicator variation and raising quality of control over the process is offered.

