

УДК 681.5.015.44

**СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ  
ПОКАЗАТЕЛЯ ПОДГОТОВЛЕННОСТИ СВЕЖЕУБРАННОГО  
РАСТИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА К ОБЕЗВОЖИВАНИЮ**

**В.М. Жилкин<sup>1</sup>, А.Н. Грибков<sup>2</sup>, Ю.Л. Муромцев<sup>2</sup>**

*Кафедры: «Автоматизированные системы и приборы» (1),  
«Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» (2), ТГТУ;  
GribkovAlexey@yandex.ru*

**Ключевые слова и фразы:** оперативный контроль; показатель качества процесса; фильтр Калмана.

**Аннотация:** Сформулирована задача оперативного контроля процесса непрерывной подготовки растительного материала к обезвоживанию. Рассмотрены вопросы контроля показателя подготовленности растительного материала к обезвоживанию в трехсекционной установке при наличии помех по каналам управления и измерения. Предложена структура системы и алгоритм оперативного контроля с использованием фильтра Калмана, который позволяет снизить вариацию показателя подготовленности растительных материалов и повысить качество контроля над процессом.

---

**Введение**

Процесс обезвоживания среди технических и технологических задач является наиболее крупным резервом повышения эффективности производства кормов из свежесобраных высоковлажных растительных материалов (РМ). Высокая энергоемкость искусственной сушки РМ связана с фазовым переходом влаги при ее испарении. Механический отжим не связан с фазовым переходом влаги, и это является основанием для использования процессов влажного фракционирования РМ на сок и жом с целью снижения энергозатрат при обезвоживании. Однако в процессе прессового разделения РМ можно извлечь только механически связанную влагу. В самой же клетке протоплазма связывает значительную часть влаги биологически и активно сопротивляется ее удалению из материала. Разрушая биологически живые клетки, можно перевести биологически связанную влагу в свободное состояние и увеличить степень разделения при прессовании. Механическое разрушение клеток РМ измельчением приводит к ухудшению дренажных свойств массы и к увеличению гидравлического сопротивления выходу влаги при прессовании.

Живая клетка РМ как основной структурный элемент биологической ткани обладает высокой чувствительностью к электрическим воздействиям. Если внешние электрические воздействия на РМ выше порога чувствительности живой

протоплазмы, то происходит ответная реакция, проявляющаяся в повышении влагопроницаемости клеточных мембран. Сильные электрические или другие экстремальные воздействия на живой РМ приводят к необратимым изменениям структуры протоплазмы и ее разрушению. Гибель протоплазмы сопровождается потерей свойства полупроницаемости клеточных мембран и потерей состояния тургора, в результате чего часть внутриклеточной влаги выходит в межклеточники, заполняет поры и капилляры, мигрирует по ним к поверхности материала. При этом существенно изменяются электрические характеристики РМ, которые могут быть использованы для оперативной оценки показателя подготовленности РМ к обезвоживанию [1–3].

При оценке показателя в непрерывных технологических потоках значения измеряемых электрических характеристик материала подвержены влиянию различных шумов. Помехи измерения возникают при деформации РМ вращающимися валками-электродами проточных датчиков из-за неоднородности фракционного состава РМ, засоренности его другими культурами, неоднородной влажности и других помех [3].

Подготовка РМ к обезвоживанию в трехсекционном устройстве осуществляется переменным электрическим током промышленной частоты при установленных значениях напряжения и тока на электродах в двух первых секциях. Величина тока в РМ в третьей секции регулируется таким образом, что осуществляется доводка измеряемой характеристики РМ на выходе третьей секции в соответствии с требованиями к качеству всего процесса  $\chi_{\text{ном}}^{\text{ВЫХ}}$ .

В статье рассмотрены вопросы оперативного контроля показателя подготовленности РМ к обезвоживанию при наличии помех и в каналах измерения и управления. Показаны пути снижения влияния помех на значение показателя подготовленности РМ к обезвоживанию. Рассмотрено влияние помех на значение энергетического функционала затрат в третьей секции.

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

Динамику процесса подготовки РМ к обезвоживанию можно представить в виде уравнений состояния и наблюдения. Уравнения состояний на входе и выходе устройства подготовки РМ к обезвоживанию имеют вид:

$$x_{i+1}^{\text{ВХ}} = F_{\text{ВХ}} x_i^{\text{ВХ}} + w_i^{\text{ВХ}}; \quad (1)$$

$$x_{i+1}^{\text{ВЫХ}} = F_{\text{ВЫХ}} x_i^{\text{ВЫХ}} + G I_i + w_i^{\text{ВЫХ}}, \quad i = \overline{0, N-1}; \quad (2)$$

уравнения наблюдения –

$$y_i^{\text{ВХ}} = H x_i^{\text{ВХ}} + v_i^{\text{ВХ}}; \quad (3)$$

$$y_i^{\text{ВЫХ}} = H x_i^{\text{ВЫХ}} + v_i^{\text{ВЫХ}}, \quad (4)$$

где  $x_i^{\text{ВХ}}, x_i^{\text{ВЫХ}}$  – значения фазовой координаты на входе и выходе устройства;  $w_i^{\text{ВХ}}, w_i^{\text{ВЫХ}}$  – шум в канале управления, замеряемый на входе и выходе устройства;  $I_i$  – величина управляющего воздействия (скалярного) на  $i$ -м шаге;  $F_{\text{ВХ}}, F_{\text{ВЫХ}}, G$  – параметры моделей;  $N$  – число шагов на временном интервале управления;  $y_i^{\text{ВХ}}, y_i^{\text{ВЫХ}}$  – значения измерительных сигналов на входе и выходе на  $i$ -м шаге;  $v_i^{\text{ВХ}}, v_i^{\text{ВЫХ}}$  – шум в канале измерения входного и выходного параметров состояния;  $H$  – параметр измерительного блока.

Статистические характеристики помех в каналах управления и измерения определяются проведением предварительных исследований, при этом предполагается, что помехи представляют собой «белый» гауссовский шум. Математическое ожидание помех определяется:

$$E[w_i^{\text{BX}}] = R_{\text{BX}} \delta(i); \quad E[v_i^{\text{BX}}] = Q_{\text{BX}} \delta(i); \quad (5)$$

$$E[w_i^{\text{ВЫХ}}] = R_{\text{ВЫХ}} \delta(i); \quad E[v_i^{\text{ВЫХ}}] = Q_{\text{ВЫХ}} \delta(i), \quad (6)$$

где  $E[\ ]$  – знак математического ожидания;  $R_{\text{BX}}, Q_{\text{BX}}, R_{\text{ВЫХ}}, Q_{\text{ВЫХ}}$  – значения дисперсий шумов в каналах управления и измерения.

Показатель результативности процесса (готововленности РМ к обезвоживанию) определяется по формуле

$$S_i = \frac{y_i^{\text{BX}} - y_i^{\text{ВЫХ}}}{y_i^{\text{BX}} - \chi_{\text{НОМ}}^{\text{ВЫХ}}}. \quad (7)$$

Задача оперативного контроля показателя готововленности материала к обезвоживанию при наличии помех в каналах управления и измерения формулируется следующим образом: требуется обеспечить непрерывный контроль показателя готововленности РМ к обезвоживанию, определенного выражением (7), в реальном времени с учетом измерений входных (1), (3) и выходных (2), (4) сигналов при заданном качестве процесса на выходе  $\chi_{\text{НОМ}}^{\text{ВЫХ}}$ .

## 2. Реализация оперативного контроля процесса с применением фильтра Калмана

Для снижения влияния помех в каналах управления и измерения предлагается при реализации оперативного контроля показателя результативности процесса  $S_i$  применять оптимальную фильтрацию входного  $y_i^{\text{BX}}$  и выходного  $y_i^{\text{ВЫХ}}$  сигналов.

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

$$\hat{x}_i^{\text{BX}} = F_{\text{BX}} \hat{x}_{i-1}^{\text{BX}} + K_i^{\text{BX}} (y_{i-1}^{\text{BX}} - F_{\text{BX}} \hat{x}_{i-1}^{\text{BX}}); \quad (8)$$

$$\hat{x}_i^{\text{ВЫХ}} = F_{\text{ВЫХ}} \hat{x}_{i-1}^{\text{ВЫХ}} + G I_{i-1} + K_i^{\text{ВЫХ}} (y_{i-1}^{\text{ВЫХ}} - F_{\text{ВЫХ}} \hat{x}_{i-1}^{\text{ВЫХ}} - G I_{i-1}), \quad (9)$$

где значения  $K_i$  (коэффициента усиления фильтра Калмана) определяются формулами [4]:

$$K_i^{\text{BX}} = \frac{F_{\text{BX}}^2 P_{i-1}^{\text{BX}} + R_{\text{BX}}}{F_{\text{BX}}^2 P_{i-1}^{\text{BX}} + R_{\text{BX}} + Q_{\text{BX}}}; \quad (10)$$

$$K_i^{\text{ВЫХ}} = \frac{F_{\text{ВЫХ}}^2 P_{i-1}^{\text{ВЫХ}} + R_{\text{ВЫХ}}}{F_{\text{ВЫХ}}^2 P_{i-1}^{\text{ВЫХ}} + R_{\text{ВЫХ}} + Q_{\text{ВЫХ}}}, \quad (11)$$

где  $P_i^{\text{BX}}$  и  $P_i^{\text{ВЫХ}}$  – дисперсии ошибок фильтрации,

$$P_i^{\text{BX}} = \frac{R_{\text{BX}} F_{\text{BX}}^2 P_{i-1}^{\text{BX}} + R_{\text{BX}}}{F_{\text{BX}}^2 P_{i-1}^{\text{BX}} + R_{\text{BX}} + Q_{\text{BX}}}; \quad (12)$$

$$P_i^{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{\text{ВЫХ}} F_{\text{ВЫХ}}^2 P_{i-1}^{\text{ВЫХ}} + R_{\text{ВЫХ}}}{F_{\text{ВЫХ}}^2 P_{i-1}^{\text{ВЫХ}} + R_{\text{ВЫХ}} + Q_{\text{ВЫХ}}}. \quad (13)$$

### 3. Система оперативного контроля и управления процессом

Схема системы контроля и управления процессом подготовки РМ в трехсекционном устройстве 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 вследствие неоднородности РМ на входе  $w_i^{BX}$  и неравномерности обработки на выходе  $w_i^{ВЫХ}$  третьей секции устройства подготовки, соответственно;

– шумы измерения  $v_i^{BX}$  и  $v_i^{ВЫХ}$ , 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 материалов. По каналам измерения электрические сигналы, искаженные помехами, подаются на управляющую вычислительную машину (УВМ), используя массивы исходных данных  $\mathfrak{R}_{ВХ}$  и  $\mathfrak{R}_{ВЫХ}$ , определенных по характеристикам применяемого оборудования, осуществляется программная оптимальная фильтрация сигналов отдельно для входного и выходного каналов измерения.

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  $I_i \in [I_H, I_B]$  в третьей секции.

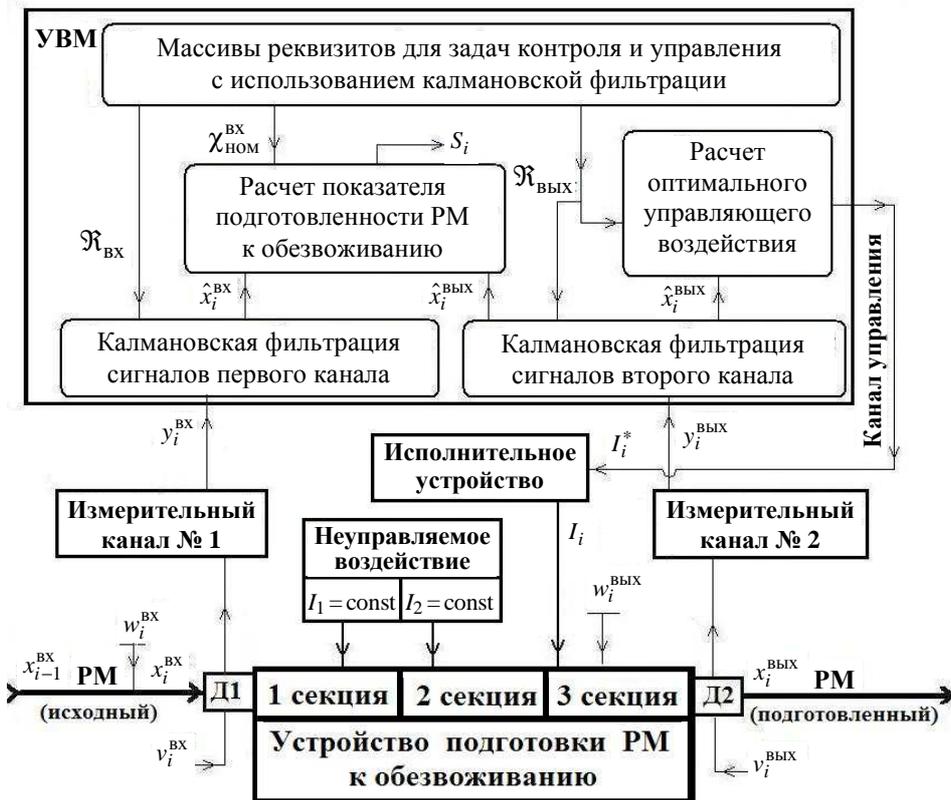
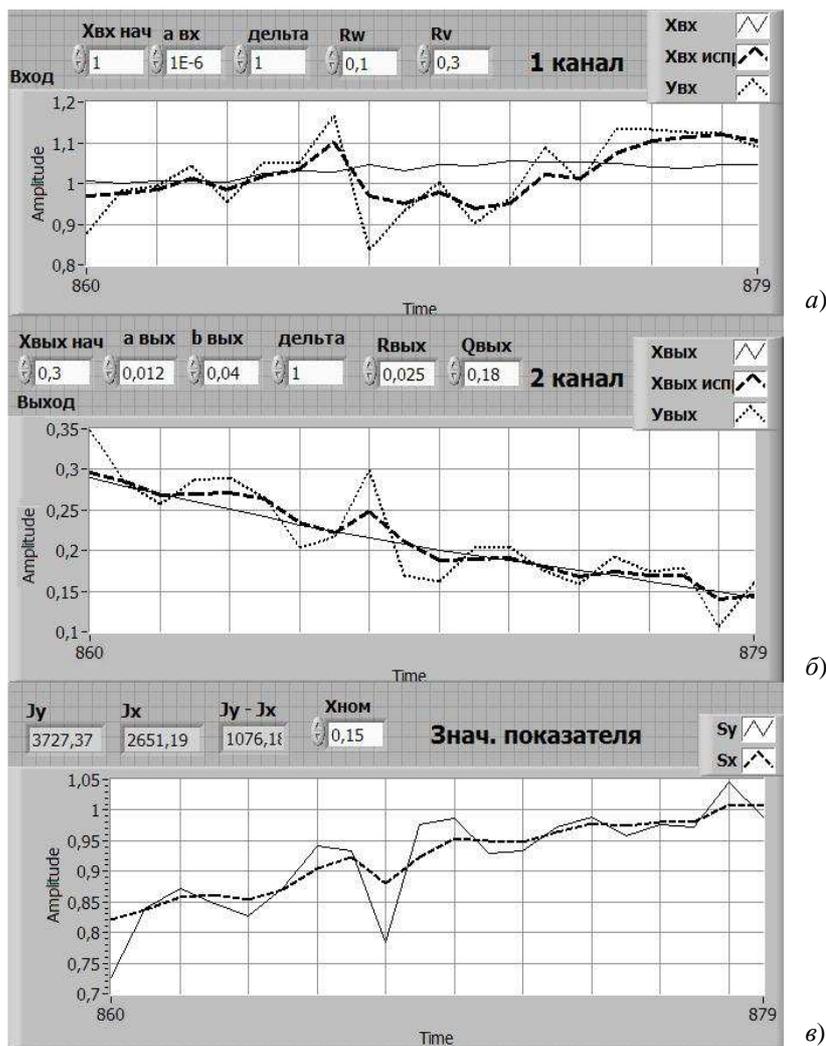


Рис. 1. Структурная схема системы контроля и управления трехсекционным устройством подготовки РМ к обезвоживанию

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

#### 4. Моделирование процесса контроля в условиях помех

Целью моделирования является визуализация и анализ результатов оперативного контроля при разной интенсивности помех в каналах управления и измерения. На рис. 2 приведен один из вариантов реализации численного моделирования процесса в программной среде LabVIEW.



**Рис. 2.** Осциллограммы фактических  $x_{\text{ВХ}}$  и  $x_{\text{ВЫХ}}$  и измеренных  $y_i^{\text{ВХ}}$  ( $y_{\text{ВХ}}$ ) и  $y_i^{\text{ВЫХ}}$  ( $y_{\text{ВЫХ}}$ ) сигналов и их оценок после фильтрации  $\hat{x}_i^{\text{ВХ}}$  ( $x_{\text{ВХ исп}}$ ) и  $\hat{x}_i^{\text{ВЫХ}}$  ( $x_{\text{ВЫХ исп}}$ ) для первого и второго каналов измерительной системы:  
*a, б* – фактические, измеренные и исправленные сигналы первого и второго каналов соответственно; *в* – графики значений показателя результативности процесса, рассчитанные по измеренным  $S_y$  и исправленным  $S_x$  значениям сигналов

На рис. 2 показаны осциллограммы сигналов измерения первого  $y_i^{BX}$  (рис. 2, а) и второго  $y_i^{ВВХ}$  (рис. 2, б) каналов контрольно-измерительной системы и их оценок  $\hat{x}_i^{BX}$  и  $\hat{x}_i^{ВВХ}$  после фильтрации. Использование фильтров Калмана существенно снижает вариацию показателя результативности процесса подготовки растительного материала к обезвоживанию (см. рис. 2, в). Оценка энергетического функционала затрат в третьей секции показала, что фильтрация помех при управлении уменьшает значение функционала на 1076,18 единиц с 3727,37 до 2651,19 (см. рис. 2, в).

### Выводы

1. Использование фильтров Калмана существенно снижает вариацию показателя подготовленности растительного материала к обезвоживанию.
2. Снижение вариации показателя качества уменьшает риски контроля первого и второго рода и приводит в целом к повышению качества контроля над процессом.
3. При значительной интенсивности помех в каналах измерения и управления использование фильтрации позволяет снизить затраты энергии на подготовку РМ к обезвоживанию.

#### 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 // Вопр. соврем. науки и практики. Ун-т им. В.И. Вернадского. – 2009. – № 1 (15). – 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 // Вестн. 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 // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2002. – Т. 8, № 3. – С. 402–409.

---

## System of Operative Continuous Control over Indicator of Vegetative Material Readiness to Dehydration

V.M. Zhilkin<sup>1</sup>, A.N. Gribkov<sup>2</sup>, Yu.L. Muromtsev<sup>2</sup>

Departments: “Automated Systems and Devices” (1),  
“Designing of Radio-Electronic and Microprocessor Systems” (2), TSTU;  
GribkovAlexey@yandex.ru

**Key words and phrases:** Kalman filter; operative control; process quality indicator.

**Abstract:** The problem of operative control over continuous preparation process of vegetative material to dehydration is considered. Matters of control over the indicator of readiness of vegetative material to dehydration in three-section unit under disturbance in control and measurement channels are studied. The structure of the system and algorithm of operative control using the Kalman filter is offered; it enables to reduce the variation of the indicator of readiness of vegetative material to dehydration and improve the quality control over the process.

---

### **System der operativen ununterbrochenen Kontrolle des Kennwertes der Vorbereitung des frischeingebrachten Pflanzenstoffes zur Entwässerung**

**Zusammenfassung:** Es ist die Aufgabe der operativen Kontrolle des Prozesses der ununterbrochenen Vorbereitung des Pflanzenstoffes zur Entwässerung formuliert. Es sind die Fragen der Kontrolle des Kennwertes der Vorbereitung des Pflanzenstoffes zur Entwässerung in der Dreispuliganlage bei Vorhandensein von den Störungen in den Kanälen der Steuerung und Messung betrachtet. Es sind die Struktur des Systems und den Algorithmus der operativen Kontrolle mit der Benutzung des Kalman-Filters, der die Variation des Kennwertes der PM-Vorbereitung zu senken und die Qualität der Prozesskontrolle zu erhöhen erlaubt, vorgeschlagen.

---

### **Système du contrôle continu opératif de l'indice de la préparation du matériel végétal pour la déshydratation**

**Résumé:** Est formulé le problème du contrôle du processus continu opératif de la préparation du matériel végétal pour la déshydratation. Sont envisagées les questions du contrôle de l'indice de la préparation du matériel végétal pour la déshydratation dans une installation à trois sections lors de la présence des erreurs dans les canaux de la commande et de la mesure. Est proposée la structure du système et l'algorithme du contrôle opératif avec l'emploi du filtre Kalman qui permet de diminuer la variation de l'indice de la préparation du matériel végétal et d'augmenter la qualité du contrôle du processus.

---

**Авторы:** *Жилкин Владимир Михайлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные системы и приборы»; *Грибков Алексей Николаевич* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Муромцев Юрий Леонидович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ГОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ГОУ ВПО «ТГТУ».