

УДК 631.879:41

UDC 631.879:41

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ
ДИСКРЕТНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА
МЕЗОФИЛЬНОЙ СТАДИИ И НА СТАДИИ
ОСТЫВАНИЯ ПРОЦЕССА
КОМПОСТИРОВАНИЯ**

**FORMULATION AND SOLUTION OF THE
PROBLEM OF DISCRETE CONTROL IN THE
THERMOPHILIC STAGE OF THE COMPOSTING
PROCESS**

Пиотровский Дмитрий Леонидович
Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой
автоматизации производственных процессов

Piotrovskiy Dmitriy Leonidovich
Dr.Sci.Tech., professor, head of the Department of
automation of production processes

Посмитная Лариса Александровна
Старший преподаватель кафедры автоматизации
производственных процессов

Posmitnaja Larisa Aleksandrovna
Senior lecturer, Department of automation of production
processes

Дружинина Ксения Васильевна
Аспирант кафедры автоматизации
производственных процессов

Druzhinina Ksenija Vasilievna
graduate student, Department of automation of
production processes

Дружинина Ульяна Васильевна
Аспирант кафедры автоматизации
производственных процессов
*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
технологический университет», Краснодар, Россия*

Druzhinina Ulyana Vasilievna
graduate student, Department of automation of
production processes
*Kuban State Technological University, Krasnodar,
Russia*

В статье сформулирована и решена задача дискретного управления на мезофильной стадии и на стадии остывания процесса компостирования. Решены задачи минимизации отклонения температуры субстрата от заданных значений и отклонения концентрации кислорода в газовой среде биореактора от заданных значений. Построен алгоритм для вычисления дискретного управления процессом компостирования на стадии остывания.. Статья подготовлена в рамках выполнения научного проекта 16-48-230441 а(р) «Математическое моделирование процессов, протекающих в автоматизированной установке для круглогодичного производства органических удобрений в условиях Краснодарского края», финансируемого РФФИ и администрацией Краснодарского края

The article formulates and solves the task of discrete control in the thermophilic stage of the composting process. It is shown that considering the relay control entity to maintain specified process conditions requires the organization of the sliding mode. We have solved the problem of minimizing the temperature deviation of the substrate from the set values and the deviation of the oxygen concentration in the gas phase of the bioreactor from the specified values. The article shows the algorithm to compute the discrete control of the composting process in the thermophilic stage. This work was prepared in the framework of the scientific project 16-48-230441 a(R) "Mathematical modeling of the processes occurring in the automated installation for year-round production of organic fertilizers in the conditions of the Krasnodar region", financed by RFBR and the administration of the Krasnodar region

Ключевые слова: КОМПОСТИРОВАНИЕ;
ДИСКРЕТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ, АЛГОРИТМ,
МЕЗОФИЛЬНАЯ СТАДИЯ, СТАДИЯ
ОСТЫВАНИЯ

Keywords: COMPOSTING, RELAY CONTROL,
ALGORITHM, THERMOPHILIC STAGE, COOLING
DOWN STAGE

Doi: 10.21515/1990-4665-131-066

Задача оптимального управления для мезофильной стадии процесса ставится следующим образом/ Имея уравнения движения системы

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 f_T(x_1)x_3 + b_1 Y_1 + b_2 Y_2 + b_4 Y_3 + a_3(x_1) \\ \dot{x}_2 = a_2 f_T(x_1)x_3 + b_3 Y_3 \\ \dot{x}_3 = -f_T(x_1)x_3 \end{cases} \quad (1),$$

перевести систему из начальной точки $x_0(T_{ос}, K_{кmax})$ при $t=0$, в конечную $x_1(T_{сан}, K_{корп})$ в момент времени $t_{1СТ}$.

Согласно выбранной стратегии управления

$$\begin{aligned} Y_1(t) &= \begin{cases} 1, t \leq t_{1выкл} \\ 0, t > t_{1выкл} \end{cases} \\ Y_2(t) &= 0 \\ Y_3(K_k) &= \begin{cases} 1, (K_k - K_{корп}) \leq 0.05K_{корп} \\ 0, (K_k - K_{корп}) > 0.05K_{корп} \end{cases} \end{aligned} \quad (2),$$

на мезофильной стадии охлаждение объекта отсутствует, т.е. $Y_2(t)=0$.

Поэтому можно преобразовать систему уравнений движения объекта:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 f_T(x_1)x_3 + b_1 Y_1 + b_4 Y_3 + a_3 \\ \dot{x}_2 = a_2 f_T(x_1)x_3 + b_3 Y_3 \\ \dot{x}_3 = -f_T(x_1)x_3 \end{cases} \quad (3)$$

Управляющие воздействия заданы в виде:

$$\begin{aligned} Y_1(t) &= \begin{cases} 1, t \leq t_{1выкл} \\ 0, t > t_{1выкл} \end{cases} \\ Y_3(K_k) &= \begin{cases} 1, (K_k - K_{корп}) \leq 0.05K_{корп} \\ 0, (K_k - K_{корп}) > 0.05K_{корп} \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

Требование к управлению, оптимальному по быстродействию, представим в виде:

$$J = \int_0^{t_k} f_0(Y_1, Y_3) dt \mapsto \min. \quad (5)$$

Выражения (3) - (5) представляют собой постановку задачи дискретного управления для мезофильной стадии процесса компостирования. Из (2) видно, что управление Y_1 является функцией времени, а Y_3 задано в форме релейного параметрического управления.

Учитывая зависимость активности экзотермической реакции от температуры, а также статическую характеристику применяемого

управления по температуре (начальный нагрев до момента времени t_k), температура субстрата будет монотонно возрастать, как это представлено на рисунке 1, на интервале времени от 0 до t_k . Поскольку связь этих величин задана системой уравнения движения, для каждого момента времени однозначно определено значение температуры субстрата, равно как известно, в какой момент времени температура субстрата достигнет заданного значения.

Это позволяет принять T_k в качестве новой независимой переменной, и определить управление Y_1 в виде зависимости от температуры субстрата:

$$Y_1(t) = \begin{cases} 1, T_k \leq T_{1\text{выкл}} \\ 0, T_k > T_{1\text{выкл}} \end{cases} \quad (6)$$

Выразим уравнения движения системы в виде зависимости от новой независимой переменной T_k , или, переходя к введенным ранее обозначениям, x_1 . Для этого представим уравнения движения объекта в виде зависимости от x_1 :

$$\begin{aligned} \frac{dx_2}{dt} &= \frac{dx_2}{dx_1} \cdot \frac{dx_1}{dt} = \frac{dx_2}{dx_1} \cdot [a_1 f_T(x_1)x_3 + b_1 Y_1 + b_4 Y_3 + a_3] \\ \frac{dx_3}{dt} &= \frac{dx_3}{dx_1} \cdot \frac{dx_1}{dt} = \frac{dx_3}{dx_1} \cdot [a_1 f_T(x_1)x_3 + b_1 Y_1 + b_4 Y_3 + a_3] \end{aligned} \quad (7)$$

С учетом выражения (7), получаем систему уравнений движения объекта в пространстве состояний:

$$\begin{cases} \frac{dx_2}{dx_1} = \frac{a_2 f_T(x_1)x_3 + b_3 Y_3(x_2)}{a_1 f_T(x_1)x_3 + b_1 Y_1(T_{1\text{выкл}}) + b_4 Y_3(x_2) + a_3} \\ \frac{dx_3}{dx_1} = \frac{-f_T(x_1)x_3}{a_1 f_T(x_1)x_3 + b_1 Y_1(T_{1\text{выкл}}) + b_4 Y_3(x_2) + a_3} \end{cases} \quad (8)$$

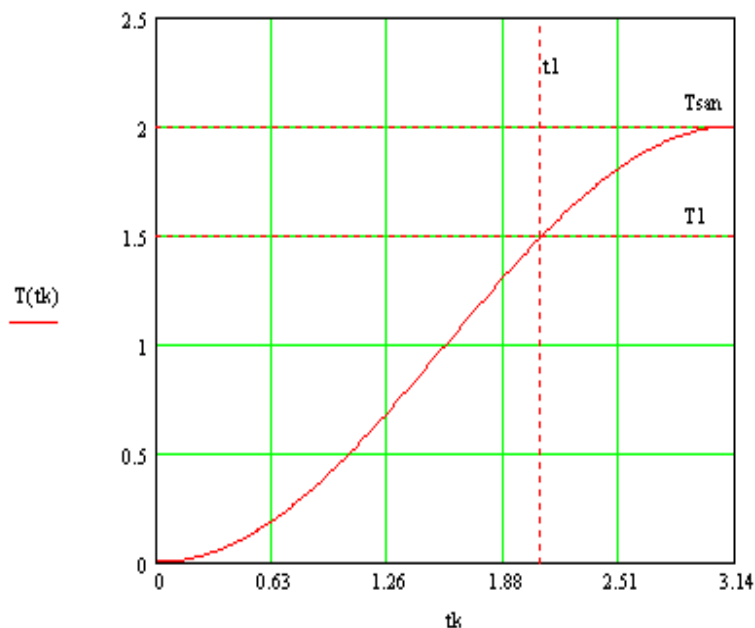


Рисунок 1 – Зависимость температуры от времени при выбранном управлении подогревом содержимого биореактора

$$t_k = \int_{T_0}^{T_{san}} \frac{dx_1}{a_1 f_T(x_1)x_3 + b_1 Y_1(T_{1выкл}) + b_4 Y_3(x_2) + a_3} = t_k(T_{1выкл}) \mapsto \min \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}(0) &= (T_{oc}, K_{kmax}, M_{OB}^0); \\ \bar{x}(t_{ICT}) &= (T_{san}, K_{kopt}, M_{OB}^1) \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, получено нелинейное дифференциальное уравнение с коэффициентами, зависящими от x_1 (8), решение которого зависит от параметра $T_{1выкл}$, и интегральный критерий качества управления (9). Для любого заданного $T_{1выкл}$ определено решение задачи Коши с начальными условиями $\bar{x}(0) = (T_{oc}, K_{kmax}, M_{OB}^0)$, которое в результате определяет время процесса t_k (9). Теперь задача дискретного управления сводится к определению минимума интегрального критерия качества управления при изменении $T_{1выкл}$ от T_{oc} до T_{san} .

Управление $Y_1(T_{1\text{выкл}}^*)$ в виде (6) является решением задачи дискретного управления (8) - (10) для мезофильной стадии процесса компостирования.

Задача дискретного управления на стадии остывания процесса компостирования ставится в виде обеспечения минимума интегрального критерия отклонения параметров процесса от заданных параметров процесса T_{opt} и $K_{\text{копт}}$ до полной деградации легкоусваиваемых органических веществ.

Таким образом, ставится задача программного управления состоянием системы для обеспечения минимального отклонения системы от точки $x_0(T_{\text{opt}}, K_{\text{копт}})$ в пространстве состояний до полной деградации легкоусваиваемых органических веществ при обеспечении минимальных затрат на поддержание оптимальных условий, т.е. при использовании тепловыделения в результате экзотермической реакции микробиологического метаболизма и охлаждения при вентиляции.

Согласно [1] минимизируемый функционал представим в виде:

$$J = \int_{t_{2CT}}^{t_{3CT}} \left(\left(\frac{x_1}{T_{\text{opt}}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{x_2}{K_{\text{копт}}} - 1 \right)^2 \right) dt \mapsto \min, \quad (11)$$

где отклонения параметров x_1 и x_2 от заданных параметров приведены к виду безразмерных величин.

Очевидно, что при недостатке легкоусваиваемых органических веществ в исходном составе субстрата, для выполнения условий санитаризации может быть недостаточно энергии, выделяемой в результате биохимических процессов, и в этом случае потребуется подогрев субстрата. Таким образом, нельзя принимать $Y_1(t)=0$. Однако при окончании процесса такое управление вызовет резкое возрастание затрат на управление вследствие падения активности биохимических процессов, и в этом случае подогрев необходимо отключить.

Преобразуем систему уравнений движения объекта к виду:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 f_T(x_1)x_3 + b_1 Y_1 + b_2 Y_2 + b_4 Y_3 + a_3 \\ \dot{x}_2 = a_2 f_T(x_1)x_3 + b_3 Y_3 \\ \dot{x}_3 = -f_T(x_1)x_3 \end{cases} \quad (12)$$

Управляющие воздействия заданы в виде:

$$\begin{aligned} Y_1(t) &\in \{0;1\} \\ Y_2(t) &\in \{0;1\} \\ Y_3(t) &\in \{0;1\} \end{aligned} \quad (13)$$

Выражения (11) - (13) представляют собой постановку задачи дискретного управления для стадии остывания процесса компостирования.

Из постановки задачи дискретного управления на стадии остывания процесса компостирования в виде (11) – (13) видно, что эта задача аналогична задаче дискретного управления на термофильной стадии процесса компостирования [2]. Однако здесь есть некоторые отличия:

- в задаче не определено время процесса, т.е. t_{3CT} не известно;
- при падении активности биохимических процессов ниже заданного уровня необходимо отключить подогрев и охлаждение субстрата через рубашку теплообменника для сокращения затрат на управление.

Момент переключения в режим созревания может быть установлен по массе разлагаемых органических веществ, оставшихся в субстрате и на практике определяется по активности биохимических реакций, косвенным показателем которой является выделение CO_2 .

Остается открытым вопрос выбора шага дискретизации времени для численного алгоритма h . Предлагается установить его равным шагу дискретизации на стадии санитаризации.

Алгоритм дискретного управления для $t \in [0; t_{3CT}]$ с шагом h приведен на рисунках 2-4.

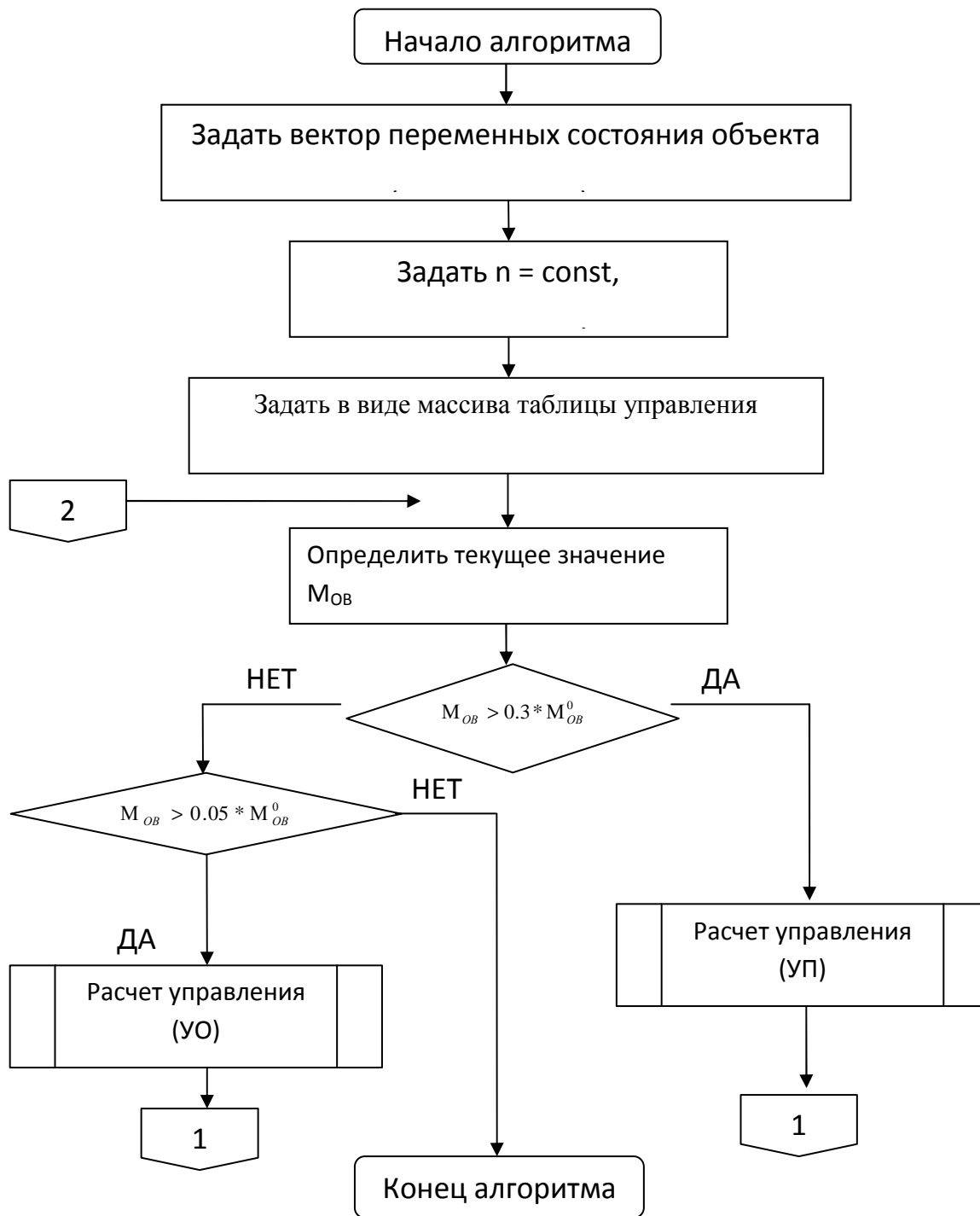


Рисунок 2 – Алгоритм расчета дискретного управления процессом компостирования на стадии остывания (начало)

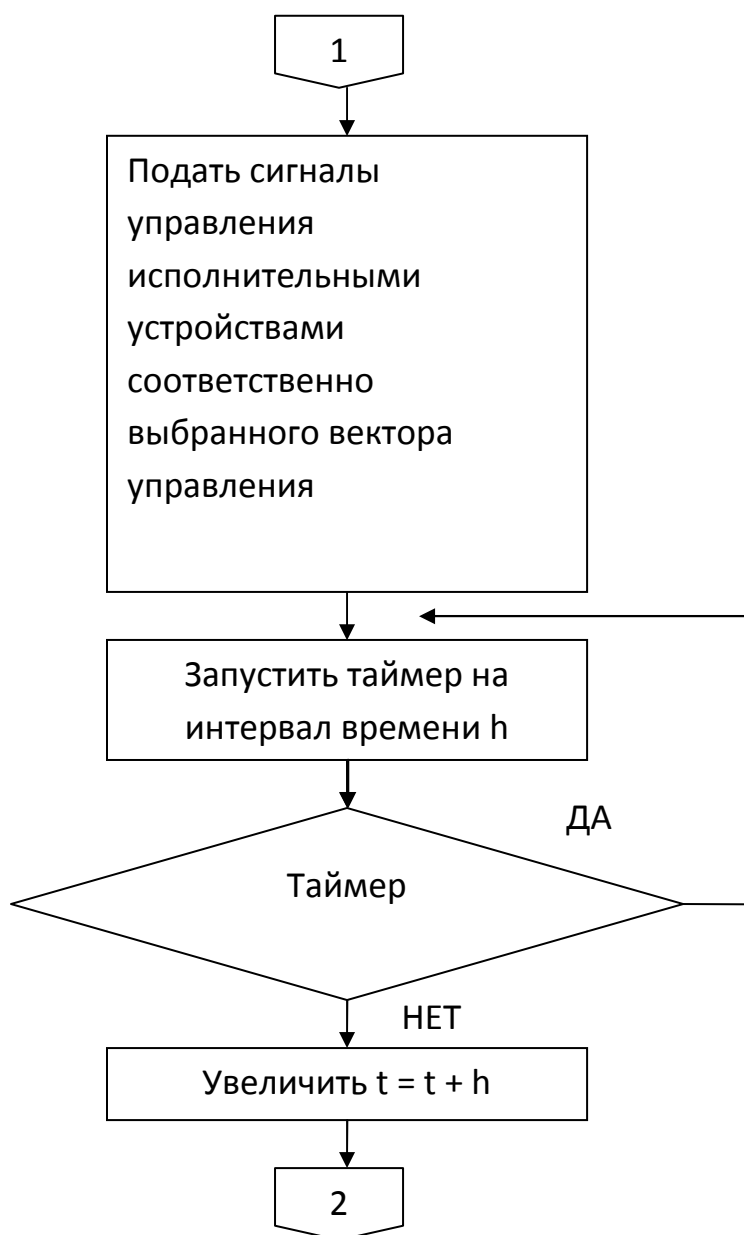


Рисунок 3 – Алгоритм расчета дискретного управления процессом компостирования на стадии остывания (окончание)

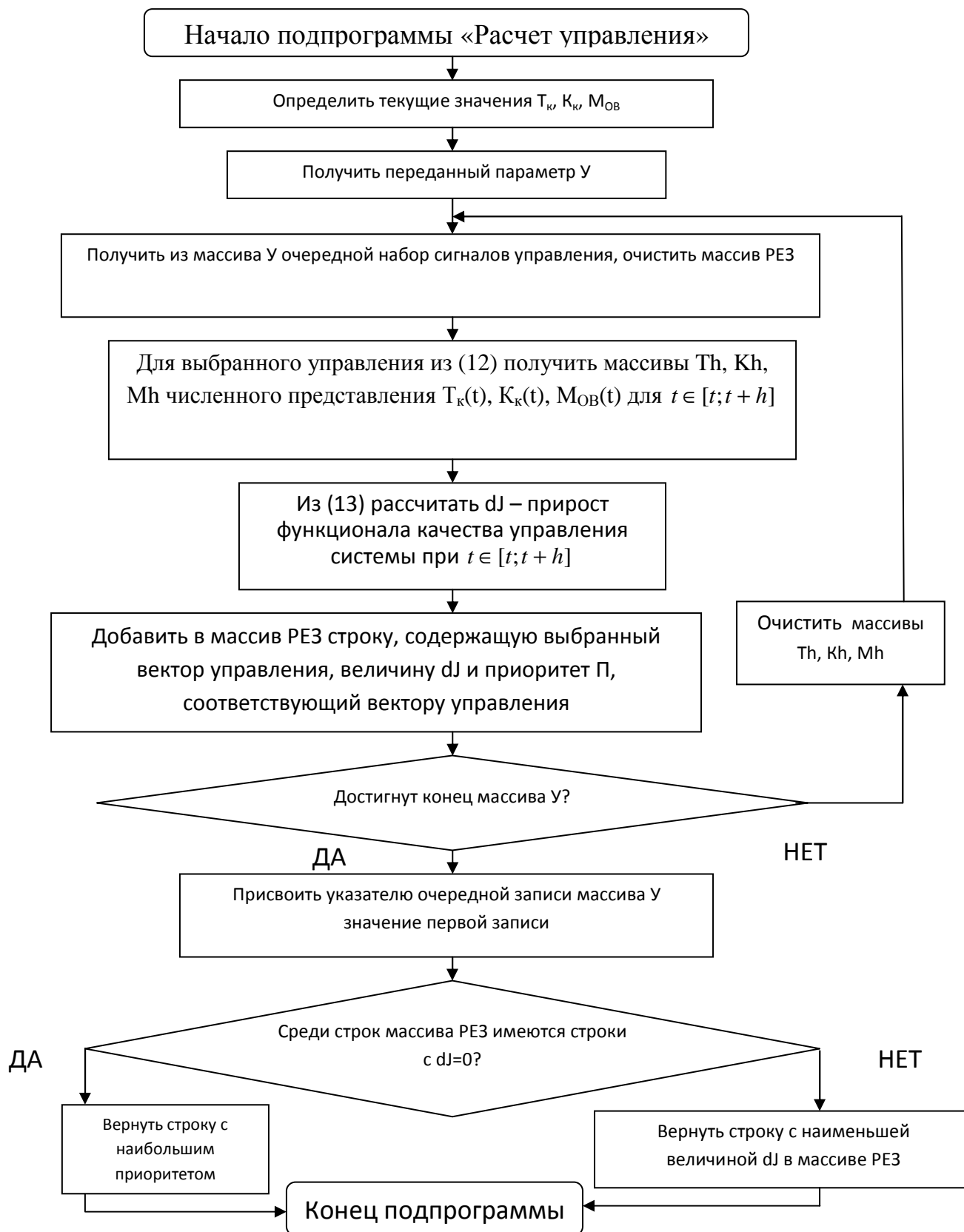


Рисунок 4 – Алгоритм подпрограммы «Расчет управления»

Реализация разработанных алгоритмов дискретного управления процессом компостирования приводит к сокращению длительности переработки партии компоста в биореакторе. Алгоритмы ориентированы на решение поставленной задачи оперативно в темпе с ходом технологического процесса. На практике реализация алгоритмов дискретного управления процессом компостирования, приведенных на рис. 2-4 и в [3] позволяет на 7 % сократить длительность процесса компостирования в биореакторе.

Статья подготовлена в рамках выполнения научного проекта 16-48-230441 а(р) «Математическое моделирование процессов, протекающих в автоматизированной установке для круглогодичного производства органических удобрений в условиях Краснодарского края», финансируемого РФФИ и администрацией Краснодарского края.

Литература

1. Пиотровский Д.Л., Выбор оптимальной стратегии управления процессом компостирования/ Д.Л., Пиотровский, А. Ал Асми, А.О. Ложкин, Н.О Ложкин//.Научная мысль Кавказа. 2005. № 13. С. 141-145.
2. Пиотровский Д.Л. Автоматизация производства органических удобрений/ Д.Л. Пиотровский, Т.Г.Шарапкина// Автоматизация. Современные технологии. 2004. - № 7. - С. 9-11
3. Пиотровский Д.Л. Идентификация технологического объекта по производству органических удобрений/ Д.Л.Пиотровский, М.П.Асмаев, Т.Г.Шарапкина. Депонированная рукопись. № 1801-В2003. 14.10.2003

References

1. Piotrovskiy D.L., Vyibor optimalnoy strategii upravleniya protsessom kompostirovaniya/ D.L., Piotrovskiy, A. Al Asmi, A.O. Lozhkin, N.O Lozhkin//.Nauchnaya myisl Kavkaza. 2005. # 13. S. 141-145.
2. Piotrovskiy D.L. Avtomatizatsiya proizvodstva organicheskikh udobreniy/ D.L. Piotrovskiy, T.G.Sharapkina// Avtomatizatsiya. Sovremennyye tehnologii. 2004. - № 7. - S. 9-11
3. Piotrovskij D.L. Identifikaciya tekhnologicheskogo ob"ekta po proizvodstvu organicheskikh udobrenij/ D.L.Piotrovskij, M.P.Aasmaev, T.G.SHarapkina/ Deponirovannaya rukopis'/ № 1801-V2003/ 14.10.2003