

УДК 631.879:41

UDC 631.879:41

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ
ДИСКРЕТНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА
ТЕРМОФИЛЬНОЙ СТАДИИ 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

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

Дружинина Ксения Васильевна
Аспирант кафедры автоматизации
производственных процессов

Druzhinina Kseniya 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 термофильной стадии процесса компостирования. Показано, что учитывая релейное управление объектом, для поддержания заданных условий процесса необходима организация скользящего режима. 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 термофильной стадии. 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 an algorithm to compute the discrete control of the composting process in the thermophilic stage. This article 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,
ТЕРМОФИЛЬНАЯ СТАДИЯ

Keywords: COMPOSTING, RELAY CONTROL,
ALGORITHM, THERMOPHILIC STAGE

Doi: 10.21515/1990-4665-130-063

Задача дискретного управления на термофильной стадии процесса компостирования заключается в обеспечении минимума интегрального

критерия отклонения параметров процесса от заданных значений $T_{сан}$ и $K_{корт}$ в течение заданного времени $t_{сан}$: $t \in [t_{ICT}; t_{ICT} + t_{сан}]$.

Согласно [1] минимизируемый функционал представим в виде:

$$J = \int_{t_{ICT}}^{t_{ICT}+t_{сан}} \left(\left(\frac{x_1}{T_{сан}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{x_2}{K_{корт}} - 1 \right)^2 \right) dt \xrightarrow{x_1, x_2} \min, \quad (1)$$

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

Таким образом, ставится задача программного управления состоянием системы для обеспечения минимального отклонения системы от точки $x_0(T_{сан}, K_{корт})$ в пространстве состояний на фиксированное время $t_{сан}$ при обеспечении минимальных затрат на поддержание оптимальных условий, т.е. при использовании тепловыделения в результате экзотермической реакции микробиологического метаболизма и охлаждения при вентиляции.

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 $Y_1(t)=0$.

Преобразуем систему уравнений движения объекта к виду:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 f_T(x_1)x_3 + b_1 Y_1 + b_2 Y_2 + b_4 Y_3 + a_3 \\ \dot{x}_2 = a_2 f_T(x_1)x_3 + b_3 Y_3 \\ \dot{x}_3 = -f_T(x_1)x_3 \end{cases} \quad (2)$$

Управляющие воздействия заданы в виде:

$$\begin{aligned} Y_1(t) &\in \{0;1\} \\ Y_2(t) &\in \{0;1\} \\ Y_3(t) &\in \{0;1\} \end{aligned} \quad (3)$$

Выражения (1) - (3) представляют собой постановку задачи дискретного управления для термофильной стадии процесса компостирования.

В полученной постановке задачи требуется минимизация функционала качества управления системы. Это возможно, если объект находится в точке покоя при заданных параметрах процесса. Однако из анализа системы уравнений, описывающих движение объекта в пространстве состояний, видно, что точками покоя системы являются состояния, при которых $f_T(x_1) = 0$, т.е. биохимические процессы отсутствуют. Это соответствует моментам начала и окончания процесса компостирования.

Таким образом, учитывая релейное управление объектом, для поддержания заданных условий процесса необходима организация скользящего режима. Однако в скользящем режиме невозможно точное поддержание заданных параметров процесса. Из требований к санитарной обработке компоста известно, что необходимо поддерживать температуру субстрата выше 55°C [2]. Из экспериментальных данных получено, что степень биодegradации субстрата незначительно ухудшается при отклонении параметров процесса на $\pm 5\%$ от оптимальных значений. Тогда изменим постановку задачи к следующему виду: необходимо поддерживать параметры процесса на уровне:

$$x_1 = T_{\text{сан}} \dots 1,05T_{\text{сан}}, \quad (4)$$

$$x_2 = 0,975x_{2\text{opt}} \dots 1,025x_{2\text{opt}}. \quad (5)$$

Разобьем временной интервал $t_{\text{сан}}$ на n равных частей величиной h . Для каждого интервала управления h построим оптимальное управление процессом с учетом постоянства управления на интервале.

Геометрически задачу минимизации выражения (1) можно представить в виде минимизации суммарной площади фигуры, состоящей из многоугольников, ограниченных заданной областью параметров процесса и фактическими значениями параметров процесса.

Представим уравнение движения системы в виде:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, x_3, Y_1, Y_2, Y_3) \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_3, Y_3) \\ \dot{x}_3 = f_3(x_1, x_3) \end{cases}, \quad (6)$$

где $f_1(x_1, x_3, Y_1, Y_2, Y_3) = a_1 f_T(x_1) x_3 + b_1 Y_1 + b_2 Y_2 + b_4 Y_3 + a_3$,

$f_2(x_1, x_3, Y_3) = a_2 f_T(x_1) x_3 + b_3 Y_3$,

$f_3(x_1, x_3) = -f_T(x_1) x_3$.

Пусть в момент времени $t = i \cdot h$, $i = 0, \dots, n-1$, являющийся началом очередного интервала кусочно-постоянного управления h , температура биореактора, концентрация кислорода и масса органических веществ в субстрате равны соответственно x_1^i , x_2^i , x_3^i .

Предположим, что известны значения управляющих сигналов $Y_1(t)$, $Y_2(t)$, $Y_3(t)$. Тогда, воспользовавшись формулой численного решения задачи Коши для дифференциальных уравнений (6) и имея в качестве начальных условий значения x_1^i , x_2^i , x_3^i , получаем:

$$\begin{cases} x_1^{i+1} = x_1^i + \int_{i \cdot h}^{(i+1) \cdot h} f_1(x_1^i, x_3^i, Y_1^i, Y_2^i, Y_3^i) dt \\ x_2^{i+1} = x_2^i + \int_{i \cdot h}^{(i+1) \cdot h} f_2(x_1^i, x_3^i, Y_3^i) dt \\ x_3^{i+1} = x_3^i + \int_{i \cdot h}^{(i+1) \cdot h} f_3(x_1^i, x_3^i) dt \end{cases}, \quad (7)$$

Система (7) может быть рассчитано по алгоритмам Рунге-Кутты 4 порядка или Адамса.

Имея значения x_1^{i+1} , x_2^{i+1} , x_3^{i+1} , можно вычислить значение выражения (1) на $(i+1)$ интервале:

$$J = \int_{i-h}^{(i+1)h} \left(\left(\delta \left(\frac{x_1(t)}{T_{сан}} - 1 \right) \right)^2 + \left(\delta \left(\frac{x_2(t)}{x_{2opt}} - 1 \right) \right)^2 \right) dt \xrightarrow{x_1, x_2} \min, \quad (8)$$

где $\delta(\alpha)$ - функция активации, $\delta(\alpha) = \begin{cases} \alpha, & |\alpha| \geq 0,025 \\ 0, & |\alpha| < 0,025 \end{cases}$.

Рассмотрим отдельно задачу минимизации отклонения температуры субстрата от заданных значений (2) и отклонения концентрации кислорода в газовой среде биореактора от заданных значений (3).

Если $T_{ki} > T_{сан}$, то температура биореактора превысила заданный диапазон изменения. В этом случае необходимо уменьшить температуру, для чего необходимо обеспечить $\frac{dT_k}{dt} < 0$. Аналогично если $T_{ki} < T_{сан}$, температура биореактора меньше требуемого значения и для увеличения температуры необходимо обеспечить $\frac{dT_k}{dt} > 0$, как показано на рисунке 1

Если $K_{ki} > K_{opt}$, то температура биореактора превысила заданный диапазон изменения. В этом случае необходимо уменьшить температуру, для чего необходимо обеспечить $\frac{dK_k}{dt} < 0$. Аналогично, если $K_{ki} < K_{opt}$, температура биореактора меньше требуемого значения и для увеличения температуры необходимо обеспечить $\frac{dK_k}{dt} > 0$ (рисунок 2).

Возможные значения сигналов управления для данной стадии определены ранее в [3]. Поэтому, произведя вычисления, можно выбрать такой набор управляющих сигналов, который обеспечивает минимальный прирост критерия качества управления на данном шаге. При наличии более чем одного набора оптимальных управляющих сигналов, выбор производится с учетом приоритета набора сигналов управления.

Таким образом, на основании приведенных ранее рассуждений становится возможным построить алгоритм для вычисления дискретного

управления процессом компостирования на термофильной стадии. Причем обеспечение минимального прироста интеграла (8) на каждом шаге управления гарантирует минимальное значение (8) за все время термофильного процесса. Поддержание заданных условий процесса гарантирует подавление патогенной микрофлоры. Поэтому управление, полученное в результате работы алгоритма, будет являться оптимальным для термофильной стадии.

Алгоритм расчета дискретного управления для $t \in [0; t_{\text{CAN}}]$ с шагом h приведен на рисунке 3.

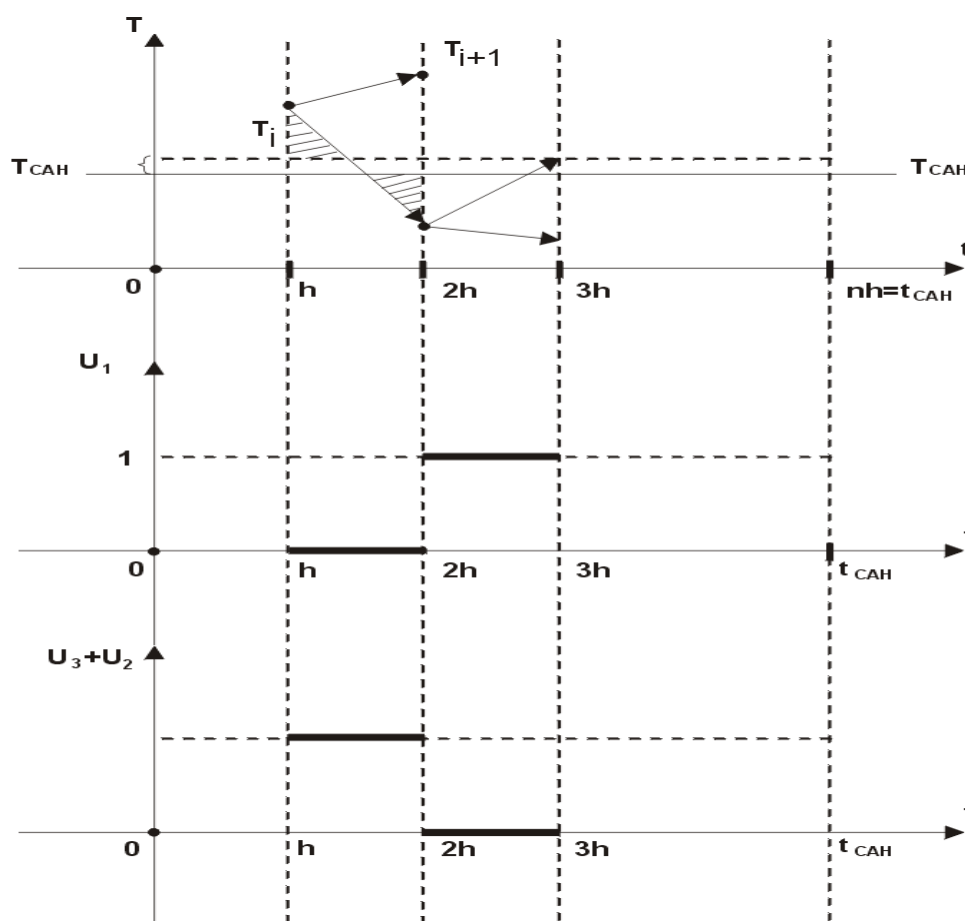


Рисунок 1 – Геометрическая интерпретация минимизации отклонения температуры субстрата от заданного значения

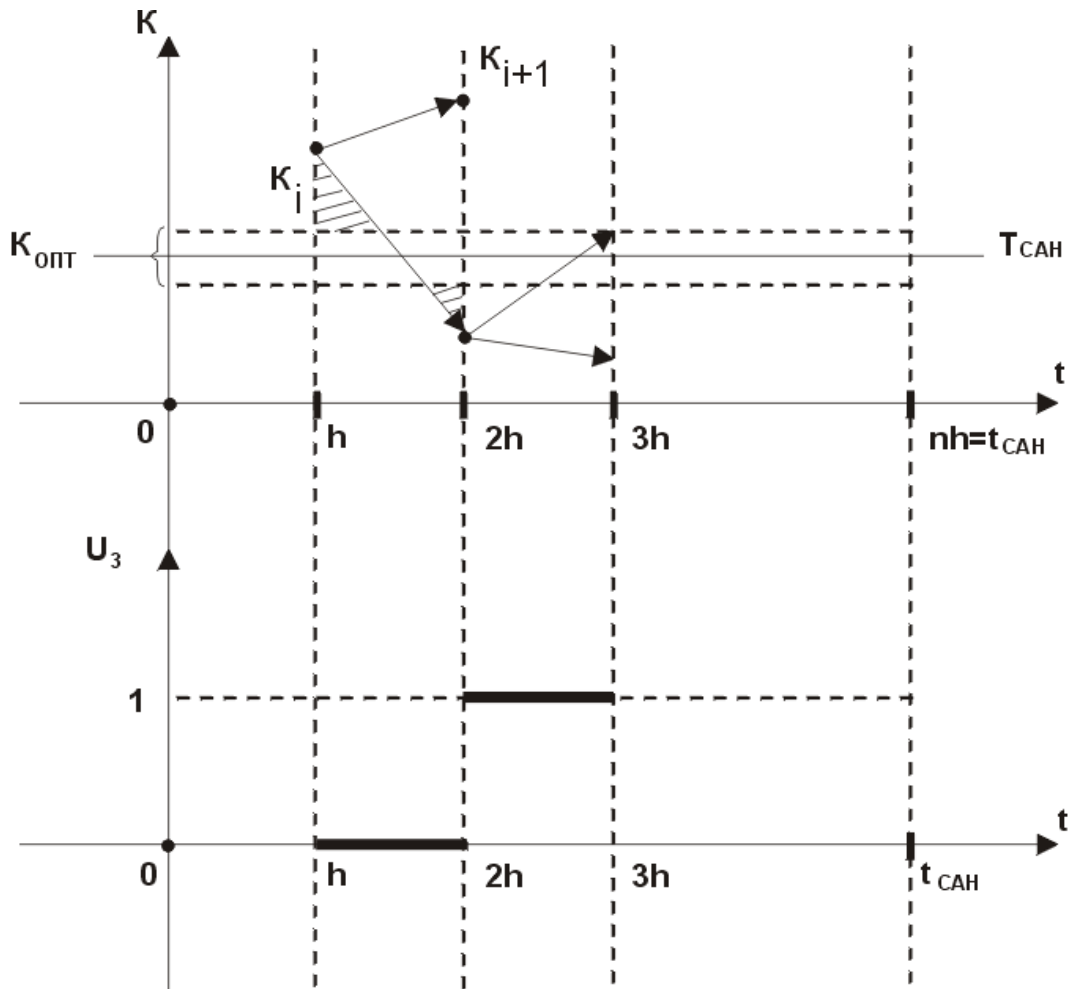


Рисунок 2 – Геометрическая интерпретация минимизации отклонения концентрации кислорода от заданного значения



Рисунок 3 - Алгоритм расчета дискретного управления процессом компостирования для термофильной стадии (начало)

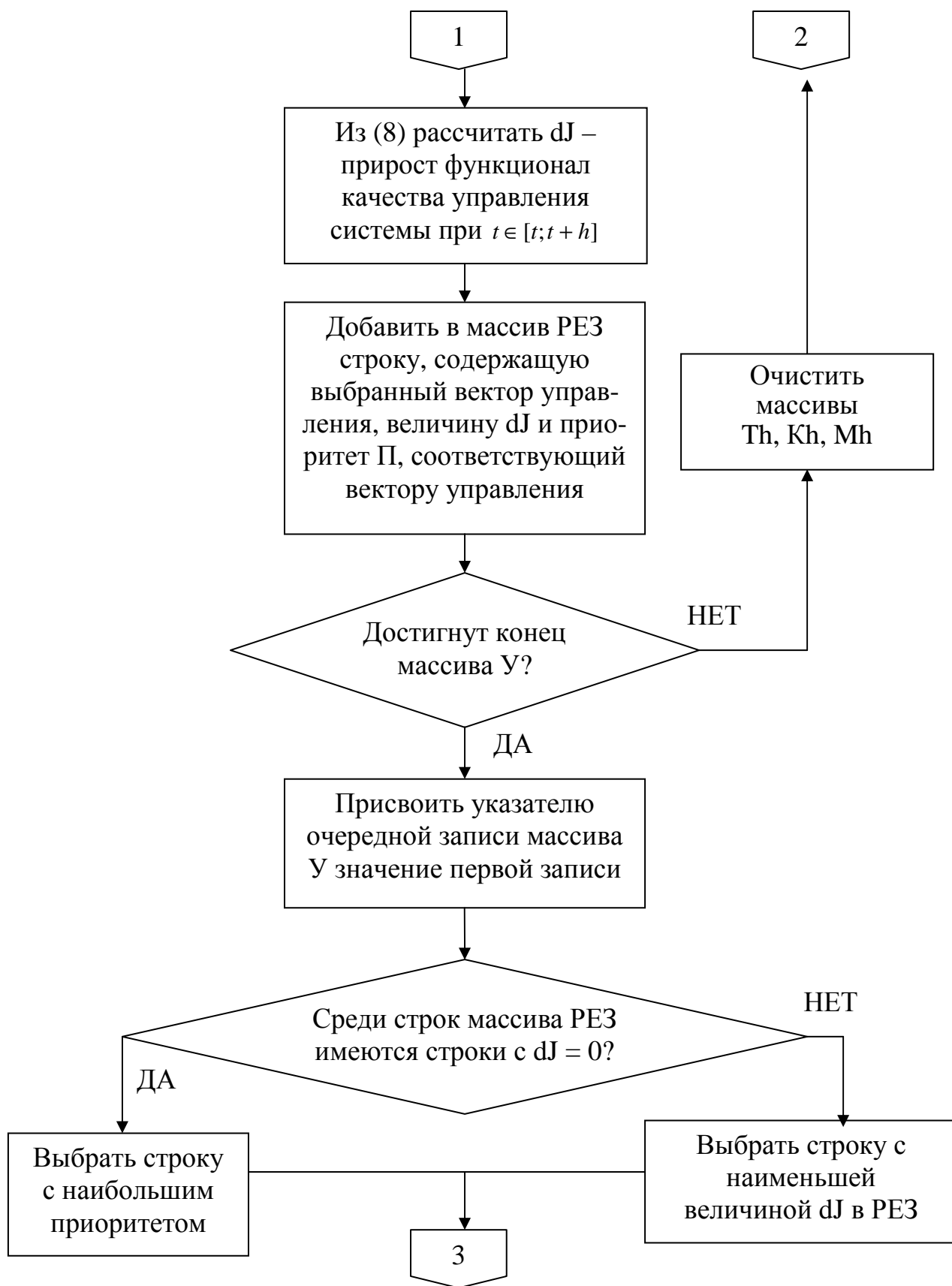


Рисунок 3 - Алгоритм расчета дискретного управления процессом компостирования для термофильной стадии (продолжение)

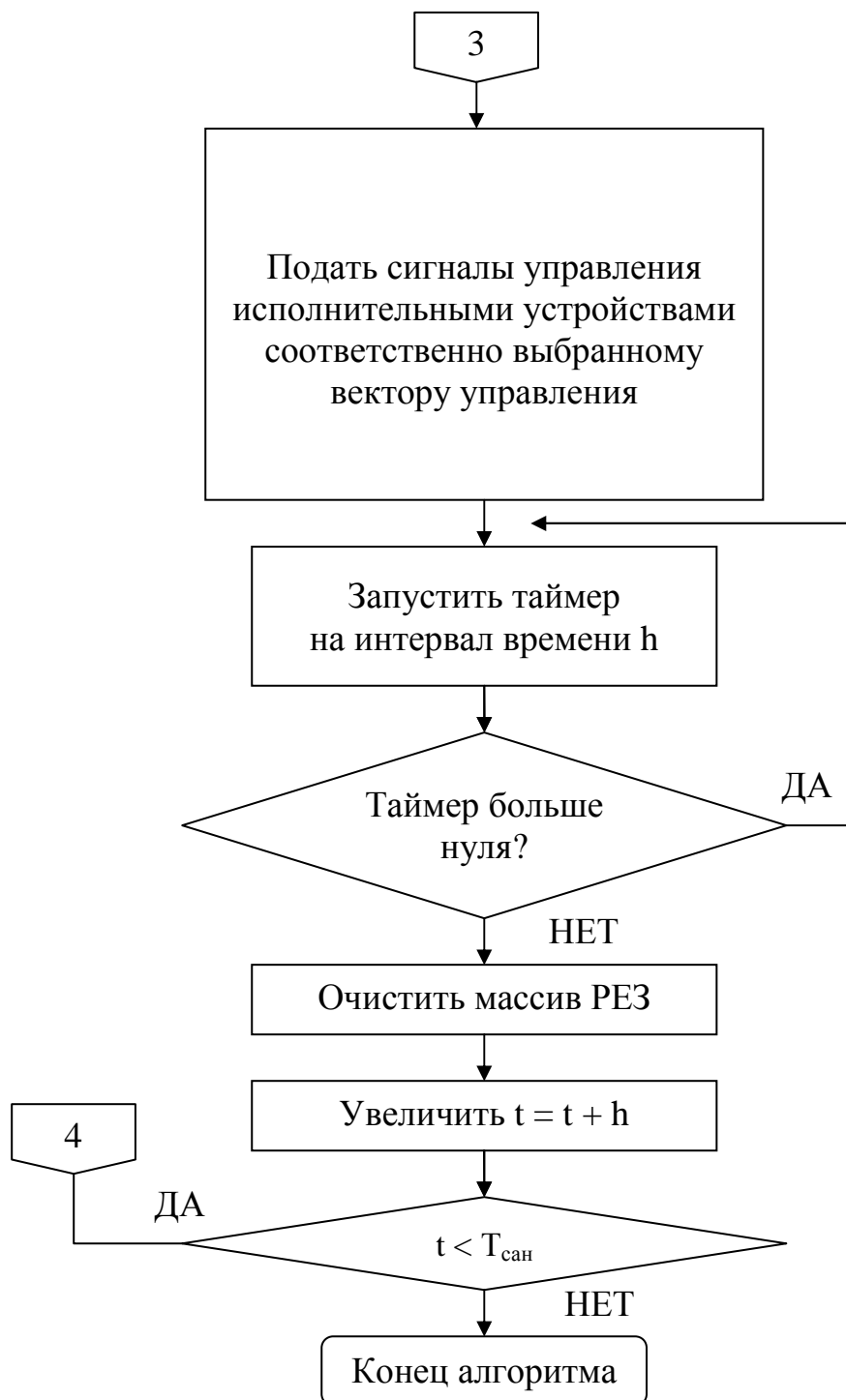


Рисунок 3 - Алгоритм расчета дискретного управления процессом компостирования для термофильной стадии (окончание)

Данная 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. Теоретические основы построения автоматических систем управления процессами производства органических компостов: диссертация ... доктора технических наук: 05.13.06 . - Краснодар, 2007
2. Пиотровский Д.Л. Автоматизация производства органических удобрений/ Д.Л. Пиотровский, Т.Г.Шарапкина// Автоматизация. Современные технологии. 2004. - № 7. - С. 9-11
3. Московец А.Л. Постановка задачи и анализ оптимального управления процессом компостирования/ А.Л.Московец, С.В.Усатиков, Д.Л.Пиотровский //депонированная рукопись № 1926-В2004. - 06.12.2004

References

1. Piotrovskij D.L. Teoreticheskie osnovy postroenija avtomaticheskikh sistem upravlenija processami proizvodstva organicheskikh kompostov: dissertacija ... doktora tehniceskikh nauk: 05.13.06 . - Krasnodar, 2007
2. Moskovec A.L. Postanovka zadachi i analiz optimal'nogo upravlenija processom kompostirovanija/ A.L.Moskovec, S.V.Usatikov, D.L.Piotrovskij //deponirovannaja rukopis' № 1926-B2004. - 06.12.2004
3. Piotrovskij D.L. Avtomatizacija proizvodstva organicheskikh udobrenij/ D.L. Piotrovskij, T.G.Sharapkina// Avtomatizacija. Sovremennye tehnologii. 2004. - № 7. - S. 9-11