УДК 591.54:681.5.01

ДИСКРЕТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПОДДЕРЖАНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ЖИВОТНОВОДЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

Волковский Антон Юрьевич

В статье рассмотрены вопросы оптимального управления поддержанием температуры в животноводческом комплексе. Показана возможность использования дискретного управления. Найден оптимальный шаг дискретизации

Ключевые слова: ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ, ДИСКРЕТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ, ТЕМПЕРАТУРА, ЖИВОТНОВОДЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

UDC 591.54:681.5.01

DISCRETE MANAGEMENT OF PROCESS OF MAINTENANCE OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS IN A CATTLE-BREEDING COMPLEX

Volkovsky Anton Yurievich

In the article questions of optimal control of temperature maintenance in a cattle-breeding complex are considered. Possibility of use of discrete management is shown. The optimum step of digitization is found

Keywords: OPTIMUM CONTROL, DISCRETE CONTROL, TEMPERATURE, CATTLE-BREEDING COMPLEX

Возможность дискретного управления процессом поддержания оптимальной температуры в животноводческом комплексе при достижении заданных показателей качества позволяет упростить аппаратную часть и снизить стоимость системы автоматики. В связи с этим встает вопрос выбора регулятора, осуществляющего дискретное управление исполнительными механизмами.

Одним из подходов к синтезу цифровых регуляторов является введение в релейную систему внутренних обратных связей, что позволяет осуществить скользящие режимы и построить на их основе частотно-импульсный регулятор [8], [9]. Сущность организации движения объекта в скользящем режиме заключается в выборе фазовом пространстве поверхности

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} (c_i * e_i) + e_n \,, \qquad (1)$$

где $e_1 \ldots e_n$ – координаты вектора ошибки, на которой функция управления Y претерпевает разрывы.

$$Y=\begin{cases}1, S(e)>0\\ -1, S(e)<0\end{cases}. \qquad (2)$$

Важным преимуществом формирования управления из регулируемой величины и ее производных является то, что возникающее в системе скользящее движение не зависит от изменения свойств объекта. Однако при этом ряд вопросов остается открытым.

Во-первых, произвол в выборе коэффициентов $c_1 \ldots c_{n-1}$ в уравнении (1), описывающем поверхность переключений, обуславливает необходимость выбора поверхности, движение объекта по которой, с одной стороны, возможно, а с другой стороны – наилучшим образом удовлетворяет заданным критериям качества. Четкие же рекомендации по выбору поверхностей переключения присутствуют в литературе только для простейших объектов.

Во-вторых, амплитуда имеющих место при движении в скользящем режиме автоколебаний может превышать допустимые с технологической точки зрения.

В-третьих, фазовые переменные системы в окрестностях нуля не всегда могут асимптотически стремиться к нулю, поэтому для обеспечения астатизма относительно ошибки может потребоваться введение в закон регулирования интегральной составляющей [5].

Наиболее целесообразной представляется разработка системы управления процессом поддержания оптимальной температуры в животноводческом комплексе с помощью аппарата математической теории оптимальных процессов (принципа максимума А.С. Понтрягина), что можно объяснить следующим.

Во-первых, постановка задачи оптимального управления, описываемой системой дифференциальных уравнений (3) предполагает нахождение среди всех допустимых управлений вектора Y = Y(t), переводящего фазовую точку из положения x_0 в положение $x_к$ и доставляющего минимум функционалу (4)

$$x_i = f_i(x_1,..,x_n,Y_1,..,Y_m), i = 1..n, \qquad (3)$$

где

x_i – фазовые координаты управляемого объекта;

f_i - функции, определяющие зависимость между фазовыми координатами и управлением.

$$J = \int_{t_0}^{t_k} f_0(x_1,..x_n,Y_1..Y_m)dt, \qquad (4)$$

где f_0 – целевая функция управления.

Именно так можно интерпретировать технологический регламент процесса поддержания оптимальной температуры в животноводческом комплексе, поскольку значение оптимальной температуры является фиксированным, а соблюдение температурного режима заключается в минимизации выражения (4), если в качестве подынтегральной функции принято рассогласование между заданным значением температуры в помещении и текущим.

Кроме того, следует отметить, что функция управления Y(t) может иметь кусочно-постоянный характер, причем на управляющее воздействие накладываются ограничения

$$|Y_j| \le Y_{j\max}, j = 1...m, \qquad (5)$$

что и имеет место при использовании микропроцессорного устройства, вырабатывающего дискретные сигналы управления.

При этом необходимо, однако, располагать математическим описанием объекта в виде (3). Эту задачу можно решить следующим образом.

Согласно правилу А.Ю.Ишлинского [2], линейный объект сколь угодно высокого порядка ведет себя в переходном процессе в основном также, как объект второго или третьего порядка. Основываясь на этом правиле, динамику процесса производства биогумуса можно описать линейным дифференциальным уравнением. Таким образом, задача синтеза системы управления процессом поддержания оптимальной температуры в животноводческом комплексе распадается на следующие этапы:

- разработка в виде (3) математического описания объекта;
- постановка задачи дискретного управления процессом поддержания оптимальной температуры в животноводческом комплексе
- определение законов изменения управляющих сигналов и реализация цифрового регулятора [3].

Задачу дискретного управления процессом повышения температуры в комплексе можно сформулировать следующим образом. Необходимо перевести объект, описываемый системой (3) из начальной точки

$$t = 0, x_1 = T_0, \dot{x}_1 = \dot{x}_{10} \qquad (6)$$

в конечную

$$t = A, x_1 = T_{0opt}, \dot{x}_1 = 0 \qquad (7)$$

при минимизации функционала

$$I = \int_{0}^{A} (x_1 - T_0 - \frac{T_{opt} - T_o}{A} * t)dt \to \min \qquad (8)$$

и ограничении на управляющее воздействие

$$0 <= Y_1 <= 1 . \qquad (9)$$

Координата x_2 нормальной системы однозначно связана с температурой поступающего воздуха и ее производной, которые могут быть определены в начале цикла нагрева. Ограничение на производную по температуре накладывается с целью предотвращения динамического выброса.

Составим гамильтониан, который с учетом явной зависимости функционала от времени и определенности интеграла (8) имеет вид

$$H = \sum_{i=0}^{3} \Phi_i * \dot{x}_i = \Phi_0 * (x_1 - T_0 - \frac{T_{opt} - T_0}{A} * t)^2 + \Phi_1 * (-G_2{}' * x_1 +$$
$$+ x_2 + Z_2{}' * Y_1) + \Phi_2 * Z_1{}' * Y_1 + \Phi_3 \quad , \qquad (10)$$

где $x_3 = t$.

Выделяя в выражении (10) члены, зависящие от Y_1, получаем закон изменения управляющего воздействия, доставляющего максимум функции Гамильтона

$$Y1 = \begin{cases} 1, Z_2{}' * \Phi_1 + Z_1{}' * \Phi_2 > 0 \\ 0, Z_2{}' * \Phi_1 + Z_1{}' * \Phi_2 \le 0 \end{cases} \qquad (11)$$

Для определения вспомогательных функций запишем систему, которая с учетом того, что $\Phi_0 = -1$, имеет вид

$$\begin{cases} \dfrac{d\Phi_1}{dt} = 2*(x_1 - T_0 - \dfrac{T_{opt} - T_o}{A}*t) + \Phi_1 * G_2 \\ \dfrac{d\Phi_2}{dt} = -\Phi_1 \end{cases} \qquad (12)$$

Упрощенное математическое описание изменения температуры в помещении на этапах нагрева и поддержания оптимальной температуры не учитывает распределенность параметров, в результате чего температура в различных точках помещения отлична от температуры в точке измерения. Кроме того, при выводе модели не были учтены тепловые потери, вызванные теплообменом между помещением и окружающей средой, которые на этапе поддержания оптимальной температуры могут достигать 7.2 % от общего расхода тепла [4].

Указанные выше причины обуславливают отклонение на этапе поддержания оптимальной измеряемой температуры и ее производной от точки, определяемой условием (7), поэтому в качестве критерия оптимальности можно принять минимум среднеквадратичного отклонения регулируемой величины от заданной [6]. Однако представляется целесообразным для более точного поддержания регулируемой величины на заданном уровне сформулировать задачу позиционного управления при поддержании оптимальной температуры в помещении следующим образом.

Перевести объект, описываемый системой (3) из некоторой начальной точки

$$x_1 = x_{1н}, \dot{x}_1 = \dot{x}_{1н} \qquad (13)$$

в конечную, фазовые координаты которой определяются соотношением (7) за минимальное время при ограничении на управляющее воздействие (9).

Запишем гамильтониан для этого случая

$$H = \sum_{i=0}^{2} \varPhi_i * \dot{x}_i = -1 + \varPhi_1 * (-G_2^{'} * x_1 + x_2 + Z_2^{'} * Y_1) + \varPhi_2 * G_1^{'} * Y_1 \,. \qquad (14)$$

Закон изменения управляющего воздействия имеет вид, аналогичный (11).

Вспомогательные функции Φ_1 и Φ_2 могут быть определены с помощью следующей системы:

$$\begin{cases} \dfrac{d\varPhi_1}{dt} = \varPhi_1 * G_2^{'} \\ \dfrac{d\varPhi_2}{dt} = -\varPhi_1 \end{cases} . \qquad (15)$$

Задачу дискретного управления охлаждения содержимого помещения можно сформулировать следующим образом. Необходимо перевести объект, описываемый системой (3) из начальной точки:

$$t = 0, x_1 = T_1, \dot{x}_1 = \dot{x}_{11} \qquad (16)$$

в конечную

$$t = B, x_1 = T_{opt}, \dot{x}_1 = 0 \,, \qquad (17)$$

при минимизации функционала

$$I = \int_0^B x_1 - T_{opt} - \frac{T_1 - T_{opt}}{B} * t)dt \to \min \tag{18}$$

и ограничении на управляющее воздействие

$$0 <= \mathrm{Y}_2 <= 1\ . \tag{19}$$

Гамильтониан для этого случая с учетом определенности интеграла и явной зависимости подынтегральной функции от времени имеет вид

$$H = \sum_{i=0}^{3} \Phi_i * \dot{x}_i = -(x_1 - T_{opt} - \frac{T_1 - T_{opt}}{B} * t)^2 + \Phi_1 * (-G_2^{'} * x_1 +$$

$$+ x_2 + Z_2^{''} * Y_2) + \Phi_2 * (-G_1^{''} * x_1 + Z_1^{''} * Y_2) + \Phi_3\,. \tag{20}$$

Выделяя в выражении (20) члены, зависящие от Y_2, получаем закон изменения управляющего воздействия, доставляющего максимум функции Гамильтона

$$\mathrm{Y}_2 = \begin{cases} 1, Z_2^{''} * \Phi_1 + Z_1^{''} * \Phi_2 > 0 \\ \\ 0, Z_2^{''} * \Phi_1 + Z_1^{''} * \Phi_2 \le 0 \end{cases}\ . \tag{21}$$

Вспомогательные функции Φ_1 и Φ_2, учитывая трансверсальность

$$\Phi_1\ (\mathrm{B}) = 0, \quad \Phi_2\ (\mathrm{B}) = 0 \tag{22}$$

могут быть определены с помощью следующей системы

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_1}{dt} = 2*(x_1 - T_{opt} - \frac{T_1 - T_{opt}}{B}*t) + \Phi_1 * G_2^{''} + \Phi_2 * G_1^{''} * Y_2) + \\ + \Phi_2 * (-G_1^{''} * x_1 + Z_1^{''} * Y_2) + \Phi_3 \\ \frac{d\Phi_2}{dt} = -\Phi_1 \end{cases} \quad (23)$$

Исходной информацией для построения процедуры идентификации является вид аппроксимирующих моделей

$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} + G_2^{'} * \frac{dx_1}{dt} = Z_2^{'} * \frac{dY_1}{dt} + Z_1^{'} * Y_1, \quad (24)$$

где $G_2^{'} = a_1 / a_2$;

$Z_2^{'} = b_1 / a_2$;

$Z_1^{'} = b_0 / a_2$

$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} + G_2^{''} * \frac{dx_1}{dt} + G_1^{''} * x_1 = Z_2^{''} * \frac{dY_2}{dt} + Z_2^{''} * Y_2, \quad (25)$$

где $G_2^{''} = a_1' / a_2$;

$G_1^{''} = a_0 / a_2$;

$Z_2^{''} = b_1' / a_2$;

$Z_1^{''} = b_0^{'} / a_2$.

и наблюдения на стадиях подачи горячего или холодного воздуха в помещение

$$< T_б(t_i), Y_1(t_i) >, (0 <= t_i <= T') \quad (26)$$

$$< T_б(t_i), Y_2(t_i) >, (0 <= t_i <= T'') \quad (27)$$

где T’, T’’,– интервалы времени наблюдений соответственно при подаче горячего или холодного воздуха в помещение,

Учитывая кусочно-постоянный характер управляющих сигналов, правомерно исключить производные по управляющим воздействиям из (24) и (25). Поэтому определение параметров G_2’, Z_1’ (для модели нагрева), G_1’’, G_2’’, Z_1" (для модели охлаждения) возможно посредством минимизации функции невязки

$$Q' = \int_0^{T'} \frac{d^2T_б}{dt^2} + G_2' * \frac{dT_б}{dt} - Z_1' * Y_1)^2 dt, \quad (28)$$

$$Q'' = \int_0^{T''} \frac{d^2T_б}{dt^2} + G_2'' * \frac{dT_б}{dt} + G_1'' * T_б - Z_1'' * Y_2)^2 dt, \quad (29)$$

Если интегрирование выражений (28) – (29) проводить методом прямоугольников, то их можно переписать в виде

$$\tilde{Q}' = \sum_{i=0}^{n'} (\frac{d^2T_{бi}}{dt^2} + G_2' * \frac{dT_{бi}}{dt} - Z_1' * Y_{1i})^2 \Delta t, \quad (30)$$

$$\tilde{Q}'' = \sum_{i=0}^{n''} (\frac{d^2T_{бi}}{dt^2} + G_2'' * \frac{dT_{бi}}{dt} + G_1'' * T_б i - Z_1'' * Y_{2i})^2 \Delta t, \quad (31)$$

где Δt – интервал времени, характеризующий базу наблюдений;

$$n' = \frac{T'}{\Delta t}; \quad n'' = \frac{T''}{\Delta t};$$

Дифференцируя (30) по параметрам G_2', Z_1', (5.109) по параметрам G_1'', G_2'', Z_1'' получаем системы линейных уравнений для параметрической идентификации моделей (24), (25) методом наименьших квадратов

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{n'} \left(\frac{d^2 T_{бi}}{dt^2} + G_2' * \frac{dT_{бi}}{dt} - Z_1' * Y_{1i}\right) * \frac{dT_{бi}}{dt} = 0 \\ \sum_{i=0}^{n'} \left(\frac{d^2 T_{бi}}{dt^2} + G_2' * \frac{dT_{бi}}{dt} - Z_1' * Y_{1i}\right) * Y_{1i} = 0 \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{n''} \left(\frac{d^2 T_{бi}}{dt^2} + G_2'' * \frac{dT_{бi}}{dt} + G_1'' * T_{бi} - Z_1'' * Y_{2i}\right) * \frac{dT_{бi}}{dt} = 0 \\ \sum_{i=0}^{n''} \frac{d^2 T_{бi}}{dt^2} + G_2'' * \frac{dT_{бi}}{dt} + G_1'' * T_{бi} - Z_1'' * Y_{2i}) * T_{бi} = 0 \\ \sum_{i=0}^{n''} \left(\frac{d^2 T_{бi}}{dt^2} + G_2'' * \frac{dT_{бi}}{dt} + G_1'' * T_{бi} - Z_1'' * Y_{2i}\right) * Y_{2i} = 0 \end{cases} \quad (33)$$

Интервал времени, характеризующий базу наблюдений, выбирается на основании следующей зависимости [1]

$$\Delta t = \frac{N_m}{f_s} + K. \quad (34)$$

где N_m – порядок модели;

f_s – частота работы системы;

K – свободная величина.

Значение величины К выбирается так, чтобы во-первых - состоялась оценка значений вектора выходной величины, а во-вторых – за это время была бы проведена корректировка параметров моделей. Уменьшение К снижает вероятность состоятельности оценивания, а увеличение может привести к запаздыванию в алгоритме.

Оценка производных наблюдаемого сигнала с помощью конечных разностей не представляется возможной, поскольку, с одной стороны, невелика скорость изменения температуры помещения, а с другой – низкий предел чувствительности промышленных термопреобразователей сопротивления. Поэтому для оценки вектора состояний объекта используются наблюдатели видов [7]

$$T_б = W_2 * t_2 + W_1 * T + W_0 \ , \qquad (35)$$

где W_0, W_1, W_2 - коэффициенты, постоянные на интервале наблюдений, которые определяются методом наименьших квадратов при аппроксимации наблюдений (26) и (27) полиномом (35) при интервалах T’, T’’,

Тогда соответствующая производная полинома (35) может быть использована в качестве производной наблюдаемого сигнала $T_{б.}$

$$\frac{d^2T_б}{dt^2} = 2 * W_2 * t + W_1. \qquad (36)$$

$$\frac{dT_б}{dt} = 2 * W_2. \qquad (37)$$

Системы (32) – (33) могут быть решены одним из известных численных методов: Гаусса, Гаусса-Жордана или Холесского.

Полученные соотношения (11), (12) свидетельствуют о принципиальной возможности оптимального управления процессами нагрева, охлаждения помещения в соответствии с критериями (8) и (18), с помощью устройства, вырабатывающего дискретные сигналы управления исполнительными механизмами, установленными на линиях подачи горячего и холодного воздуха в помещение.

Однако нахождение конечного решения в аналитическом виде представляется достаточно затруднительным из-за сложности определения общих интегралов систем (12), (23), характеризующих вспомогательные функции Φ_1 и Φ_2 в любой момент времени t, в связи с чем расчет оптимальных управлений Y_1, Y_2, возможен посредством решения соответствующих систем численными методами.

Для начала процедуры численного интегрирования систем (12), (23) необходимо знать начальные значения вспомогательных функций Φ_{10} и Φ_{20}.

Между тем, в случае нагрева и в случае охлаждения начальная и конечная точки оптимизируемой траектории, т.е. значения Φ_{10} и Φ_{20} не определены.

Начальные значения вспомогательных функций Φ_{10} и Φ_{20} можно определить методом многомерной оптимизации Гаусса-Зейделя, при этом минимизируются критерии вида

$$\begin{cases} J' = \left|X_1(A) - T_{opt}\right| + \left|\dot{X}_1(A)\right| \\ J'' = \left|X_1(B) - T_{opt}\right| + \left|\dot{X}_1(B)\right| \end{cases} . \tag{38}$$

т.е. оценивалось несоответствие найденной конечной точки оптимизируемой траектории, заданной в соответствии с условиями (7), (17).

Для оптимизации решения при минимизации критерия (38) получено общее аналитическое решение системы (11) и системы (21), вид которого определяется следующим образом

$$X_1 = e^{-\int G_2{}' dt} * \left(\int \left(\int (Z_1{}' * Y_1) dt + Z_2{}' * Y_1\right) e^{\int G_2{}' dt} dt + C_1{}'\right) \tag{39}$$

$$\dot{X}_1 = e^{-\int G_2{}'' dt} * \left(\int \left(\int (Z_1{}'' * Y_2) dt + Z_2{}'' * Y_2\right) e^{\int G_2{}'' dt} dt + C_1{}'\right) \tag{40}$$

Поскольку управляющая функция имеет кусочно-постоянный характер, то общее решение (38) можно разбить на 4 части с учетом возможных изменений управляющих сигналов Y_1 и Y_2

Для подачи горячего воздуха при $Y_1 = 1$

$$\begin{cases} X_1 = C_1 * e^{-G_2{}' * t} + \dfrac{Z_1{}' * G_2{}' * t + Z_2{}' * G_2{}' - Z_1{}' + G_2{}' * C_0}{(G_2{}')^2} \\ \dot{X}_1 = -G_2{}' * C_1 * e^{-G_2{}' * t} + \dfrac{Z_1{}'}{G_2{}'} \end{cases} \tag{41}$$

Для подачи горячего воздуха при $Y_1 = 0$ имеем следующую систему:

$$\begin{cases} X_1 = C_1 * e^{-t*G_2'} + \dfrac{C_0}{G_2'} \\ \dot{X}_1 = -G_2' * C_1 * e^{-G_2'*t} \end{cases} \tag{42}$$

Для подачи холодного воздуха при $Y_2 = 1$

$$\begin{cases} X_1 = C_1' * e^{-G_2'*t} + \dfrac{Z_1'' * G_2'' * t + Z_2'' * G_2'' - Z_1'' + G_2'' * C_0'}{(G_2'')^2} \\ \dot{X}_1 = -G_2'' * C_1' * e^{-G_2''*t} + \dfrac{Z_1''}{G_2''} \end{cases} \tag{43}$$

Для подачи холодного воздуха при $Y_2 = 0$ имеем следующую систему:

$$\begin{cases} X_1 = C_1 * e^{-t*G_2''} + \dfrac{C_0'}{G_2''} \\ \dot{X}_1 = -G_2'' * C_1' * e^{-G_2''*t} \end{cases} \tag{44}$$

Таким образом, определение параметров состояния и перерасчет постоянных интегрирования производится только в моменты смены управляющего воздействия.

Для решения задачи дискретного управления на этапе поддержания оптимальной температуры можно воспользоваться теоремой об N-интервалах [10], так как в течение одного интервала управления коэффициенты линейного уравнения (10) можно считать постоянными, а корни его характеристического уравнения в любом случае неположительны. Тогда, поскольку в соответствии с теоремой для оптимального управления необходимо и достаточно двух интервалов предельных значений управляющего воздействия. Стыкуя решение (35) в момент переключения при граничных условиях (7), (17), определим длительность импульса управляющего сигнала:

$$t_и = \frac{G_2{}' * (T_{opt} - X_{1н}) - \dot{X}_{1н}}{Z_1{}'} \quad , \qquad (45)$$

где $t_и$ – длительность импульса, с.

Литература

1. Гутер, Р.С. Элементы численного анализа/ Р.С. Гутер, В.В. Овчинский – М.: Наука, 1970. – 432 с.
2. Ишлинский, А.Ю. Механика гироскопических систем / А.Ю. Ишлинский– М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 213 с.
3. Пиотровский, Д.Л. Выбор и обоснование метода управления биореактором – установкой для производства биогумуса / Д.Л.Пиотровский, М.П. Асмаев, Т.Г. Шарапкина/ Известия вузов. Пищевая технология, 2003. №5-6, с.126-127.
4. Пиотровский, Д.Л. Стохастическая модель процесса производства органических удобрений / Д.Л. Пиотровский, А.О.Ложкин, Н.О. Ложкин, Ал Асми Ахмад // Научная мысль Кавказа. Приложение. - 2006. - №4. – С. 143-149. - Библиогр.:с.149.
5. Понтрягин, Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С.Понтрягин, В.Г. Волтянский, Р.В.Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко.- М.: Наука, 1983.- 392 с.
6. Ракитинский, Ю.В. Численные методы решения жестких систем / Ю.В. Ракитинский, Ю.М. Устинов, И.Г. Ченоруцкий. - М.: Наука, 1979. - 258 с.
7. Растригин, Л.А. Введение в идентификацию объектов управления / Л.А. Растригин, Н.Е. Маджаров – М.: Энергия, 1977. – 216 с.
8. Уткин, В.И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой / В.И. Уткин – М.: Наука, 1974. – 272 с.
9. Цыпкин, Я.З. Релейные автоматические системы / Я.З. Цыпкин – М.: Наука, 1974. – 576с.
10. Шуп, Т.Е. Прикладные численные методы в физике и технике/ Т.Е. Шуп – М.: Высшая школа, 1990. – 225 с.