УДК 62.503.56: 66.047

М.М. Кисляков, В.Ю. Харченко

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ФТАЛОЦИАНИНА МЕДИ

Процесс сушки от токсичных органических растворителей с высокой температурой кипения является одним из наиболее сложных и энергоемких процессов в химической технологии. Его оптимизация (на примере сушки фталоцианина меди (ФЦМ) в гребковой вакуумной сушилке (ГВС)) является актуальной задачей.

Как объект моделирования, процесс сушки в ГВС представляет собой систему, состоящую из ряда взаимодействующих объектов: рубашки с высокотемпературным органическим теплоносителем (ВОТ), внутреннего объема аппарата с суспензией ФЦМ.

Математическая модель строится на основе материального и энергетического балансов, кинетического уравнения сушки и представляет собой систему нелинейных алгебраических уравнений, обыкновенных дифференциальных уравнений и дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями.

Для данного процесса возможна следующая постановка задачи:

Задача 1 Определить программу изменения температуры сушильного агента $t^*(\tau),\ \tau \in [0, \tau_к]$, при минимально возможном времени, т.е. $\tau_к^*[t^*(\tau)] = \min \tau_к[t(\tau)]$ при выполнении технологических ограничений и уравнений связи в виде математической модели:

$$y(\tau) = \mathrm{M}(z, u(\tau), x), \tag{1}$$

где $y(\tau)$ – вектор-функция выходных величин, необходимых для расчета качественных показателей процесса; $\mathrm{M}(\cdot)$ – оператор математической модели; $u(\tau)$ – функция управления; x – вектор начальных условий.

Система технологических ограничений имеет вид:

ограничение на температуру ФЦМ:

$$T_{\min} \le t(\tau) \le T_{\max}\,; \tag{2}$$

на мгновенный расход теплоносителя:

$$A_{\min} \le G^{вх}(\tau) \le A_{\max}\,; \tag{3}$$

на температуру высушиваемого материала в конечный момент времени:

$$t\ (\tau^*{}_к) \le C_{\max}\,; \tag{4}$$

на влагосодержание в продукте в конечный момент времени:

$$\varphi\ (\tau^*{}_k) \le B_{\max}\,; \tag{5}$$

на суммарный расход теплоносителя:

$$\int_0^{\tau_k^*} G(\tau)\, d\tau \le E\,; \tag{6}$$

Задача 2 Определить программу изменения температуры $t^*(\tau),\ \ \tau \in [0, \tau_к]$, при которой суммарный расход теплоносителя минимальный $I^*(t^*(\tau)) = \min \int_0^{\tau_к} G^{вх}(t(\tau))\, d\tau$ при выполнении уравнения связи в виде математической модели (1) и ограничений (2) – (5) и ограничения на время процесса

$$\tau_к \le \tau_к^{зад} \tag{7}$$

Вследствие чрезвычайной сложности математической модели, включающей в себя уравнения в обычных и частных производных, решение задачи оптимального управления является весьма трудной задачей. Решение данной задачи с помощью известных принципов максимума не представляется возможным из-за большого числа уравнений.

Применение других методов оптимизации, в частности динамического программирования, затруднено из-за большой размерности пространства состояний [1].

Применение прямых методов без введения упрощающих положений так же весьма затруднительно из-за большого числа варьируемых переменных [2].

Для приближенного решения поставленных задач предлагается использовать метод минимизирующих последовательностей в пространстве состояний, который позволяет свести задачу оптимального управления к последовательности решения задач математического программирования.

Для этого вводится последовательность функций, описывающих изменение температуры в аппарате. Программа управления процессом сушки ФЦМ осуществляется программными регулирующими устройствами, реализующими заданный закон изменения температуры в сушилке путем изменения подачи ВОТа.

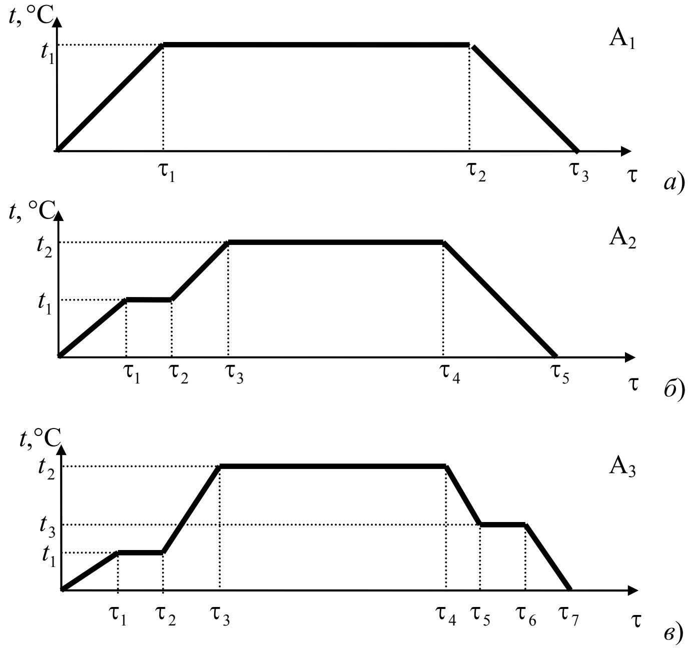

Рис. 1 Классы варьируемых функций

На рис. 1, *а* изображена кривая изменения температуры в аппарате, состоящая из трех участков. На участке нагрева и участке охлаждения скорости подъема и снижения температуры выбраны на основании опыта эксплуатации промышленных сушилок.

Кривая (рис. 1, *а*) является 4-х параметрической с параметрами τ_1, τ_2, τ_3, t_1. Будем считать, что множество программ изменения температуры в рубашке аппарата, отображаемых кривыми вида рис. 1, *а*, составляют класс A_1.

Более широкий класс составляют параметрические кривые (рис. 1, *б*). Множество двухступенчатых программ составляют класс A_2.

По аналогии с классом A_2 можно определить класс A_3, состоящий из трехступенчатых программ изменения температуры в сушилке (рис. 1, *в*). Определив класс функций, получаем задачи условной оптимизации. В задаче 1 критерий оптимизации записывается как:

$$\tau_к^*\left[(t^{\tau_к^*}(\cdot))^*\right] = \min_{\substack{\tau_{min} \le \tau \le \tau_{max} \\ t^{\tau_к}(\cdot) \in A_i}} \tau_к\left[t^{\tau_к^*}(\cdot)\right], \tag{8}$$

и ограничения определяются согласно (1) – (6).

В задаче 2 критерий записывается как:

$$I^*(t^*(\tau)) = \min_{t^*(\tau)\in A_i} \int_0^{\tau_к} G^{вх}(t(\tau))\,d\tau, \tag{9}$$

и ограничения определяются согласно (1) – (5), (7).

Таким образом, при выборе класса функций A_1 (рис. 1, *а*) поиск ведется в пространстве переменных (τ_1, τ_2, τ_3, t_1) с использованием известного метода условной оптимизации, например, метода скользящего допуска или метода штрафных функций [3]. При увеличении числа параметров программа изменения температуры в сушилке будет сходиться к функции, являющейся решением задачи оптимального управления по всем функциям классов A_j.

Однако необходимо помнить, что с увеличением числа варьируемых параметров не только усложняется решение задачи оптимизации, но и значительно возрастают трудности реализации в промышленных условиях найденной функции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского М.: Наука, 1987. 712 с.

2. Табак Д., Куо Б. Оптимальное управление и математическое программирование. М.: Наука, 1975. 280 с.

3. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 535 с.

Кафедра «Информационные процессы и управление»