

РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СУШКИ МОЛОКА

Н.И. Шиянова, А.Н. Мамцев (МГУТУ)

Робастная система управления процессом сушки молока с компенсацией транспортного запаздывания позволяет производить сухие молочные продукты высокого качества как с добавками для функционального питания, так и с искусственными окислителями, так как сокращается время пребывания сырья и готовой продукции в сушильной башне, что положительно сказывается на жизнедеятельности биологически активных добавок.

В настоящее время перспективным направлением развития сухих молочных консервов является производство сухих молочных продуктов как с добавками для функционального питания, так и с искусственными окислителями. Независимо от вида продукта, предназначенного для сушки, существует ряд общих условий, обязательных при производстве сухих продуктов. Сгущенный продукт сразу после выхода из вакуумвыпарного аппарата следует обязательно профильтровать. Температура сгущенного молока перед сушкой должна быть не ниже 40°C. В целях интенсификации сушки возможен подогрев до 55...60°C. Необходимо стремиться к уменьшению длительности температурного воздействия на продукт, так как в противном случае снижается жизнедеятельность биологически активных добавок.

Основными показателями, по которым контролируют режим сушки, являются температура входящего/выходящего воздуха.

При производстве сухих молочных продуктов с активными добавками важным фактором является снижение времени нахождения их в сушильной башне, то есть в зоне высоких температур. Для решения данной задачи на ЗАО "Мелеузовский молочноконсервный комбинат" проведены исследования робастной системы управления процессом сушки молока с компенсатором транспортного запаздывания.

Традиционная система автоматического регулирования (САУ) процессом сушки молока содержит объект управления (сушильную установку, состоящую из сушильной башни и калорифера) и регулятор. Сушильная баш-

ня представляет собой звено, близкое к апериодическому звену второго порядка, которое можно аппроксимировать как апериодическое звено первого порядка с транспортным запаздыванием. Экспериментальные исследования показали, что транспортное запаздывание для данного объекта может составлять от 1,5...2 мин.

Значительная величина транспортного запаздывания приводит к заметному снижению качества управления ТП сушки молока. Поэтому важно уменьшить его негативное влияние на качество управления указанным процессом. Для решения этой проблемы предлагается традиционную САУ дополнить компенсатором транспортного запаздывания (рис. 1).

Идеальный компенсатор транспортного запаздывания реализуется звеном с передаточной функцией $e^{s\tau}$, которую можно разложить в ряд Тейлора с бесконечным числом членов:

$$e^{s\tau} = 1 + \frac{s\tau}{1!} + \frac{s^2\tau^2}{2!} \dots + \frac{s^n\tau^n}{n!} + \dots, \quad (1)$$

где S – комплексная переменная; τ – постоянная времени транспортного запаздывания.

С помощью существующих технических средств невозможно реализовать идеальный компенсатор. Для его практической реализации в разложении передаточной функции (1) можно ограничиться первыми тремя членами. Тогда передаточная функция $W_k(s)$ реального компенсатора транспортного запаздывания принимает вид:

$$W_k(s) = 1 + \frac{s\tau}{1!} + \frac{s^2\tau^2}{2!}. \quad (2)$$

Схема технически реализуемого компенсатора представлена на рис. 2. Тогда передаточная функция $W_k(s)$ определяется выражением:

$$W_k(s) \equiv \frac{Z(s)}{E(s)} = 1 + \frac{K}{\frac{K}{\theta s} + 1} + \frac{K^2}{\left(\frac{K}{\theta s} + 1\right)^2} \cdot \chi, \quad (3)$$

где $Z(s) = \int_0^\infty z(t)e^{-st} dt$, $E(s) = \int_0^\infty \varepsilon(t)e^{-st} dt$ – изображения сигналов $z(t)$ и $\varepsilon(t)$ соответственно; K, χ – коэффициенты передачи соответствующих безынерционных звеньев; θ – постоянная времени интегрирующего звена.

Выражение (3) после простых преобразований приводится к следующему виду:

$$W_k(s) = \frac{(K^{-2} + K^{-1} + \chi) \theta^2 s^2 + (2K^{-1} + 1)\theta s + 1}{(K^{-1}\theta s + 1)^2}. \quad (4)$$

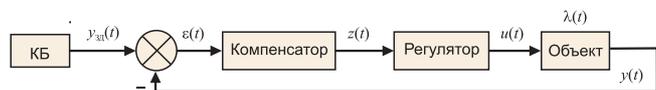


Рис. 1. Система управления с компенсатором транспортного запаздывания: КБ – командный блок; $y_{30}(t)$, $\varepsilon(t)$ и $u(t)$ – сигналы задания, управляющих воздействий и ошибки управления; $z(t)$ и $y(t)$ – выходные сигналы компенсатора и объекта; $\lambda(t)$ – возмущающее воздействие; t – переменная времени

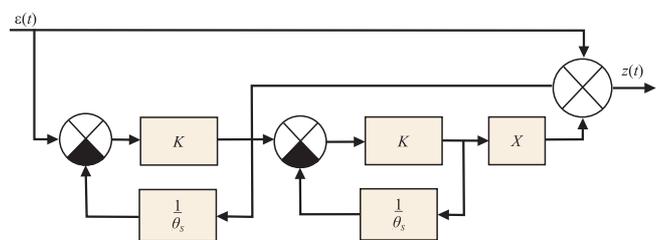


Рис. 2. Структурная схема технически реализуемого компенсатора

Числитель выражения (4) представляет передаточную функцию (2) при выполнении следующих равенств:

$$\tau^2 = 2(K^{-2} + K^{-1} + \chi) \theta^2; \quad (5)$$

$$\tau = (2K^{-1} + 1) \theta. \quad (6)$$

Подставляя выражение (6) в равенство (5), приходим к следующему соотношению, обеспечивающему одновременное выполнение равенств (5) и (6) при любых значениях величины θ :

$$\chi = \frac{1}{2} + \frac{1}{K} + \frac{1}{K^2}. \quad (7)$$

Величина θ определяется емкостью конденсаторов, используемых в интегрирующих звеньях компенсатора, а величины K и χ определяются сопротивлениями резисторов, которые выбираются исходя из выполнения равенства (7) и с учетом целесообразности выполнения неравенства $K > 10$, позволяющего снизить инерционность апериодического звена второго порядка $W_A(s) = (K^{-1}\theta s + 1)$, входящего в состав передаточной функции (4).

Компенсатор можно использовать в уже действующих САУ с различными регулирующими приборами. Практически во всех серийных регулирующих приборах доступен сигнал $\varepsilon(t)$ и имеются дополнительные входы для подачи стандартных сигналов $z(t)$.

Оценим эффективность предлагаемого метода. На Мелеузовском молочноконсервном комбинате для сушки молока используется установка "Нема-500", функциональная схема которой представлена на рис. 3.

Для оценки динамических характеристик объекта управления проведены экспериментальные исследования сушительной установки "Нема-500", получены переходные процессы, результаты которых представлены на графиках (рис. 4 и 5).

На основании динамических характеристик можно сделать вывод, что объект управления с достаточной для практического применения точностью можно представить в виде последовательно соединенных типовых звеньев: апериодического звена первого порядка и звена чистого запаздывания. Тогда передаточные функции каналов $u(t) \rightarrow \mu(t)$ и $\mu(t) \rightarrow y(t)$ можно представить в виде:

$$W_{\mu u}(s) = K_{\mu u} \frac{e^{-\tau_1 s}}{1 + T_2 s}; \quad W_{y \mu}(s) = K_{y \mu} \frac{e^{-\tau_2 s}}{1 + T_1 s}, \quad (8)$$

где $T_1 = 90$ с; $\tau_1 = 65$ с; $K_{\mu y} = 1,34$; $T_2 = 180$ с; $\tau_2 = 40$ с; $K_{\mu u} = 1,25$ град/МПа.

Поскольку передаточная функция объекта для канала управления $u(t) \rightarrow \mu(t)$ определяется выражением $W_{y \mu}(s) = W_{\mu u}(s) W_{\mu y}(s)$, то с учетом равенств (8) имеем

$$W_{y u}(s) = K_{y u} \frac{e^{-\tau s}}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)}, \quad (9)$$

где $K_{y u} = K_{\mu u} K_{\mu y} = 1,675$ град/МПа; $\tau = \tau_1 + \tau_2 = 105$ с.

Передаточная функция реального компенсатора (4) выбрана в виде:

*Как часто мелкая трава
становится жирным молоком.
Важно лишь
правильно подогреть корову.*

С. Изюмов

$$W_k(s) = \frac{1 + s\tau + 0,5\tau^2 s^2}{(T_k s + 1)^2}, \quad (10)$$

где $T_k = 75$ с – постоянная времени компенсатора.

Для управления температурой $y(t)$ в схеме на рис. 1 используется ПИД-регулятор с передаточной функцией

$$W_{\text{ПИД}}(s) = K_p T_D s + K_p + K_i / (T_I s), \quad (11)$$

где K_p – коэффициент передачи регулятора; T_D и T_I – постоянные времени дифференцирования и интегрирования соответственно.

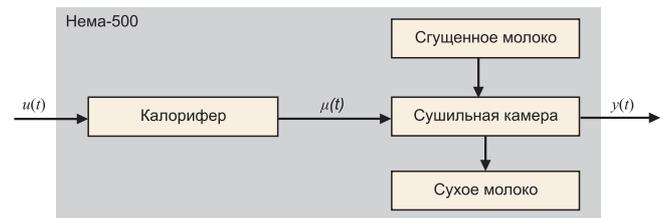


Рис. 3. Функциональная схема сушительной установки "Нема-500": $u(t)$ – давление пара; $\mu(t)$ – температура горячего воздуха, поступающего в сушительную башню; $y(t)$ – температура воздуха на выходе из сушительной башни

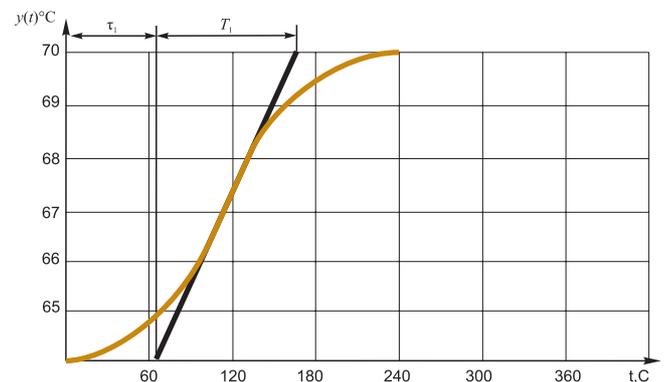


Рис. 4. Переходный процесс на выходе из сушительной башни

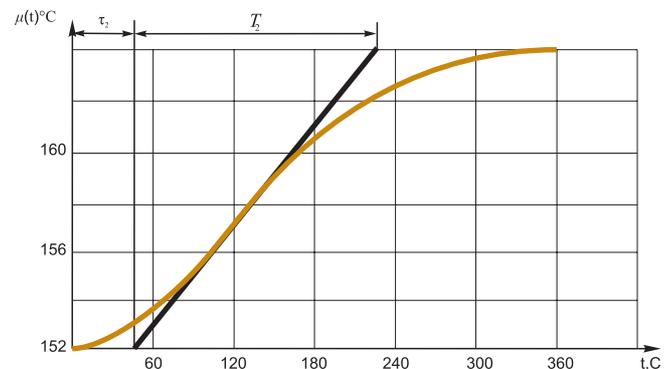


Рис. 5. Переходный процесс на выходе из калорифера

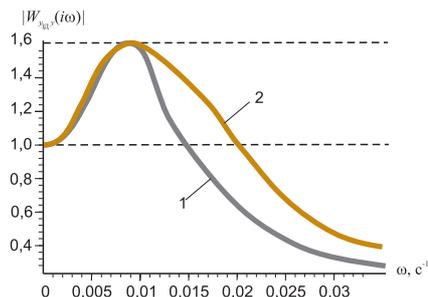


Рис. 6. Графики АЧХ системы для канала передачи сигналов $y_{30}(t) \rightarrow y(t)$: 1 – без компенсации; 2 – с компенсацией

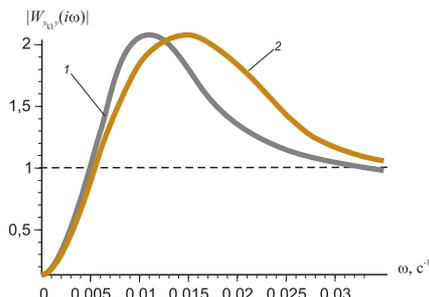


Рис. 7. Графики АЧХ системы для канала передачи сигналов $y_{30}(t) \rightarrow \epsilon(t)$: 1 – без компенсации; 2 – с компенсацией

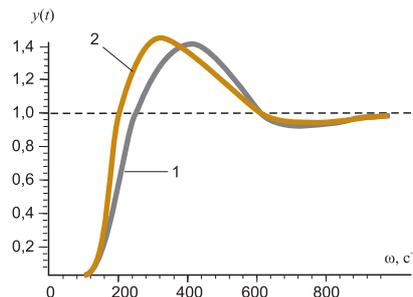


Рис. 8. Графики переходных процессов на выходе системы: 1 – без компенсации; 2 – с компенсацией

Поскольку характеристики случайного возмущения $\lambda(t)$ неизвестны, то желательно наделить систему управления робастными свойствами.

В результате исследований, выполненных в работе [1], было установлено, что робастность систем с ПИД-регуляторами обеспечивается при выполнении следующих требований к расположению доминирующих корней S_k , $k = \overline{1,4}$ характеристического уравнения замкнутой системы:

$$S_{1,3} = -\eta(1 + i/m_{\Pi}); S_{2,4} = \eta(-1 + i/m_{\Pi}), \quad (12)$$

где η и m_{Π} – показатели абсолютного и предельно допустимого относительного демпфирования свободного движения системы соответственно; i – мнимая единица.

Выполнение требований (12) обеспечивает наиболее быстрое затухание свободного движения системы, так как величина η при этом максимальна, а доминирующие корни S_k , $k = \overline{1,4}$ являются ближайшими к мнимой оси сравнительно с остальными корнями характеристического уравнения [1].

В работе [2] значение показателя m_{Π} было предложено выбирать исходя из требования

$$M = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1,618\dots, \quad (13)$$

где M – показатель колебательности замкнутой системы.

Выполнение требования (14) позволяет добиться компромисса между противоречащими друг другу требованиями по обеспечению наилучшего качества управления при одновременном действии на систему высокочастотных и низкочастотных случайных возмущений с неизвестными статистическими характеристиками [2].

Расчеты показали, что при

$$m_{\Pi} = 0,7972 \quad (14)$$

$$\text{и } K_p = 1,730; T_{\Pi} = 213,0 \text{ с}; T_d = 85,65 \text{ с} \quad (15)$$

обеспечивается выполнение требований (12) и (13) для системы (9-11).

При отсутствии компенсации транспортного запаздывания, когда

$$W_k(s) = 1, \quad (16)$$

требования (13) и (14) для системы (9), (11) и (17) выполняются, если

$$m_{\Pi} = 0,75 \quad (17)$$

$$\text{и } K_p = 1,170; T_{\Pi} = 199,5 \text{ с}; T_d = 63,50 \text{ с}. \quad (18)$$

Сравним качество управления температурой $y(t)$ с компенсацией транспортного запаздывания и при ее отсутствии.

На основании графиков АЧХ, отвечающих каналу передачи $y_{30}(t) \rightarrow y(t)$ (рис. 6), можно заключить, что при выборе значений параметров настройки ПИД-регулятора в соответствии с равенствами (14) и (17) обеспечивается выполнение требования (13), что в свою очередь подтверждает правильность выбора значений m_{Π} согласно равенствам (14) и (18).

На основании графиков АЧХ, отвечающих каналу передачи $y_{30}(t) \rightarrow \epsilon(t)$ (рис. 7), приходим к выводу, что применение компенсатора транспортного запаздывания позволяет улучшить фильтрующие свойства системы робастного управления процессом сушки молока при действии на нее низкочастотных случайных возмущений.

Как видно из графиков переходных процессов на выходе системы, возникающих при подаче на ее вход единичного ступенчатого возмущения (рис. 8), использование компенсатора способствует более быстрому затуханию переходных процессов в системе.

Таким образом, на основании выполненного анализа можно заключить, что применение разработанного устройства для частичной компенсации транспортного запаздывания способствует повышению качества управления процессами сушки молока.

Список литературы

1. Солдатов В.В., Борцов В.П. Методы робастного и адаптивного управления технологическими процессами / Тр. Междун. науч. конф. "Теория и практика построения и функционирования АСУТП". М.: МЭИ, 2003.
2. Солдатов В.В., Агабекян Н.Г. Робастное управление линейными стационарными системами на основе оптимального соотношения между составляющими хаоса и порядка // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2005. № 5.

Мамцев Александр Николаевич – канд техн. наук, проф.,

Шиянова Наталья Ивановна – соискатель кафедры "Системы управления"

Московского государственного университета технологий и управления (МГУТУ).

Контактный телефон (34764) 431-83. E-mail: shianova58@mail.ru