

## СИСТЕМА РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТП ПРОИЗВОДСТВА СУХОГО МОЛОКА

В.В. Солдатов, В.В. Маклаков, Н.И. Шиянова (МГУТУ)

*Сформулированы особенности технологического процесса производства сухого молока в молочноконсервной промышленности. Для эффективного управления ТП разработаны робастные методы с использованием ПИ и ПИД-регуляторов. Показано, что при робастном управлении сушкой молока лучшее качество управления обеспечивается при использовании ПИД-регуляторов.*

Основными направлениями увеличения объемов производства молочных продуктов являются повышение эффективности использования сырьевых ресурсов и внедрение безотходных и малоотходных технологий переработки сырья животного происхождения, разработка принципиально новых методов переработки сырья, обеспечивающих наиболее полное его использование, уменьшение потерь, повышение выхода и качества готовой продукции, снижение энергоемкости ТП. Таким образом, для молочноконсервной промышленности является актуальной задача создания новых методов автоматизированного управления ТП сгущения и сушки молока.

Объектом управления в АСУТП сушки молока является распылительная сушильная башня. К входным параметрам объекта относятся: расход, массовая доля влаги и температура сгущенного продукта; расход, влагосодержание и температура горячего воздуха, скорость вращения вала распыливающего диска (или давление сгущенного продукта в форсунках).

Управляющими воздействиями могут служить изменение расхода сгущенного молока  $R_m(t)$ , а также температуры  $T_g(t)$  и расхода горячего воздуха  $R_g(t)$ , где  $t$  — переменная времени.

Повышение температуры воздуха, входящего в сушильную камеру, ограничено опасностью самовозгорания сухого молока, а ее снижение приводит к увеличению расхода теплоносителя на 1 тонну испаренной влаги. Уменьшение расхода воздуха также ограничено опасностью самовозгорания сухого молока, а при его повышении увеличиваются потери продукта. Изменение расхода сгущенного продукта связано с изменением производительности установок сгущения и сушки.

При управлении температурой воздуха  $u(t)$  на выходе из сушильной башни и изменением расхода сгущенного молока  $R_m(t)$  необходимо согласование производительностей установок сгущения и сушки. Для этого используется схема с промежуточным резервуаром для хранения сгущенного молока, установленным между аппаратами сгущения и сушки, поскольку в таком случае изменение расхода сгущенного молока, подаваемого из резервуара на распылительную сушку, не сказывается на работе установки для сгущения молока. В процессе распылительной сушки возможно изменение массовой доли влаги в продукте на выходе установки. Управление осуществляется изменением расхода продукта.

Для управления процессом сушки в распылительных сушильных установках возможны две схемы авто-

матического управления: по косвенному параметру — зависимости влажности готового продукта от температуры выходящего из башни сушильного агента (горячего воздуха); по прямому параметру — влажности сухого продукта, выходящего из сушильной башни.

Измерить влажность сухого продукта существующими средствами контроля затруднительно, поэтому для управления процессом используют косвенный параметр — температуру  $y(t)$  воздуха, выходящего из сушильной башни.

В процессе функционирования системы автоматического управления (САУ) температура воздуха на выходе из сушильной башни подвергается разнообразным и, как правило, неконтролируемым возмущающим воздействиям с неизвестными статистическими характеристиками и поэтому не удается синтезировать регуляторы указанной температуры на основе методов, развитых, например, в теории линейной оптимальной фильтрации Винера-Колмогорова и Калмана-Бьюси.

Для эффективного управления рассматриваемым ТП были использованы робастные методы, обеспечивающие настройку системы на максимальное быстродействие, что позволяет ей успешно парировать действующие на нее возмущения даже при изменении их статистических характеристик в широких пределах. Рассмотрим требования, выполнение которых обеспечивает робастность системы управления.

Установлено [1], что математическое ожидание интенсивности экономических потерь, возникающих при отклонениях управляемых технологических параметров от заданных значений, стремится к минимуму при выполнении следующего условия:

$$\alpha_0 = \max, \quad (1)$$

где  $\alpha_0$  — свободный член характеристического уравнения замкнутой системы.

Наряду с условием (1) целесообразно использовать также следующие ограничения на запас устойчивости системы:

$$m = \min \left| \frac{\operatorname{Re} s_h}{\operatorname{Im} s_h} \right| \geq m_{II}; \quad \eta = \min(-\operatorname{Re} s_h) > \eta_{II} > 0, \quad (2)$$

где  $S_h$ ,  $h = \overline{1, n}$  — полюсы передаточных функций замкнутой системы;  $n$  — порядок характеристического уравнения;  $m_{II}$  и  $\eta_{II}$  — соответственно предельно допустимые величины относительного и абсолютного демпфирования свободного движения замкнутой системы.

Доказано [2], что условие (1) при ограничениях (2) выполняется тогда и только тогда, когда расположе-

ние полюсов передаточных функций замкнутой системы удовлетворяет следующим требованиям:

$$S_k = -\eta[1 + i\chi_k(m_n)]; k = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где 
$$\chi_k(m_n) = \begin{cases} (-1)^k / m_n, & k \leq 2N; \\ 0, & k > 2N, \end{cases}$$

причем  $N$  – целая часть отношения  $n/2$  ( $n$  – порядок характеристического полинома);  $i$  – мнимая единица.

Следовательно, параметры настройки регулятора следует выбирать таким образом, чтобы обеспечить выполнение требований (3). Отметим, что выполнение требований (3) гарантируется лишь в тех случаях, когда объект полностью управляем и имеется полная обратная связь по состоянию замкнутой системы, т.е. при формировании сигнала обратной связи используются все координаты вектора состояния  $X(t)$ .

Одна из проблем, с которыми приходится сталкиваться при синтезе систем управления ТП, заключается в отсутствии полной обратной связи по вектору  $X(t)$ . Это объясняется тем, что управляемые объекты зачастую описываются дифференциальными уравнениями высоких порядков, а в алгоритмах управления обычно не удается использовать производные по времени выше первого порядка, так как входные сигналы регуляторов наряду с полезным сигналом содержат и шумовые составляющие, влияние которых недопустимо усиливается с возрастанием порядка указанных производных. Кроме того, управляемым объектам нередко присуща пространственная распределенность параметров, вектор  $X(t)$  для системы с таким объектом имеет бесконечную размерность. Разумеется, на практике невозможно реализовать обратную связь по бесконечному числу координат вектора  $X(t)$ .

Поэтому в системах с неполной обратной связью по состоянию далеко не все полюсы можно расположить в любом, заранее заданном положении, т.е. заведомо обеспечить выполнение требований (3). Поэтому приходится ограничиться выполнением требований (3) лишь для так называемых *доминирующих* полюсов системы.

Предположим, что система имеет  $n_d$  доминирующих полюсов  $S_k, k = \overline{1, n_d}$  тогда для остальных полюсов системы  $S_h, h = n_d+1, n_d+2, \dots$  должны выполняться неравенства

$$\operatorname{Re} S_h \leq \operatorname{Re} S_k; \quad (4)$$

$$|s_h| \gg |s_k|. \quad (5)$$

В соответствии с условием (4) все недоминирующие полюсы системы должны располагаться на комплексной плоскости не ближе к мнимой оси, чем доминирующие. Условие (5) означает, что недоминирующие полюсы расположены значительно дальше от начала системы координат по сравнению с доминирующими.

При выполнении хотя бы одного из условий (4), (5) качество управления определяется в основном доминирующими полюсами и поэтому выполнение для

них требований (3) способствует его существенному повышению.

Для применения требований (3) необходимо установить взаимосвязь между числом доминирующих полюсов системы  $n_d$ , для которых эти требования выполнимы, и числом параметров настройки регулятора  $n_p$ , значения которых требуется определить. Кроме того, необходимо также вычислить значение неизвестной величины  $\eta$ , используемой в требованиях (3) и служащей мерой быстродействия замкнутой системы. Следовательно имеется  $n_p + 1$  величин, варьируя значения которых, можно задать желаемое расположение такого же числа полюсов, то есть  $n_d = n_p + 1$ .

В таком случае, при использовании ПИ-регулятора с передаточной функцией

$$W_{\text{ПИ}}(S) = K_p + K_p/(T_{\text{И}}S),$$

где  $K_p$  – коэффициент передачи регулятора;  $T_{\text{И}}$  – постоянная времени интегрирования;  $S$  – комплексная переменная, робастность замкнутой системы управления обеспечивается при следующем расположении доминирующих полюсов:

$$s_{1,2} = \eta \left( -1 \pm i \frac{1}{m_n} \right); s_3 = -\eta. \quad (6)$$

Исходя из требований (6) для расчета значений параметров настройки ПИ-регулятора получим следующие формулы [3]:

$$K_p = \frac{m_n}{\eta} F_I(\eta); T_{\text{И}} = \frac{m_n F_I(\eta)}{\eta [F_R(\eta) + m_n F_I(\eta)]}, \quad (7)$$

где 
$$F_R(\eta) = -\operatorname{Re} \left[ \frac{-\eta + i \frac{\eta}{m_n}}{W_{\text{об}} \left( -\eta + i \frac{\eta}{m_n} \right)} \right];$$
  

$$F_I(\eta) = -\operatorname{Im} \left[ \frac{-\eta + i \frac{\eta}{m_n}}{W_{\text{об}} \left( -\eta + i \frac{\eta}{m_n} \right)} \right],$$

причем  $W_{\text{об}}(S)$  – передаточная функция объекта по каналу управления. Значение величины  $\eta$  в выражениях (7) определяется в результате решения уравнения

$$\frac{\eta}{W_{\text{об}}(-\eta)} = F_R(\eta). \quad (8)$$

Для робастных систем с ПИД-регулятором, имеющим передаточную функцию

$$W_{\text{ПИД}}(S) = K_p T_D S + K_p + K_p/(T_{\text{И}}S),$$

где  $T_D$  – постоянная времени дифференцирования, расположение доминирующих полюсов определяется выражениями:

$$s_{1,3} = -\eta + i \frac{\eta}{m_n}; s_{2,4} = -\eta - i \frac{\eta}{m_n}. \quad (9)$$

Воспользовавшись требованиями (9) для определения значений параметров настройки ПИД-регулятора, получим следующие формулы [3]:

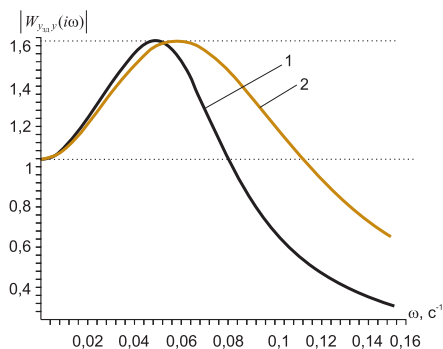


Рис. 1. АЧХ замкнутой системы по каналу  $y_{зд}(t) \rightarrow y(t)$  при использовании: 1 – ПИ-регулятора; 2 – ПИД-регулятора

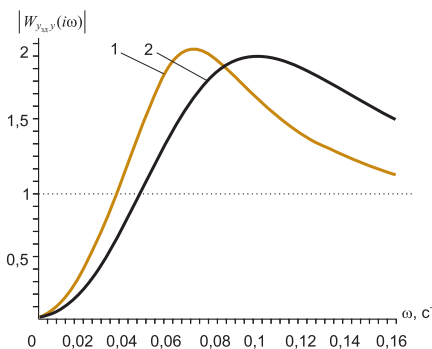


Рис. 2. АЧХ замкнутой системы по каналу  $y_{зд}(t) \rightarrow y(t)$  при использовании: 1 – ПИ-регулятора; 2 – ПИД-регулятора

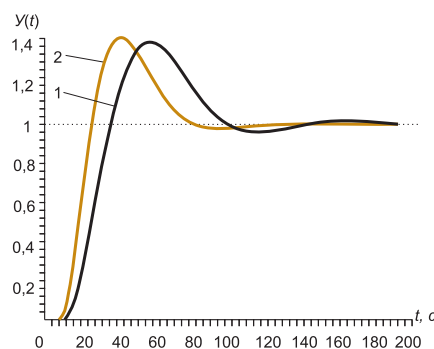


Рис. 3. Переходные процессы при использовании: 1 – ПИ-регулятора; 2 – ПИД-регулятора

$$K_p = \Phi_R(\eta) + m_{II} \Phi_I(\eta); \quad (10)$$

$$T_{II} = \frac{\Phi_R(\eta) + m_{II} \Phi_I(\eta)}{F_R(\eta) + \eta \Phi_R(\eta) + m_{II} \eta \Phi_I(\eta) - \frac{1}{2} \Phi_I(\eta) \eta \left( m_{II} - \frac{1}{m_{II}} \right)}; \quad (11)$$

$$T_d = \frac{m_{II} \Phi_I(\eta)}{2\eta [\Phi_R(\eta) + m_{II} \Phi_I(\eta)]}; \quad (12)$$

где

$$\Phi_R(\eta) = -\operatorname{Re} \left\{ \left. \frac{d}{ds} \left[ \frac{s}{W_{об}(s)} \right] \right|_{s = -\eta + i(\eta/m_{II})} \right\};$$

$$\Phi_I(\eta) = -\operatorname{Im} \left\{ \left. \frac{d}{ds} \left[ \frac{s}{W_{об}(s)} \right] \right|_{s = -\eta + i(\eta/m_{II})} \right\}.$$

Чтобы определить значение величины  $\eta$  в выражениях (10–12) необходимо решить уравнение

$$\frac{\eta}{m_{II}} \Phi_R(\eta) = F_I(\eta). \quad (13)$$

Таким образом, располагая выражениями для передаточных функций  $W_{об}(s)$  по каналам управления, на основании полученных соотношений (7), (8) или (10–13) можно определить такие значения параметров настройки основных регуляторов (ПИ, ПИД), при которых обеспечивается робастность системы управления температурой воздуха  $y(t)$  на выходе из сушильной башни.

На основании экспериментальных исследований сушильной установки "Нема – 500" на Мелеузовском молочноконсервном заводе были построены переходные характеристики (кривые разгона) объекта по трем каналам управления:  $T_a(t) \rightarrow y(t)$ ,  $R_a(t) \rightarrow y(t)$ ,  $R_m(t) \rightarrow y(t)$ .

По этим характеристикам были получены выражения для передаточных функций объекта в виде

$$W_{об}(s) = K_{об} \frac{e^{-\tau s}}{1 + Ts}, \quad (14)$$

где  $K_{об}$  – коэффициент передачи объекта;  $\tau$  – постоянная времени транспортного запаздывания;  $T$  – постоянная времени объекта.

В результате оказалось, что инерционность каналов  $T_a(t) \rightarrow y(t)$  и  $R_a(t) \rightarrow y(t)$ , многократно превышает инерционность канала  $R_m(t) \rightarrow y(t)$ . Поэтому для управления температурой  $y(t)$  был выбран единственный канал  $R_m(t) \rightarrow y(t)$ . Для него параметры передаточной функции (14) принимают значения:

$$K_{об} = 1,3; t = 15 \text{ с}; T = 105 \text{ с}. \quad (15)$$

Рассмотрим случай, когда для управления рассматриваемым объектом по каналу  $R_m(t) \rightarrow y(t)$  в контуре управления используется ПИ-регулятор. Чтобы определить значения его параметров настройки  $K_p$  и  $T_{II}$  необходимо задать определенное значение показателю  $m_{II}$ , которое обычно выбирается из интервала 0,221 ... 0,366. Однако в работе [3] было показано, что значение  $m_{II}$  в условиях информационной неопределенности относительно характеристик, действующих на систему возмущений, целесообразно выбирать так, чтобы обеспечить выполнение равенства

$$M \equiv \max \left| \frac{W_{y_{зд}}(i\omega)}{W_{y_{зд}}(i0)} \right| = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \approx 1,618. \quad (16)$$

где  $W_{y_{зд}}(i\omega)$  – комплексная частотная характеристика (КЧХ) замкнутой системы по каналу  $y_{зд}(t) \rightarrow y(t)$ ;  $\omega$  – циклическая частота;  $y_{зд}(t)$  – заданное в соответствии с технологическими требованиями значение температуры  $y(t)$ .

В результате выполненных расчетов было установлено, что равенство (16) выполняется, если  $m_{II} = 0,52$ , а в результате решения уравнение (8) получаем  $\eta = 0,0303 \text{ с}^{-1}$ . Тогда из (7) получим  $K_p = 3,605$ ,  $T_{II} = 46,71 \text{ с}$ .

В случае использования в контуре управления ПИД-регулятора имеем  $m_{II} = 1,27$ , а в результате решения уравнения (13) установлено, что  $\eta = 0,0731 \text{ с}^{-1}$ . Тогда воспользовавшись выражениями (10–12) получим

$$K_p = 5,279, T_{II} = 35,98 \text{ с}; T_d = 4,663 \text{ с}.$$

Проанализируем качество управления в обоих рассмотренных случаях, чтобы выбрать наилучший алгоритм управления.

В случае использования ПИ-регулятора, выбранные из условия (16) значения величины  $m_{II}$  существенно отличаются от тех, что обычно рекомендуются. На рис. 1 представлены графики АЧХ замкнутой системы  $|W_{y_{зд}}(i\omega)|$  по каналу передачи сигналов  $y_{зд}(t) \rightarrow y(t)$ . Рисунок свидетельствует о выполнении в обоих случаях условия (16), а также о заметном возрастании резонансной частоты замкнутой системы при замене ПИ-регулятора на ПИД-регулятор.

## *Контур управления - это тонкое кружево параметров настройки и передаточных функций*

Журнал "Автоматизация в промышленности"

Сопоставление значений  $\eta$  показывает, что для системы с ПИД-регулятором быстродействие в 2,4 раза выше, чем для аналогичной системы с ПИ-регулятором.

На рис. 2 приводятся графики АЧХ замкнутой системы по каналу  $y_{зд}(t) \rightarrow \varepsilon(t)$ , где ошибка управления задается равенством  $\varepsilon(t) = y_{зд}(t) - y(t)$ .

Из рисунка можно сделать вывод, что в низкочастотной области фильтрующие свойства системы с ПИД-регулятором значительно лучше, чем у системы с ПИ-регулятором. Это объясняется тем, что максимизируемый показатель  $\alpha_0$  при замене ПИ-регулятора на ПИД-регулятор возрастает в 1,9 раза, что следует из полученных значений  $K_p$ ,  $T_{II}$ ,  $T_D$ .

На рис. 3 изображены графики переходных процессов, возникающих на выходе замкнутой системы при скачкообразном изменении сигнала задания

$$y_{зд}(t) = 1(t) \equiv \begin{cases} 0, & t \leq 0; \\ 1, & t > 0. \end{cases}$$

Из рисунка видно, что величина перерегулирования в обоих рассматриваемых случаях примерно одинаковая, но переходный процесс на выходе системы с

ПИД-регулятором затухает быстрее, чем в системе с ПИ-регулятором.

Следовательно, при робастном управлении сушкой молока лучшее качество управления обеспечивается при использовании ПИД-регуляторов.

Таким образом, разработанный метод робастного управления позволяет не только рассчитать значения параметров настройки типовых регуляторов, но и выбрать среди них наиболее отвечающий требованиям, предъявляемым к качеству управления.

### 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. Шавров А.В., Солдатов В.В. Многокритериальное управление в условиях статистической неопределенности. М.: Машиностроение, 1990.
3. 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.

*Солдатов В.В. — д-р техн.наук, проф.,*

*Маклаков В.В. — д-р, техн. наук, проф., заведующий кафедрой "Системы управления",*

*Шиянова Н.И. — соискатель Московского государственного университета технологий и управления (МГУТУ),*

*Контактный телефон (495)670-91-90. E-mail: syscontr@mail.ru*

## АРХИТЕКТУРА ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ LEGOS

**К.Е. Лепешенков (Компания "Группа "Контур Безопасности")**

*Показано, что в современной интегрированной системе обеспечения безопасности важнейшую роль играет архитектура и протоколы обмена данными между элементами системы. Выделены основные категории данных таких систем и сформулированы основные требования, предъявляемые узлам распределенных систем обеспечения безопасности и протоколам обмена данными. В качестве примера рассмотрены архитектура и механизмы реализации обмена данными в интегрированной программно-аппаратной системе обеспечения безопасности Legos.*

В современной интегрированной системе обеспечения безопасности важнейшую роль играет архитектура и протоколы обмена данными между элементами системы. От эффективности этой архитектуры, от того, насколько быстро система способна отреагировать на тревожные события и различные внештатные ситуации подчас зависит безопасность охраняемого объекта и жизнь людей. В то же время важную роль играет и гибкость архитектуры, возможность построения на ее основе многозвенных, территориально распределенных систем, возможность организации непрерывного обмена данными между узлами, в том числе по низкокачественным каналам связи, применения в системе мобильных и карманных устройств и т.д.

Можно выделить следующие основные категории данных в системах обеспечения безопасности.

1. Права доступа. Сведения о сотрудниках (все взаимодействующие с системой работники организации, временные посетители и др.), идентификационная информация и полномочия: номера TouchMemory-ключей и/или proximity-карт, разрешенные действия, временные ограничения и т.д.

2. События. Информационные и тревожные события от контроллеров и охранных датчиков: проход сотрудника, взлом двери, срабатывание охранного датчика, потеря связи и т.д.

3. Статусы. Данные о текущем состоянии охранных устройств: под охраной/снят с охраны, состоящие тревоги, дверь открыта, питание от сети/от аккумулятора, есть связь/нет связи и т.д.

Сформулируем основные требования, предъявляемые к узлам распределенных систем обеспечения безопасности и протоколам обмена данными между ними (рис. 1):