

УДК: 621.793

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАНЕСЕНИЕМ ПОКРЫТИЯ НА ВНУТРЕННЮЮ ПОВЕРХНОСТЬ ТРУБЫ

© 2013 Б. В. Скворцов, М. И. Зарецкая, П. А. Курылёва

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье приводятся результаты исследования системы управления нанесением покрытия на внутреннюю поверхность трубы с использованием компьютерного моделирования. Проводится оптимизация параметров элементов для обеспечения наилучшего качества наносимого покрытия в диапазоне длины трубы. Компьютерная модель дополнена блоками, приближающими результаты моделирования к результатам экспериментов.

Система управления, труба, нанесение покрытия, компьютерное моделирование, оптимальные параметры, диапазон качественного нанесения покрытия.

Эмалевые покрытия применяются для защиты от коррозии внутренних поверхностей труб, что увеличивает пропускную способность и срок службы трубопроводов. В статье проводится анализ работы системы нанесения покрытий способом управляемого слива [1], различные варианты технических решений которой приведены в [2-4]. Упрощённая структурная схема системы нанесения покрытий показана на рис. 1.

Система работает следующим образом. Труба наполняется наносимым материалом (шликером) через впускной вентиль 4. Затем начинается его управляемый слив через шланговую задвижку 5. Толщина и равномерность покрытия зависит от скорости слива и её стабильности.

В работе [6] разработана функциональная схема системы управления нанесением покрытия на внутреннюю поверхность труб. В настоящей работе схема усложнена введением новых блоков, приближающих результаты компьютерного моделирования к экспериментальным данным, и блоков, позволяющих провести оптимизацию параметров всей системы. Усложнённая функциональная схема приведена на рис. 2.

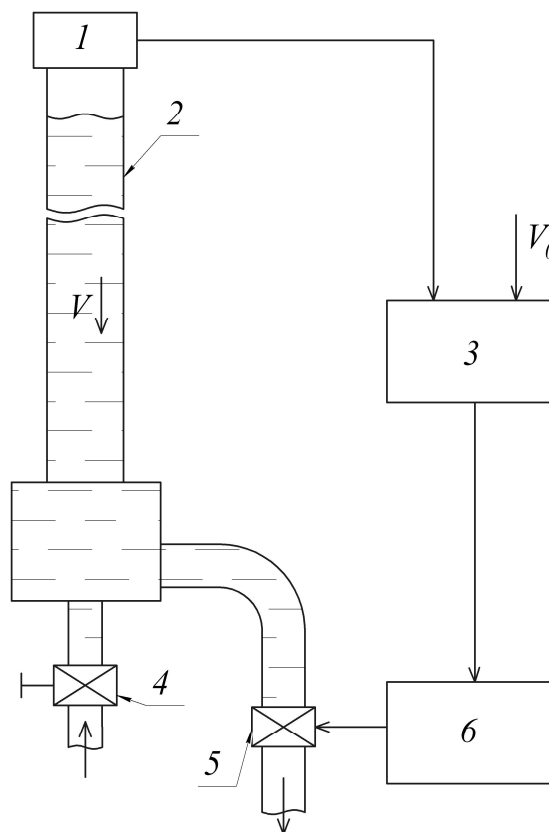


Рис. 1. Структурная схема системы управления нанесением покрытия на внутреннюю поверхность трубы:
1 – датчик уровня материала в трубе;
2 – обрабатываемая труба; 3 – модуль обработки информации и управления; 4 – впускной вентиль;
5 – шланговая задвижка; 6 – электропривод

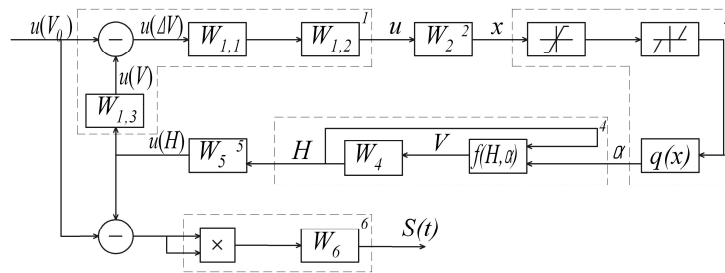


Рис. 2. Функциональная схема системы управления нанесением покрытия на внутреннюю поверхность труб

Определены функции преобразования каждого блока. Модуль обработки информации и управления представлен звеном 1. V_0 – заданное оператором значение требуемой скорости движения жидкости. Модуль обработки информации и управления преобразует текущую высоту в скорость, что учитывается использованием вновь введенного блока $W_{1,3} = p$. В этом же модуле происходит сравнение эталонной скорости движения материала с реальной скоростью в трубе $u(\Delta V) = u(V_0) - u(V)$. Блок $W_{1,1}$ реализует способ обработки разностного сигнала (П-регулирование, ПИ-регулирование, ПИД-регулирование). $W_{1,2}$ – блок коррекции, входящий в состав регулятора и использующийся для достижения максимально равномерного покрытия. Звено 2 связывает входной сигнал электродвигателя с перемещением x траверса задвижки и описывается передаточной функцией

$$W_2(p) = k_2 / p(T_2 p + 1).$$

Звено 3 связывает пропускную способность шланговой задвижки a с механическим воздействием двигателя. В схеме в блок задвижки включены ограничитель и зона нечувствительности, которые определяются максимальным диаметром шланга в задвижке и его деформацией.

Труба моделируется звеном 4, состоящим из двух блоков с локальной обратной связью, где функция преобразования первого звена $V = f(H, \alpha)$ является уравнением движения материала в полости трубы, определяемым индивидуально для каждой трубы и вида материала. Сигнал высоты для звена $f(H, \alpha)$ формируется интегрирующим блоком $W_4 = k_4 / p$.

Функция $f(H, \alpha)$ получена с помощью математического описания слива жидкости из вертикальной трубы [5]:

$$\frac{dV}{dH} = \frac{g(C\alpha)^2}{V} - \frac{V(1 - (C\alpha)^2)}{H} - \frac{kgH^2(C\alpha)^2}{RV} \left(\frac{0,73K_{\text{Э}}}{R} + \frac{50\eta_{\text{к}}}{VR} \right)^{0,25},$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $\eta_{\text{к}}$ – кинематическая вязкость; $K_{\text{Э}}$ – эквивалентная абсолютная шероховатость (определяется из таблиц); $\alpha \in [0..1]$ – пропускная способность шланговой задвижки; C – коэффициент поправки на конструктивные особенности задвижки; R – радиус покрываемой трубы; k – коэффициент, учитывающий сопротивление движению шликера после сливной задвижки,

определяемый экспериментально.

Звено 5 моделирует датчик уровня материала в трубе и имеет передаточную функцию $W_5 = k_5$, где k_5 определяет чувствительность датчика. Звено 6 используется для определения оптимальных параметров системы.

На рис. 3 приведены результаты моделирования усовершенствованной модели системы в программе MATLAB+SIMULINK.

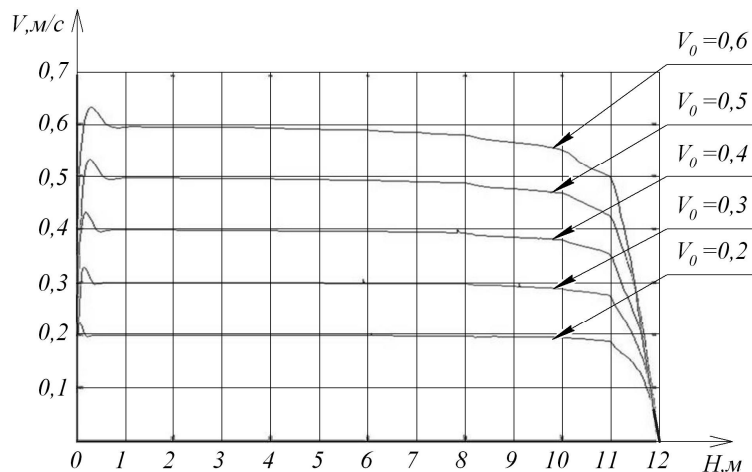


Рис. 3. Графики процесса регулирования по длине трубы при разных заданных скоростях стабилизации

Полученные графики имеют три чётко выраженных участка: выход на стабильный режим, стабильный режим и неуправляемый слив. Проведены исследования компьютерной модели системы и её отдельных элементов, которые позволяют объяснить форму графиков на рис. 3. Задача исследований состоит в определении параметров, обеспечивающих максимально длинный участок стабильного движения жидкости.

Проведены исследования параметров двигателя на регулирование скорости движения материала. Передаточная функция двигателя имеет вид $W_2(p) = k_2/p(T_2p+1)$, где T_2 – постоянная времени двигателя, влияющая только на передний фронт характеристики.

Рассмотрена зона нечувствительности шланговой задвижки, появление которой связано с деформацией стенок шланга. В целом её влияние отражается только на смещении по времени начала слива материала. Однако, если значение нечувствительной зоны становится соизмеримым с радиусом самой задвижки, то отсутствует участок стабильной скорости движения материала.

На стабилизацию скорости большое влияние оказывает чувствительность датчика уровня материала в трубе, которая определяется коэффициентом k_5 . По результатам исследований определено, что

с ростом коэффициента k_5 возникает перерегулирование, превышающее допустимое значение, но увеличивается протяжённость участка стабильного движения материала как во времени, так и относительно длины трубы. При малых значениях k_5 скорость движения материала не достигает заданного значения.

Рассмотрено влияние различных типов регулирования на стабилизацию скорости. Звено обработки разностного сигнала может быть реализовано тремя способами: П-регулированием: $W_{1,1} = k_1$; ПИ-регулированием: $W_{1,1} = k_1/p$; ПИД-регулированием: $W_{1,1} = k_{11} + k_{12}/p + k_{13}p$. Проведено сравнение П-, ПИ- и ПИД-регулирования. Определено, что для разрабатываемой системы управления наилучшим образом подходит режим П-регулирования, так как можно реализовать наибольший участок стабильного движения материала с заданной скоростью.

Исследование влияния коэффициента П-регулирования ($W_{1,1} = k_1$) показало, что он сильно влияет на скорость течения материала. При больших коэффициентах в начале цикла возникает перерегулирование, которое приводит к неравномерности, а при малых коэффициентах процесс не выходит на стабильную скорость движения.

Рассмотрено поддержание стабильной скорости по высоте трубы. Текущее отклонение скорости от требуемого значения определяется по формуле:
 $\Delta V(H) = V_0 - V(H)$.

График зависимости текущего отклонения имеет вид, показанный на рис.4.

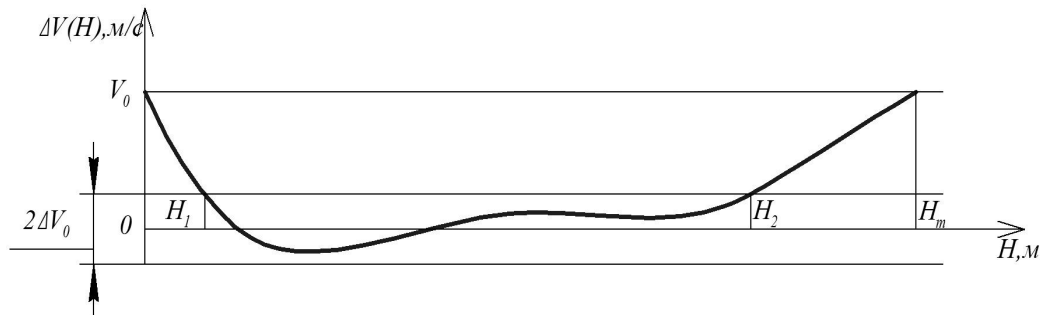


Рис. 4. Отклонение текущей скорости от эталонной по высоте трубы

На рис.4 V_0 – заданная скорость движения материала; ΔV_0 – допустимая погрешность скорости. Из рисунка видно, что кривая скорости имеет три характерных участка: $0 \div H_1$ – участок нарастания скорости и входа её в зону допустимых отклонений; $H_1 \div H_2$ – участок относительно стабильного движения, при котором скорость не выходит за рамки допустимых значений $\pm \Delta V_0$; $H_2 \div H_m$ – участок спада скорости, обусловленный невозможностью её регулирования ввиду резкого снижения давления столба жидкости.

Требуемая толщина покрытия достигается в диапазоне $H_1 \div H_2$. Перед системой управления ставится задача обеспечения максимально широкого диапазона равномерного нанесения покрытия $H_1 \div H_2$, которое связано с минимизацией отклонения скорости по высоте трубы в полном диапазоне $0 \div H_m$. Очевидно, что расширение диапазона $H_1 \div H_2$ достигается минимизацией интегрального квадратического критерия, определяемого выражением:

$$S = \int_0^{H_m} \Delta V^2(H) dH.$$

Для того, чтобы приступить к оптимизации, необходимо в функциональной схеме (рис. 2) выделить

параметры, которыми реально можно варьировать в системе. К таким параметрам можно отнести коэффициент пропорциональности П-регулятора k_1 и коэффициент усиления датчика уровня k_5 . Эти параметры существенно влияют на передний и задний фронты процесса регулирования и могут изменяться путём введения в схему электронного усилителя с регулируемым коэффициентом усиления. Отметим, что на передний фронт импульса также существенно влияют постоянные времени двигателя T_2 и зона нечувствительности шланговой задвижки, но параметры этих элементов не могут быть изменены. Поэтому они исключены из процедуры оптимизации. Таким образом, целевую функцию оптимизации можно переписать в виде:

$$S = \int_0^{H_m} \Delta V^2(H) dH = F(k_1, k_5) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Прямое решение задачи оптимизации затрудняется тем, что функция $F(k_1, k_5)$ неизвестна. Однако можно задать диапазоны изменений указанных параметров, например $k_1=0,05 \div 0,23$, $k_5=0,5 \div 2,25$. Выбор диапазонов производится из следующих условий: система не теряет устойчивости;

перерегулирование системы не превышает 10%; система входит в режим стабилизации скорости с погрешностью $\pm 10\%$.

Для определения оптимальной совокупности $\{k_{1opt}, k_{5opt}\}$ необходимо создать массивы коэффициентов k_1^i, k_5^j , где $i=0\dots N, j=0\dots M, M$ и N – число точек сетки коэффициентов, например $N=6, M=8, k_1^i = k_1^{i-1} + \Delta k_1, k_5^j = k_5^{j-1} + \Delta k_5$. При этом шаг может быть переменным.

Для каждой совокупности коэффициентов $\{k_1^i, k_5^j\}$ в программе MATLAB+ SIMULINK получаем значение функции, пропорциональной интегральному квадратическому критерию качества:

$$S = \int_0^{H_m} \Delta V^2(H) dH = \int_0^{t_c} \Delta V^2(t) dt = S(t). \quad (2)$$

Эквивалентность следует из того, что функции $\Delta V^2(H)$ и $\Delta V^2(t)$ имеют одинаковый вид на участке слива. Эквивалентность подтверждается вычислениями интегралов во времени и от длины трубы. Время слива t_c определяется из соответствующего графика $H(t)$ при достижении $H=0,02H_m$. Отметим, что фиксация времени слива по моменту $H=0$ невозможна, так как кривая слива при малых высотах имеет асимптотический характер (неуправляемый слив при сверхмалых давлениях).

Вычисление интеграла (2) иллюстрируется звеном б схемы на рис. 2, где блок умножения вычисляет квадрат разностного сигнала, а текущее интегрирование реализуется блоком с передаточной функцией $W_6 = k_6/p$. Изменение сигнала $S(t)$ показано на рис. 5, а при $V_0=0,3$ м/с.

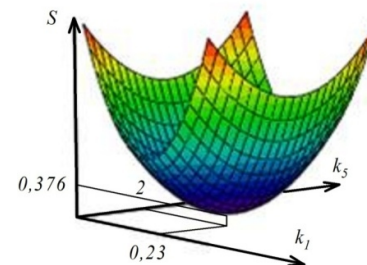
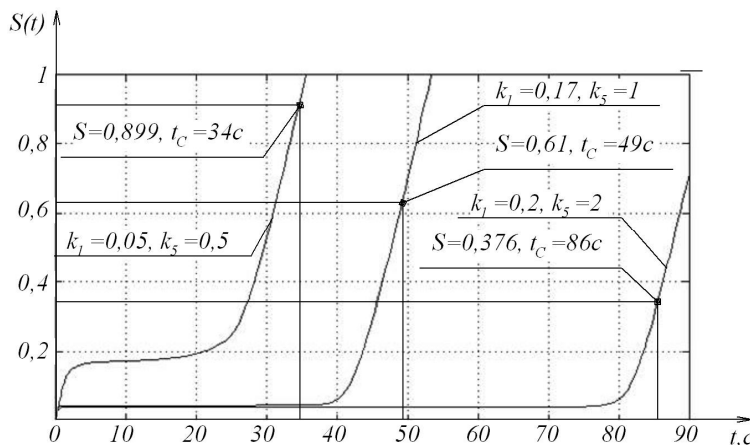


Рис. 5. Пример изменения сигнала $S(t)$ и определения оптимальных значений k_1, k_5

Анализ полученных значений показывает, что имеет место локальный и абсолютный минимум. На рис. 5, б показан участок достижения абсолютного минимума при $k_1 = 0,20, k_5 = 2$. Дальнейшее увеличение k_1, k_5 приводит к недопустимому перерегулированию. Исследования показали, что оптимальное сочетание коэффициентов k_1, k_5 не зависит от V_0 .

Исследование системы управления с помощью компьютерной модели

позволяет определить влияние параметров отдельных блоков и подобрать их оптимальные значения, обеспечивающие наилучшие равномерность и качество покрытия. Разработанная система управления позволяет моделировать различные нелинейные законы управления движением шликера в трубе, что может расширить диапазон качественного покрытия по длине трубы.

Библиографический список

1. Пат. 2488450 Российская Федерация, МПК⁷В05С11/10. Способ нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы [Текст] / Скворцов Б.В., Борминский С.А., Голикова М.И., Сератинский А.А., Риккер В.И.; заявитель и патентообладатель Скворцов Б.В., Борминский С.А., Голикова М.И., Сератинский А.А., Риккер В.И. - №2010116734; заявл. 27.04.10; опубл. 10.11.11, Бюл.№21.

2. Пат. 96793 Российская Федерация, МПК⁷В05С11/10. Устройство нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы [Текст] / Скворцов Б.В., Борминский С.А., Голикова М.И.; заявитель и патентообладатель СГАУ.- №2010114883; заявл. 13.04.10; опубл. 20.08.10, Бюл. №23.

3. Пат. 106850 Российская Федерация, МПК⁷В05С7/08. Устройство нанесения изолирующих покрытий на внутреннюю поверхность трубы [Текст] / Скворцов Б.В., Борминский С.А., Голикова М.И.; заявитель и патентообладатель Скворцов Б.В., Борминский С.А., Голикова М.И. -

2011106716/05; заявл. 22.02.11; опубл. 27.07.11, Бюл. №21.

4. Заявка 2011154418 Российская Федерация, МПК⁷В05С7/08. Система автоматического управления нанесением изолирующего покрытия на внутреннюю поверхность изделий цилиндрической формы [Текст] / Скворцов Б.В., Борминский С.А., Голикова М.И.; заявитель и патентообладатель ООО «Аналитические приборы и системы» - №2011154418; приоритет 29.12.2011.

5. Скворцов, Б.В. Компьютерное моделирование системы автоматического управления нанесением покрытия на внутреннюю поверхность трубы [Текст] / Б.В. Скворцов, М.И. Голикова // Materiály IX mezinárodní vědecko-praktická konference «MODERNÍ VYMOŽENOSTI VĚDY – 2013». - Díl 76 Technické vědy. – P. 83-88, Praha, 2013.

6. Скворцов, Б.В. Исследование процесса регулирования движения жидкости в системе нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы [Текст] / Б.В. Скворцов, М.И. Голикова // Датчики и системы. – 2013. №3 – С.9-13.

RESEARCH AND OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF A SYSTEM CONTROLLING THE PROCESS OF TUBE INSIDE SURFACE COATING

© 2013 B. V. Skvortsov, M. I. Zaretskaya, P. A. Kurylyova

Samara State Aerospace University

The paper presents the results of research of a system controlling the process of tube inside surface coating using computer simulation. The parameters of the elements are optimized in order to provide the highest quality of the coating applied along the tube. The computer model is complemented by units that make the results of the simulation close to the experimental results.

Control system, process, tube, coating, computer simulation, optimal parameters, range of high-quality coating.

Информация об авторах

Скворцов Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор, научный руководитель НИЛ «Аналитические приборы и системы», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный иссле-

довательский университет). E-mail: aps@ssau.ru. Область научных интересов: аналитические приборы и системы.

Зарецкая Маргарита Игоревна, младший научный сотрудник НИЛ «Аналитические приборы и системы», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: aps@ssau.ru. Область научных интересов: аналитические приборы и системы.

Курылёва Полина Андреевна, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: aps@ssau.ru. Область научных интересов: аналитические приборы и системы.

Skvortsov Boris Vladamirovitch, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of Samara State Aerospace University, Scientific Supervisor of the Research Laboratory of Analytical Devices and Systems. E-mail: aps@ssau.ru. Area of research: analytical devices and systems.

Zaretskaya Margarita Igorevna, Junior Researcher, Research Laboratory of Analytical Devices and Systems, Samara State Aerospace University. E-mail: aps@ssau.ru. Area of research: analytical devices and systems.

Kurylyova Polina Andreevna, undergraduate student, Samara State Aerospace University. E-mail: aps@ssau.ru. Area of research: analytical devices and systems.