

## Математическое моделирование автоматизированной системы управления технологическим процессом освинцования длинномерных рукавов

*Л.И. Медведева, Г.К. Кукарский*

*Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»*

**Аннотация:** Данная работа посвящена исследованию и разработке автоматизированной системы управления технологическим процессом освинцования длинномерных рукавов. Модернизация технологического процесса производства рукавов является одной из приоритетных задач промышленной отрасли. Рукава - важная составляющая части производства многих предприятий и востребованы на рынке. В статье представлен анализ достоинств и недостатков способов производства рукавов. Анализ достоинств и недостатков способов позволяет сделать вывод, что производство рукавов на гибких дорнах является наиболее перспективным. Поэтому стоит рассматривать его при проектировании и модернизации автоматизированных систем управления технологическим процессом. Приведены результаты математического моделирования автоматизированной системы. Моделирование произведено с помощью программного средства ViSim. Объектом управления является плавильная ванна свинца. В качестве регулируемого технологического параметра принята температура свинца. Для построения автоматизированной системы управления применен метод пассивного эксперимента. Получены основные параметры объекта управления и пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора.

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления, технологический процесс, длинномерный рукав, свинец, температура, математическое моделирование, объект управления, передаточная функция, параметры управления.

Модернизация технологического процесса производства рукавов является одной из приоритетных задач промышленной отрасли. Рукава - важная составляющая часть производства многих предприятий и востребованы на рынке [1].

Создание автоматизированной системы управления технологическим процессом освинцования длинномерных рукавов позволит получить высокие показатели качества процесса [2].

Проведем анализ способов изготовления рукавов: дорновый, полудорновый, бездорновый и на гибких дорнах [3].

Дорновый способ является самым технологически длительным, но при его использовании можно изготовить рукава любых форм и радиусов, однако здесь есть ограничение по длине рукава.

Полудорновый способ позволяет сократить число операций и, соответственно, оборудования для производства рукавов, а также уменьшить длительность технологического процесса за счет отсутствия некоторых действий при производстве.

При бездорновом способе производятся рукава любой длины, скорость технологического процесса существенно выше, чем при вышеизложенных способах. Процесс вулканизации можно осуществлять без перерыва. Технологический процесс может иметь высокую степень механизации и автоматизации. К недостаткам данного способа можно отнести то, что качество рукавов ниже по сравнению с дорновым способом изготовления. Также применяется свинец, который является токсичным и влияет на сложность технологии изготовления изделий [4]. В настоящее время нет исследований, подтверждающих удачный опыт перехода к термопластичным полимерам [5].

Описанные выше преимущества способов изготовления рукавов нашли место в методе производства на гибких дорнах.

Приведем требования, которым должны соответствовать гибкие дорны. В первую очередь, им необходимо быть достаточно твердыми, прочными и гибкими, а также выдерживать многократное воздействие высоких температур. Поверхность дорна должна быть гладкой и глянцевой. Материалу дорна следует быть устойчивым к резиновым смесям, иметь низкую плотность и хорошую теплопроводность, коэффициент его термического расширения должен быть выше аналогичного для материалов, из которых изготавливается рукав. Последнее требование особенно критично.

---

Сборка рукава на гибком дорне осуществляется при температуре до 30 °С, поэтому при вулканизации дорн расширяется и создает давление на стенки рукава, заключенного в свинцовую оболочку [6]. После вулканизации и снижения температуры дорн возвращается в исходное состояние (относительно размеров), а рукав практически не меняет своей геометрии. Это нарушает контакт между рукавом и дорном и облегчает его выемку [7]. От материала дорна зависит его конструкция и особенности технологии изготовления рукавов.

Анализ достоинств и недостатков способов позволяет сделать вывод, что производство рукавов на гибких дорнах является наиболее перспективным. Поэтому стоит рассматривать его при проектировании и модернизации автоматизированных систем управления технологическим процессом [8].

### **Математическое моделирование**

Для построения автоматизированной системы управления освинцования длинномерных рукавов применим метод математического моделирования. Математическая модель позволяет без вмешательства в технологический процесс оценить реакцию системы на изменение входных параметров. Для проверки адекватности модели используем метод пассивного эксперимента.

Объектом управления является плавильная ванна свинца.

Чистый и сухой свинец в виде пластин, после обдирки свинцовой оболочки на обдирочной машине, по транспортеру загружается в плавильную ванну. Температура свинца в ванне должна составлять 385 °С. Допускается отклонение 3%.

Регулирование температуры осуществляется за счет изменения подачи напряжения на промышленный трубчатый электрический нагреватель (ТЭН).

---

Для снятия временных характеристик достигаем постоянство степени подачи напряжения на ТЭН, затем вносим на вход возмущающее воздействие – ступенчатое увеличение температуры. Изменение входной величины регистрируем до установившегося значения температуры 385 °С. По полученным данным строим кривую разгона, предварительно преобразовав температуру в относительные координаты (рисунок 1) [9].

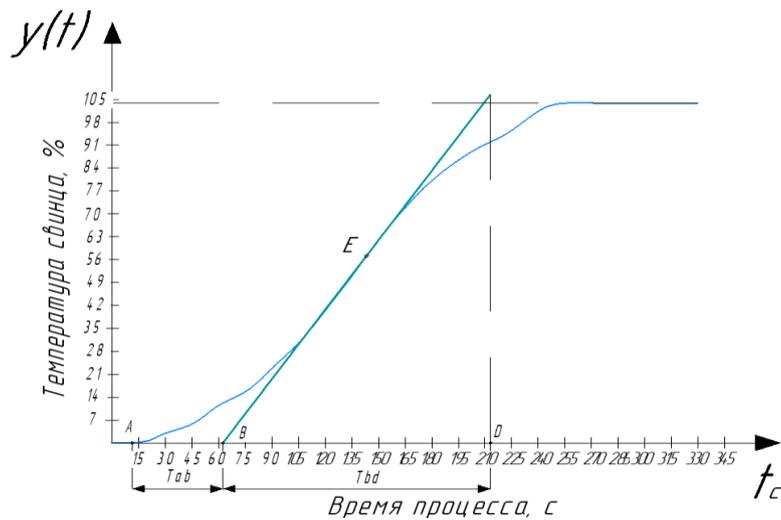


Рис. 1. Кривая разгона объекта управления

Численное значение коэффициента усиления  $k$  определяем по формуле (1):

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad (1)$$

где  $\Delta y$  – изменение температуры, % (2);

$\Delta x$  – ступенчатое изменение скорости нагнетания, % (3).

$$\Delta y = \frac{y_k - y_n}{y_k} \cdot 100\%, \quad (2)$$

$$\Delta x = \frac{x_k - x_n}{x_k} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $y_k, y_n$  – конечное и начальное значения температуры, °С;

$x_k, x_n$  – конечное и начальное значения скорости нагнетания, °С/с.

В точке перегиба строим касательную.

По отношению  $T_{ab}/T_{bd}$  определяем порядок передаточной функции.

Передаточная функция объекта определяется выражением (4):

$$W(p) = \frac{k}{T_3 p^3 + T_2 p^2 + T_1 p + 1} \cdot e^{-\tau p} \quad (4)$$

где  $T_1, T_2, T_3$  – постоянные времени, с (5);

$\tau$  – время запаздывания, с (6).

$$T = \frac{T_{bd}}{k} \quad (5)$$

$$\tau = T_{ab} - T \cdot k \quad (6)$$

По экспериментальным данным изменения температуры определена математическая модель объекта управления, которая представлена передаточной функцией последовательно соединенных инерционного звена третьего порядка и звена запаздывания с параметрами  $k = 1,73, T_1 = 138, T_2 = 6348, T_3 = 97336, \tau = 9$ .

Для системы регулирования выбираем пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) закон регулирования, так как он обеспечивает необходимую точность и качество переходного процесса.

Расчет ПИД-регулятора производим по методу Зиглера-Никольса, который позволяет осуществить простую и быструю настройку регулятора с последующей дополнительной подстройкой коэффициентов [10].

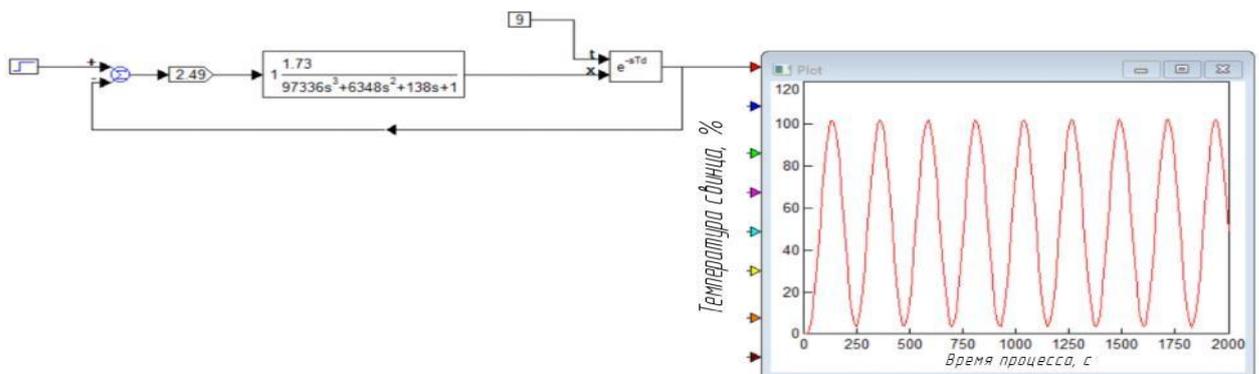


Рис. 2. Переходный процесс системы с коэффициентом пропорциональности

Путем подбора коэффициентов пропорциональности  $k_0$  в управляющем устройстве, при котором система находится на границе устойчивости, находим значение  $k_0 = 2,49$ ,  $T_r = 222$  (рисунок 2).

Рассчитаем коэффициенты ПИД-регулятора.

$$k_1 = 0,36 \cdot 2,49 = 1,494,$$

$$k_2 = 2/222 = 0,009,$$

$$k_3 = 222/8 = 27,75.$$

В программной среде VisSim осуществляем проверку коэффициентов ПИД-регулятора.

Производим ручную поднастройку регулятора, в ходе которой пропорциональная составляющая регулятора принимает значение 1,1.

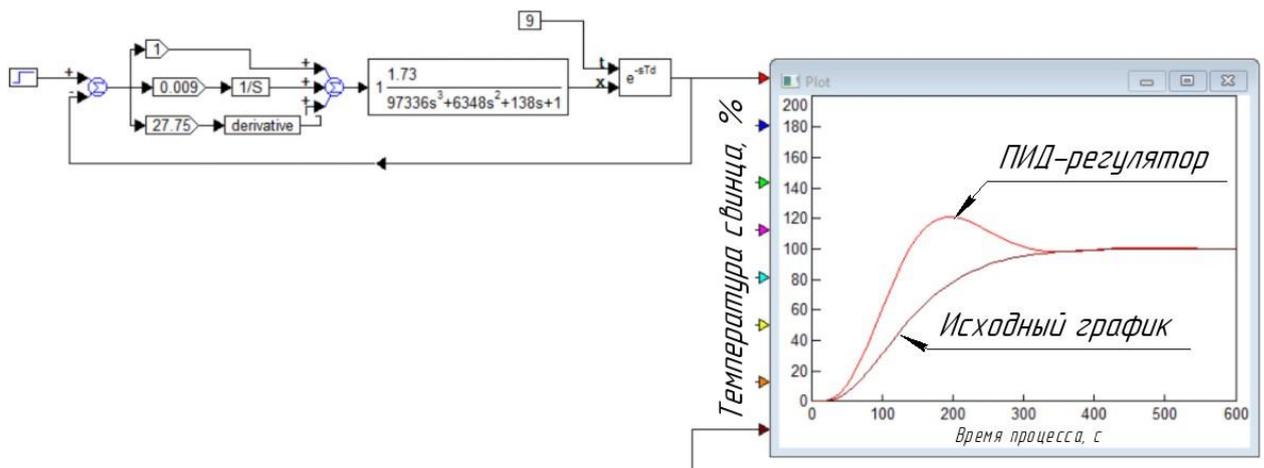


Рис. 3. Переходный процесс системы с ПИД-регулятором

Описанная выше система автоматического управления является устойчивой.

Однако требуется, чтобы установившееся состояние было близко к заданному, затухание переходного процесса – быстрым, а отклонения (колебания) – невелики [10].

Поэтому, после обеспечения устойчивости системы, исследуем качество процесса управления, показателями которого являются длительность переходного процесса (быстродействие системы), величина перерегулирования, степень затухания, длительность переходного процесса, колебательность.

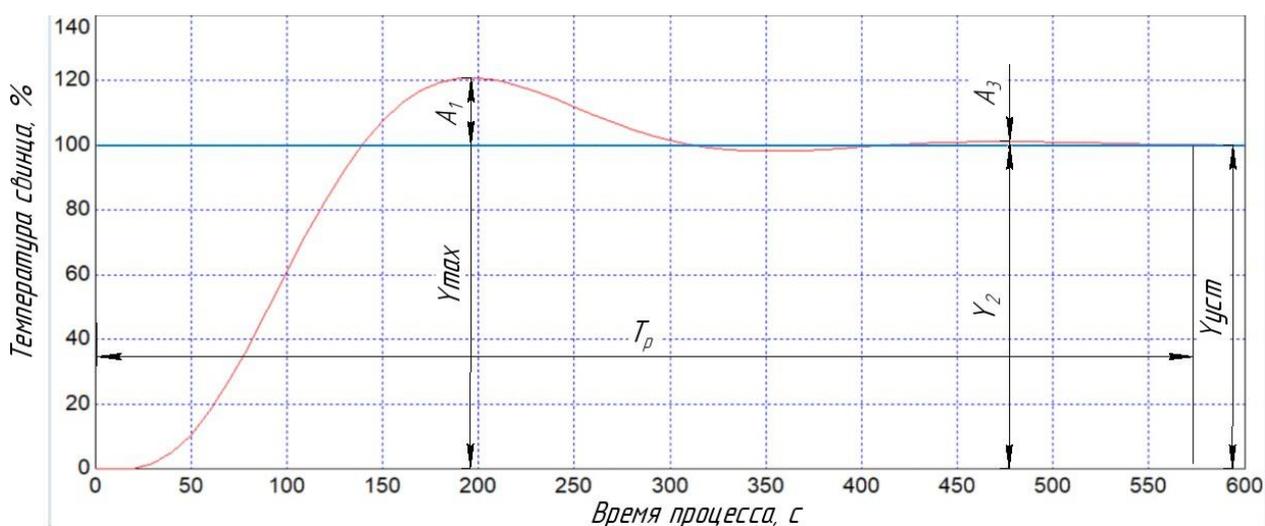


Рис. 4. Оценка качества управления переходного процесса

### Заключение

В статье разработана автоматизированная система управления технологическим процессом освинцования длинномерных рукавов. Получена математическая модель автоматизированной системы, состоящей из объекта управления – плавильной ванны свинца – и ПИД-регулятора. Определены свойства объекта управления ( $k = 1,73$ ,  $T1 = 138$ ,  $T2 = 6348$ ,  $T3 = 97336$ ,  $\tau = 9$ ) и оптимальные параметры настройки регулятора ( $kr = 1,1$ ;  $Tr = 222$ ). Анализ переходного процесса показал, что время регулирования переходного процесса составляет 580 секунд, перерегулирование – 20%, колебательность – 2.



## Литература

1. Stephen O. // University of Alabama in Huntsville, 2012. Vol. 89. pp. 11–20.
  2. Peter F. Stanbury Allan Whitaker Stephen J. Hall // Principles of Fermentation Technology (Third Edition), 2017. pp. 487-536. URL:sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080999531000089.
  3. Гришин Б.С. Материалы резиновой промышленности (информационно-аналитическая база данных). Казань: КГТУ, 2010. 506 с.
  4. Никишкина А.Б., Булычев В.В. Моделирование глубины упрочнения деталей из серого чугуна при обработке поверхностным пластическим деформированием // Инженерный вестник Дона, 2022, № 11. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/N1y2020/6235.
  5. Лебедева М.А., Идиятуллина Э.Ф., Чухлатый М.С., Набоков А.В. Строительство трубопроводов из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом // Инженерный вестник Дона, 2020, № 1. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7980.
  6. Минигалиев Т. Б. Технология резиновых изделий. Казань: КГТУ, 2009. 236 с.
  7. Кирпичникова В.А. Технология резиновых технических изделий. М.: Химия, 1991. 320 с.
  8. Люсова Р.Л., Буканов А.М., Кузин В.С., Овсянников Н.Я., Наумова Ю.А. Армирующие материалы, применяемые при производстве резиновых изделий. М.: МИТХТ имени М. В. Ломоносова, 2010. 47 с.
  9. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. М.: Энергоиздат, 1985. 296 с.
  10. Трофимов А.И., Егупов Н.Д., Дмитриев А.Н. Методы теории автоматического управления, ориентированные на ЭВМ. М.: Энергоатомиздат, 1997. 656 с.
-

## References

1. Stephen O. University of Alabama in Huntsville, 2012. Vol. 89. pp. 11-20.
  2. Peter F. Principles of Fermentation Technology (Third Edition), 2017. pp. 487-536. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080999531000089](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080999531000089).
  3. Grishin B.S. Materialy rezinovej promyshlennosti (informacionno-analiticheskaya baza dannyh) [Materials of the rubber industry (information and analytical database)]. Kazan': KGTU, 2010. 506 p.
  4. Nikishkina A.B., Bulychev V.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 11. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N1y2020/6235](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N1y2020/6235).
  5. Lebedeva M.A., Idiyatullina E.F., CHuhlatyj M.S., Nabokov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7980](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7980).
  6. Minigaliev T. B. Tekhnologiya rezinovyh izdelij [Technology of rubber products]. Kazan': KGTU, 2009. 236 p.
  7. Kirpichnikova V.A. Tekhnologiya rezinovyh tekhnicheskikh izdelij [Technology of rubber technical products]. M.: Himiya, 1991. 320 p.
  8. Lyusova R.L., Bukanov A.M., Kuzin V.S., Ovsyannikov N.YA., Naumova YU.A. Armiruyushchie materialy, primenyaemye pri proizvodstve rezinovyh izdelij [Reinforcing materials used in the manufacture of rubber products]. M.: MITHT imeni M. V. Lomonosova, 2010. 47 p.
  9. Rotach V.YA. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya teploenergeticheskimi processami [Theory of automatic control of thermal power processes]. M.: Energoizdat, 1985. 296 p.
  10. Trofimov A.I., Egupov N.D., Dmitriev A.N. Metody teorii avtomaticheskogo upravleniya, orientirovannye na EVM [Computer-oriented methods of the theory of automatic control]. M.: Energoatomizdat, 1997. 656 p.
-