

Разработка математической модели стадии нагрева резиновой смеси и синтез алгоритма управления нагревом с использованием принципа максимума Понтрягина

Владимир С. Кудряшов	¹	kudryashovvs@mail.ru
Михаил В. Алексеев	¹	mwa1976@mail.ru
Андрей А. Юдаков	²	yudakov07@yandex.ru

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

² ЗАО «Воронежский шинный завод», ул. Ростовская, 41, г. Воронеж, Россия

Реферат. Статья посвящена разработке алгоритма управления стадией нагрева резиновой смеси для ЗАО «Воронежский шинный завод». Алгоритм предназначен для реализации на базе контроллера Siemens S-300 для управления резиносмесителем РС-270. Для составления алгоритма проведен системный анализ процесса нагрева как объекта управления и разработана математическая модель стадии нагрева на основе уравнений тепловых балансов, описывающая процессы нагрева теплоносителя в теплообменнике и дальнейшего нагрева им смеси в резиносмесителе. Получены динамические характеристики по температуре теплообменного аппарата и резиносмесителя. В виду сложности и нелинейности объекта управления – резиносмесителя, а также наличия методов и большого опыта управления данным аппаратом в промышленных условиях, алгоритм реализован с использованием принципа максимума Понтрягина. Задача оптимизации сводится к определению оптимального управления (подача греющего пара) и оптимальной траектории выходной координаты объекта (температура смеси), обеспечивающих минимальный расход пара при нагреве резиновой смеси за ограниченное время. Для этого математическая модель стадии нагрева записана в матричном виде, сформированы матрицы коэффициентов для каждого состояния управления, векторы управления и возмущения, получена функция Гамильтона и для построения оптимального управления и траектории выхода объекта найдены временные точки переключения. Анализ результатов модельных экспериментов и практических исследований при программировании контроллера, показал снижение расхода греющего пара на 24,4% при проведении стадии нагрева резиновой смеси.

Ключевые слова: резиносмешение, математическая модель, алгоритм управления, управляющий контроллер, принцип максимума Понтрягина

Development of a mathematical model of the heating phase of rubber mixture and development of the synthesis of the heating control algorithm using the Pontryagin maximum principle

Vladimir S. Kudryashov	¹	kudryashovvs@mail.ru
Mikhail V. Alekseev	¹	mwa1976@mail.ru
Andrei A. Yudakov	²	yudakov07@yandex.ru

¹ Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

² JSC “Voronezh Tire Plant”, Rostovskaya str., 41, Voronezh, Russia

Summary. The article is devoted to the development of the algorithm of the heating phase control of a rubber compound for CJSC “Voronezh tyre plant”. The algorithm is designed for implementation on basis of controller Siemens S-300 to control the RS-270 mixer. To compile the algorithm a systematic analysis of the heating process has been performed as a control object, also the mathematical model of the heating phase has been developed on the basis of the heat balance equation, which describes the process of heating of a heat-transfer agent in the heat exchanger and further heating of the mixture in the mixer. The dynamic characteristics of temperature of the heat exchanger and the rubber mixer have been obtained. Taking into account the complexity and nonlinearity of the control object – a rubber mixer, as well as the availability of methods and great experience in managing this machine in an industrial environment, the algorithm has been implemented using the Pontryagin maximum principle. The optimization problem is reduced to determining the optimal control (heating steam supply) and the optimal path of the object’s output coordinates (the temperature of the mixture) which ensure the least flow of steam while heating a rubber compound in a limited time. To do this, the mathematical model of the heating phase has been written in matrix form. Coefficients matrices for each state of the control, control and disturbance vectors have been created, the Hamilton function has been obtained and time switching points have been found for constructing an optimal control and escape path of the object. Analysis of the model experiments and practical research results in the process of programming of the controller have showed a decrease in the heating steam consumption by 24.4% during the heating phase of the rubber compound.

Keywords: rubber mixing, mathematical model, control algorithm, main controller, Pontryagin maximum principle

Для цитирования

Кудряшов В.С., Алексеев М.В., Юдаков А.А. Разработка математической модели стадии нагрева резиновой смеси и синтез алгоритма управления нагревом с использованием принципа максимума Понтрягина // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 2. С. 80–87. doi:10.20914/2310-1202-2017-2-80-87

For citation

Kudryashov V.S., Alekseev M.V., Yudakov A.A. Development of a mathematical model of the heating phase of rubber mixture and development of the synthesis of the heating control algorithm using the Pontryagin maximum principle. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2017. vol. 79. no. 2. pp. 80–87. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2017-2-80-87

Введение

Приготовление и обработка резиновых смесей – важнейшая операция в шинном и резиновом производствах, от которой зависят пластоэластические и прочностные свойства, структура и однородность, а также технологичность смесей резиновых и резинокордных полуфабрикатов [1, 2]. На одном из участков в ЗАО «Воронежский шинный завод» используется резиносмеситель РС-270. Процесс приготовления резиновой смеси начинается с дозирования и загрузки сыпучих материалов из приемных бункеров в резиносмеситель. Заполнение производится системой шнековых питателей и весовых дозаторов. После происходит загрузка жидких ингредиентов, подогретых до необходимых температур. Часть операций производится в ручном режиме. Для отработки рецептов предусмотрен контроллер Siemens S-300 с дискретными и аналоговыми модулями расширения. Контроллер управляет дозированием компонентов, а также выгрузкой резиновой смеси по температуре и времени смешения.

Система управления нагревом резиновой смеси значительно устарела. С целью ее модернизации и повышения качества управления предлагается разработать математическое описание стадии нагрева и синтезировать алгоритм управления с использованием принципа максимума Понтрягина, который позволит снизить энергозатраты на нагрев резиновой смеси.

Результаты

Для стадии нагрева характерен интенсивный нагрев резиновой смеси в резиносмесителе до оптимальной температуры, путем подачи в него циркулирующего греющего теплоносителя (воды), который подается из теплообменного аппарата, а также за счет преобразования механической энергии (сил трения) в тепловую. Теплообменный аппарат обеспечивает нагрев теплоносителя путем подачи в него греющего пара высокой температуры. Греющий теплоноситель циркулирует в системе (вода после выхода из резиносмесителя через циркуляционный насос попадает обратно в теплообменник), поэтому при составлении математической модели первой стадии также необходимо учитывать и теплообменный аппарат как орган управления. Так как теплообменный аппарат и резиносмеситель по своей структуре довольно схожи – продукт взаимодействует с теплоносителем через разделяющую стенку, то математическое описание для них будем выполнять по одной структуре.

Особенностью модели будет являться то, что выход теплообменного аппарата будет являться входом для смесителя и наоборот, а также будет необходимо учесть выделение тепла в результате перехода механической энергии смесителя в тепловую (при работе смесительных роторов).

Основная часть

Разработано математическое описание стадии нагрева [3–5], представляющее собой уравнения тепловых балансов для малого интервала времени $\Delta\tau$ и описывающее процессы нагрева теплоносителя в теплообменнике и дальнейшего нагрева им смеси в резиносмесителе:

для конденсата

$$Gp \cdot I \cdot \Delta\tau = Gk \cdot Tk \cdot ck \cdot \Delta\tau + Stp \cdot \alpha ts \cdot (Tk - Ts) \cdot \Delta\tau + Mk \cdot ck \cdot \Delta Tk; \quad (1)$$

для воды, нагреваемой в теплообменнике

$$Gv \cdot Tvo \cdot cv \cdot \Delta\tau + S \cdot \alpha ps \cdot (Ts - Tv) \cdot \Delta\tau = Gv \cdot Tv \cdot cv \cdot \Delta\tau + Mv \cdot cv \cdot \Delta Tv; \quad (2)$$

для стенки между конденсатом и водой в теплообменнике

$$S \cdot \alpha ts \cdot (Tk - Ts) \cdot \Delta\tau = S \cdot \alpha ps \cdot (Ts - Tv) \cdot \Delta\tau + Ms \cdot cs \cdot \Delta Ts; \quad (3)$$

для воды, выходящей из резиносмесителя (после теплообмена)

$$Gv \cdot Tv \cdot cv \cdot \Delta\tau = Gv \cdot Tvo \cdot cv \cdot \Delta\tau + S2 \cdot \alpha 2ts \cdot (Tvo - T2s) \cdot \Delta\tau + Mvo \cdot cv \cdot \Delta Tvo; \quad (4)$$

для стенки между водой и резиновой смесью в резиносмесителе

$$S2 \cdot \alpha 2ts \cdot (Tv - T2s) \cdot \Delta\tau = S2 \cdot \alpha 2ps \cdot (T2s - Tvo) \cdot \Delta\tau + M2s \cdot cs \cdot \Delta T2s; \quad (5)$$

для резиновой смеси, нагреваемой в резиносмесителе

$$N \cdot Kp \cdot Msm + S2 \cdot \alpha 2ps \cdot (T2s - Tvo) \cdot \Delta\tau = Msm \cdot csm \cdot \Delta Tsm, \quad (6)$$

где Gp – массовый расход пара; Gv – массовый расход воды; I – энтальпия пара; Tk – температура конденсата на выходе теплообменника; Tv – температура воды на выходе теплообменника и входе резиносмесителя; Tvo – температура воды на выходе резиносмесителя и входе теплообменника; ck , cv , cs , csm – теплоемкости конденсата, воды, стенки и резиновой смеси; Mk , Mv , Mvo , Ms , $M2s$, Msm – массы конденсата в теплообменнике, воды в теплообменнике и резиносмесителе, стенки между конденсатом и водой в теплообменнике, стенки между водой и смесью в резиносмесителе,

а также смеси; T_s , T_{2s} – среднее значение температуры стенок между конденсатом и водой, среднее значение температуры стенок между водой и смесью; S_1 , S_2 – площади стенок в резиносмесителе и теплообменнике; ats , aps , a_{2ts} , a_{2ps} – коэффициенты теплоотдачи от конденсата к стенке, от стенки к воде, от воды к стенке и от стенки к резиновой смеси; N – мощность электродвигателя

рабочего органа смесителя; K_p – коэффициент полезного действия привода резиносмесителя; τ – время.

Запишем уравнения (1)–(6) в виде уравнений Коши. Для этого разделим левые и правые части уравнений на $\Delta\tau$, перенесем производную в левую часть уравнений, а все остальное – в правую, и получим систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{dT_k}{d\tau} &= \frac{G_p \cdot I}{M_k \cdot c_k} - \frac{G_k \cdot T_k \cdot c_k}{M_k \cdot c_k} - \frac{St_p \cdot ats \cdot (T_k - T_s)}{M_k \cdot c_k}; \\ \frac{dT_v}{d\tau} &= \frac{G_v \cdot T_{vo} \cdot c_v}{M_v \cdot c_v} + \frac{S \cdot \alpha_{ps} \cdot (T_s - T_v)}{M_v \cdot c_v} - \frac{G_v \cdot T_v \cdot c_v}{M_v \cdot c_v}; \\ \frac{dT_s}{d\tau} &= \frac{S \cdot ats \cdot (T_k - T_s)}{M_s \cdot c_s} - \frac{S \cdot \alpha_{ps} \cdot (T_s - T_v)}{M_s \cdot c_s}; \\ \frac{dT_{vo}}{d\tau} &= \frac{G_v \cdot T_v \cdot c_v}{M_{vo} \cdot c_v} - \frac{G_v \cdot T_{vo} \cdot c_v}{M_{vo} \cdot c_v} - \frac{S_2 \cdot \alpha_{2ts} \cdot (T_{vo} - T_{2s})}{M_{vo} \cdot c_v}; \\ \frac{dT_{2s}}{d\tau} &= \frac{S_2 \cdot \alpha_{2ts} \cdot (T_v - T_{2s})}{M_{2s} \cdot c_s} - \frac{S_2 \cdot \alpha_{2ps} \cdot (T_{2s} - T_{vo})}{M_{2s} \cdot c_s}; \\ \frac{dT_{sm}}{d\tau} &= \frac{N \cdot K_p \cdot M_{sm}}{M_{sm} \cdot c_{sm}} + \frac{S_2 \cdot \alpha_{2ps} \cdot (T_{2s} - T_{vo})}{M_{sm} \cdot c_{sm}}.\end{aligned}\quad (7)$$

Рассчитаем динамические характеристики стадии нагрева (рисунки 1, 2).

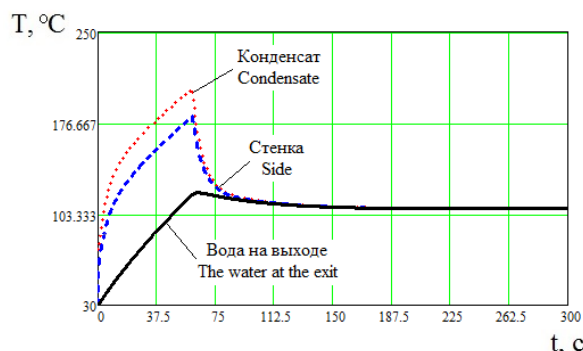


Рисунок 1. Динамические характеристики по температуре теплообменного аппарата

Figure 1. The dynamic characteristics of the temperature of heat exchanger

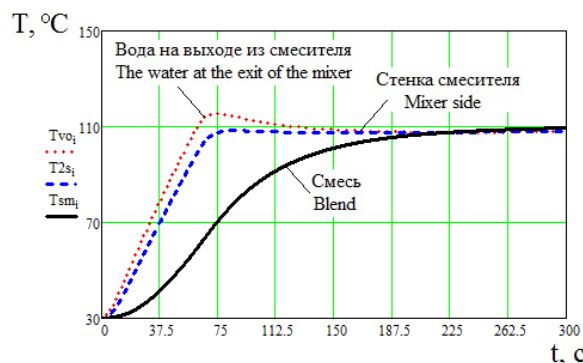


Рисунок 2. Динамические характеристики по температуре резиносмесителя

Figure 2. Dynamic characteristics by Rubber mixer temperature

Для синтеза алгоритма оптимального управления стадией нагрева воспользуемся принципом максимума Понтрягина. Задача оптимизации сводится к определению оптимального управления (подача греющего пара) и оптимальной траектории выходной координаты объекта (температура смеси), обеспечивающих минимальный расход пара при нагреве резиновой смеси за ограниченное время (при ограничении на управляющее воздействие).

Приведем уравнения системы (7) к матричной форме:

$$\frac{dX}{dt} = A \cdot X + B \cdot U + C \cdot Z, \quad (8)$$

где X , U , Z – векторы переменных состояния, управления и возмущения; A , B , C – матрицы коэффициентов.

В качестве управления выступит расход пара G_p , а выделение тепла $N \cdot K_p$ (в результате перевода механической энергии в тепловую) станет возмущением.

В уравнениях вектор переменных состояния имеет вид $\{T_k \ T_v \ T_{vo} \ T_{2s} \ T_{sm}\}^T$; вектор управления – $\{G_p \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\}^T$; вектор возмущений – $\{N \cdot K_p \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\}^T$. Так как заведомо предполагая, что расход поступающего греющего пара G_p равен расходу конденсата, выходящего из теплообменного аппарата, то можно заметить, что система уравнений нелинейна. Но если организовать управление подачей греющего пара в двух состояниях: греющий пар подается в максимальном расходе или не подается совсем, то система уравнений (7) в каждом

из состояний управления перестает быть нелинейной. В результате мы получаем две системы линейных уравнений.

В соответствии с векторами переменных состояний запишем матрицы коэффициентов для каждого состояния управления:

$$A1 := \begin{bmatrix} \frac{S1 \cdot D + Gk \cdot ck}{Mk \cdot ck} & \frac{S1 \cdot D}{Mk \cdot ck} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{S1 \cdot D}{Mv \cdot cv} & \frac{S1 \cdot D + Gv \cdot cv}{Mv \cdot cv} & \frac{Gv \cdot cv}{Mv \cdot cv} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Gv \cdot cv}{Mv2 \cdot cv} & \frac{S2 \cdot \alpha2ts + Gv \cdot cv}{Mv2 \cdot cv} & \frac{S2 \cdot \alpha2ts}{Mv2 \cdot cv} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{S2 \cdot \alpha2ts}{Ms \cdot cs} & \frac{S2 \cdot (\alpha2ts + \alpha2ps)}{Ms \cdot cs} & \frac{S2 \cdot \alpha2ps}{Ms \cdot cs} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{S2 \cdot \alpha2ps}{Msm \cdot csm} & \frac{S2 \cdot \alpha2ps}{Msm \cdot csm} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$A2 := \begin{bmatrix} \frac{S1 \cdot \alpha ts}{Mk \cdot ck} & \frac{S1 \cdot \alpha ts}{Mk \cdot ck} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{S1 \cdot \alpha ps}{Mv \cdot cv} & \frac{S1 \cdot \alpha ps + Gv \cdot cv}{Mv \cdot cv} & \frac{Gv \cdot cv}{Mv \cdot cv} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Gv \cdot cv}{Mv2 \cdot cv} & \frac{S2 \cdot \alpha2ts + Gv \cdot cv}{Mv2 \cdot cv} & \frac{S2 \cdot \alpha2ts}{Mv2 \cdot cv} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{S2 \cdot \alpha2ts}{Ms \cdot cs} & \frac{S2 \cdot (\alpha2ts + \alpha2ps)}{Ms \cdot cs} & \frac{S2 \cdot \alpha2ps}{Ms \cdot cs} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{S2 \cdot \alpha2ps}{Msm \cdot csm} & \frac{S2 \cdot \alpha2ps}{Msm \cdot csm} \end{bmatrix}.$$

Также запишем векторы управления и возмущения:

$$B := \begin{pmatrix} \frac{Ipar}{Mk \cdot ck} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{N \cdot Kp}{cs} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Чтобы получить математическое описание в виде зависимости выхода объекта Tsm от управления Gp и возмущения $N \cdot Kp$ или в виде соответствующих передаточных функций, можно исключить из уравнений (7) промежуточные переменные Tk , Tv , Tvo , $T2s$ и получить одно уравнение пятого порядка для Tsm . Это проще всего выполнить, переходя к преобразованиям Лапласа:

$$X(s, u, z) = (E \cdot s - A1)^{-1} \cdot B \cdot u + (E \cdot s - A2)^{-1} \cdot C \cdot z, \quad (11)$$

где E – единичная матрица; s – комплексная переменная Лапласа.

Так как уравнение записано для приращений, все начальные значения переменных равны нулю, что удовлетворяет требованиям для передаточной функций [7–9].

Из уравнения (11) достаточно найти вектор $X(s)$, используя операции с матрицами в системе Mathcad. После нахождения передаточных функций для выхода объекта, находим корни характеристических уравнений для двух состояний управления:

$$\lambda1 := \begin{pmatrix} -3.3092024252193001718 \\ -50525582941656373523 \\ -19599241914230279279 \\ -24858249769714896775e-1 \\ -20955764521184033564e-2 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$\lambda2 := \begin{pmatrix} 0 \\ -3.3092023859043633231 \\ -50357336558886473926 \\ -16758754463218023878 \\ -23707838501281881098e-1 \end{pmatrix}.$$

Функция Гамильтона для данной системы будет выглядеть как:

$$\begin{aligned}
H = \Psi 1 \cdot \left[\frac{Gp \cdot I}{Mk \cdot ck} - \frac{Gk \cdot ck + Stp \cdot ats}{Mk \cdot ck} \cdot Tk \right] + \Psi 2 \cdot \left[\frac{Gv \cdot cv}{Mv \cdot cv} \cdot Tvo - \frac{Gv \cdot cv + S \cdot \alpha ps}{Mv \cdot cv} \cdot Tv \right] + \\
\Psi 3 \cdot \left[\frac{Gv \cdot cv}{Mvo \cdot cv} \cdot Tv - \frac{Gv \cdot cv + S2 \cdot \alpha 2ts}{Mvo \cdot cv} \cdot Tvo + \frac{S2 \cdot \alpha 2ts}{Mvo \cdot cv} \cdot T2s \right] + \\
\Psi 4 \cdot \left[\frac{S2 \cdot \alpha 2ts}{M2s \cdot cs} \cdot Tv - \frac{S2 \cdot \alpha 2ts}{M2s \cdot cs} \cdot T2s - \frac{S2 \cdot \alpha 2ps \cdot (T2s - Tvo)}{M2s \cdot cs} \right] + \Psi 5 \cdot \left[\frac{N \cdot Kp \cdot Msm}{Msm \cdot csm} + \frac{S2 \cdot \alpha 2ps \cdot (T2s - Tvo)}{Msm \cdot csm} \right].
\end{aligned} \quad (13)$$

В соответствии с принципом максимума Понтрягина оптимальное управление должно обеспечивать максимум функции Гамильтона в каждый момент времени в явном виде, т. е.

$$u = \begin{cases} a, & \text{если } \psi 1 \cdot Kim > 0 \\ b, & \text{если } \psi 1 \cdot Kim < 0 \end{cases} \quad (14)$$

Поскольку все корни характеристического уравнения для стадии подачи греющего пара действительные и разные, решение его при постоянном управляющем воздействии uc можно записать как:

$$\begin{aligned}
y(t, C, uc) = C_1 \cdot e^{s1 \cdot t} + C_2 \cdot e^{s2 \cdot t} + \\
+ C_3 \cdot e^{s3 \cdot t} + C_4 \cdot e^{s4 \cdot t} + C_5 \cdot e^{s5 \cdot t} + \\
+ Ko \cdot uc + Q.
\end{aligned} \quad (15)$$

Для построения управления и траектории необходимо найти четыре временных точки переключения, значения пяти постоянных интегрирования C для пяти интервалов постоянства управления. Итого, необходимо найти двадцать девять неизвестных величин, составив и решив систему из двадцати девяти нелинейных алгебраических уравнений. Эту задачу можно решить только численным методом,

Первая и последующие производные при постоянном входном воздействии равны:

$$\begin{aligned}
dy(t, C, n) = C_1 \cdot s1^n \cdot e^{s1 \cdot t} + \\
+ C_2 \cdot s2^n \cdot e^{s2 \cdot t} + C_3 \cdot s3^n \cdot e^{s3 \cdot t} + \\
+ C_4 \cdot s4^n \cdot e^{s4 \cdot t} + C_5 \cdot s5^n \cdot e^{s5 \cdot t}.
\end{aligned} \quad (16)$$

Решение для стадии без подачи греющего пара будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
y(t, C, uc) = C_1 + C_2 \cdot e^{s22 \cdot t} + \\
+ C_3 \cdot e^{s33 \cdot t} + C_4 \cdot e^{s44 \cdot t} + \\
+ C_5 \cdot e^{s55 \cdot t} + Q.
\end{aligned} \quad (17)$$

Первая и последующие производные при постоянном входном воздействии для стадии без подачи пара равны:

$$dy(t, C, n) = \begin{cases} C_2 \cdot s22^n \cdot e^{s22 \cdot t} + C_3 \cdot s33^n \cdot e^{s33 \cdot t} + C_4 \cdot s44^n \cdot e^{s44 \cdot t} + C_5 \cdot s55^n \cdot e^{s55 \cdot t} + Q, & \text{если } n = 1; \\ C_2 \cdot s22^n \cdot e^{s22 \cdot t} + C_3 \cdot s33^n \cdot e^{s33 \cdot t} + C_4 \cdot s44^n \cdot e^{s44 \cdot t} + C_5 \cdot s55^n \cdot e^{s55 \cdot t}, & \text{если } n > 1. \end{cases} \quad (18)$$

задав достаточно близко начальное приближение неизвестным величинам. Чтобы это выполнить, приближенные значения будем задавать и уточнять последовательно (по участкам).

Примем в начальный момент управление положительным и равным a . Рассчитаем выход объекта при управлении $u=uc$ для первого участка постоянства управления (рисунок 3).

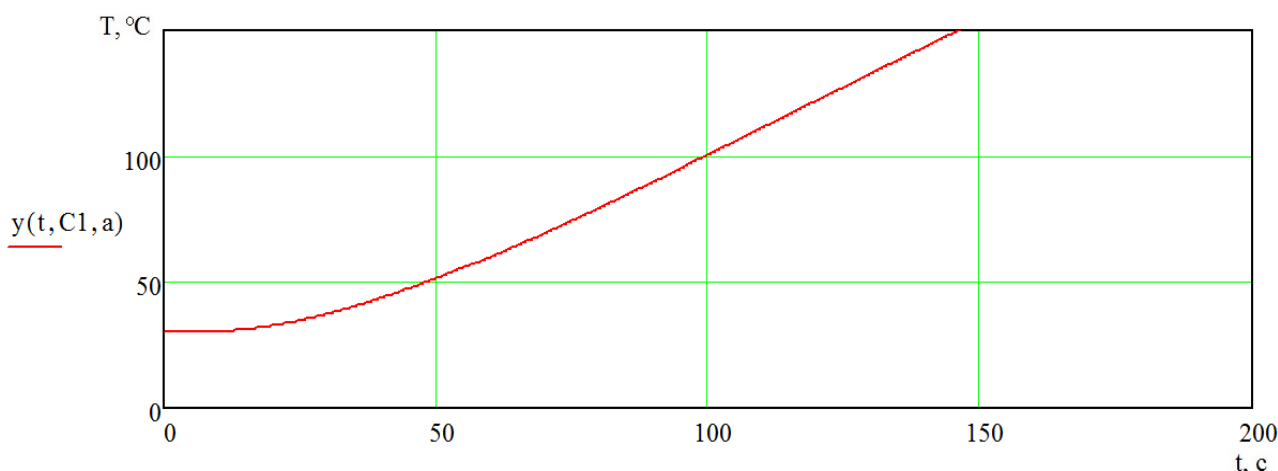


Рисунок 3. Выход объекта управления для первого участка

Figure 3. The output of the control object for the first section

Задавая последовательно точки переключения в пределах положительных значений y , определим начальные приближения констант интегрирования по участкам постоянства управления. Для второго участка в качестве начального приближения для констант интегрирования $C2$ возьмем $C1$, рассчитанные для первого участка.

Выражение для выхода объекта при управлении $u=0$ для второго участка будет иметь вид (рисунок 4):

$$Y1(t, t1) = \begin{cases} y(t, C1, a), & \text{если } t \leq t1 \\ y1(t - t1, C2, b), & \text{если } t > t1 \end{cases} \quad (19)$$

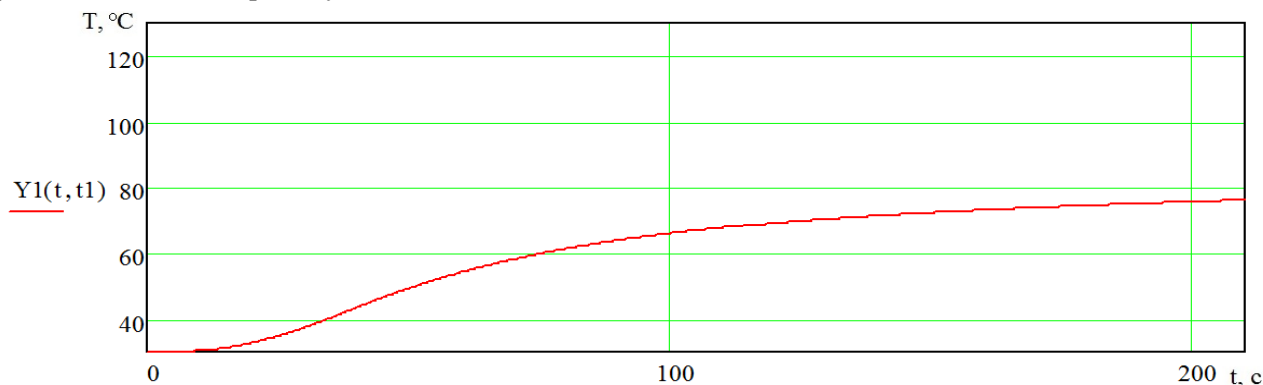


Рисунок 4. Выход объекта управления для второго участка
Figure 4. The output of the control object for the second section

Для третьего участка принимаем вектор констант $C3=C2$. Точку переключения также задаем приближенно по графику: $t2=80$.

Выражение для выхода объекта при управлении $u=us$ для третьего участка будет иметь вид (рисунок 5):

$$Y2(t, t1, t2) = \begin{cases} Y1(t, t1), & \text{если } t \leq t2 \\ y(t - t2, C3, a), & \text{если } t > t2 \end{cases} \quad (20)$$

Для четвертого участка принимаем вектор констант $C4=C3$. Точку переключения также задаем приближенно по графику: $t3=85$.

Выражение для выхода объекта при управлении $u=0$ для четвертого участка будет иметь вид (рисунок 6):

$$Y3(t, t1, t2, t3) = \begin{cases} Y2(t, t1, t2), & \text{если } t \leq t3 \\ y1(t - t3, C4, b), & \text{если } t > t3 \end{cases} \quad (21)$$

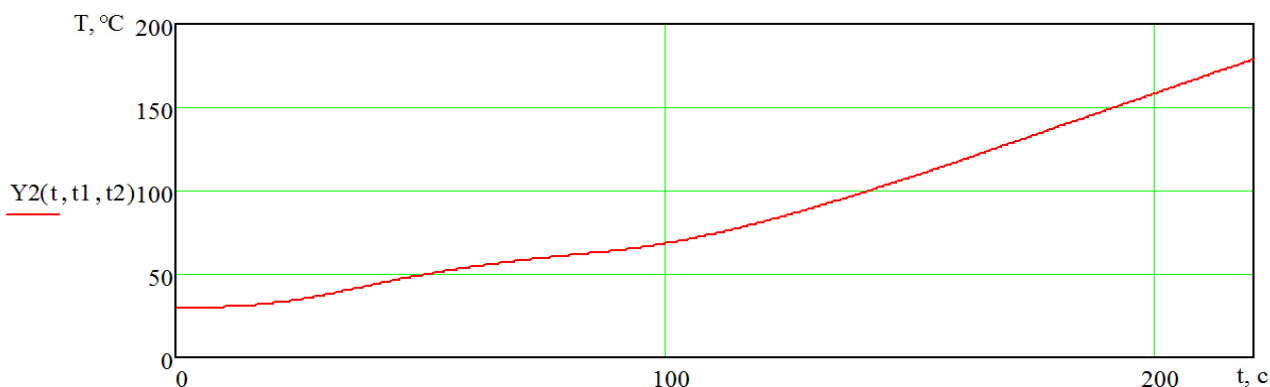


Рисунок 5. Выход объекта управления для третьего участка
Figure 5. The output of the control object for the third section

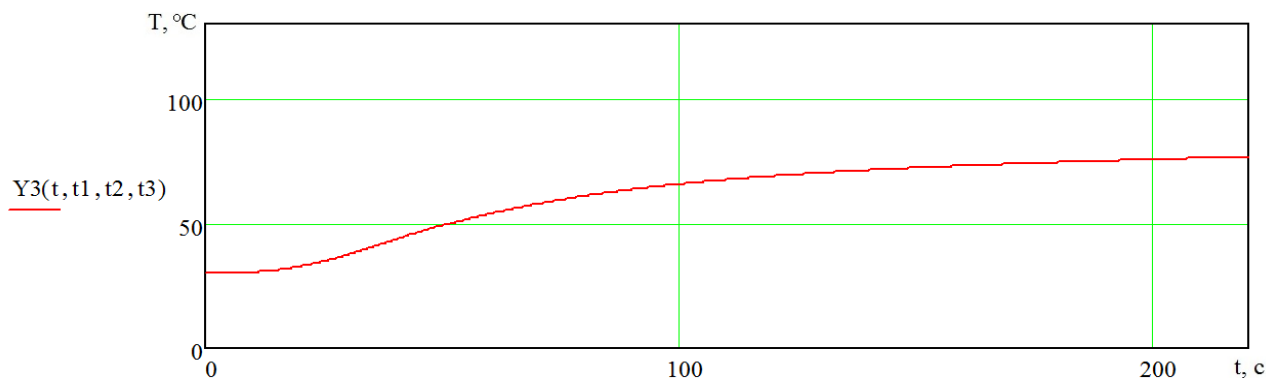


Рисунок 6. Выход объекта управления для четвертого участка
Figure 6. The output of the control object for the fourth section

Для пятого участка вновь принимаем вектор констант $C5=C4$. Точку переключения также задаем приближенно по графику: $t4=100$.

Выражение для выхода объекта при управлении $u=uc$ для пятого участка будет иметь вид (рисунок 7):

$$Y4(t, t1, t2, t3, t4) = \begin{cases} Y3(t, t1, t2, t3), & \text{если } t \leq t4 \\ y(t - t4, C5, a), & \text{если } t > t4 \end{cases} \quad (22)$$

После этого уточняем окончательно все точки переключения, конечную точку (согласно техническому регламенту $tk=130$), константы для всех участков (исключая первый) и рассчитываем оптимальное управление и траекторию выхода объекта.

Описания координаты y и функций управления u (рисунки 8, 9):

$$Y(t) = \begin{cases} y(t, C1, a), & \text{если } t \leq t1; \\ y1(t - t1, C2, b), & \text{если } t \leq t2 \wedge t > t1; \\ y(t - t2, C3, a), & \text{если } t \leq t3 \wedge t > t2; \\ y1(t - t3, C4, b), & \text{если } t \leq t4 \wedge t > t3; \\ y(t - t4, C5, a), & \text{если } t > t4; \end{cases} \quad (23)$$

$$UU(t) = \begin{cases} a, & \text{если } t \leq t1; \\ b, & \text{если } t \leq t2 \wedge t > t1; \\ a, & \text{если } t \leq t3 \wedge t > t2; \\ b, & \text{если } t \leq t4 \wedge t > t3; \\ a, & \text{если } t > t4. \end{cases} \quad (24)$$

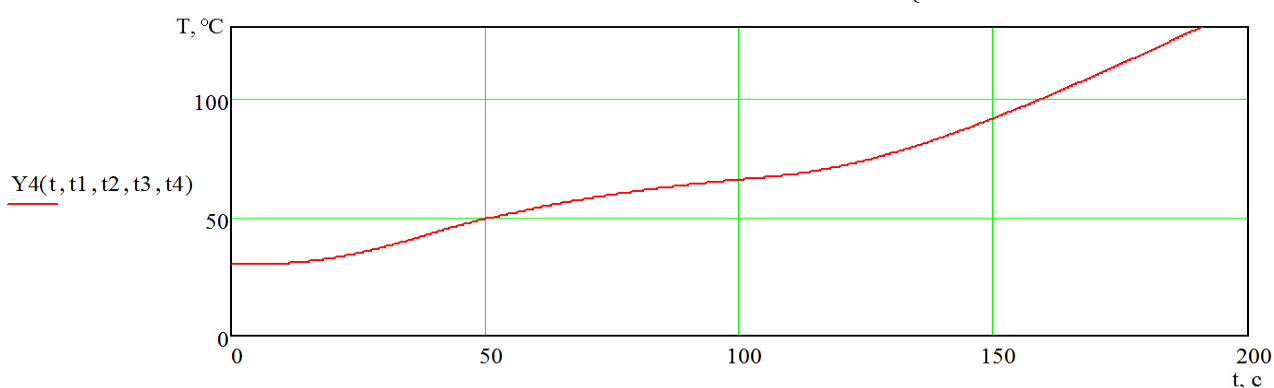


Рисунок 7. Выход объекта управления для пятого участка

Figure 7. The output of the control object for the fifth section

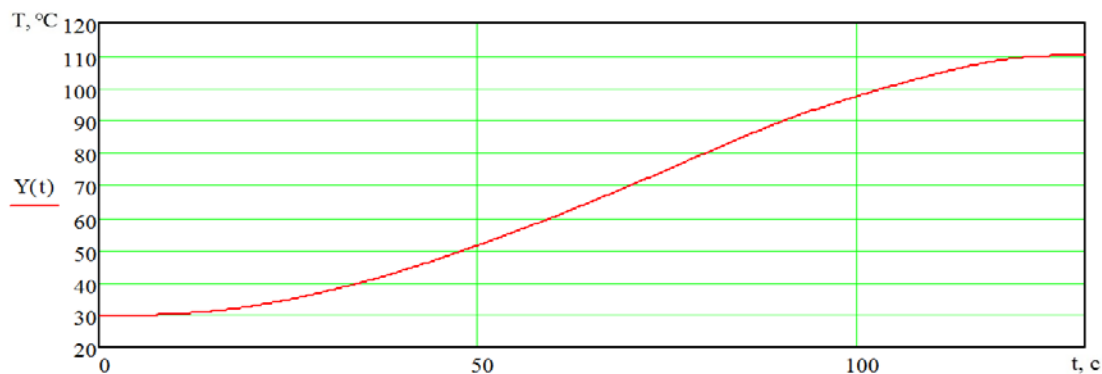


Рисунок 8. Оптимальная траектория выхода объекта управления (температура смеси)

Figure 8. The optimal path of the control object's output (temperature of the compound)

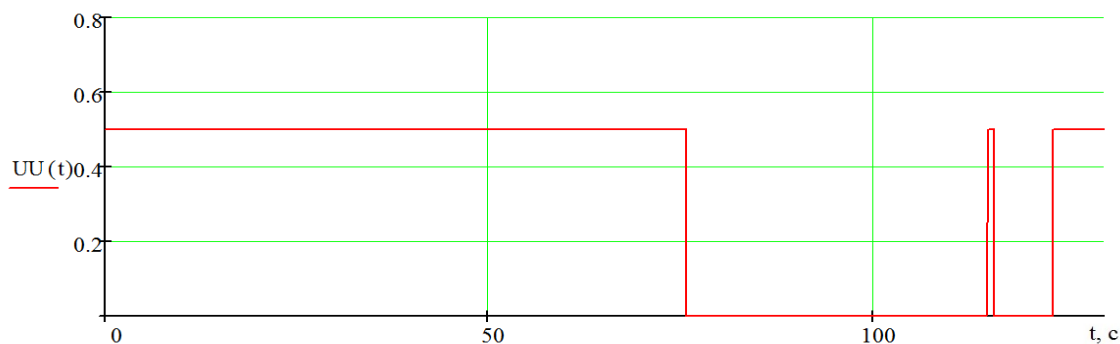


Рисунок 9. Оптимальное управление объектом (подача греющего пара)

Figure 9. Optimal control of the object (supply of the heating steam)

Сравнивая результаты (при постоянной подаче греющего пара в теплообменный аппарат и при реализации оптимального управления), установлено, что время необходимое для разогрева резиновой смеси до 110 °С при постоянной подаче пара составляет 110 с (с общим количеством поданного пара 55 кг), а при оптимальном управлении – 130 с (с общим количеством поданного пара 41,5 кг). Таким образом, экономия греющего пара составила 24,4%.

Выводы и рекомендации

Анализ результатов моделирования и проведения испытаний на предприятии при

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Резниченко С.В., Морозов Ю.Л. Большой справочник резинщика. Том 1. Каучуки и ингредиенты. М.: Техинформ, 2012. 744 с.
- 2 Резниченко С.В., Морозов Ю.Л. Большой справочник резинщика. Том 2. Резины и резинотехнические изделия. М.: Техинформ, 2012. 648 с.
- 3 Красных В.Ю., Королев В.Н. Тепломассообмен. Основные формулы, задачи и способы их решения. Екатеринбург: УрФУ, 2012. 64 с.
- 4 Алексеев М.В., Юдаков А.А. Разработка математического описания и алгоритмов управления процессом резиносмешения // Сборник трудов XXVIII международной научной конференции ММТТ 28. 2015. С. 34–37.
- 5 Кудряшов В.С., Алексеев М.В., Юдаков А.А., Попов А.П., Чертов Е.Д. Разработка математической модели процесса резиносмешения и синтез корректирующего алгоритма управления температурным режимом процесса с использованием искусственной нейронной сети // Вестник ВГУИТ. 2016. № 2. С. 52–59.
- 6 Программирование с помощью STEP 7 V5.3: Руководство. Siemens AG, 2004. 602 с.
- 7 Cândido J. J., Justino P. A. Modelling, control and pontryagin maximum principle for a two-body wave energy device // Renewable Energy. 2011. T. 36. № 5. С. 1545–1557.
- 8 Laschov D., Margaliot M. A maximum principle for single-input Boolean control networks // IEEE Transactions on Automatic Control. 2011. T. 56. № 4. С. 913–917.
- 9 Kim N., Cha S., Peng H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2011. T. 19. № 5. С. 1279–1287.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир С. Кудряшов д.т.н., профессор, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kudryashovvs@mail.ru
Михаил В. Алексеев к.т.н., доцент, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, mwa1976@mail.ru
Андрей А. Юдаков инженер, ЗАО “Воронежский шинный завод”, ул. Ростовская, 41, г. Воронеж, Россия, yudakov07@yandex.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в одинаковой степени принимали участие в подготовке материала для рукописи.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 02.02.2017

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 12.04.2017

программировании управляющего контроллера Siemens S-300 [6], показал эффективность синтезированного алгоритма управления стадией нагрева.

Данные исследования позволили получить уникальный алгоритм управления и снизить расход греющего пара при разогреве резиновой смеси.

Синтезированный алгоритм можно использовать для настройки контроллера в системе управления стадией нагрева в резиномесителе РС-270.

REFERENCES

- 1 Reznichenko S.V., Morozov Yu.L., ingredients Bol'shoi spravochnik rezinshchika. Tom 1. Kauchuki i ingredient [A large directory of reinsta. Volume 1. Rubber and ingredient]. Moscow. Tekhinform 2012. 744 p. (in Russian).
- 2 Reznichenko S.V., Morozov Yu.L. Bol'shoi spravochnik rezinshchika. Tom 2. Reziny i rezinotekhnicheskie izdeliya [A large directory of reinsta. Volume 2. Rubber and rubber products]. Moscow: Tekhinform 2012. 648 p. (in Russian).
- 3 Krasnykh V.Yu., Korolev V.N. Teplomassоobmen. Osnovnye formuly, zadachi i sposoby ikh resheniya [Heat and mass transfer. Basic formulas, tasks and ways of their solution]. Ekaterinburg. UrFU 2012. 64 p. (in Russian).
- 4 Alekseev M.V., Yudakov A.A. The development of the mathematical description and control algorithms of the rubber mixing process. Proceedings of the XXVIII International Scientific Conference MMTT 28. Ryazan, 2015. pp. 34–37. (in Russian).
- 5 Kudryashov V.S., Alekseev M.V., Yudakov A.A., Popov A.P., Chertov E.D. Development of rubber mixing process mathematical model and synthesis of control correction algorithm by process temperature mode using an artificial neural network. Vestnik VGUIT [Proceeding of VSUET]. 2016. no. 2 pp. 52–59. (in Russian).
- 6 Programming with STEP 7 V5.3: Guide. Siemens AG, 2004. 602 p. (in Russian).
- 7 Cândido J. J., Justino P. A. Modelling, control and pontryagin maximum principle for a two-body wave energy device. Renewable Energy. 2011. vol. 36. no. 5. pp. 1545–1557.
- 8 Laschov D., Margaliot M. A maximum principle for single-input Boolean control networks. IEEE Transactions on Automatic Control. 2011. vol. 56. no. 4. pp. 913–917.
- 9 Kim N., Cha S., Peng H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2011. vol. 19. no. 5. pp. 1279–1287.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Vladimir S. Kudryashov doctor of technical sciences, professor, information and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kudryashovvs@mail.ru
Mikhail V. Alekseev candidate of technical sciences, engineer, information and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, mwa1976@mail.ru
Andrei A. Yudakov engineer, JSC “Voronezh Tire Plant”, Rostovskaya str., 41, Voronezh, Russia, yudakov07@yandex.ru

CONTRIBUTION

All authors equally participated in the preparation of material for manuscript.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 2.2.2017

ACCEPTED 4.12.2017