

Разработка математической модели процесса резиносмешения и синтез корректирующего алгоритма управления температурным режимом процесса с использованием искусственной нейронной сети

Владимир С. Кудряшов,	¹	kudryashovvs@mail.ru
Михаил В. Алексеев,	¹	mwa1976@mail.ru
Андрей А. Юдаков,	¹	yudakov07@yandex.ru
Алексей П. Попов,	¹	aleksej_p_91@mail.ru
Евгений Д. Чертов	²	

¹ кафедра информационных и управляющих систем, Воронеж. гос. ун-т инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, Россия

² кафедра технической механики, Воронеж. гос. ун-т инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, Россия

Реферат. Статья посвящена разработке корректирующего алгоритма управления температурным режимом периодического процесса резиносмешения для ЗАО «Воронежский шинный завод». Алгоритм предназначен для реализации в главном контроллере участка резиносмешения Siemens S7 CPU319F-3 PN/DP, который формирует задания по температуре локальным контроллерам HESCH HE086 и Jumo dTRON304, управляющим темперирующими станциями. Для составления алгоритма проведён системный анализ процесса резиносмешения как объекта управления и разработана математическая модель процесса на основе уравнений тепловых балансов, описывающая процессы теплопередачи через стенки технологических аппаратов, изменение температуры теплоносителя, а также температуры смешения резиновой смеси до момента выгрузки из камеры резиносмесителя. Ввиду сложности и нелинейности объекта управления – резиносмесителя, а также наличия методов и большого опыта управления данным аппаратом в промышленных условиях, корректирующий алгоритм реализован на базе искусственной однослойной нейронной сети и обеспечивает корректировку заданий для локальных контроллеров по температуре охлаждающей воды и температуре воздуха в цехе, которые могут значительно меняться в зависимости от времени года, а также при длительной работе оборудования или его простое. Управление темперирующими станциями осуществляется изменением подачи холодной воды из охладителя и включением/выключением нагревательных элементов. Анализ результатов модельных экспериментов и практических исследований при программировании главного контроллера в среде STEP 7 на предприятии, показал снижение времени смешения для различных типов резин за счёт уменьшения погрешности управления теплообменными процессами.

Ключевые слова: резиносмешение, математическая модель, системный анализ, управляющий контроллер, цифровой регулятор, нейронная сеть

Development of rubber mixing process mathematical model and synthesis of control correction algorithm by process temperature mode using an artificial neural network

Vladimir S. Kudryashov,	¹	kudryashovvs@mail.ru
Michail V. Alekseev,	¹	mwa1976@mail.ru
Andrei A. Yudakov,	¹	yudakov07@yandex.ru
Aleksej P. Popov,	¹	aleksej_p_91@mail.ru
Evgenij D. Chertov	²	

¹ information and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, Russia

² technical mechanics department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, Russia

Summary. The article is devoted to the development of a correction control algorithm by temperature mode of a periodic rubber mixing process for JSC "Voronezh tire plant". The algorithm is designed to perform in the main controller a section of rubber mixing Siemens S7 CPU319F-3 PN/DP, which forms tasks for the local temperature controllers HESCH HE086 and Jumo dTRON304, operating by tempering stations. To compile the algorithm was performed a systematic analysis of rubber mixing process as an object of control and was developed a mathematical model of the process based on the heat balance equations describing the processes of heat transfer through the walls of technological devices, the change of coolant temperature and the temperature of the rubber compound mixing until discharge from the mixer chamber. Due to the complexity and nonlinearity of the control object – Rubber mixers and the availability of methods and a wide experience of this device control in an industrial environment, a correction algorithm is implemented on the basis of an artificial single-layer neural network and it provides the correction of tasks for local controllers on the cooling water

Для цитирования

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. doi:10.20914/2310-1202-2016-2-52-59

For citation

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 VSUET* [Proceedings of VSUET]. 2016.no. 2 pp. 52–59. (in Russ.). doi:10.20914/2310-1202-2016-2-52-59

temperature and air temperature in the workshop, which may vary considerably depending on the time of the year, and during prolonged operation of the equipment or its downtime. Tempering stations control is carried out by changing the flow of cold water from the cooler and on/off control of the heating elements. The analysis of the model experiments results and practical research at the main controller programming in the STEP 7 environment at the enterprise showed a decrease in the mixing time for different types of rubbers by reducing of heat transfer process control error.

Keywords: rubber mixing, mathematical model, system analysis, a main controller, a digital controller, a neural network

Введение и постановка задачи

Одним из основных этапов в производстве автомобильных шин является процесс резиносмешения, который заключается в получении резиновой смеси механическим смешением различных ингредиентов с каучуком [1, 2]. Важность проведения этого этапа обусловлена его влиянием на показатели качества готового продукта и энергетические затраты.

Процесс приготовления резиновой смеси начинается с дозирования и загрузки сыпучих материалов из приёмных бункеров в резиносмеситель. Заполнение производится системой шнековых питателей и весовых дозаторов. Затем происходит загрузка жидких ингредиентов, подогретых до необходимых температур.

Резиносмеситель представляет собой рабочую смесительную камеру с вращающимися внутри навстречу друг другу роторами, приводимыми в движение электродвигателем. Процесс резиносмешения требует по мере поступления ингредиентов поддержания температуры в необходимом интервале. Для поддержания температуры циркулирующего теплоносителя используются темперирующие станции. Для каждого узла резиносмесителя используется своя темперирующая станция. Каждая станция состоит из насоса, производящего движение теплоносителя, и теплообменного аппарата для регулирования температуры путём изменения отбора горячей воды (используются нагревательные элементы) и притока холодной воды (из охладителя) в циркулирующий теплоноситель.

На участке резиносмешения на ЗАО «Воронежский шинный завод» темперирующие станции оснащены локальными контроллерами HESCH HE086 и Jumo dTRON304, реализующими ПИД – закон регулирования с логическим переключением исполнительных устройств. Задание на температуру поступает от главного контроллера Siemens S7 CPU319F-3 PN/DP. Контроллеры темперирующих станций опрашивают датчики температуры на выходах станций и в зависимости от заданий открывают/закрывают клапаны на линиях подачи охлаждающей воды в теплообменные аппараты или включают/выключают нагревательные элементы.

Задание по температуре формируется по рецепту приготовления резиновой смеси и не может меняться во время его отработки. Количество рецептов весьма велико и каждый содержит множество параметров. При этом не учитывается изменение температуры охлаждающей воды и температуры в цехе, тип резин и время смешения, что приводит к ухудшению качества процесса резиносмешения.

Исходя из вышесказанного, главная цель научного исследования – разработка алгоритма управления температурным режимом процесса резиносмешения, в котором будут учитываться особенности рецептуры смеси и изменяющиеся условия проведения процесса, что в свою очередь, требует составления математического описания процесса для апробации алгоритма.

Результаты

Разработано математическое описание процесса резиносмешения [3, 4], представляющее собой уравнения тепловых балансов для малого интервала времени $\Delta\tau$ и описывающее изменение температуры в процессе смешения резиновой смеси до момента выгрузки из камеры смешения:

для воды охлаждения

$$G_{voh} \cdot T_{vh} \cdot \Delta\tau = G_{voh} \cdot T_{voh} \cdot cv \cdot \Delta\tau + \\ + S \cdot \alpha_{ts} \cdot (T_{voh} - T_s) \cdot \Delta\tau + \\ + M_{voh} \cdot cv \cdot \Delta T_{voh};$$

для воды, выходящей из темперирующей станции

$$G_v \cdot T_{vo} \cdot cv \cdot \Delta\tau + S \cdot \alpha_{ps} \cdot (T_s - T_v) \cdot \Delta\tau + \\ + S_n \cdot \alpha_{ps} \cdot (T_n - T_v) \cdot \Delta\tau = \\ = G_v \cdot T_v \cdot cv \cdot \Delta\tau + M_v \cdot cv \cdot \Delta T_v;$$

для стенки между водой охлаждения и циркулирующей водой в охлаждающем теплообменнике темперирующей станции

$$S \cdot \alpha_{ts} \cdot (T_{voh} - T_s) \cdot \Delta\tau = \\ = S \cdot \alpha_{ps} \cdot (T_s - T_v) \cdot \Delta\tau + M_s \cdot cs \cdot \Delta T_s;$$

для воды, выходящей из резиносмесителя после теплообмена

$$G_v \cdot T_v \cdot cv \cdot \Delta\tau = G_v \cdot T_{vo} \cdot cv \cdot \Delta\tau + \\ + S_2 \cdot \alpha_{2ts} \cdot (T_{vo} - T_{2s}) \cdot \Delta\tau + \\ + M_{vo} \cdot cv \cdot \Delta T_{vo};$$

для стенки между водой и резиновой смесью в резиносмесителе

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

для резиновой смеси, нагреваемой в резиносмесителе

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

где $Gvoh$, Gv – массовый расход охлаждающей воды, подаваемой в охлаждающий теплообменник темперирующей станции, и воды контура циркуляции; Tvh , $Tvoh$, Tv , Tvo – температура охлаждающей воды на входе в теплообменный аппарат темперирующей станции, на выходе из теплообменника, воды в контуре циркуляции (на выходе из темперирующей станции и входе резиносмесителя), воды на выходе резиносмесителя и входе темперирующей станции; ck , cv , cs , csm – теплоёмкости конденсата, воды, стенки и резиновой смеси; $Mvoh$, Mv , Mvo , Ms , $M2s$, Msm – масса охлаждающей воды в теплообменном аппарате, воды в контуре циркуляции темперирующей станции и резиносмесителя, стенки между водой охлаждения и водой контура циркуляции, стенки между водой и смесью в резиносмесителе, смеси; Ts , $T2s$, Tn – среднее значение температуры стенок между конденсатом и водой, стенок между водой и смесью, нагревателя темперирующей станции; $S1$, $S2$ – площади стенок в резиносмесителе и теплообменнике; αts , αps , $\alpha 2ts$, $\alpha 2ps$ – 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; Kp – коэффициент полезного действия привода резиносмесителя; τ – время.

Процесс резиносмешения является периодическим и происходит путём последовательного выполнения фаз смешения, которые оказывают существенное влияние на ход технологического процесса. Основным фактором влияния является резкое изменение температуры резиновой смеси (в процессе смешения в фазах) при вводе новых дополнительных компонентов в резиносмеситель. Часть компонентов добавляется в резиновую

смесь в процессе смешения при достижении смесью определённой температуры, а часть – после заранее заданного времени смешения.

Например, ввод технологического масла осуществляется с задержкой 30–60 с после начала смешения независимо от температуры. Температура вводимого масла благодаря участку подготовки масла поддерживается на одном уровне и не зависит от внешних факторов, поэтому не оказывает существенного влияния на процесс. Однако ввод химических компонентов происходит при достижении смесью 100 °С через загрузочную дверцу и требует её открытия, а также поднятия верхнего затвора (пресса). В результате поднятия пресса смесь под действием постоянного перемещения роторами и отсутствия пресса начинает перемещаться в верхнюю часть смесительной камеры, площадь трения смеси значительно сокращается. Выделяющийся, в процессе смешения каучуков, масла и технических углеродов, газ начинает покидать камеру через открытую загрузочную дверцу, унося с собой часть тепла, к тому же в камеру поступает холодный воздух, находящийся в цехе. Смесью начинает остывать, несмотря на работу двигателей. В результате этого, температура воздуха в цехе оказывает существенное влияние на процесс резиносмешения. Температура воздуха также влияет на температуру воды контура циркуляции (из-за достаточно больших расстояний между смесителем и темперирующими станциями). Температура в цехе может значительно меняться, например, в зависимости от времени года, а также при длительной работе оборудования или его простое. Дополнительно, существенное влияние на процесс управления температурой смеси оказывает температура охлаждающей воды. Её значения могут также существенно колебаться в разные периоды года.

Введём в математическое описание (1)–(6) коэффициенты, учитывающие влияние температуры в цехе и охлаждающей воды на температуру резиновой смеси в резиносмесителе, а также на температуру воды в контуре циркуляции. С учётом этого влияния, уравнения (2), (4) и (6) примут следующий вид:

$$Gv \cdot Tvo \cdot cv \cdot \Delta\tau + S \cdot \alpha ps \cdot (Ts - Tv) \cdot \Delta\tau + Sn \cdot \alpha ps \cdot (Tn - Tv) \cdot \Delta\tau + \\ + S4 \cdot \alpha 3ts \cdot (Tvoz - Tv) \cdot \Delta\tau = Gv \cdot Tv \cdot cv \cdot \Delta\tau + Mv \cdot cv \cdot \Delta Tv;$$

$$Gv \cdot Tv \cdot cv \cdot \Delta\tau = Gv \cdot Tvo \cdot cv \cdot \Delta\tau + S2 \cdot \alpha 2ts \cdot (Tvo - T2s) \cdot \Delta\tau + S4 \cdot \alpha 3ts \cdot (Tvoz - Tv) \cdot \Delta\tau + \\ + Mvo \cdot cv \cdot \Delta Tvo,$$

где $Tvoz$ – температура воздуха в цехе смешения; $S4$ – площадь поверхности трубопровода с цирку-

лирующим теплоносителем; $\alpha 3ts$ – коэффициент теплоотдачи от стенки трубопровода воздуху;

$$N \cdot K_p \cdot M_{sm} + S_2 \cdot \alpha_2 ps \cdot (T_{2s} - T_{vo}) \cdot \Delta\tau + \\ + S_{sm} \cdot \alpha_5 ts \cdot (T_{voz} - T_{sm}) \cdot \Delta\tau - \\ - Gg \cdot T_{sm} \cdot cg \cdot \Delta\tau = M_{sm} \cdot c_{sm} \cdot \Delta T_{sm}, \quad (9)$$

где S_{sm} – площадь открываемой загрузочной двери; $\alpha_5 ts$ – коэффициент теплоотдачи от резиновой смеси воздуху; Gg – массовый расход газа, выделяемого в процессе смешения, и уходящего при открытой двери; cg – теплоёмкость газа.

Полученная по уравнениям тепловых балансов (1)–(6) система дифференциальных

$$\begin{aligned} \frac{dT_{voh}}{d\tau} &= \frac{G_{voh} \cdot T_{voh} \cdot cv}{Mv \cdot cv} - \frac{G_{voh} \cdot T_{vh} \cdot cv}{Mv \cdot cv} - \frac{Stp \cdot \alpha ts \cdot (T_{voh} - T_s)}{Mv \cdot cv}, \\ \frac{dT_v}{d\tau} &= \frac{G_v \cdot T_{vo} \cdot cv}{Mv \cdot cv} + \frac{S \cdot \alpha ps \cdot (T_s - T_v)}{Mv \cdot cv} - \frac{G_v \cdot T_v \cdot cv}{Mv \cdot cv} + \frac{Sn \cdot \alpha ps \cdot (T_n - T_v)}{Mv \cdot cv} + \frac{S_4 \cdot \alpha_3 ts \cdot (T_{voz} - T_v)}{Mv \cdot cv}, \\ \frac{dT_s}{d\tau} &= \frac{S \cdot \alpha ts \cdot (T_{voh} - T_s)}{Ms \cdot cs} - \frac{S \cdot \alpha ps \cdot (T_s - T_v)}{Ms \cdot cs}, \\ \frac{dT_{vo}}{d\tau} &= \frac{G_v \cdot T_v \cdot cv}{Mvo \cdot cv} - \frac{G_v \cdot T_{vo} \cdot cv}{Mvo \cdot cv} - \frac{S_2 \cdot \alpha_2 ts \cdot (T_{vo} - T_{2s})}{Mvo \cdot cv} + \frac{S_4 \cdot \alpha_3 ts \cdot (T_{voz} - T_v)}{Mvo \cdot cv}, \\ \frac{dT_{2s}}{d\tau} &= \frac{S_2 \cdot \alpha_2 ts \cdot (T_v - T_{2s})}{M_{2s} \cdot cs} - \frac{S_2 \cdot \alpha_2 ps \cdot (T_{2s} - T_{vo})}{M_{2s} \cdot cs}, \\ \frac{dT_{sm}}{d\tau} &= \frac{N \cdot K_p \cdot M_{sm}}{M_{sm} \cdot c_{sm}} + \frac{S_2 \cdot \alpha_2 ps \cdot (T_{2s} - T_{vo})}{M_{sm} \cdot c_{sm}} + \frac{S_{sm} \cdot \alpha_5 ts \cdot (T_{voz} - T_{sm})}{M_{sm} \cdot c_{sm}} - \frac{Gg \cdot T_{sm} \cdot cg}{M_{sm} \cdot c_{sm}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для расчёта динамических характеристик замкнутой системы регулирования температуры к полученному математическому описанию процесса (после процедуры дискретизации) добавим уравнение ПИД – регулятора с логическим переключением исполнительных устройств в цифровой форме [5]:

$$u_i = u_{i-1} + q_0 \cdot (y_i^3 - y_i) + q_1 \cdot (y_{i-1}^3 - y_{i-1}) + \\ + q_2 \cdot (y_{i-1}^3 - y_{i-1}), \quad (11)$$

где u_i , y_i – выход и вход цифрового регулятора на i -ом такте квантования; y_i^3 – величина задания; q_0 , q_1 , q_2 – настройки регулятора.

Логика переключения исполнительных устройств осуществляется в зависимости от величины управляющего воздействия u_i :

$$K_q = 1, \text{ если } u_i > k, \\ K_h = 1, \text{ если } u_i < -k, \quad (12)$$

$$K_q = 0, K_h = 0, \text{ если } -k < u_i < k,$$

где K_q , K_h – коэффициенты для включения нагрева и охлаждения соответственно; k – настраиваемый коэффициент регулятора, который задаёт зону нечувствительности для включения исполнительных устройств.

При расчёте динамических характеристик необходимо учитывать переход процесса смешения с одной фазы на другую. Расчёт

уравнений (10), с учётом изменений в уравнениях (7) – (9), описывает изменение температуры смеси, греющей и охлаждающей воды, а также стенок аппаратов во времени от расхода охлаждающей воды и температуры нагревателя. Эти значения температуры являются параметрами состояния объекта управления. Управляющими воздействиями служат: изменение подачи охлаждающей воды и включение/выключение нагревательных элементов.

начинается со значений температур, величины которых несколько ниже необходимых для запуска процесса смешения, чтобы проанализировать выход параметров процесса в исходное рабочее положение.

Исходным состоянием для камеры смешения является температура циркулирующей в ней воды на уровне 38 °С (допуск ± 2 °С). Далее начинается процесс смешения до достижения смесью 100 °С, после чего начинается загрузка дополнительных химических компонентов, требующих открытия загрузочной двери и поднятия верхнего затвора. Загрузка осуществляется в течение 20 с, после чего дверь закрывается, затвор опускается, и смешение продолжается до достижения смеси 110 °С. Смешение при температуре выше 110 °С должно осуществляться более 60 с. Выгрузка смеси будет осуществляться на 26 минуте. Предусматривается обязательная выгрузка смеси, если температура превысит 125 °С.

Проведём расчёт динамических характеристик процесса смешения резины типа CDIZE 001102 VZ01 при температуре охлаждающей воды 18 °С и температуре воздуха в цехе 35 °С, с учётом выхода смесителя в исходное стартовое положение и нескольких последующих заправок (рисунки 1–3).

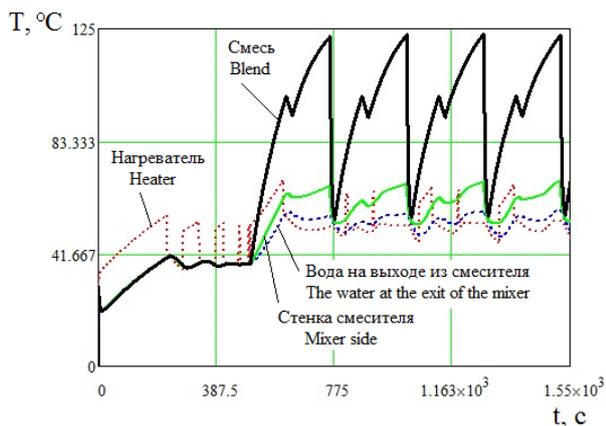


Рисунок 1. Динамические характеристики по температуре резиносмесителя

Figure 1. Dynamic characteristics by Rubber mixer temperature

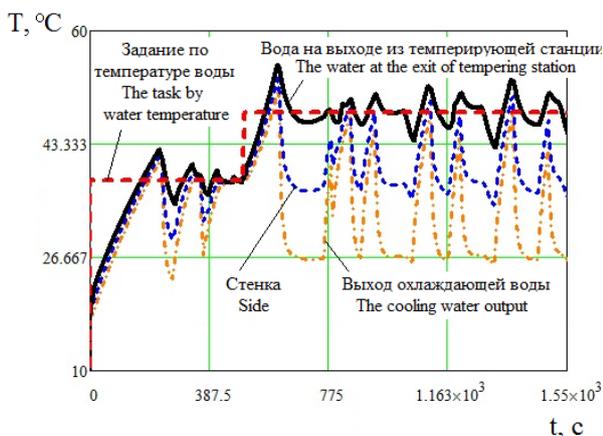


Рисунок 2. Динамические характеристики по температуре temperирующей станции

Figure 2. Dynamic characteristics by tempering station temperature

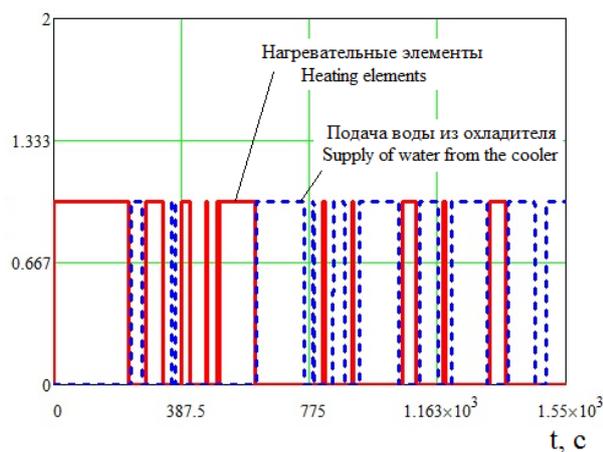


Рисунок 3. Фазы включения/выключения нагревательных элементов и подачи воды из охладителя

Figure 3. The heating elements on/off and the water filing from cooler phases

В данный момент в цехе на предприятии регулирование теплообменных процессов резиносмесителя происходит с помощью temperирующих станций, расстояние от которых до некоторых узлов может достигать около 30÷40 метров, что также оказывает существенное влияние на качество регулирования.

Главный контроллер Siemens S7 CPU319F-3 PN/DP через систему периферийного ввода / вывода выдаёт управляющие воздействия на локальные контроллеры HESCH HE086 и Jumo dTRON304 temperирующих станций в виде заданий на температуру теплоносителя (воды) в каждом соответствующем контуре регулирования. Все задания по температуре определяются из рецептов и не могут меняться во время их отработки, что является существенным недостатком системы регулирования.

В условиях изменения температуры цеха и охлаждающей воды, типов резин и времени смешения необходима корректировка температурных режимов различных участков резиносмешения.

Разработан корректирующий алгоритм управления для реализации в главном контроллере, который обеспечивает корректировку выдаваемых заданий на станции temperирования. Алгоритм разработан на основе искусственной нейронной сети [6].

На рисунке 4 представлена структура однослойной нейронной сети со множеством сумматоров по каждому входу.

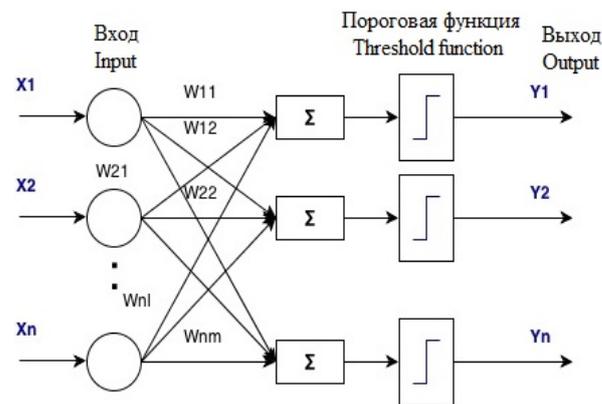


Рисунок 4. Структура однослойной нейронной сети: X_1, X_2, \dots, X_n – входы; $W_{11}, W_{12}, W_{21}, W_{22}, \dots, W_{nm}$ – весовые коэффициенты; Σ – сумматоры; \square – функции активации; Y_1, Y_2, \dots, Y_n – выходы

Figure 4. The structure of a single-layer neural network: X_1, X_2, \dots, X_n – inputs; $W_{11}, W_{12}, W_{21}, W_{22}, \dots, W_{nm}$ – weighting coefficients; Σ – activation functions; \square – activation function; Y_1, Y_2, \dots, Y_n – outputs

Рассматриваемая нейронная сеть позволяет выполнять необходимую корректировку величин

заданий, благодаря возможности отдельной настройки синоптических весов по каждому независимому входному сигналу.

Так как в системе управления температурным режимом главный контроллер может воздействовать на процесс путём изменения величины задания на температуру циркулирующей в контуре воды, то с учётом этого, скорректирована структура нейронной сети (рисунок 5).

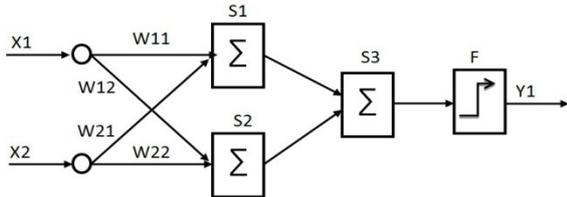


Рисунок 5. Структура нейронной сети для корректирующего алгоритма управления процессом резиносмешения: X1, X2 – температура охлаждающей воды и воздуха в цехе резиносмешения; W11, W12, W21, W22 – весовые коэффициенты; S1, S2 – сумматоры, вычисляющие выходной сигнал нагрева и охлаждения; S3 – сумматор, вычисляющий выходной сигнал корректировки задания; F – функция активации выходного корректирующего сигнала нейронной сети; Y1 – корректирующее воздействие

Figure 5. The neural network structure for correction algorithm of rubber mixing process control: X1, X2 – temperature of cooling water and air in the rubber mixing workshop; W11, W12, W21, W22 – weighting coefficients; S1, S2 – compute heating and cooling output signal adders; S3 – compute corrections task output signal adder; F – activation function of the neural network output correction signal; Y1 – corrective action

Принцип работы корректирующего регулятора на основе нейронной сети заключается в следующем: после осуществления смешения каждой заправки и выгрузки её из смесителя система запоминает параметры, при которых проводилось смешение и выгрузка. В случае выхода этих параметров за допустимые значения алгоритм корректировки синоптических весов изменит соответствующие коэффициенты для выработки нейронной сетью корректирующего воздействия, которое будет добавлено к существующему заданию из рецепта. После следующей заправки проверка повторится и коэффициенты будут вновь изменены, если технологические параметры не достигнут оптимальных значений.

Система будет запоминать текущие значения коэффициентов синоптических весов и при изменении внешних факторов постепенно настроит систему управления temperирующими станциями без участия человека.

Для осуществления влияния весовых коэффициентов на вырабатываемое корректирующее

воздействие (пропорционально изменению входных сигналов), представим коэффициенты W11, W21, W12 и W22 в виде прямо и обратно пропорциональных зависимостей от входных сигналов:

$$F1 = \frac{k \cdot T_{voh}}{T_{voh}} - W11 \cdot \frac{k \cdot T_{voh}}{T_{voh}}, \quad (13)$$

$$F2 = \frac{k \cdot T_{voz}}{T_{voz}} - W21 \cdot \frac{k \cdot T_{voz}}{T_{voz}}, \quad (14)$$

$$F3 = T_{voh} - W12 \cdot T_{voh}, \quad (15)$$

$$F4 = T_{voz} - W22 \cdot T_{voz}, \quad (16)$$

где F1, F2 – функции, вычисляющие выходные сигналы для корректировки управления с целью нагрева; F3, F4 – функции, вычисляющие выходные сигналы с целью охлаждения.

Тогда структура нейронной сети примет вид (рисунок 6).

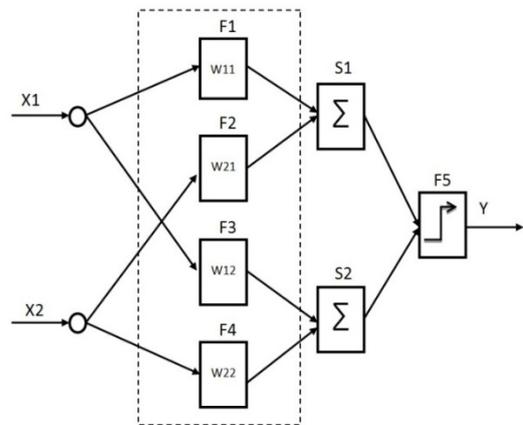


Рисунок 6. Структура нейронной сети с функциями F1 – F4

Figure 6. The neural network structure with functions F1 – F4

Запрограммируем выполнение алгоритма корректировки задания с помощью разработанной структуры нейронной сети и рассчитаем динамические характеристики системы (рисунки 7, 8).



Рисунок 7. Динамические характеристики temperирующей станции с корректировкой задания

Figure 7. The tempering station dynamic characteristics with task correction

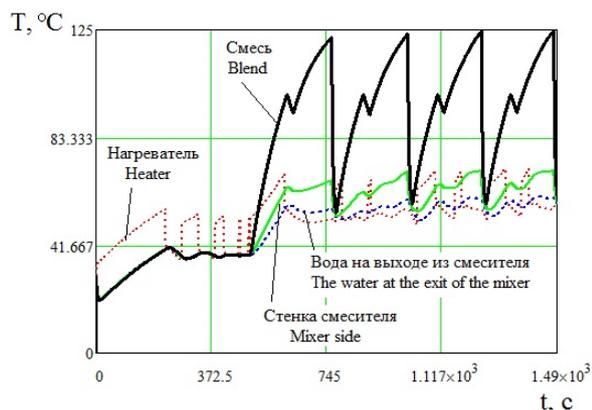


Рисунок 8. Динамические характеристики резиносмесителя с корректировкой задания

Figure 8. Dynamic characteristics of Rubber mixer with task correction

После расчёта динамических характеристик с учётом корректировки величины задания, выявлено снижение времени смешения резины благодаря достижению необходимых параметров процесса за более короткое время. Общее время, необходимое для смешения четырёх заправок смесителя сократилось на 50 с.

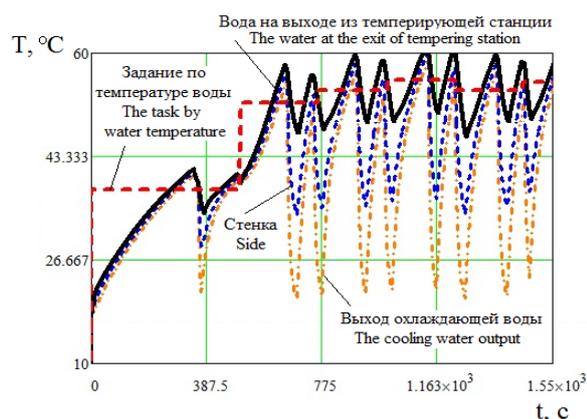


Рисунок 9. Динамические характеристики tempering station с корректировкой задания при низких температурах

Figure 9. The tempering station dynamic characteristics with task correction at low temperatures

Для определения способности регулятора корректировки к адекватному самообучению, проведём расчёты динамических характеристик

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.

процесса смешения при низких температурах, оставив неизменными величины коэффициентов, полученных в результате идентификации на четырёх заправках при нормальных температурах (рисунки 9, 10).

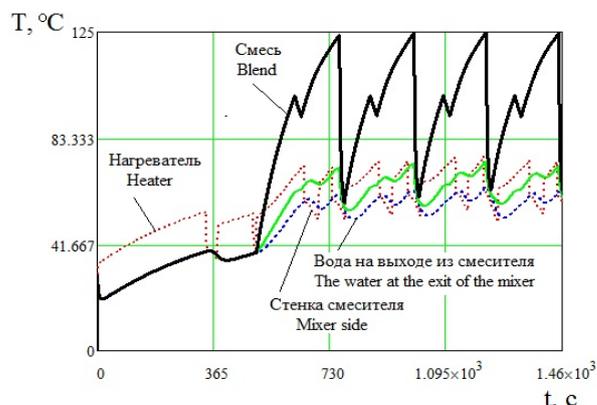


Рисунок 10. Динамические характеристики резиносмесителя с корректировкой задания при низких температурах

Figure 10. Dynamic characteristics of Rubber mixer with task correction at low temperatures

В итоге выявлено сокращение общего времени смешения четырёх заправок на 95 секунд по отношению к расчёту, проведённому при таких же низких температурах, но без регулятора корректировки.

Выводы и рекомендации

Анализ результатов моделирования и проведения испытаний на предприятии при программировании главного контроллера Siemens S7 CPU319F-3 PN/DP в среде STEP 7 [7], показал эффективность предложенного корректирующего алгоритма для tempering stations.

Данные исследования позволили получить уникальные корректирующие коэффициенты для каждого узла смесителя и снизить погрешности в управлении теплообменными процессами.

Разработанную математическую модель и синтезированный на базе искусственной нейронной сети корректирующий алгоритм управления температурным режимом процесса резиносмешения можно использовать для настройки главного контроллера в системе управления.

3 Красных В.Ю., Королев В.Н. Теплообмен. 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: в 12 т. Рязань, 2015. Т. 6. С. 34-37.

5 Кудряшов В.С., Алексеев М.В. Моделирование систем. Воронеж: ВГУИТ, 2012. С. 75–80.

6 Галушкин А.И. Нейронные сети. Основы теории. М.: Горячая линия, Телеком, 2010. 480 с.

7 Программирование с помощью STEP 7 V5.3: Руководство. Siemens AG, 2004. 602 с.

REFERENCES

1 Reznichenko S.V., Morozov Yu.L. Bol'shoi spravochnik rezinshchika. Tom 1. Kauchuki i ingredienty [Great reference book of tires light men. Volume 1. Rubbers and ingredients]. Moscow, Tekhinform, 2012. 744 p. (in Russian).

2 Reznichenko S.V., Morozov Yu.L. Bol'shoi spravochnik rezinshchika. Tom 2. Reziny i rezi-notekhnicheskie izdeliya [Great reference book of tires light men. Volume 2. Rubber and rubber products]. Moscow, Tekhinform, 2012. 648 p. (in Russian).

3 Krasnykh V.Yu., Korolev V.N. Teplo-massoobmen. Osnovnye formuly, zadachi i sposoby

ikh resheniya [Heat and Mass Transfer. The basic formulas, objectives 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. Sbornik trudov XXVIII mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii MMTT [Proceedings of the XXVIII International Scientific Conference MMTT 28: in 12 volumes]. Rязan, 2015. vol. 5, pp. 34–37. (in Russian).

5 Kudryashov V.S., Alekseev M.V. Modelirovanie system [Simulation systems]. Voronezh: VGUIT, 2012. pp. 75–80. (in Russian).

6 Galushkin A.I. Neironnye seti. Osnovy teorii [Neural networks. Fundamentals of theory]. Moscow, Goryachaya liniya, Telekom, 2010. 480 p. (in Russian).

7 Programirovanie s pomoshch'yu STEP 7V5.3 [Programming with STEP 7 V5.3: Guide. Siemens AG] 2004. 602 p. (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир С. Кудряшов д. т. н., профессор, кафедра информационных и управляющих систем, Воронеж. гос. ун-т инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, Россия, kudryashovvs@mail.ru

Михаил В. Алексеев к. т. н., доцент, кафедра информационных и управляющих систем, Воронеж. гос. ун-т инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, Россия, mwa1976@mail.ru

Андрей А. Юдаков магистрант, кафедра информационных и управляющих систем, Воронеж. гос. ун-т инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, Россия, yudakov07@yandex.ru

Алексей П. Попов к. т. н., ассистент, кафедра информационных и управляющих систем, Воронеж. гос. ун-т инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, Россия, aleksey_p_91@mail.ru

Евгений Д. Чертов д. т. н., профессор, кафедра технической механики, Воронеж. гос. ун-т инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, Россия

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в одинаковой степени принимали участие в подготовке материала для рукописи. Ответственными за плагиат являются доцент **Алексеев М.В.** и ассистент **Попов А.П.**

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 22.03.2016

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 19.04.2016

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Vladimir S. Kudryashov D. sc., professor, information and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, Russia, kudryashovvs@mail.ru

Michail V. Alekseev Ph. d., associate professor, information and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, Russia, mwa1976@mail.ru

Andrei A. Yudakov master student, information and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, Russia, yudakov07@yandex.ru

Aleksey P. Popov Ph. d., assistant, information and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, Russia, aleksey_p_91@mail.ru

Evgenij D. Chertov D. sc., professor, technical mechanics department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, Russia

CONTRIBUTION

All authors equally participated in the preparation of material for manuscript. Associate professor **Alekseev M.V.** and assistant **Popov A.P.** are responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 3.22.2016

ACCEPTED 4.19.2016