

УДК 677.011

DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_2\_109

**КОМБИНИРОВАННАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА  
РЕГУЛИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ПЛОТНОСТИ ЛЕНТЫ**

**COMBINED NEURAL NETWORK SYSTEM  
FOR REGULATING LINEAR TAPE DENSITY**

*А.Д. СЕМЕНОВ, В.В. ВОЛКОВ, В.С. НИКОЛАЕВ, Н.К. ПАКУЛОВА*

*A.D. SEMENOV, V.V. VOLKOV, V.S. NIKOLAEV, N.K. PAKULOVA*

(Пензенский государственный технологический университет,  
Пензенский государственный университет)

(Penza State Technological University,  
Penza State University)

E-mail: volkovv@penzgtu.ru

*Рассмотрена комбинированная система регулирования линейной плотности волокнистой ленты, в которой регулирование по отклонению реализуется нейросетевым регулятором, синтезированным из условия инвариантности по возмущению.*

*We consider a combined system for regulating the linear density of a fiber tape, in which the deviation control is implemented by a neural network controller synthesized from the perturbation invariance condition.*

**Ключевые слова:** комбинированная система регулирования, линейная плотность волокнистой ленты, ленточная машина, нейросетевой регулятор.

**Keywords:** combined control system, linear density of fiber tape, tape machine, neural network controller.

В настоящее время разработано и нашло практическое применение большое количество регуляторов линейной плотности, устанавливаемых на ленточных машинах [1], [2]. Лучшие показатели качества, достигаемые за счет более сложной системы регулирования, имеют комбинированные регуляторы. Однако использование традиционных законов регулирования в силу не-

линейности и стохастичности объекта (вытяжной прибор + волокнистый продукт) не позволяет получить более высокие показатели качества. Одним из возможных способов дальнейшего совершенствования систем регулирования линейной плотности является использование нейронных сетей и нечеткого управления [3].

### Постановка задачи

Рассмотрим процесс регулирования линейной плотности, динамика которого представляется уравнением

$$y_m = P[u], \quad (1)$$

где  $P$  – нелинейный оператор, отображающий вход  $u$  в выход  $y_m$  математической модели процесса.

Пусть  $y_d$  желаемая траектория управляемого процесса. Тогда управление должно удовлетворять условию:

$$J = \min_u (|y_d - y_m|), \quad (2)$$

где  $y_m$  – значение регулируемой величины на выходе объекта, в котором протекает управляемый процесс (1).

Подставляя в условие (2) уравнение (1), получим:

$$J = \min_u (|y_d - P[u] - e_m|), \quad (3)$$

где  $e_m$  – ошибка модели.

Очевидно, что минимум (3) достигается при условии:

$$|y_d - P[u] - e_m| = 0. \quad (4)$$

Откуда искомого управление, отвечающее условию (2), будет равно:

$$u = P^{-1}(y_d - e_m) = P^{-1}(y_m). \quad (5)$$

Метод синтеза регулятора, реализующего уравнение (5), наталкивается на ряд трудностей, связанных с условиями существования и реализуемости оператора, обратного к  $P$ . В том случае, если такой оператор существует и реализуем, возникают проблемы робастности по отношению к ошибкам моделирования и его физической реализуемости. Предлагается в качестве такого регулятора использовать нейронную сеть, обучаемую по временным рядам выходного и входного сигналов системы. Причем на вход нейронной сети подается выходной сигнал регулируемого процесса,

а на выход – входной, чем и достигается получение оценки обратного оператора  $P^{-1}$ . Рассмотрим формирование обратного оператора двухзонного вытяжного прибора, реализующего управление по возмущению и компенсирующего неровноту волокнистого продукта, поступающего в вытяжной прибор.

*Формирование обратного оператора вытяжного прибора*

Структурная схема двухзонного вытяжного прибора показана на рис. 1.

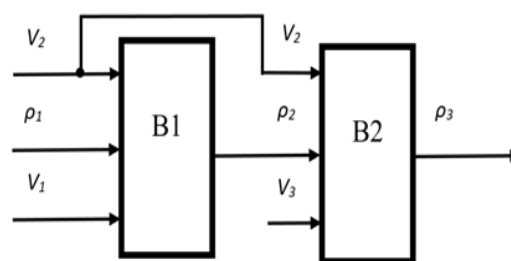


Рис. 1

Она включает в себя блок первой  $B1$  и второй  $B2$  зон вытягивания;  $V_1, V_2, V_3$  – скорости выпуска первой, второй и третьей выпускной пары;  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  – линейные плотности ленты на входе, после первой зоны и на выходе вытяжного прибора. Будем полагать, что стабилизация линейной плотности осуществляется путем регулирования скорости выпуска  $V_1$  в зависимости от измеряемых линейных плотностей на входе и выходе вытяжного прибора, то есть закон управления будем искать в виде

$$u = P^{-1}(\rho_1, \rho_3). \quad (6)$$

Динамика блока описывается следующими уравнениями [4]:

$$\begin{aligned} R_2 \frac{d\rho_2}{dt} + V_2 \rho_2 &= -R_1 \frac{d\rho_1}{dt} + V_1 \rho_1; \\ R_3 \frac{d\rho_3}{dt} + V_3 \rho_3 &= -R_2 \frac{d\rho_2}{dt} + V_2 \rho_2; \\ T \frac{dV_1}{dt} + V_1 &= kU. \end{aligned} \quad (7)$$

Третье уравнение системы (7) описывает динамику регулируемого привода первой выпускной пары.

В случае приемлемой стабилизации процесса будем считать, что  $\frac{d\rho_2}{dt} = \frac{d\rho_3}{dt} = 0$ . Тогда исходная система упростится, и условия компенсации примут вид:

$$V_1 = R_1 \frac{d\rho_1}{dt} + V_3 \rho_0; \quad (8)$$

$$U = \frac{T \frac{dV_1}{dt} + V_1}{k}.$$

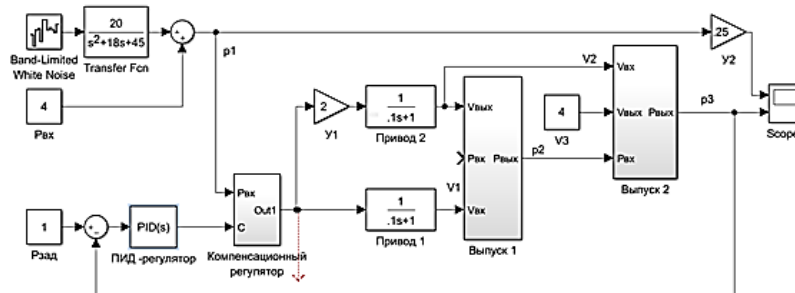


Рис. 2

На рис. 3 показаны результаты работы этой системы для случая, когда входная линейная плотность приведена к выходной.

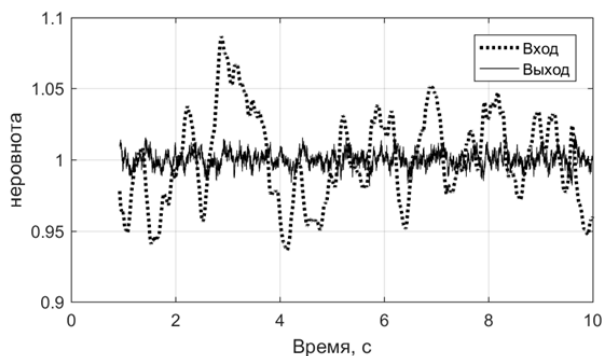


Рис. 3

Введение компенсационного регулятора позволяет снизить дисперсию неровноты в 24 раза.

Физическая реализация такого регулятора связана с известными трудностями, поскольку для его работы необходимо получать вторые производные от измеряемых сигналов неровноты. Для преодоления указанных трудностей воспользуемся нейронной сетью.

*Синтез нейросетевого компенсационного регулятора*

Для обучения такого регулятора использо-

На рис. 2 представлена Simulink-модель комбинированной системы стабилизации линейной плотности с компенсационным регулятором (8) в контуре регулирования по возмущению и ПИД - регулятором в контуре регулирования по отклонению. Входной сигнал Simulink-модели вычислялся по методу формирующего фильтра.

валась динамическая трехслойная нейронная сеть прямой передачи с линейными функциями активации в каждом слое. Обучение сети проводилось по алгоритму Левенберга – Маркварта, регуляризованного по Байесу. При обучении в качестве входной обучающей выборки использовались входные и выходные сигналы компенсационного регулятора. В качестве выходной обучающей выборки использовался выходной сигнал компенсационного регулятора. Нейронная сеть при таком обучении представляет собой АРСС-модель, связывающую выходные сигналы регулятора с входным.

На рис. 4 показана разность сигналов компенсационного и нейросетевого регулятора.

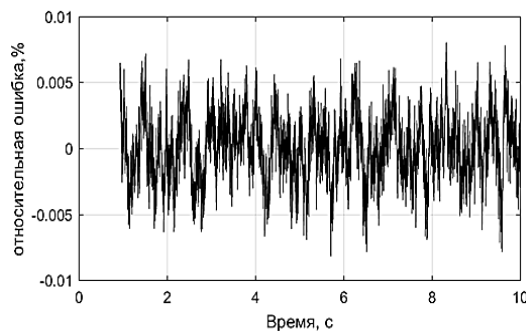


Рис. 4

Как видно из рисунка, ошибка нейросетевого регулятора практически равна нулю, и такой регулятор физически реализуем на базе нейронной сети.

## ВЫВОДЫ

1. Для повышения качества регулирования линейной плотности волокнистой ленты предложено использовать комбинированную систему регулирования, в которой компенсационный регулятор в контуре регулирования по отклонению построен из условия инвариантности по возмущению.

2. Для достижения условий инвариантности было проведено формирование обратного оператора вытяжного прибора, что позволило синтезировать компенсационный регулятор.

3. Работоспособность регулятора проверялась в ходе вычислительного эксперимента на Simulink-модели системы регулирования. Было установлено, что дисперсия неровноты в выходной ленте снижается в 24 раза.

4. Для обеспечения физической реализуемости компенсационного регулятора была создана и обучена на Simulink-модели системы регулирования динамическая трехслойная нейронная сеть прямой передачи с линейными функциями активации в каждом слое. Обучение сети проводилось по алгоритму Левенберга – Маркварта, регуляризованного по Байесу.

5. Построенный на базе нейронной сети нейросетевой компенсационный регулятор

физически возможен и реализует такой же закон управления, как и исходный регулятор (относительная разность выходных сигналов регуляторов не превышает 0,01 %).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Севостьянов П.А. Компьютерное моделирование технологических систем и продуктов прядения. – М.: Наука, 2006.

2. Волков В.В., Семенов А.Д., Николаев В.С. Система автоматического регулирования линейной плотности волокнистого материала // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2013, №2. С.68...71.

3. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления. – М.: Высшая школа, 2002.

4. Ашнин Н.М. Вытягивание. Сложение. – СПб.: СПГУТД, 2011.

## REFERENCES

1. Sevost'yanov P.A. Komp'yuternoe modelirovanie tekhnologicheskikh sistem i produktov pryadeniya. – M.: Nauka, 2006.

2. Volkov V.V., Semenov A.D., Nikolaev V.S. Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya lineynoy plotnosti voloknistogo materiala // Izv. vuzov. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti. – 2013, №2. S.68...71.

3. Terekhov V.A., Efimov D.V., Tyukin I.Yu. Neyrosetevye sistemy upravleniya. – M.: Vysshaya shkola, 2002.

4. Ashnin N.M. Vytyagivanie. Slozhenie. – SPb.: SPGUTD, 2011.

Рекомендована кафедрой автоматизации и управления ПГТУ. Поступила 14.04.21.