

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ¹

Доктор физ.-мат. наук, профессор **Дружинина О.В.**

(Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук. ФИЦ ИУ РАН,
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. ИПУ РАН),

доктор физ.-мат. наук, доцент **Масина О.Н.**

(Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина),

кандидат техн. наук **Петров А.А.**

(Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина)

MATHEMATICAL MODELLING OF CONVEYOR TRANSPORT SYSTEMS WITH INTELLIGENT CONTROL

O.V. Druzhinina, Doctor (Physics & Math.), Professor

(FRC “Computer Science and Control” of RAS, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS),

O.N. Masina, Doctor (Physics & Math.), Associate Professor,

(I.A. Bunin Yelets State University),

A.A. Petrov, Ph.D. (Tech.)

(I.A. Bunin Yelets State University)

Конвейерный транспорт, транспортирующие устройства непрерывного действия, математическое моделирование, интеллектуальное управление, нечеткий регулятор, ленточный конвейер, инновационный кластер машиностроения.

Conveyor transport, continuous transport devices, mathematical modeling, intelligent control, fuzzy controller, belt conveyor, innovative mechanical engineering cluster.

Предложен подход к математическому моделированию систем конвейерного транспорта с интеллектуальным управлением. Построена базовая модель ленточного конвейера с динамическим изменением угла между горизонтальной плоскостью и плоскостью ленты. Рассмотрены модификации базовой модели, а именно, модель с трением качения, модель с учетом осевого трения, модель с учетом управления в виде линейной функции, модель с учетом управления в виде квадратичной функции, обобщенная модель с переключениями. Представлены результаты вычислительных экспериментов с применением регуляторов на основе нечеткой логики. Полученные результаты могут найти применение в задачах проектирования и построения машин непрерывного действия, а также при разработке производственных линий предприятий инновационного кластера машиностроения.

An approach to modeling conveyor transport systems with intelligent control is proposed. A basic model of a belt conveyor with a dynamic change in the angle between the horizontal plane and the belt plane is constructed. Modifications of the basic model are considered, namely, a model with rolling friction, a model with axial friction, a model with control in the form of a linear function, a model with control in the form of quadratic function, a generalized model with switching. The results of computational experiments using fuzzy logic-based controllers are presented. The obtained results can be used in the design and construction of continuous machines, as well as in the development of production lines of enterprises of the innovative cluster of machine-building.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Липецкой области в рамках научного проекта № 20-47-480003.

Введение. В современном массовом и крупносерийном производстве конвейерный транспорт является неотъемлемой частью технологического процесса. В [1] отмечается, что «вновь проектируемые конвейеры должны быть достаточно прочными, надежными, долговечными и экономичными в эксплуатации, а изготовление их следует осуществлять с наименьшими затратами материалов и труда. Это требует проведения всесторонних теоретических и экспериментальных исследований, и на базе их результатов – дальнейшего совершенствования конструкций и методов расчета конвейеров».

Направления совершенствования конвейерного транспорта связаны с современными тенденциями развития отраслей промышленности и экономики в целом, в том числе с развитием цифровой экономики и систем интеллектуального управления механизмами и системами. Важными проблемами разработки моделей, проектирования и совершенствования систем конвейерного транспорта являются следующие проблемы: проектирование и моделирование многоприводных конвейеров различных типов, ленточных конвейеров со сверхпрочными лентами, разветвленных систем подвесных толкающих конвейеров, трубчатых скребковых конвейеров с пространственной трассой; разработка систем для крутонаклонного перемещения грузов; автоматизация управления конвейерными системами с использованием современных цифровых и интеллектуальных технологий.

В рамках решения указанных проблем возникают вопросы построения математических моделей систем конвейерного транспорта как для совершенствования существующих конструкций машин, так и для создания новых конструкций машин с использованием перспективных способов транспортирования. К таким способам, в частности, относятся: а) транспортирование с применением магнитной и воздушной подушек грузонесущего элемента; б) транспортирование с использованием привода от линейных асинхронных двигателей; в) транспортирование с динамическим изменением угла между горизонтальной плоскостью и плоскостью ленты конвейера.

Вопросы проектирования и внедрения машин непрерывного действия рассмотрены в многочисленных работах, например, в [2–4]. Задачи автоматизации ленточного конвейерного транспорта рассмотрены в [5]. Разработке и исследованию системы управления скоростью движения ленты двухприводного ленточного конвейера посвящена работа [6]. Вопросы управления приводами ленточных конвейеров изучены в [7].

При управлении производственными процессами производства все большее применение находят методы искусственного интеллекта, нечеткой логики и интеллектуального управления [8–11]. Вопросы применения нечеткой логики при управлении конвейерным транспортом изучены, в частности, в [12–14]. В [12] для решения задач проектирования и эксплуатации многоприводных конвейеров использована модель нечеткого управления на основе реализации алгоритма Мамдани. В [13] изучена управляемая модель ленточного конвейера для транспортировки угля с помощью построения нейронной сети. Интеллектуальное моделирование и управление зерносушилкой с конвейерной лентой рассмотрено в [14].

Проблемы создания и эксплуатации высокоэффективных конструкций конвейеров для крутонаклонного перемещения насыпных и штучных грузов являются важными проблемами [15]. Следует отметить, что конвейеры с динамическим изменением угла между горизонтальной плоскостью и плоскостью ленты конвейера могут сочетать в себе преимущества обычных и крутонаклонных ленточных конвейеров.

В настоящей статье построена базовая модель конвейера с динамическим изменением угла между горизонтальной плоскостью и плоскостью ленты конвейера. Кроме того, построены модификации базовой модели, а именно, модель с учетом трения качения конвейера, модель с учетом осевого трения, модель с учетом управления в виде линейной функции, модель с учетом управления в виде квадратичной функции, модель с переключениями. Предложен подход к моделированию переключаемых систем конвейерного транспорта с интеллектуальным управлением.

Целью работы является развитие методов стабилизации на основе интеллектуального управления в рамках предложенной переключаемой модели ленточного конвейера. Разработаны базовые модули программного комплекса с применением библиотек языка высокого уровня Python 3 для моделирования и стабилизации систем конвейерного транспорта. С применением модулей программного комплекса проведен ряд вычислительных экспериментов, подтверждающих результативность интеллектуального управления.

2. Построение моделей конвейерного транспорта. Рассмотрим следующие модели конвейерного транспорта. При неизменной массе движение грузов рассматривается как процесс перемещения из нулевого положения по оси x под воздействием скалярного значения тяги, развиваемой лентой конвейера. Кроме того, в процессе движения конвейера происходит динамическое изменение угла между горизонтальной и плоскостью ленты согласно заданным ограничениям. На рис. 1 представлена схема моделируемого конвейера.

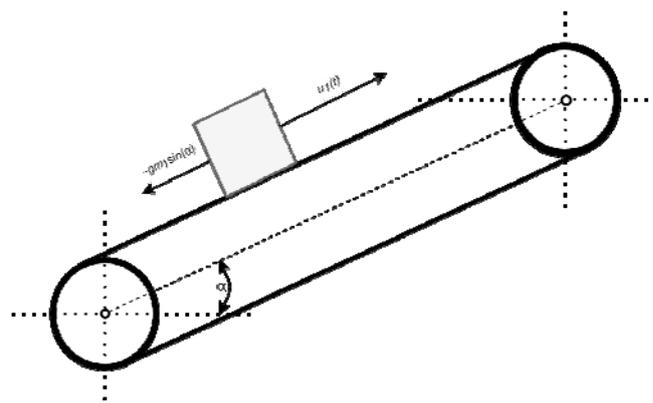


Рис. 1. Схема конвейера с динамическим изменением угла подъема

На рис. 1 α – угол подъема конвейера относительно нулевого положения, g – ускорение свободного падения, m_1 – общая масса грузов на конвейере, $u_1(t)$ – функция управления тягой конвейера. Базовая модель функционирования конвейера с динамическим изменением угла задается системой четырех обыкновенных дифференциальных уравнений и имеет вид:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_0 &= x_1, \\
\dot{x}_1 &= \frac{u_1(t) - m_1 g \sin(\alpha_0)}{m_1 + m_0}, \\
\dot{\alpha}_0 &= \alpha_1, \\
\dot{\alpha}_1 &= \frac{u_2(t)}{s \varepsilon^2 (m_0 + m_1)} - \frac{g \cos(\alpha_0)}{\varepsilon},
\end{aligned} \tag{1}$$

где x_0 – перемещение ленты конвейера, x_1 – линейная скорость движения ленты конвейера, m_0 – масса ленты конвейера, $u_2(t)$ – функция управления углом подъема ленты, ε – положение центра масс конвейера относительно нижнего ролика, s – коэффициент, определяющий момент инерции конвейера. Последнее уравнение системы (1) представляет собой уравнение перевернутого маятника с вынужденными колебаниями, смещенного по фазе на $-\frac{\pi}{2}$.

С учетом того, что ленточный конвейер моделируется незамкнутой системой, от модели (1) удобно перейти к модели с переключениями следующего вида

$$\begin{aligned}
\dot{x}_0 &= x_1, \\
\dot{x}_1 &= \frac{u_1(t) - m_1 g \sin(\alpha_0)}{m_1 + m_0}, \\
\dot{\alpha}_0 &= \alpha_1, \\
\dot{\alpha}_1 &= \frac{u_2(t)}{s \varepsilon^2 (m_0 + m_1)} - \frac{g \cos(\alpha_0)}{\varepsilon}, \\
m_1 &\in M, \quad \varepsilon \in E.
\end{aligned} \tag{2}$$

Отметим, что в модели (2) по сравнению с моделью (1) фигурируют множества M , E , включающие в себя возможные значения общей массы грузов и центра масс соответственно. Переключения в модели (2) заключаются в выборе соответствующих значений m_1 и ε согласно определенному закону.

С учетом описания модели рассматриваются два типа действий – погрузка (действие 1) и разгрузка (действие 2).

Действие 1 (погрузка) заключается в следующем: пусть $m = m_0 + m_1$, \dot{x}_{cm} – скорость до момента погрузки, $\dot{x}_{нов}$ – скорость после погрузки. Поскольку в момент погрузки справедливо равенство $m\dot{x} = \text{const}$, получим

$$\dot{x}_{cm} m = \dot{x}_{нов} (m + \Delta m), \quad \dot{x}_{нов} = \frac{\dot{x}_{cm} m}{m + \Delta m}.$$

Следует отметить, что также изменяется положение центра масс ε , т.е.

$$\varepsilon = f(x, m + \Delta m),$$

где f – некоторая функция для расчета положения центра масс.

В свою очередь, действие 2 (разгрузка) характеризуется следующим: масса груза уменьшается, а линейная скорость движения остается неизменной.

Следует отметить, что модель (2) не учитывает такой существенный фактор, как трение, возникающее при перемещении грузов. Далее примем, что трение в сис-

теме линейно зависит от скорости. В таком случае уравнение модели примет вид:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_0 &= x_1, \\
\dot{x}_1 &= \frac{u_1(t) - kx_1 - m_1 g \sin(\alpha_0)}{m_1 + m_0}, \\
\dot{\alpha}_0 &= \alpha_1, \\
\dot{\alpha}_1 &= \frac{u_2(t)}{s \varepsilon^2 (m_0 + m_1)} - \frac{g \cos(\alpha_0)}{\varepsilon}, \\
m_1 &\in M, \quad \varepsilon \in E,
\end{aligned} \tag{3}$$

где k – коэффициент трения качения. Таким образом, в модели (3) трение качения прямо пропорционально скорости движения конвейера. Поскольку предполагается, что конвейер движется постоянно, указанный тип трения оказывает существенное влияние на динамику системы.

Кроме того, возможно построение модели, учитывающей осевое трение, которое приводит к затуханию колебаний конвейера. Можно принять, что осевое трение прямо пропорционально угловой скорости перемещения конвейера. В этом случае уравнения модели (3) примут вид:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_0 &= x_1, \\
\dot{x}_1 &= \frac{u_1(t) - kx_1 - m_1 g \sin(\alpha_0)}{m_1 + m_0}, \\
\dot{\alpha}_0 &= \alpha_1, \\
\dot{\alpha}_1 &= \frac{u_2(t) - l\alpha_1 - g \cos(\alpha_0)}{s \varepsilon^2 (m_0 + m_1)} - \frac{g \cos(\alpha_0)}{\varepsilon}, \\
m_1 &\in M, \quad \varepsilon \in E,
\end{aligned} \tag{4}$$

где l – коэффициент осевого трения. Данный тип трения оказывает существенное влияние при больших угловых скоростях движения конвейера, что имеет значение при построении уточненных моделей.

Далее рассмотрим различные математические модели функционирования конвейерного транспорта с учетом различных типов непрерывных функций управления. Отметим, что на небольшом временном интервале возможно использование линейных функций управления. В этом случае система (4) примет вид:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_0 &= x_1, \\
\dot{x}_1 &= \frac{p_{11} + p_{12}t - kx_1 - m_1 g \sin(\alpha_0)}{m_1 + m_0}, \\
\dot{\alpha}_0 &= \alpha_1, \\
\dot{\alpha}_1 &= \frac{p_{21} + p_{22}t - l\alpha_1 - g \cos(\alpha_0)}{s \varepsilon^2 (m_0 + m_1)} - \frac{g \cos(\alpha_0)}{\varepsilon}, \\
m_1 &\in M, \quad \varepsilon \in E,
\end{aligned} \tag{5}$$

где p_{11} , p_{12} , p_{21} , p_{22} – коэффициенты, определяющие вид линейных функций управления. К преимуществам указанного типа функций можно отнести небольшое количество коэффициентов и возможность кусочно-линейной аппроксимации любых возможных функций управления.

Отметим, что представляет интерес для изучения также модель с учетом законов управления в виде квадратичных функций. В этом случае имеем

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= x_1, \\ \dot{x}_1 &= \frac{p_{11} + p_{12}t + p_{13}t^2 - kx_1 - m_1 g \sin(\alpha_0)}{m_1 + m_0}, \\ \dot{\alpha}_0 &= \alpha_1, \\ \dot{\alpha}_1 &= \frac{p_{21} + p_{22}t + p_{23}t^2 - l\alpha - g \cos(\alpha_0)}{s\varepsilon^2(m_0 + m_1)} - \frac{g \cos(\alpha_0)}{\varepsilon}, \\ m_1 &\in M, \quad \varepsilon \in E, \end{aligned} \quad (6)$$

где $p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{21}, p_{22}, p_{23}$ – коэффициенты, определяющие вид квадратичных функций управления. При рассмотрении квадратичных функций управления возникают дополнительные возможности построения гладких кусочно-нелинейных функций управления.

Критерий оптимальности может быть применен ко всем рассмотренным выше моделям и имеет вид:

$$\int_0^t \sqrt{u_1(t)^2 + u_2(t)^2} dt \rightarrow \min.$$

Физический смысл критерия заключается в минимизации величины вектора управляющих сил. Аналогичный критерий оптимальности для переключаемых систем других типов рассмотрен в работах [16, 17].

На основе моделей (4)–(6) предлагается построение обобщенной переключаемой модели функционирования конвейера с динамически изменяемым углом подъема, которая учитывает переключение управлений и переключение режимов нагрузки. Уравнения указанной модели имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= x_1, \\ \dot{x}_1 &= \frac{u_1 - kx_1 - m_1 g \sin(\alpha_0)}{m_1 + m_0}, \\ \dot{\alpha}_0 &= \alpha_1, \\ \dot{\alpha}_1 &= \frac{u_2 - l\alpha}{s\varepsilon^2(m_0 + m_1)} - \frac{g \cos(\alpha_0)}{\varepsilon}, \\ u_1 &\in \Gamma_1, \quad u_2 \in \Gamma_2, \\ m_1 &\in M, \quad \varepsilon \in E, \end{aligned} \quad (7)$$

где u_1, u_2 – управления в системе, Γ_1 и Γ_2 – множества возможных управлений. Задача управления заключается в нахождении однозначного взаимного соответствия параметров траектории модели и управлений из множеств Γ_1 и Γ_2 .

Далее приведем результаты вычислительных экспериментов по управлению и стабилизации модели (3) с применением алгоритмов нечеткой логики.

3. Результаты вычислительных экспериментов.

Для изучения динамики конвейера используется переключаемая модель (7). Особенностью данной модели является переключение как режимов нагрузки, так и режимов управления. Для модели (7) разработаны связанные с построением и численным решением уравнений модули программного комплекса с применением библиотек языка Python 3. Изучен модельный пример и проведен ряд вычислительных экспериментов со следующими условиями.

(A₁) для модельного примера принято, что длина конвейера равна 2 м.

(A₂) При выполнении действий 1, 2 относительно ленты в случайные моменты погружаются либо разгружаются грузы (массой до 0.25 кг). Генератор случайных чисел настроен таким образом, что общая масса грузов на ленте возрастает с течением времени. Собственная масса конвейерной ленты — 1.6 кг.

(A₃) При совершении действий 1, 2 положение центра масс конвейера изменяется произвольным образом в интервале от 0.75 м до 1.25 м.

(A₄) Цель управления – стабилизировать модель относительно значений, близких к $\dot{x} = 4$ м/с, $\alpha = \frac{\pi}{4}$.

(A₅) Для стабилизации линейной скорости перемещения конвейера используется введение системы в скользящий режим, для стабилизации угла подъема используется нечеткий регулятор с 6 правилами.

С учетом физического смысла начальные условия для модели (7) имеют вид

$$x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = 0, \quad \alpha(0) = 0.5, \quad \dot{\alpha}(0) = 0.$$

Параметры модели (7) при $t = 0$ имеют вид $m_0 = 1.6$, $g = 9.8$, $s = 1/3$, $k = 1$, $l = 0$, $m_1 = 1$, начальные управления имеют вид $u_1(0) = 2$, $u_2(0) = 100$.

Результаты вычислительных экспериментов, связанных с численным решением модельных уравнений и применением нечетких регуляторов, представлены на рис. 2–4.

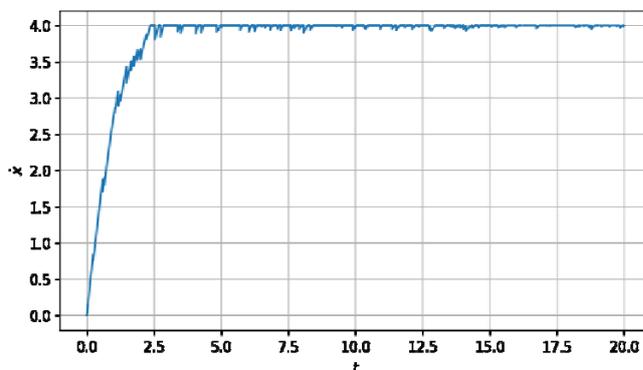


Рис. 2. Линейная скорость движения конвейера для системы (7)

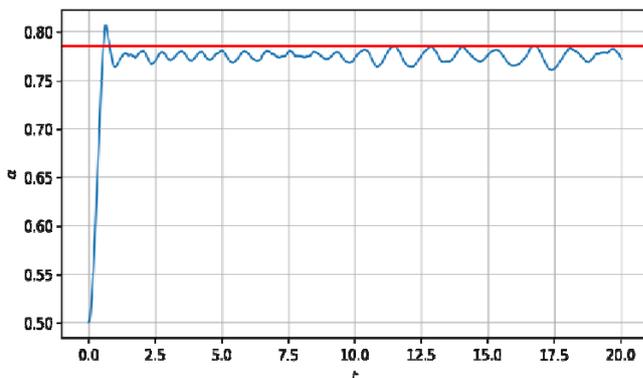


Рис. 3. Угол подъема конвейера для системы (7)

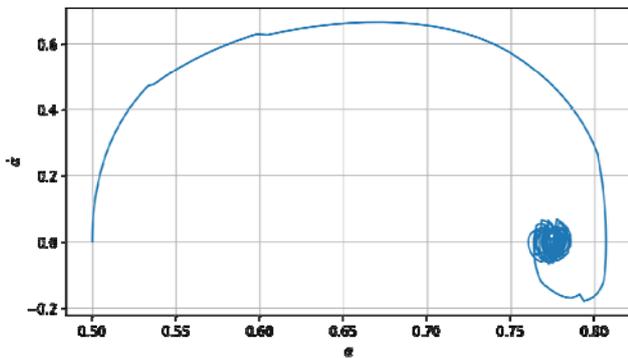


Рис. 4. Фазовая траектория управления углом подъема конвейера для системы (7)

Можно отметить, что для управления линейной скоростью конвейера достаточно введения в соответствующее уравнение системы (7) скользящего режима. Периодическое незначительное снижение скорости, которое можно отметить на рис. 2, связано с погрузкой наиболее тяжелых грузов. Получено, что с увеличением общей массы груза влияние данного фактора на скорость уменьшается.

В отличие от линейной скорости, реализация скользящего режима для управления углом подъема не дает ожидаемых результатов в связи с тем, что система (7) становится неустойчивой. Для управления углом подъема используется построенный нечеткий регулятор.

На рис. 3 представлен график изменения фактического угла подъема конвейера, требуемый угол $\frac{\pi}{4}$ отмечен горизонтальной линией. Можно отметить, что нечеткий регулятор стабилизирует угол подъема конвейера в малой окрестности требуемого положения.

На рис. 4 представлена фазовая траектория управления углом подъема конвейера для системы (7), для которой можно отметить устойчивую траекторию с особой точкой типа центр. Искажения траектории на рис. 4 вызваны недетерминированностью осуществления действий для модели (7).

Далее рассмотрим график управления угловой скоростью для модели (7), который приведен на рис. 5.

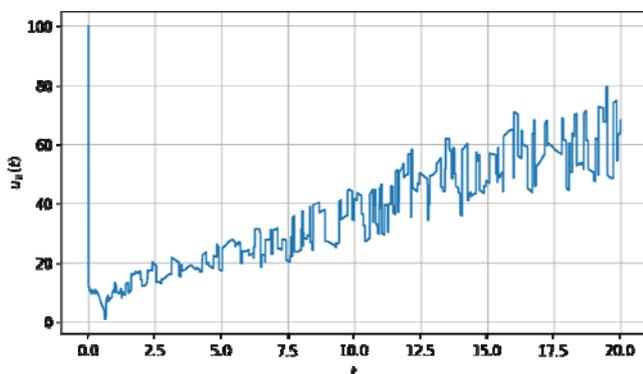


Рис. 5. Управление на основе нечеткого регулятора для модели (7)

На рис. 5 приведен график управления на основе нечеткого регулятора. Несмотря на достаточно редкое срабатывание, нечеткий регулятор стабилизирует систему (3) по α , чего не удалось достигнуть введением в скользящий режим.

С учетом результатов вычислительных экспериментов применительно к модельному примеру можно отметить, что цель управления, заключающаяся в стабилизации модели (7), является достигнутой. В дальнейших исследованиях планируется усовершенствовать модель (7), рассмотреть другие виды критериев оптимальности, а также провести вычислительные эксперименты с другими типами интеллектуального управления.

Заключение. Таким образом, в настоящей статье построена базовая математическая модель конвейера с динамическим изменением угла к горизонту, а также предложены различные модификации базовой модели. Рассмотрен подход к математическому моделированию систем конвейерного транспорта с интеллектуальным управлением на основе применения нечетких регуляторов и анализа скользящих режимов. Сформулированы критерии оптимального управления, основанные на ограничениях, накладываемых на управление. Разработаны базовые модули программного комплекса, с помощью которых проведен ряд вычислительных экспериментов, подтверждающих результативность интеллектуального управления. Указанные модули являются частью находящегося в разработке программного комплекса для интеллектуального управления динамическими системами. Использование нечетких регуляторов позволяет экономить ресурсы, повысить уровень автоматизации, ускорить проектирование систем управления и использовать динамические режимы в задачах управления производственными линиями. На основе полученных в работе результатов планируется разработка нечетких и нейро-нечетких регуляторов с применением машинного обучения.

Литература

1. *Пертен Ю.А.* Конвейерный транспорт XXI века // Транспорт Российской Федерации.- 2005, № 1.- С. 42–43.
2. *Ромакин М.Е.* Машины непрерывного транспорта. М.: Издательский центр Академия, 2008.
3. *Рачков Е.В.* Машины непрерывного транспорта. М.: Альтаир-МГАВТ, 2014.
4. *Zhao L., Lyn Y.* Typical Failure Analysis and Processing of Belt Conveyor // Procedia Engineering. 2011. V. 26. P. 942–946.
5. *Дмитриева В.В.* Современные задачи автоматизации ленточного конвейерного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-zadachi-avtomatizatsii-lentochnogo-konveyernogo-transporta>.
6. *Каунг Пьей Аунг, Кубрин С.С., Певзнер Л.Д., Дмитриева В.В.* Разработка системы управления скоростью движения ленты двухприводного ленточного конвейера // Известия высших учебных заведений. Горный журнал.- 2018, №3.- С. 57–64.
7. *Реутов А.А., Мясников А.А.* Управление приводами ленточных конвейеров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2006. Вып. 2. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-privodami-lentochnyh-konveyerov>.
8. *Васильев С.Н.* К интеллектуальному управлению // Нелинейная теория управления и ее приложения. М.: Физматлит, 2000. С. 57–126.

9. *Васильев В.И., Ильясов Б. Г.* Интеллектуальные системы управления. Теории и практика. М.: Радиотехника, 2009.

10. *Пегат А.* Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.

11. *Дружинина О.В., Масина О.Н.* Методы анализа устойчивости динамических систем интеллектуального управления. М.: Изд. группа URSS, 2016.

12. *Кожубаев Ю.Н., Семенов И.М.* Системы управления ленточным конвейером // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. 2(195). С. 181–186.

13. *Xianmin Ma, Xiongxiang Gao.* Coal belt conveyor PID controller parameter regulation with neural network // Applied Mechanics and Materials. 2013. V. 315. P. 583–589.

14. *Lutfy O.F., Selamat H., Mohd Noor S.B.* Intelligent modeling and control of a conveyor belt grain dryer using a simplified type 2 neuro-fuzzy controller // Drying Technology. 2015. V. 33. P. 1210–1222.

15. *Пертен Ю.А., Михайлова Е.А.* Крутонаклонные конвейеры и их применение // Процессы и аппараты пищевых производств. 2011. №2. С. 314–318.

16. *Druzhinina O.V., Masina O.N., Petrov A.A.* The synthesis of the switching systems optimal parameters search algorithms // Communications in Computer and Information Science (CCIS). 2019. V. 974. P. 306–320. DOI: 10.1007/978-3-030-10934-9_22.

17. *Druzhinina O.V., Masina O.N., Petrov A.A., Lisovsky E.V., Lyudagovskaya M.A.* Neural network optimization algorithms for controlled switching systems // Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC). 2020. V. 1225. P. 470–483.

Сведения об авторах:

Дружинина Ольга Валентиновна, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН), главный научный сотрудник.

Адрес: 119333 Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2.

Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН). Адрес: 117997, ул. Профсоюзная, д. 65.

Тел. +7(499)-135-62-60,

E-mail: ovdruzh@mail.ru.

Масина Ольга Николаевна, Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина (ЕГУ им. И.А. Бунина), зав. кафедрой математического моделирования и компьютерных технологий.

Адрес: 399770, Липецкая обл., г. Елец, ул. Коммунаров, 28.

Тел. (8) (47467) 2-24-26,

E-mail: olga121@inbox.ru.

Петров Алексей Алексеевич, Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина (ЕГУ им. И.А. Бунина), старший преподаватель.

Адрес: 399770, Липецкая обл., г. Елец, ул. Коммунаров, 28.

Тел. (47467) 2-24-26,

E-mail: xeal91@yandex.ru.