

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ПРИВОДОВ СКРЕБКОВОГО КОНВЕЙЕРА НА ОСНОВЕ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Ле Динь Хиеу<sup>1</sup>, А. Агабубаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: agabubaev.a@misis.ru

**Аннотация:** Рассмотрен подход к управлению режимами работы приводов скребкового конвейера на основе мягких вычислений для угледобывающей отрасли. Он основан на анализе состояния вопросов механизации и автоматизации в угольной промышленности Республики Вьетнам, в рамках этого подхода была определена важность развития транспортно-технологических комплексов, в первую очередь, забойных скребковых конвейеров, для повышения эффективности угледобычи. В ходе работы были рассмотрены основные проблемы, затрудняющие эффективное управление электроприводом конвейера, в различных условиях плановых нагрузок на транспортно-технологических узлах угольных шахт, представлена схема управления скребкового конвейера, проведено сравнение существующих алгоритмов оптимизации процесса плавного пуска электроприводов скребкового конвейера. Разработан метод управления на основе нечеткой логики для автоматического регулирования натяжения двух тяговых цепей скребкового конвейера (СК). В результате работы представлен механизм управления скоростью синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) с использованием многоцелевых алгоритмов оптимизации, которые включают набор параметров пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора (ПИД): метод роя частиц (МРЧ), оптимизации сбора бактерий (ОСБ) и нечеткой логики (НЛ), которые обеспечивают высокое качество переходных процессов по параметрам регулирования, а проведенный сравнительный анализ этих механизмов дает представление о достоверности результатов исследования.

**Ключевые слова:** скребковый конвейер, нечеткий регулятор, математическое моделирование, MATLAB, электропривод, динамический процесс, контроль запуска привода, контроль натяжения цепи, управление технологическим процессом.

**Для цитирования:** Ле Динь Хиеу, Агабубаев А. Разработка модели управления режимами работы приводов скребкового конвейера на основе мягких вычислений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 3. – С. 130–142. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_130.

### Modeling operation control of chain conveyor drives using soft computing

Le Din Hieu<sup>1</sup>, A. Agabubaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MI SiS», Moscow, Russia,  
e-mail: agabubaev.a@misis.ru

---

**Abstract:** The article discusses an approach to soft computing of operation control for chain conveyor drives in the coal mining industry. The proposed approach is based on the analysis of mechanization and automation practices in the coal industry in Vietnam. Within the framework of this approach, it is emphasized that it is important to expand the application range of mining machinery and, primarily, chain conveyors, to enhance efficiency of coal production. The article addresses the main constraints of the effective control over chain conveyor motor drives under conditions of various workloads at haulage points in coal mines, presents the chain conveyor control scheme and compares the existing optimization methods of smooth start of chain conveyor drives. The developed method of control is based on the fuzzy logic for the automated tension adjustment of two haulage chains of the conveyor. The velocity control mechanism of the permanent magnet synchronous motor (PMSM) uses multi-purpose optimization algorithms including a set of parameters of a proportional–integral–derivative controller (PID controller): particle array technique (PAT), optimized bacterial foraging (BF) and fuzzy logic (FL). These parameters ensure high quality of transient processes by the control options. The implemented comparative analysis of these mechanisms proves reliability of the research results.

**Key words:** chain conveyor, fuzzy controller, mathematical modeling, MATLAB, motor drive, dynamic process, drive start control, chain tension control, process flow control.

**For citation:** Le Din Hieu, Agabubaev A. Modeling operation control of chain conveyor drives using soft computing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(3):130-142. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_130.

---

## Введение

В странах с наиболее развитыми технологиями подземной угледобычи большая часть добываемого сырья обеспечивается комплексно-механизированными системами, оснащенными самопередвигающимися механизированными крепями, гидроприводом и скребковыми конвейерными устройствами, а во Вьетнаме до недавнего времени использовались преимущественно устаревшие технологии добычи угля, из-за чего производительность труда была весьма низкой и составляла 1,5–3 т в смену, а скорость отработки пластов составляла ~18–25 м/месяц. Во многом это объясняется необходимостью отработки крутопадающих пластов с повышенными требованиями к уровню механизации добычного оборудования и автоматизации управления процессами добычи. В рамках

перспективного плана компании «Винакомин» в период до 2025 г. рост добычи угля должен составить более 12%. При этом к 2025 г. уровень добычи угля подземным способом должен возрасти с 46% до 90%. Перспективный прогноз до 2040 г. подтверждает сохранение тенденции значительного преобладания подземной добычи над открытой.

Основываясь на приведенных показателях и особенностях производственных процессов на угольных шахтах Вьетнама, отметим, что разработка и внедрение современных транспортно-технологических систем подземной угледобычи является важной научно-технической задачей. Скребковый конвейер является центральной частью забойных механизированных систем, а его функциональной задачей является поддержание равномерного режима перемещения скреб-

ков вдоль желоба в условиях подачи угольной массы.

Данная задача не имеет простого решения, так как неравномерное поступление угольной массы на желоб ведет к возникновению динамической нестационарной нагрузки на приводы двигателей. Стохастический характер различных сил трения между перемещаемым углем, желобом и скребками, а также между всеми другими элементами этой системы, приводит к периодическим аварийным остановкам конвейера. Стопный характер движения скребковой конструкции вызывает в итоге сверхнормативные нагрузки нестационарного характера на отдельные элементы конвейерной цепи. В целом, речь идет о достаточно сложном объекте управления, часть параметров которого имеют существенно нелинейный характер. Известны различные подходы к управлению такого класса объектами. Среди них значительное место занимают алгоритмы управления, основанные на парадигме нечеткой логики. В последние десятилетия работоспособность классических нечетких регуляторов кардинально повысилась за счет развития нейро-нечетких подходов и применения для повышения адаптивной способности регуляторов методов генетической оптимизации.

#### **О некоторых подходах к оптимизации работы нечетких регуляторов сложных технологических процессов**

С момента появления нечетких множеств, введенных Л.А. Заде [9] в 1965 г., нечеткое управление стало новой парадигмой автоматизации. Его логическое обоснование можно резюмировать в заявлении Заде: «С ростом сложности точные утверждения теряют смысл, а значимые утверждения теряют точность». Отсюда следует, что нечеткое управление — это попытка решить проблемы

возрастающей сложности контролируемых процессов и задач, которые должны решать системы автоматического управления. Нечеткое управление может быть выгодной альтернативой традиционным методам управления, если выполняются следующие условия [2]:

- управляемый процесс демонстрирует ярко выраженное нелинейное поведение;
- отсутствует математическая модель процесса по причине высоких затрат на моделирование, или процесс недостаточно понятен;
- экспертные знания играют ключевую роль в управлении процессом и должны быть приобретены и использованы для автоматического управления;
- многомерная нелинейная зависимость (прим.: закон управления) должна быть представлена так, чтобы ее можно было легко понять и модифицировать.

Нечеткие системы управления можно рассматривать в различных аспектах: нечеткий регулятор — как нелинейный, описываемый лингвистическими правилами, а не дифференциальными уравнениями; систему — как реализацию экспертом стратегии управления. Понимание функционирования нечетких систем управления и ее взаимодействия с объектом и другими компонентами системы автоматического управления требует знания нечеткой логики и теории управления.

Предложенный Кеннеди, Эберхартом и Ши в 1995 г. [3] МРЧ стал эффективным стохастическим подходом к эволюционному моделированию. С тех пор он используется в различных областях применений и исследований, успешно предоставляя оптимизированные решения. Этот метод имитирует социальное поведение индивидуумов в стае птиц или косяков рыб, ищущих подходящее место для кормежки (глобальный опти-

мум). МРЧ не зависит ни от начальных условий, ни от знания точного градиента оптимизируемой функции. Поскольку он зависит только от значения целевой функции, МРЧ менее затратен и намного проще реализуется. Еще одно преимущество МРЧ — низкие требования к ЦП и памяти. Результаты экспериментов показывают, что способность локального поиска вокруг оптимумов очень плохая по сравнению с глобальным поиском МРЧ [5, 12, 16]. Это приводит к преждевременной конвергенции проблем, в которых существует несколько оптимумов и, следовательно, снижает производительность.

Еще одним эффективным алгоритмом оптимизации является алгоритм ОСБ, который недавно вошел в семейство природных алгоритмов оптимизации, таких как генетический алгоритм [17], эволюционное программирование [18] и эволюционная стратегия, доминирующих в эволюционном моделировании уже более пятидесяти лет. Пассино (Pasinio) в 2002 г. предложил ОСБ, следуя тенденции МРЧ [3] и муравьиного алгоритма, нашедших свое применение в этой сфере и доказавших свою эффективность в ней [15].

Ключевая идея этого алгоритма — применение стратегии группового кормодобывания роя бактерий *E. coli* с целью оптимизации мультиоптимальных функций. Бактерии ищут питательные вещества таким образом, чтобы получить максимальную энергию в единицу времени. Отдельная бактерия также общается с другими, посылая сигналы. Бактерия принимает решение о добыче пищи после рассмотрения двух предыдущих факторов. Процесс, в котором бактерия перемещается небольшими шагами в поисках питательных веществ, называется хемотаксисом и является ключевой идеей ОСБ — имитация метатоксического движения виртуальных бак-

терий в проблемном поисковом пространстве.

С момента своего создания ОСБ привлек внимание многих исследователей из различных областей знаний. ОСБ изрядно пытались объединить с другими алгоритмами, изучая тем самым отдельные его локальные и глобальные поисковые свойства. Алгоритм уже применяется ко многим реальным задачам и доказал свою эффективность на многих вариантах генетического алгоритма и МРЧ. Математическое моделирование, адаптация и модификация алгоритма могут стать важной частью исследований ОСБ в будущем.

### **Схема управления скребковым конвейером (СК)**

Схема управления содержит следующие основные блоки [1].

- Управляющее устройство (программируемый контроллер) — является исполнителем алгоритмов управления и контроля процесса транспортировки.

- Конвейерная полоса, включающая в себя цепь (предназначена для соединения скребков с приводом) и скребки (представлены пластинами, которые передают механическое воздействие материалу на момент его транспортировки).

- Датчики контроля процесса транспортировки:

- Д1 — датчик контроля скорости рабочего органа конвейера;

- Д2 — датчик температуры;

- Д3 — датчик заполнения спрессованной горной массой полостей и зазоров;

- Д4 — датчик обрыва цепи.

- Приводная станция представлена сочетанием электрического двигателя и привода, который передает вращение.

- Концевая головка предназначена для передачи усилия на основной элемент конструкции.

На рис. 1 представлена блок-схема процесса организации управления СК.

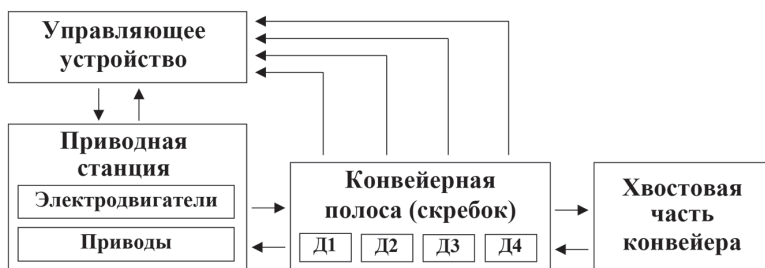


Рис. 1. Блок-схема организации управления СК  
 Fig. 1. Chain conveyor control flowchart

В настоящее время перспектива повышения эффективности и надежности процесса управления СК связана с возможностью изменять пусковые режимы многоприводных конвейеров путем управления электродвигателями головного и хвостового приводов (рис. 2), в т.ч. путем последовательного включения первой и второй скоростей.

Однако, помимо реализации максимально безопасного старт-стопного режима работы приводов концевых вращателей, необходимо обеспечить управление скоростью вращения, а точнее, стабилизацию скорости в условиях переменной нагрузки на привод, вызванный постоянно изменяющимся уровнем

загруженности желоба конвейера отбитым углем.

### Адаптивный нечеткий ПИД-регулятор скорости синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ)

- Блок-схема системы векторного управления СДПМ на основе регулятора НЛ-ПИД [6] показана на рис. 3. Регулятор скорости представляет собой каскад регуляторов НЛ-ПИД, параметры которого изменяются в зависимости от состояния системы, что позволяет улучшить ее динамические характеристики. Он также содержит обычный ПИД-ре-

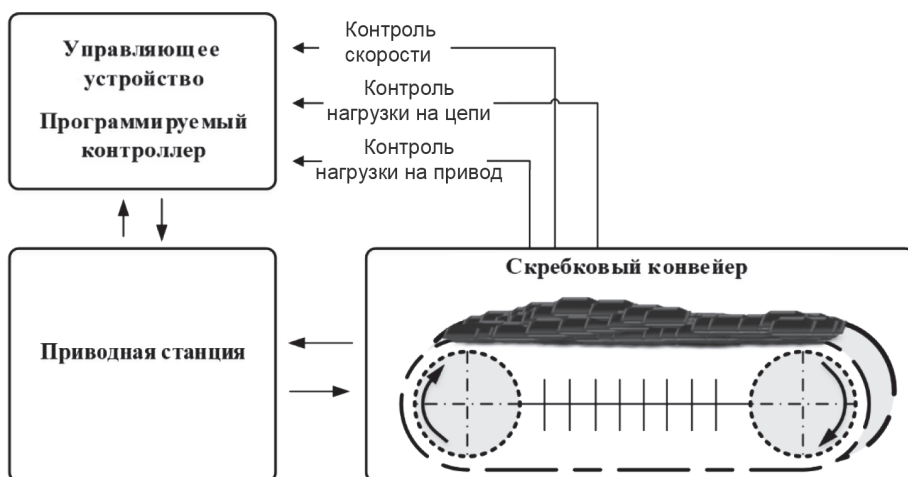


Рис. 2. Схема организации управления СК  
 Fig. 2. Chain conveyor control structure

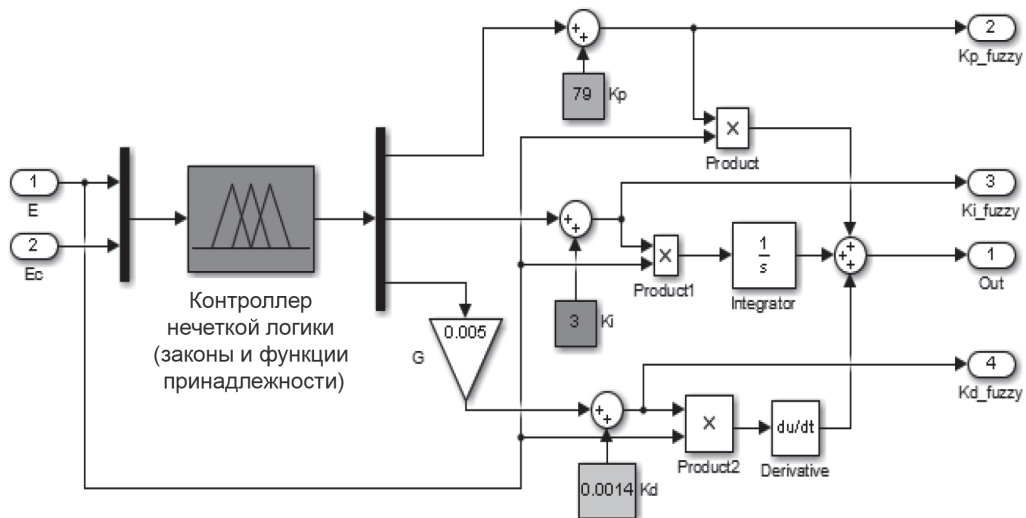


Рис. 3. Моделирование каскадной структуры регулятора НЛ-ПИД в программе Matlab/Simulink R2016  
 Fig. 3. Modeling tandem structure of FL-PID controller in Matlab/Simulink R2016

гулятор и систему логического вывода нечеткой логики. Проектная работа включает в себя следующие аспекты:

- начальные параметры  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  условного ПИД;
- функции принадлежности системы нечеткого вывода;
- нечеткие управляющие правила;

- масштабные коэффициенты ввода:  $E$ ,  $E_c$ .

Начальные параметры обычного ПИД выбираются либо на основе опытных данных, либо могут быть рассчитаны при помощи процедуры, описанной в работах [10]. На практике результаты могут быть применены непосредствен-

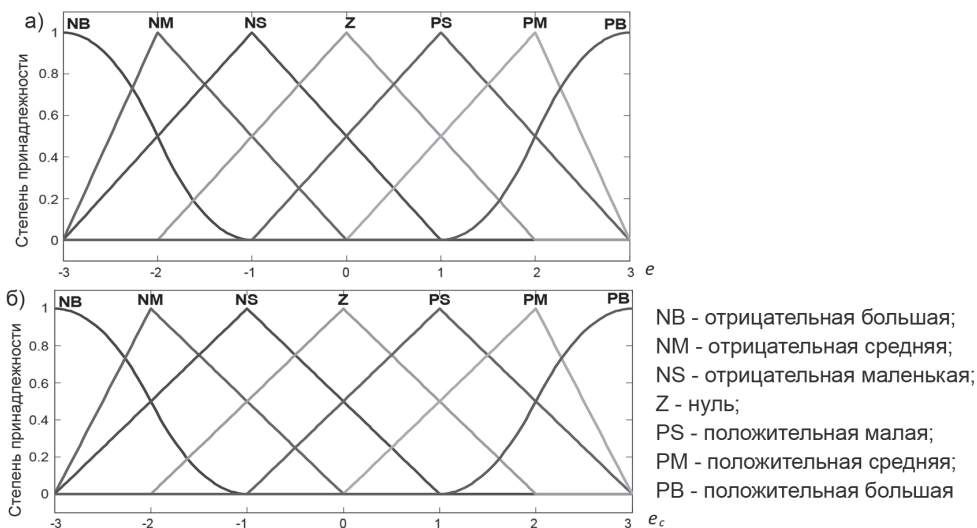


Рис. 4. Функции принадлежности для входов:  $E$  (а) и  $E_c$  (б)  
 Fig. 4. Membership functions for inlets:  $E$  (a) and  $E_c$  (b)

но к системе управления с использованием обычного ПИД-регулятора, но для нечеткого ПИД-регулятора они являются просто начальными значениями, а именно:  $K_p = 79,0$ ;  $K_i = 3,0$ ;  $K_d = 0,0014$ .

Функции принадлежности нечеткого регулятора Мамдани для ввода отображают нормированную ошибку скорости ( $E$ ) и частоту изменения ошибок ( $E_c$ ). Существует семь лингвистических переменных: положительная большая ( $PL$ ), положительная средняя ( $PM$ ), положительная маленькая ( $PS$ ), нулевая ( $ZO$ ), отрицательная маленькая ( $NS$ ), отрицательная средняя ( $NM$ ), отрицательная большая ( $NL$ ). Входные и выходные функ-

ции принадлежности изображены на рис. 4 и рис. 5 соответственно. Они состоят из треугольных и сигмоидальных функций принадлежности.

Входные функции принадлежности характеризуются тем, что нечеткий регулятор становится менее чувствительным, когда входное значение относительно малое. Другими словами, если скорость двигателя близка к опорному значению, обычные ПИД параметры остаются стабильными, так что колебания скорости двигателя ограничены, и стационарное состояние гарантируется.

Как в случае выходных функций принадлежности, когда  $E$  и  $E_c$  остаются

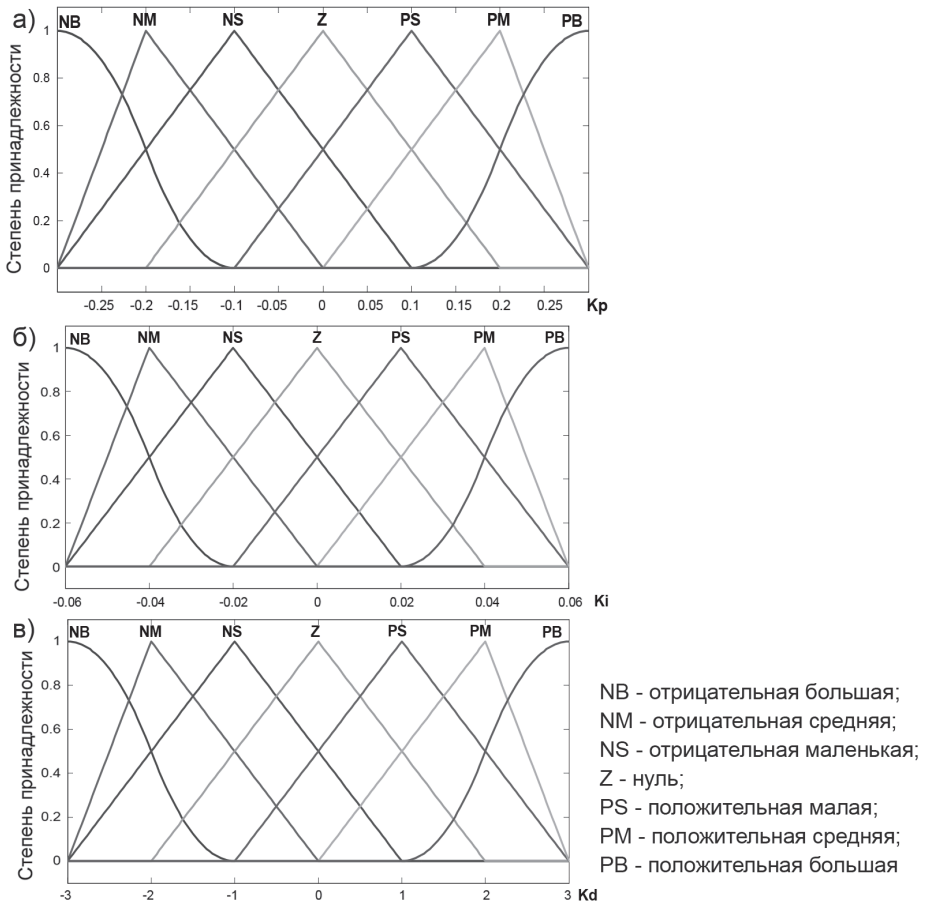


Рис. 5. Функции принадлежности для выходов:  $K_p$  (а),  $K_i$  (б),  $K_d$  (в)

Fig. 5. Membership functions for outlets:  $K_p$  (a),  $K_i$  (b),  $K_d$  (v)

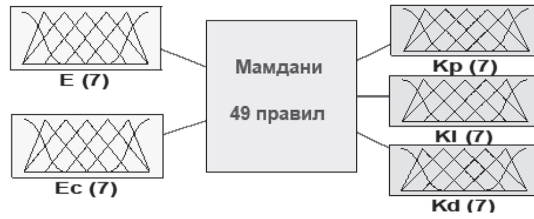


Рис. 6. Нечеткое правило для выходов  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$   
 Fig. 6. Fuzzy condition for outlets  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$

маленькими, начальное значение коррекции ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) изменяется. По сравнению с функциями принадлежности, принятыми в [4], функции фокусируются не только на динамических характеристиках, но и на стационарных характеристиках системы.

### Построение нечеткого регулятора и цифровой модели

Связь между входами и выходами, которые зависят от фундаментальных знаний и опыта экспертов, несомненно, важны для нечеткого регулятора. Путем введения разумных логических правил управления можно получить хорошие результаты, схема организации нечетких правил представлена на рис. 6.

$E = 10$ ;  $E_c = 10$ ;  $K_p = [-0,3; 0,3]$ ;  $K_i = [-0,06; 0,06]$ ;  $K_d = [-3; 3]$ ; число законов составляет 49 законов ( $7 \cdot 7 = 49$  законов).

Производительность системы будет гарантирована. Согласно большому ко-

личеству экспериментальных результатов, правила нечеткого управления, подходящие для системы, показаны в табл. 1. Как показано, для  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  используются одни и те же правила ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – коэффициент пропорциональности, интегральный коэффициент и дифференциальный коэффициент соответственно).

В итоге была сформирована имитационная модель (рис. 7), которая использовалась для моделирования различных алгоритмов управления СДПМ и оперативной подстройки параметров ПИД-регулятора.

### Итоговые результаты

В ходе проведения компьютерных экспериментов исследовались различные схемы управления, в том числе схемы с адаптивной настройкой параметров ПИД-регулятора с использованием описанных ранее алгоритмов эволюционной оптимизации, основные идеи при-

Таблица 1

Нечеткие правила управления для  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$   
 Fuzzy control conditions for  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$

$E \backslash E_c$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
Z	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NS	NS	ZO	PS	PM	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
PB	ZO	ZO	PM	PM	PB	PB	PB



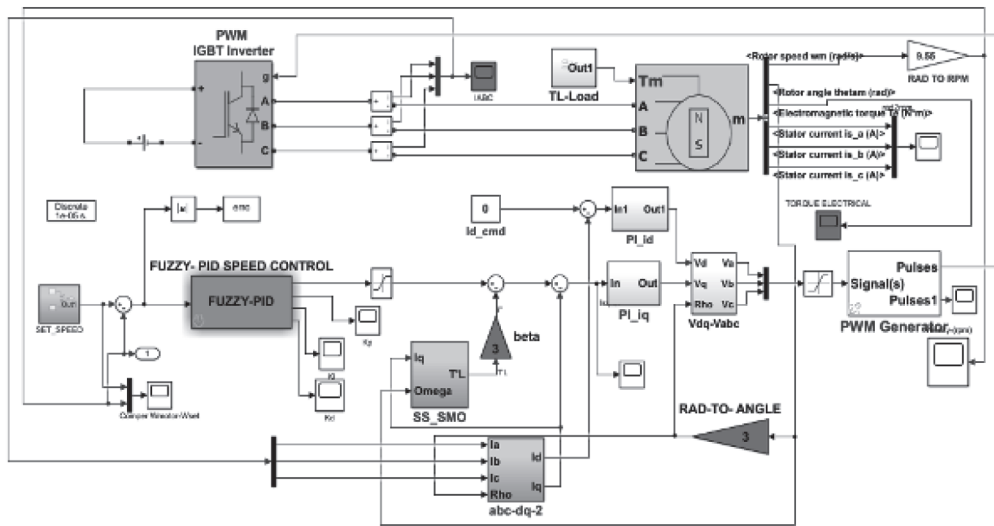


Рис. 7. Моделирование СДПМ с использованием НЛ-ПИД-регулятора в программе Matlab/Simulink R2016  
 Fig. 7. Modeling PMSM using FL-PID controller in Matlab/Simulink R2016

менения которых описаны в статьях [1, 7]. Полученные результаты оценки качества алгоритмов НЛ-ПИД, МРЧ-ПИД, ОСБ-МРЧ-ПИД представлены в табл. 2. В ней также даны сравнительные результаты различных критериев трех алгоритмов по контролю стабильности скорости СДПМ скребкового конвейера. Из табл. 2 видно, что коэффициент ошибки регулятора ОСБ-МРЧ-ПИД ниже, чем у регуляторов НЛ-ПИД и МРЧ-ПИД; у ПИД-регулятора и МРЧ-ПИД коэффициент ниже, чем у НЛ-ПИД и, наконец, у НЛ-ПИД ниже, чем у ПИД-регулятора.

Таким образом, опираясь на полученные нами результаты оценок качества управления скоростью СК с мягкими вычислительными алгоритмами, делаем вывод о том, что регулятор ОСБ-МРЧ-ПИД является наиболее качественным для управления СК.

### Заключение

По результатам проведенной работы достигнуто следующее:

- Проведен анализ состояния вопросов механизации и автоматизации в угольной промышленности Республики

Вьетнам с целью определения ключевых траекторий развития транспортно-технологических комплексов, в частности, забойных скребковых конвейеров.

- Разработан метод управления на основе нечеткой логики для автоматического регулирования натяжения двух тяговых цепей СК. Имитационная модель показала, что данный подход дает минимальное натяжение в основных точках цепи, в зависимости от нагрузки конвейера и его величины уклона.

- Сравнительный анализ показал, что механизмы управления скоростью СДПМ с использованием многоцелевых алгоритмов оптимизации с набором параметров ПИД (МРЧ-ПИД, ОСБ-МРЧ-ПИД и НЛ-ПИД) являются работоспособными, обеспечивают высокое качество переходных процессов по параметрам регулирования.

### Вклад авторов

Ле Динь Хиеу — генерация идеи, разработка модели и проведение моделирования;

Агабубаев Аслан — постановка задачи, подготовка материалов к публикации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ле Динь Хиеу, Темкин И. О., До Лич Тхань, Агабубаев А. Оптимизация управления режимами пуска скребкового конвейера на основе анализа результатов имитационного моделирования // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. — 2020. — № 2 (50). — С. 10 — 21. DOI: 10.21672/2074-1707.2020.50.2.010-021.
2. Angeline P. Evolutionary optimization versus particle swarm optimization: philosophy and performance difference / Proceedings of the 7th Annual Conference on Evolutionary Programming. 1998, pp. 601 — 610. DOI: 10.1007/BFb0040811.
3. Francesco G., Riccardo Z., Marco M., Davide C. Genetical swarm optimization of multi-hop routes in wireless sensor networks // Applied Computational Intelligence and Soft Computing. 2010, vol. 2010, pp. 1 — 14. DOI: 10.1155/2010/523943.
4. Chen J., Mohammad N. O., Morteza A., Xin Y. Knowledge-based particle swarm optimization for PID controller tuning / 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). 2017, pp. 1819 — 1826. DOI: 10.1109/CEC.2017.7969522.
5. Das S., Biswas A., Dasgupta S., Abraham A. Bacterial foraging optimization algorithm: theoretical foundations, analysis and applications // Foundations of computational intelligence. 2009, vol. 3, pp. 23 — 55. DOI: 10.1007/978-3-642-01085-9\_2.
6. Electric W. WEG Electric Innovation the W22 Magnet Drive System. Available at: <https://est-aegis.info/2018/03/weg-electric-innovation-w22-magnet-drive-system/>, 2018.
7. Hieu L., Temkin I. Application of adaptive PSO and Adaptive fuzzy logic controllers to speed control PMSM motor servo systems // MATEC Web of Conferences. 2018, vol. 220, no. 5, article 08003. DOI: 10.1051/mateconf/201822008003.
8. Temkin I., Deryabin S., Konov I. Soft computing models in an intellectual open-pit mines transport control system // Procedia Computer Science. 2017, vol. 120, pp. 411 — 416. DOI: 10.1016/j.procs.2017.11.257.
9. James K., Russell E. Particle swarm optimization // Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks. 1995, vol. 4, pp. 1942 — 1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
10. Majidian A., Saidi M. H. Comparison of fuzzy logic and neural network in life prediction of boiler tubes // International Journal of Fatigue. 2007, vol. 29, no. 3, pp. 489 — 498. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2006.05.001.
11. Polikarpova M., Lindh P., Tapia J., Pyrhönen J. Application of potting material for a 100 kW radial flux PMSM / 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM). 2014, pp. 2146 — 2151. DOI: 10.1109/ITEC.2017.7993349.
12. Sivanandam S., Deepa S. Genetic algorithms / Introduction to genetic algorithms. Springer, 2008, pp.15 — 37.
13. Temkin I., Deryabin S., Konov I., Kim M. Possible architecture and some neuro-fuzzy algorithms of an intelligent control system for open pit mines transport facilities // Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. 2019, vol. 320, pp. 412 — 420. DOI: 10.3233/FAIA190205.
14. Ehsan V., Shahram M., Saeed T. Improved cuckoo search algorithm for feedforward neural network training // International Journal of Artificial Intelligence & Applications. 2011, vol. 2, no. 3, pp. 36 — 43. DOI: 10.5121/ijai.2011.2304.
15. Vinacomin Mechanical products: information site: [website]. Available at: <http://tapchi-congthuong.vn/bai-viet/san-pham-co-khi-cua-vinacomin-34531.htm>
16. Yao X., Liu Y., Lin G. Evolutionary programming made faster // IEEE Transactions on Evolutionary computation. 1999, vol. 3, no. 2, pp. 82 — 102. DOI: 10.1109/4235.771163.
17. Yang X.-S., Deb S. Cuckoo search via Lévy flights / 2009 World congress on nature & biologically inspired computing (NaBIC). 2009, pp. 210 — 214. DOI: 10.1109/NABIC.2009.5393690.
18. Yang X.-S., Deb S. Multiobjective cuckoo search for design optimization // Computers & Operations Research. 2013, vol. 40, no. 6, pp. 1616 — 1624. DOI: 10.1016/j.cor.2011.09.026.

19. Ещин Е. К. Моделирование и управление динамическим состоянием скребковых конвейеров // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2015. — № 2 (108). — С. 118–122.

20. Ещин Е. К. Управление динамической нагруженностью забойных скребковых конвейеров // Записки Горного института. — 2019. — Т. 239. — С. 570–575.

21. Казанин О. И., Ле Ван Хау Состояние и перспективы развития технологий подземной добычи угля в бассейне Куангнинь Вьетнама // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 5. — С. 15–20.

22. Кожушко Г. Г., Лукашук О. А. Расчет и проектирование ленточных конвейеров. Учебно-методическое пособие. — Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2016. — 232 с. **УДК**

## REFERENCES

1. Le Dinh Hieu, Temkin I. O., Do Lich Thanh, Agabubaev A. Optimization of the control of the start-up modes of the scraper conveyor based on the analysis of simulation results. *Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2020, no. 2 (50), pp. 10–21. DOI: 10.21672/2074-1707.2020.50.2.010-021.

2. Angeline P. Evolutionary optimization versus particle swarm optimization: philosophy and performance difference. *Proceedings of the 7th Annual Conference on Evolutionary Programming*. 1998, pp. 601–610. DOI: 10.1007/BFb0040811.

3. Francesco G., Riccardo Z., Marco M., Davide C. Genetical swarm optimization of multi-hop routes in wireless sensor networks. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*. 2010, vol. 2010, pp. 1–14. DOI: 10.1155/2010/523943.

4. Chen J., Mohammad N. O., Morteza A., Xin Y. Knowledge-based particle swarm optimization for PID controller tuning. *2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. 2017, pp. 1819–1826. DOI: 10.1109/CEC.2017.7969522.

5. Das S., Biswas A., Dasgupta S., Abraham A. Bacterial foraging optimization algorithm: theoretical foundations, analysis and applications. *Foundations of computational intelligence*. 2009, vol. 3, pp. 23–55. DOI: 10.1007/978-3-642-01085-9\_2.

6. Electric W. *WEG Electric Innovation the W22 Magnet Drive System*. Available at: <https://est-aegis.info/2018/03/weg-electric-innovation-w22-magnet-drive-system/>, 2018.

7. Hieu L., Temkin I. Application of adaptive PSO and Adaptive fuzzy logic controllers to speed control PMSM motor servo systems. *MATEC Web of Conferences*. 2018, vol. 220, no. 5, article 08003. DOI: 10.1051/mateconf/201822008003.

8. Temkin I., Deryabin S., Konov I. Soft computing models in an intellectual open-pit mines transport control system. *Procedia Computer Science*. 2017, vol. 120, pp. 411–416. DOI: 10.1016/j.procs.2017.11.257.

9. James K., Russell E. Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks*. 1995, vol. 4, pp. 1942–1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.

10. Majidian A., Saidi M. H. Comparison of fuzzy logic and neural network in life prediction of boiler tubes. *International Journal of Fatigue*. 2007, vol. 29, no. 3, pp. 489–498. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2006.05.001.

11. Polikarpova M., Lindh P., Tapia J., Pyrhönen J. Application of potting material for a 100 kW radial flux PMSM. *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2014, pp. 2146–2151. DOI: 10.1109/ITEC.2017.7993349.

12. Sivanandam S., Deepa S. Genetic algorithms. *Introduction to genetic algorithms*. Springer, 2008, pp. 15–37.

13. Temkin I., Deryabin S., Konov I., Kim M. Possible architecture and some neuro-fuzzy algorithms of an intelligent control system for open pit mines transport facilities. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. 2019, vol. 320, pp. 412–420. DOI: 10.3233/FAIA190205.

14. Ehsan V., Shahram M., Saeed T. Improved cuckoo search algorithm for feedforward neural network training. *International Journal of Artificial Intelligence & Applications*. 2011, vol. 2, no. 3, pp. 36 – 43. DOI: 10.5121/ijaia.2011.2304.

15. *Vinacomin Mechanical products: information site*. Available at: <http://tapchicongthuong.vn/bai-viet/san-pham-co-khi-cua-vinacomin-34531.htm>

16. Yao X., Liu Y., Lin G. Evolutionary programming made faster. *IEEE Transactions on Evolutionary computation*. 1999, vol. 3, no. 2, pp. 82 – 102. DOI: 10.1109/4235.771163.

17. Yang X.-S., Deb S. Cuckoo search via Lévy flights. *2009 World congress on nature & biologically inspired computing (NaBIC)*. 2009, pp. 210 – 214. DOI: 10.1109/NABIC.2009.5393690.

18. Yang X.-S., Deb S. Multiobjective cuckoo search for design optimization. *Computers & Operations Research*. 2013, vol. 40, no. 6, pp. 1616 – 1624. DOI: 10.1016/j.cor.2011.09.026.

19. Eshchin E. K. Modeling and control of the dynamic state of scraper conveyors. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015, no. 2 (108), pp. 118 – 122.

20. Eshchin E. K. Management of dynamic loading of downhole scraper conveyors. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 239, pp. 570 – 575.

21. Kazanin O. I., Le Van Hau The state and prospects of development of underground coal mining technologies in the Quang Ninh basin of Vietnam. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no. 5, pp. 15 – 20.

22. Kozhushko G. G., Lukashuk O. A. *Raschet i proektirovanie lentochnykh konveyerov*. Uchebno-metodicheskoe posobie [Calculation and design of belt conveyors. Educational and methodological manual], Ekaterinburg, Izd-vo Ural'skogo universiteta, 2016, 232 p. [In Russ].

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ле Динь Хиеу<sup>1</sup> – аспирант,  
e-mail: hieuhuech@gmail.com,

Агабубаев Аслан<sup>1</sup> – старший преподаватель,  
e-mail: agabubaev.a@misis.ru,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

**Для контактов:** Агабубаев А., e-mail: agabubaev.a@misis.ru.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Le Din Hieu<sup>1</sup>, Graduate Student,  
e-mail: hieuhuech@gmail.com,

A. Agabubaev<sup>1</sup>, Senior Lecturer,  
e-mail: agabubaev.a@misis.ru,

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISiS»,  
119049, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** A. Agabubaev, e-mail: agabubaev.a@misis.ru.

Получена редакцией 24.11.2021; получена после рецензии 10.12.2021; принята к печати 10.02.2022.

Received by the editors 24.11.2021; received after the review 10.12.2021; accepted for printing 10.02.2022.

