

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

DOI 10.21672/2074-1707.2020.50.2.010-021
УДК 004.942

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ПУСКА СКРЕБКОВОГО КОНВЕЙЕРА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Статья получена редакцией 12.02.2020, в окончательном варианте – 23.05.2020.

Ле Динь Хиеу, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119049, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский проспект, 4, HueIC-Vietnam, аспирант, e-mail: hieuhuech@gmail.com

Темкин Игорь Олегович, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119049, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский проспект, 4, доктор технических наук, профессор, e-mail: igortemkin@yandex.ru

До Тхань Лич, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119049, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский проспект, 4, аспирант, e-mail: lichdalat@gmail.com

Агабубаев Аслан Такабудинович, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119049, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский проспект, 4, аспирант, e-mail: agabubaev@yandex.ru

В статье рассмотрены основные принципы управления динамическими характеристиками скребкового конвейера, проведено моделирование различных режимов пуска скребкового конвейера. Целью работы является проведение сравнительного анализа современных режимов пуска скребкового конвейера для определения наиболее безопасного и надежного способа регулирования ключевых параметров конвейерной установки. На основе технических характеристик СК типа SGZ-800/630 и параметров работы конвейера на выемочных участках было проведено моделирование различных режимов пуска в среде моделирования динамических систем Simulink (MATLAB). Выполнен анализ процесса управления динамическими характеристиками входного сигнала, проведено имитационное моделирование начальных характеристик пуска скребкового конвейера, которое позволило выделить характеристики, оказывающие наибольшее влияние на процесс пуска системы в целом. В результате исследований установлено, что управление скребковым конвейером с использованием двухступенчатого пуска является наиболее эффективным способом. Оно позволяет значительно снизить уровень колебания натяжения цепи и повысить надежность работы установки при критических моментах нагрузки.

Ключевые слова: скребковый конвейер, контроль запуска, контроль натяжения цепи, математическое моделирование, динамический процесс, промышленный конвейер, моделирование в MATLAB, электропривод

OPTIMIZATION OF SCRAPER CONVEYOR RUN MODES CONTROL BASED ON THE ANALYSIS OF IMITATION MODELLING

The article was received by the editorial board on 12.02.2020, in the final version – 23.05.2020.

Le Dinh Hieu, National University of Science and Technological “MISiS”, 4 Leninskiy Prospekt, Moscow, 119049, Russian Federation, HueIC-Vietnam, postgraduate student, e-mail: hieuhuech@gmail.com

Temkin Igor O., National University of Science and Technological “MISiS”, 4 Leninskiy Prospekt, Moscow, 119049, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: igortemkin@yandex.ru

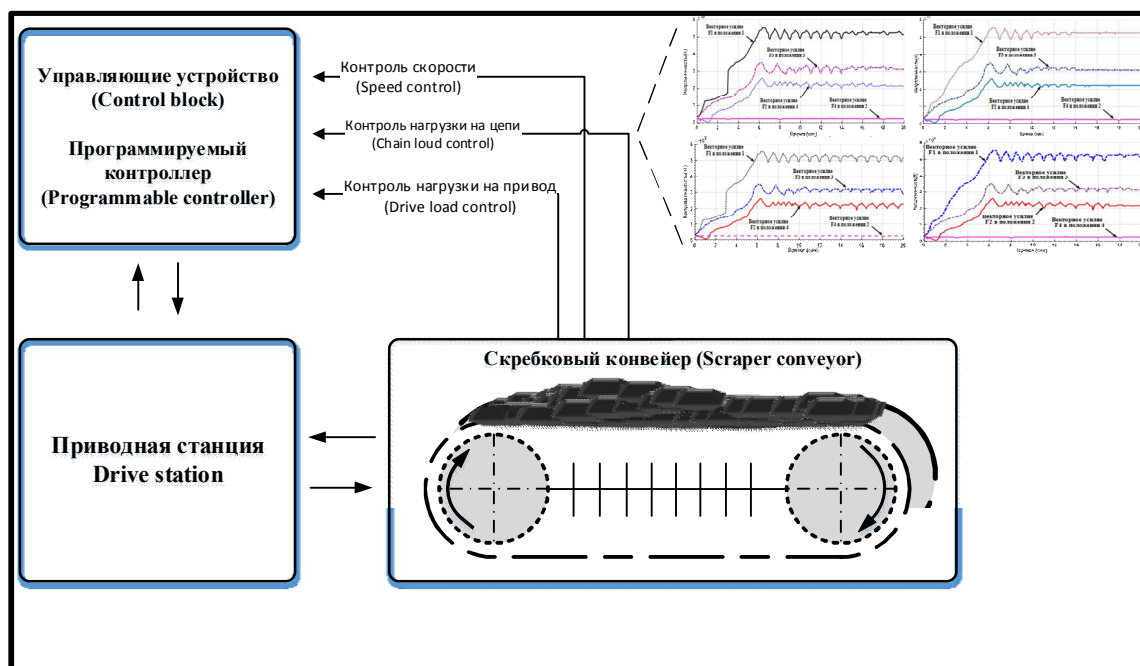
Do Thanh Lich, National University of Science and Technological “MISiS”, 4 Leninskiy Prospekt, Moscow, 119049, Russian Federation, postgraduate student, e-mail: lichdalat@gmail.com

Agabubaev Aslan T., National University of Science and Technological “MISiS”, 4 Leninskiy Prospekt, Moscow, 119049, Russian Federation, postgraduate student, e-mail: agabubaev@yandex.ru

The article discusses the basic principles of controlling the dynamic characteristics of the scraper conveyor, modeling of various modes of starting the conveyor. The purpose of this research work is to conduct a comparative analysis of modern start-up modes of the scraper conveyor, to determine the safest and most reliable way to control key parameters of the conveyor installation. Based on the technical characteristics of the scraper conveyor type SGZ-800/630 and the parameters of the conveyor in the excavation areas, various modes of the scraper conveyor start-up were simulated in the dynamic simulation environment of complex Simulink systems (MATLAB). As a result of the research, an analysis of the control of the dynamic characteristics of the input signal is shown, a simulation of the initial characteristics of the start-up of the scraper conveyor is carried out, which made it possible to single out the characteristics that have a greater influence on the process of starting the system as a whole. Upon completion of the work, it was revealed that the control of the scraper conveyor using a two-stage start-up is the most effective way, it can significantly reduce the level of fluctuations in the chain tension and increase the reliability of the installation at critical load moments.

Keywords: scraper conveyor, start control, chain tension control, mathematical modeling, dynamic process, industrial conveyor, modeling in MATLAB, electric drive

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. В настоящее время Вьетнам является одной из быстроразвивающихся стран. Рост экономических показателей страны в значительной степени опирается на потенциал горнодобывающей отрасли. Развитие современных промышленных предприятий страны напрямую зависит от эффективного освоения богатых угольных месторождений, которые во Вьетнаме разрабатываются подземным способом. Потенциал темпов развития экономики страны определяется с учетом результатов анализа горно-геологических условий залегания угольных пластов. Эти результаты показывают, что общие ресурсы наиболее крупного угольного бассейна Куанг Нинь составляют более 3,6 млрд тонн. Однако извлечение этих запасов требует использования адекватных технических решений, позволяющих обеспечить достаточно высокую производительность труда. В данной статье мы рассматриваем вопрос автоматизации одного из комплексных транспортно-технологических процессов подземной добычи угля в сложных горно-геологических условиях республики.

В угледобывающей промышленности Вьетнама сегодня можно выделить более 20 крупных шахт. Семь из них имеют производственную мощность более 2 миллионов тонн в год: Мао Кхе, Ванг Данх, Нам Мау, Ха Лам, Мон Дуонг, Кхе Чам и Дуонг Хай. Уровень добычи на других угледобывающих предприятиях составляет 800 000 тонн – 1 миллион тонн в год. На рисунке 1 представлена карта расположения крупнейших горнодобывающих предприятий Вьетнама.

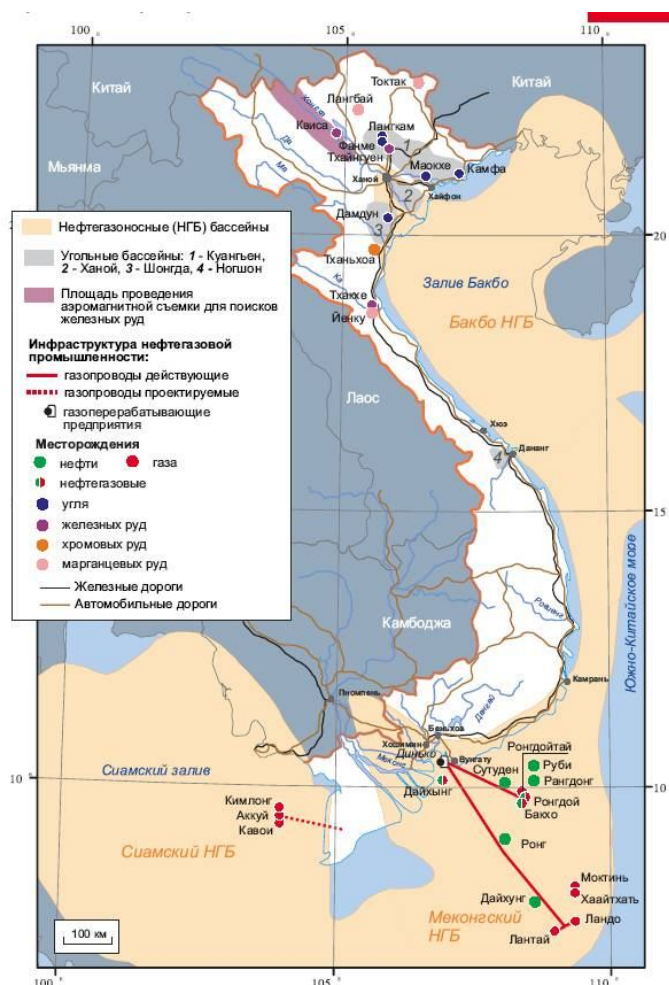


Рисунок 1 – Крупнейшие горнодобывающие предприятия во Вьетнаме

Как видно из рисунка, угольные месторождения расположены преимущественно на Севере, Северо-Востоке и в центральной части страны. Специфика данных областей – гористая местность. Это, в свою очередь, определяет сложные горно-геологические условия освоения угольных бассейнов. В подобных условиях при подземном способе разработки месторождений, горнодобывающие предприятия для повышения производительности и безопасности добычи угля, активно внедряют современные средства механизации горных работ. В частности, делается акцент на повышение надежности транспортировочных комплексов. Их модернизация позволит расширить зону эксплуатации месторождений и оптимизирует производственные этапы, включающие процессы отработки и выемки породы в забоях. Эффективное внедрение современных программно-технических средств предполагает рациональный выбор режимов работы технологического оборудования для обеспечения надежности его эксплуатации. В свою очередь выбор таких режимов требует комплексного анализа процессов работы оборудования, проведения математического моделирования и/или выполнения натурных экспериментов над ним.

Рост технологического потенциала отрасли обеспечивается за счет внедрения механизированной и других современных технологий выемки угля. Сравнительный анализ показывает следующее:

- рост нагрузки при механизированной отработке на очистных забоях превышает предыдущие показатели в 1,32–3,17 раз [7];
- удельная протяженность подготовленных выработок в механизированных забоях возросла на 44–61 % по сравнению с забоями, разрабатываемыми на основе применения буровзрывного способа отработки [7];
- производительность труда при механизированных способах выемки повысилась в 1,5–4 раза по сравнению с гидравлическим и буровзрывным способами выемки.

Дальнейшее увеличение объемов добычи угля требует расширения зоны очистных работ и оптимизации процессов на всех этапах работы на забойных участках, включая повышение производительности и эффективности транспортных операций [2, 3].

Одним из надежных и эффективных элементов процесса транспортировки угля на шахтах Вьетнам являются «скребковые конвейеры» (СК). Данная технология обладает рядом достоинств: гибкая настройка длины конвейера, удобное интегрирование в конструкцию крепи, возможность использования комбайна в качестве опоры, высокая производительность.

Однако в процессе эксплуатации забойных СК обозначился ряд проблем, связанных со сложностью запуска загруженных конвейеров и недостаточной надежностью электроприводов, которые при высокой нагрузке выходят из строя. Большинство случаев, связанных с поломкой конвейерной установки, относятся к неисправности тягового органа. Данная проблема требует исследования режимов пуска и торможения цепи, поскольку именно в эти моменты образуются наиболее высокие динамические усилия, которые влияют на прочность и надежность работы установки в целом.

Схема управления СК включает следующие основные блоки:

- управляющее устройство (программируемый контроллер), является исполнителем алгоритмов управления и контроля процесса транспортировки;
- конвейерная лента, 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 рисунке 2 представлена блок-схема процесса организации управления СК.

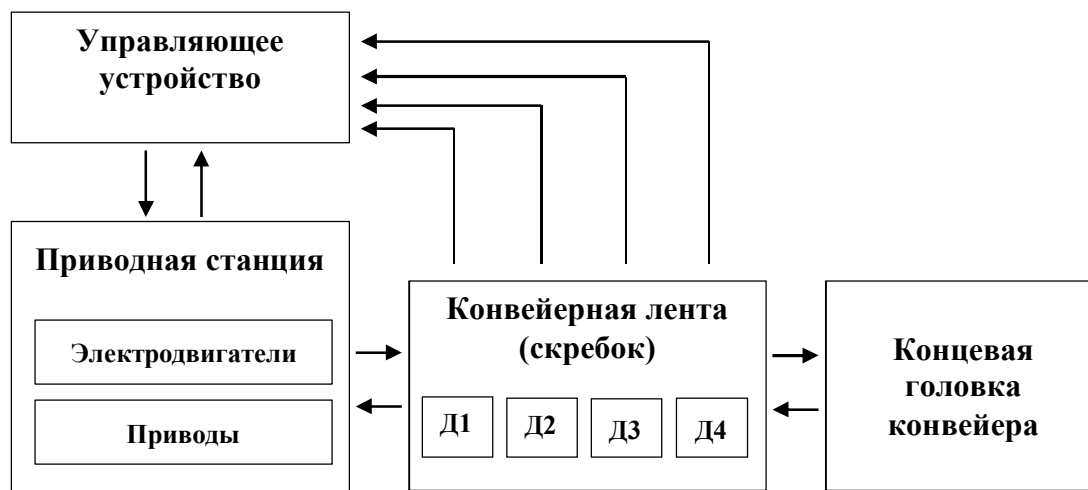


Рисунок 2 – Блок-схема организации управления СК

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, в том числе путем последовательного включения первой и второй скоростей. Нами было проведено теоретическое исследование режимов управления СК с целью построения более эффективных алгоритмов пуска и остановки конвейерной ленты.

Материалы и методы. Основные динамические характеристики СК: натяжение, скорость, смещение, ускорение и общее сопротивление движению. В качестве внешних возмущающих воздействий рассматриваются движущая сила, тормозное усилие, эффект многоугольника, смещение с автоматической регулировкой системы натяжения, изменения объема породы на конвейере

и другие факторы, которые напрямую влияют на нагрузки [4, 12]. Основная задача управления динамическими характеристиками СК заключается в контроле запуска установки в соответствии с разницей между установленным выходным заданием и фактическим выходом. При этом необходимо, чтобы выходные параметры удовлетворяли определенным требованиям [5]. В данной работе рассматривается решение задачи двухступенчатого пуска СК, что в конечном итоге сводится к поиску оптимальных характеристик выходного сигнала на приводные установки [12].

Суть двухступенчатого пуска заключается в следующем. Цепное колесо СК работает на низкой скорости в течение некоторого времени, затем начинает ускоряться и в результате достигает стабильной скорости вращения V_1 (м/с) [6]. Схематически этот процесс показан на рисунке 3.

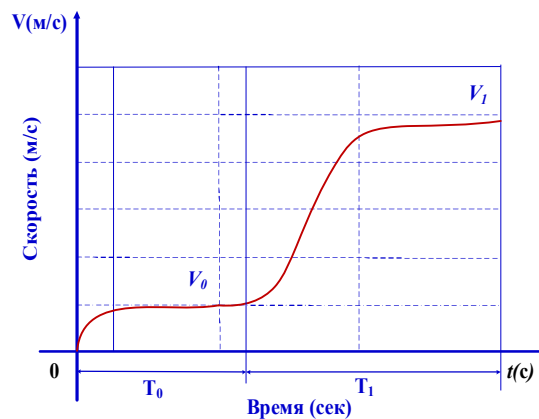


Рисунок 3 – Управляемая стартовая оптимизированная кривая

Как показано на этом рисунке, $V_0 = 0,1 \times V_1$ и $V_0 \times T_0 \geq \Delta l$, где V_0 – начальная скорость медленного пуска на первом уровне, T_0 – время пуска при скорости V_0 ; Δl – минимальный путь, проходимый СК (расстояние пробега), который больше или равен упругому удлинению цепи.

Из-за сложности математической модели системы СК оптимизация процесса пуска конвейера по параметру скорости рассматривается с применением теории вязкоупругой динамики. Предполагается, что конвейер предварительно запускается последовательными микроперемещениями перед полным пуском. При запуске СК направление силы трения не изменяется, а цепь рассматривается как линейное вязкоупругое тело. Сегмент соединения звеньев цепи может быть описан моделью Фойгта [10, 12–14, 18]. Предполагается, что сила тяги, действующая по данной модели, и изменение отклика представляются в виде синусоидальной функции и между ними существует разность фаз φ_0 [6, 14, 18]:

$$F = F_0 \cdot e^{j\omega \cdot t} = E \cdot dl + \eta \frac{d(dl)}{dt} = (E \cdot l_0 + j \cdot \eta \cdot \omega \cdot l_0) \cdot e^{j\omega \cdot t}, \quad (1)$$

$$dl = dl_0 \cdot e^{j\omega \cdot t - \varphi_0} = l_0 \cdot e^{j\omega \cdot t}$$

где F – упругое удлинение цепи под действием нагрузки:

$$L_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n l_{0i} = F_0 * \sum_{i=1}^n I_{ai} \cdot e^{-j\varphi_i} = I_{\Sigma} * F_0 = I_{\Sigma} * L_{\Sigma} * E_{ai(\omega)} e^{-j\varphi_{\Sigma(\omega)}}. \quad (2)$$

Приложенная нагрузка выражается произвольной периодической функцией. Далее представлено разложение функции в ряд Фурье:

$$F_{(t)} = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} c_n \cdot e^{j\omega_0 \cdot n \cdot t}; \quad c_n = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} F_{(t)} \cdot e^{-j\omega_0 \cdot n \cdot t}; \quad \omega_0 = \frac{2}{\pi}. \quad (3)$$

Положительная частота в уравнении (2) может быть равна $1\omega_0, 2\omega_0, 3\omega_0, \dots, n\omega_0$. Соответствующая амплитуда возмущения является суммой величин коэффициентов $c_1, c_2, c_3 \dots c_n$.

Необходимо провести настройку процесса запуска и торможения СК для различных вариантов возмущающей нагрузки.

Следует отметить, что «идеальное» возмущение может быть представлено простым гармоническим возбуждением:

$$\begin{aligned} F_{(t)} &= F_0 \sin \omega_0 t ; \Delta L_{(t)} = \Delta L_0 \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi) , \\ U_{(t)} &= A_1 \cdot L_0 \cdot x_0 \cdot \cos(\omega_0 + \varphi) + f(t) + B \end{aligned} \quad (4)$$

Первичным результатом оптимизации, на основании представленных выше формул, является величина горизонтальной скорости, передаваемой на цепь колесом. Из-за ограниченного количества зубьев цепного колеса скорость цепи отличается от тангенциальной скорости круга, что приводит к затруднению определения скорости цепи при фактическом управлении. Это связано с тем, что в точке крепления колеса, многоугольный эффект оказывает большое влияние на наиболее удаленный скребок, передающий маневренную нагрузку – особенно во время процесса запуска. При данных ограничениях участки тяговой цепи, которые находятся на различных расстояниях от цепного колеса привода, начинают движение поэтапно (друг за другом), вследствие чего наиболее удаленный скребок цепи начинает движение с отклонением по времени, поэтому скорость конвейера может отличаться от фактической.

Как показано в работе [11], добавление люфта в моделируемую систему с большой инерцией объекта (загруженная конвейерная линия) практически не влияет на его скорость движения в установившемся режиме. Вопросы учета больших динамических нагрузок на механический редуктор привода в момент выхода из зоны люфта (мертвой зоны, не имеющей реакции на воздействия) не рассматривались в данной работе.

$$\dot{U}(t) = 2 \cdot \pi \cdot R_e \cdot n_{(t)} ; n_{(t)} = \frac{\dot{U}(t)}{2 \cdot \pi \cdot R_e} = \begin{cases} \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_e} \left[\frac{V_0 t}{T} - \frac{V_0}{2 \cdot \pi} \sin \omega_0 t \right] , & t \leq T \\ \frac{V_0}{2 \cdot \pi \cdot R_e} , & t \geq T \end{cases} ; R_e = \frac{1}{2} R_0 \left[1 + \cos\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) \right] ; \varphi = \frac{\pi}{Z} \quad (5)$$

где R_e – эквивалентный радиус шага звездочки (м); Z_0 – фактический радиус цепного колеса (м); Z – число зубьев цепного колеса.

Увеличение времени запуска T позволяет эффективно снизить динамическую нагрузку запуска СК. Однако время запуска ограничено требованиями экономии энергоресурсов и возможным повышением температуры привода. Поэтому момент запуска должен быть ограничен по времени. В настоящее время достаточно мощные пускатели с регулируемой скоростью оснащены производительной системой охлаждения, которая используется для решения проблемы повышения температуры во время запуска.

Приведенные выше выражения определяют предпусковое состояние конвейера. Предварительный запуск изменяет состояние распределения натяжения цепи до стабилизации ускорения цепного колеса СК. Для реализации данного режима запуска следует разделить процесс на двухступенчатый старт. В нем первый этап назовем предстартовым, а на втором этапе приводы будут выходить на полную мощность. Предполагается, что цепное колесо работает на очень низкой скорости в течение некоторого периода времени; затем входит во вторую ступень; далее начинает ускоряться и в итоге достигает стабильной скорости вращения V_0 . В нормальных условиях $V_0 \approx \Delta l$. Вследствие этого можно гарантировать следующее условие: $V_0 T_0 \geq \Delta l$. Дистанция пробега цепного колеса привода больше или равна упругому удлинению цепи. Также учитывается следующее условие:

$$T_1 = (2-3) 2l / c ,$$

где c – скорость распространения волны напряжения в цепи (м/с).

Исследование процесса запуска скребкового конвейера осуществлялось на базе транспортера шабера SGZ-800/630 [12]. На рисунке 4 представлена расчетная схема для построения имитационной модели в виде принципиальной схемы конвейерной линии. Четыре нумерованные точки представляют собой позиции, в которых напряжение конвейерной цепи изменяется наиболее заметно. Точка «1» – это пересечение головной части цепи и цепного колеса. Точка «3» – это пересечение хвостовой части цепи и звездочки. Точки 4 и 2 – это соответствующие им точки разделения.

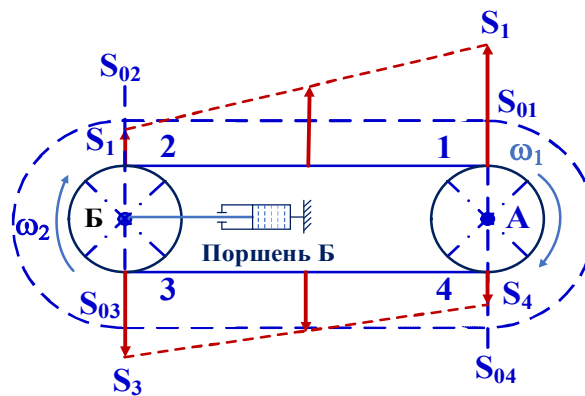


Рисунок 4 – Расчетная схема задачи

Для моделирования были использованы следующие параметры [1]: длина транспортера шабера $L = 240$ (м); транспортировочная мощность конвейера $Q = 1950$ (т/ч); скребок номинальный цепной ленточный со скоростью движения $v_0 = 1,3$ (м/с); угол наклона конвейера: $\beta = 1^\circ$; длина центральной канавки $L_c = 1,5$ (м); ширина средней канавки $B = 1$ (м); высота верхней и средней канавки $h_1 = 0,122$ (м); допустимый угол поворота средней канавки $\alpha = 1^\circ$; горизонтальный шаг опережения конвейера $a = 0,8$ (м); КПД передаточного устройства: $\eta = 0,86$; коэффициент перегрузки двигателя $\lambda_m = 2,5$; коэффициент натяжения цепи $\lambda = 1$; вес породы на метр длины скребкового конвейера $q_b = 0,95$ (кН/м); насыпная плотность сырого угля $\rho = 1000$ (кг/м³); высота угля, загруженного на среднюю плиту: $H = 0,47$ (м); высота угля, загруженного на корыто $h = 0,305$ (м); коэффициент трения стали об сталь в движении $\mu_{ss} = (0,0375 \div 0,28) V$, коэффициент трения цепи и угля по секционным желобам $\mu_{sc} = (0,00625 \div 0,39) V$, коэффициент внутреннего груза породы $\mu_\alpha = 0,84$.

Средствами управления для двух систем привода являются синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ), которые контролируют скорость вращения цепного колеса СК в соответствии с известным методом [15, 16].

Эквивалентная мощность двух систем привода СДПМ: $P_A = P_B = 200$ (кВт) передаточное отношение редуктора; номинальные параметры двигателя $n_0 = 1500$ (об/мин); радиус окружности шага звездочки $R_e = 0,252$ (м); число зубьев $z = 9$; цепь – круглозвенная горно-шахтная, типоразмер 34 x 126 [8]. Учитывая быструю скорость передачи волны напряжения в цепи, два приводных устройства в голове и хвосте цепи запускаются одновременно.

Настройка мощности двух приводных систем имеют следующие значения: $P_A = P_B = 200$ (кВт).

При данных мощностях момент передачи волны напряжения в цепи происходит за достаточно короткий период времени. При этом синхронно запускаются два приводных устройства (головное и хвостовое) конвейера. Для устранения вибрации, вызванной сопротивлением сухому трению, применяется технология предварительного запуска. При этом электропривод работает на небольшой скорости в течение 5–6 секунд, прежде чем входит в фазу ускорения с основным периодом 10 секунд.

Модель системы скребкового конвейера была построена в программной среде MATLAB. Структура имитационной модели СК представлена на рисунке 5.

Результаты и их обсуждение. Результаты имитационного моделирования представлены на рисунках 6–11. Из графиков реализаций запуска конвейера видно, что режим старта существенно сказывается на напряжениях в ключевых точках конвейерной ленты, определенных для исследования.

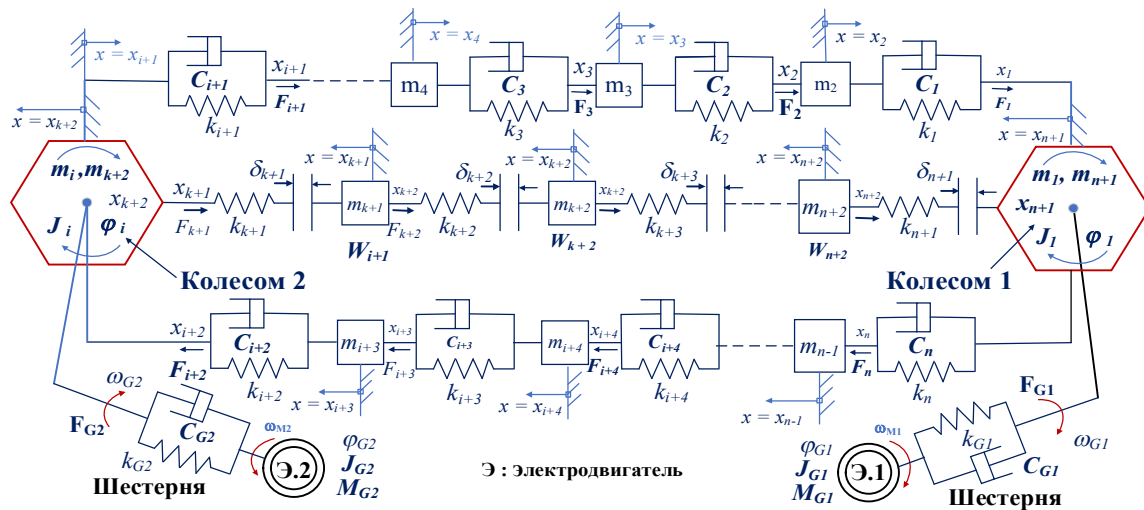


Рисунок 5 – Модель системы скребкового конвейера

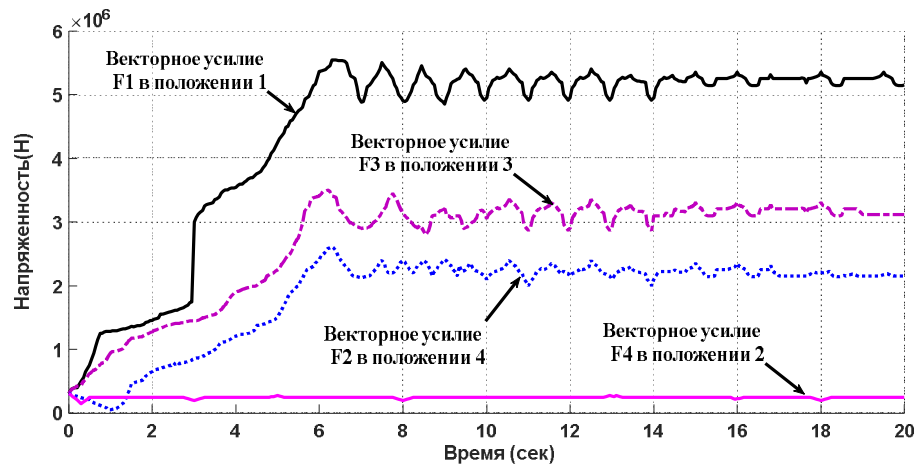


Рисунок 6 – Линейный старт натяжения с предварительным запуском

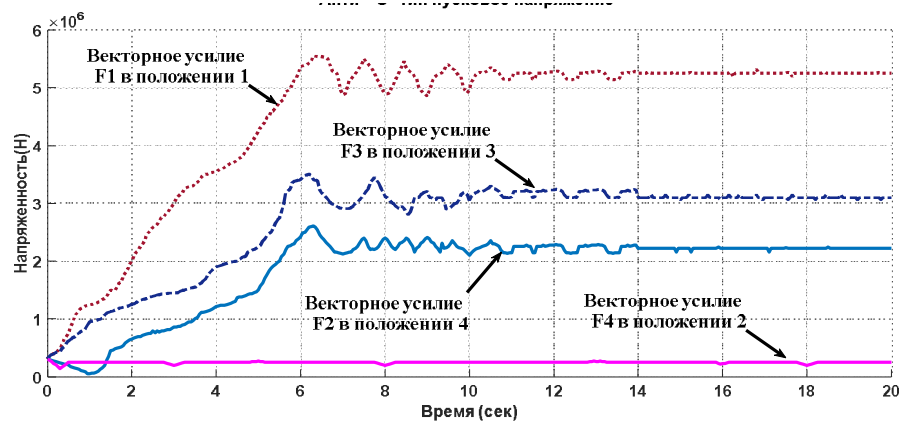


Рисунок 7 – Анти-«S» тип пусковое напряжение

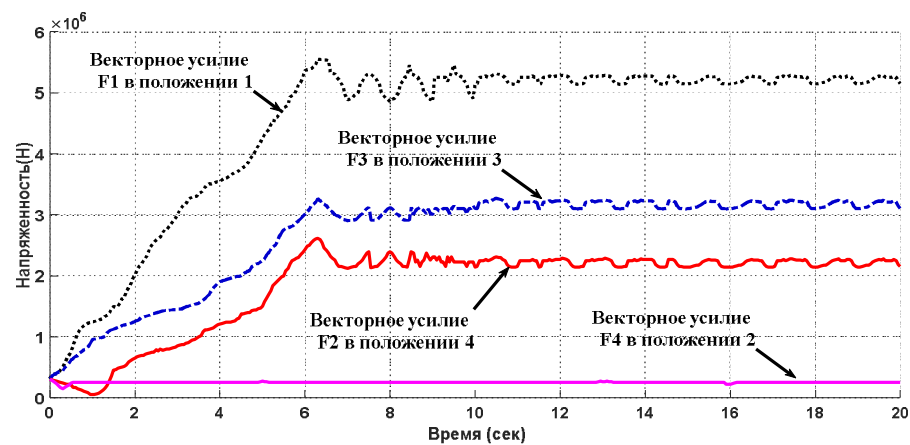


Рисунок 8 – Синусоидальное пусковое напряжение с предварительным запуском

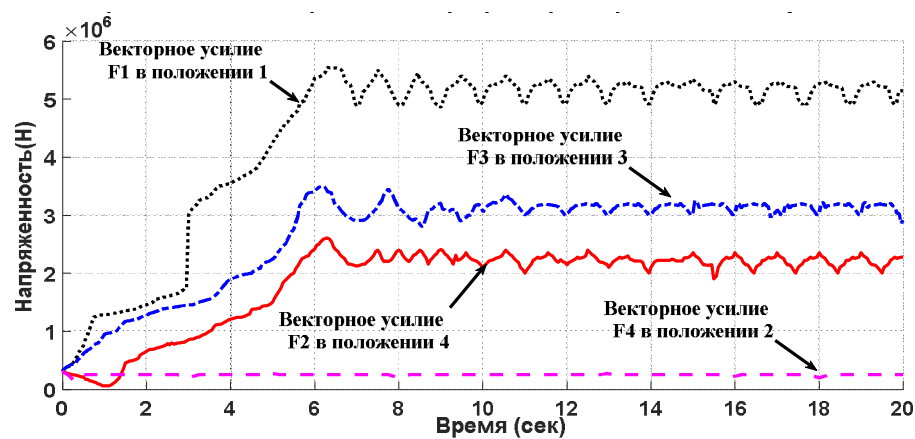


Рисунок 9 – Параболическое напряжение стартера с предварительным запуском

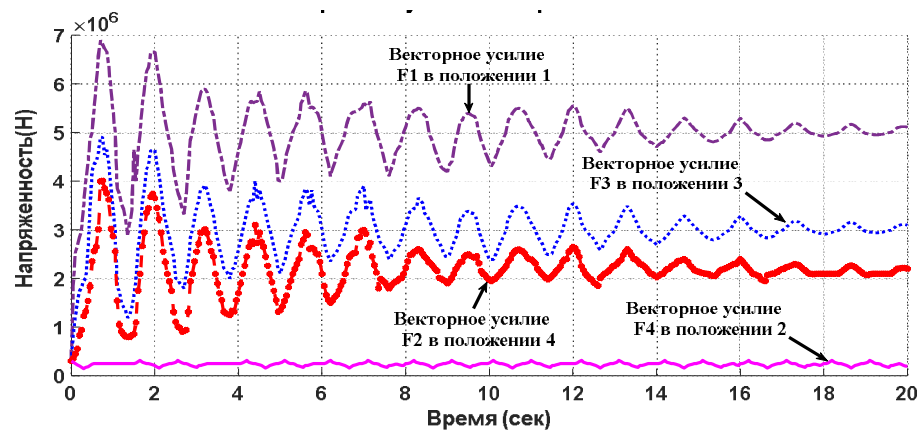


Рисунок 10 – Прямое пусковое напряжение

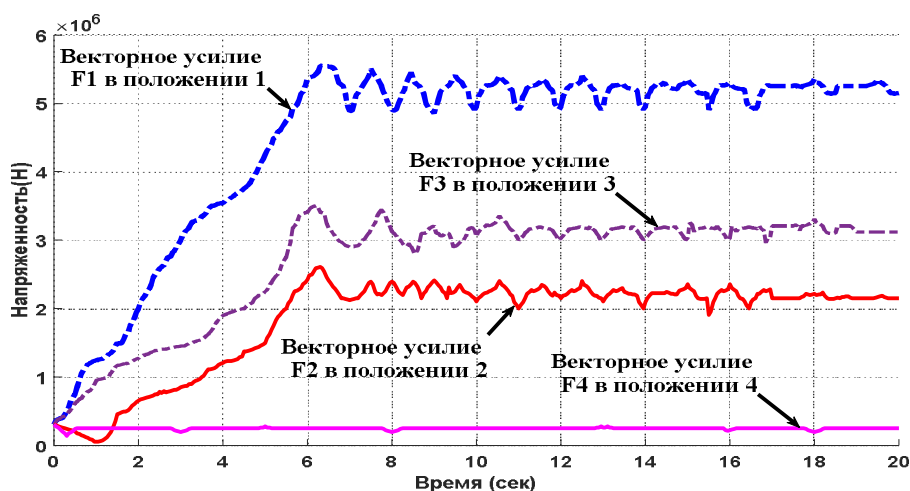


Рисунок 11 – Анти-«S» тип пускового натяжения без предварительного запуска

На этих рисунках показано начальное натяжение (напряженность) в точке 1, а также в других ключевых точках при различных режимах запуска системы. Моделировались следующие режимы запуска: линейный, параболический, синусоидальный и анти-«S» варианты изменения напряжения стартера с предварительным запуском, а также прямой и анти-«S» варианты без предварительного запуска.

Для всех вычислительных экспериментов параметры модели не менялись, варьировались только режимы старта и функции изменения напряжения стартера после предварительного запуска. Для сравнительного анализа полученных в ходе имитационного моделирования диаграмм использовались достаточно «грубые» оценочные критерии, а именно следующие.

К1. Отклонение результатов моделирования силы натяжения $F1$ на временном интервале (0–6 с) от функции, соответствующей некоторой «идеальной» кривой старта конвейера (рис. 3), относящейся определенному оптимальному переходу с низкой скорости за период T_0 на вторую ступень скорости за период T_1 .

К2. Суммарное значение величины колебаний по всем траекториям (ключевым точкам) для различных режимов пуска.

К3. Минимальное время достижения условия $|F_r(t_i + 1) - F_r(t_i)| < e, r = 1, 2, 3, 4$.

Как показано на рисунке 10, во время прямого пуска системы приводных колес с электроприводом процесс запуска имеет максимальное динамическое натяжение и амплитуда колебания цепи крайне велика. В то же время в случае типа «S» запуск происходит более плавно по сравнению с прямым запуском.

Управление с S-образным типом изменения напряжения (даже без предварительного запуска) является весьма эффективным и превосходит все остальные варианты по критерию «К1», а также не уступает большинству из них по критерию «К3». Однако использование режима предварительного старта существенно снижает интегральную ударную нагрузку на конвейерную ленту. Диаграммы наглядно демонстрируют, что двухступенчатый запуск оказывает положительное влияние на систему в целом. Причина – при этом реализуется планомерная нагрузка на цепь СК, что в конечном итоге приводит к эффективному использованию транспортировочной ленты в целом.

Выводы. Стартовые характеристики скребкового конвейера оказывают большое влияние на его динамические характеристики. Использование оптимального управления процессом запуска может снизить динамические воздействия на скребковый конвейер в условиях запуска. На основании теоретического анализа процесса запуска скребкового конвейера были определены параметры аномальной нагрузки на цепь в точках сочленения с электроприводами. Показано, что двухступенчатый запуск с «S»-образным изменением скорости является наиболее рациональным и может рассматриваться как основа для проектирования мощных и высоконадежных скребковых конвейеров.

Библиографические список

1. Васильченко В. А. Скребковый конвейер. Тяговый расчет : методические указания к выполнению курсового проекта по дисциплине «Машины непрерывного транспорта» для студентов специальности 190602. – Владивосток : Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского, 2009. – С. 48.
2. Гончаренко С. Н. Управление производственными параметрами основных технологических циклов горнорудного предприятия / С. Н. Гончаренко, Н. И. Федунец // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 9, – С. 230–239.

3. Гончаренко С. Н. Оценка влияния эффективности использования технологического оборудования на результаты производственно хозяйственной деятельности горнодобывающего предприятия / С. Н. Гончаренко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – №10. – С. 194–202.
4. Ещин Е. К. Динамика скребковых конвейеров. Обзор / Е. К. Ещин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – С. 28.
5. Ещин Е. К. Моделирование и управление динамическим состоянием скребковых конвейеров / Е. К. Ещин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – С. 118–121.
6. Ещин Е. К. Управление динамической нагруженностью забойных скребковых конвейеров / Е. К. Ещин // Записки Горного института. – 2019. – Т. 239. – С. 570–575.
7. Казанин О. И. Состояние и перспективы развития технологий подземной добычи угля в бассейне Куангнинь Вьетнама / О. И. Казанин, Ле Ван Хау // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – С. 15–20.
8. Кожушко Г. Г. Расчет и проектирование ленточных конвейеров: учебно-методическое пособие / Г. Г. Кожушко, О. А. Лукашук. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2016. – С. 232.
9. Кондрахин В. П. Обоснование конечно-элементной модели тягового органа скребкового конвейера / В. П. Кондрахин, В. Б. Борисенко, А. А. Мельник, В. В. Косарев, И. И. Косарев // Научные труды Донецкого национального технического университета. – 2005. – С. 97–103.
10. Кондрахин В. П. Математическая модель для исследования нагрузок в двухскоростном многодвигательном приводе и тяговом органе скребкового забойного конвейера / В. П. Кондрахин, В. Б. Борисенко, А. А. Мельник, В. В. Косарев, И. В. Стадник, И. И. Косарев // Научные труды Донецкого национального технического университета. – 2008. – С. 132–140.
11. Листопада Ю. И. Моделирование люфта электропривода в программной среде NI Multisim при управлении скоростью движения / Ю. И. Листопада, В. Т. Николаев, Л. Б. Сапожникова // Электронные информационные системы. – 2015. – № 2. – С. 19–31.
12. Серов В. А. Угловой скребковый конвейер проходческо-очистного комплекса / В. А. Серов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – С. 205–206.
13. Технология синхронизированной механизации: повышение производительности добычи угля // NSCL. – 17 июля 2017. – Режим доступа: <http://nscl.vn/cong-nghe-co-gioi-hoa-dong-bo-nang-cao-nang-suat-khai-thac-than/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 20.04.2020).
14. Cenacewicz K. Modeling and simulation of longwall scraper conveyor considering operational faults / K. Cenacewicz, A. Katunin // *Studia Geotechnica et Mechanica*. – 2016. – Vol. 38. – P. 15–27.
15. Hieu L. D. Application of PSO and Bacterial Foraging Optimization to Speed Control PMSM Servo Systems / L. D. Hieu and I. O. Temkin // 2018 IEEE Seventh International Conference on Communications and Electronics (ICCE). – Hue City, Vietnam, 2018. – P. 196–201.
16. Hieu L. D., Application of Adaptive PSO and Adaptive Fuzzy Logic Controllers to Speed Control PMSM Motor Servo Systems / L. D. Hieu and I. O. Temkin // IEEE-ICMCS 2018-International Conference on Mechanical, System and Control Engineering. – Moscow, Russian Federation, 2018. – P. 1–8.
17. Lu E. Composite sliding mode control of a permanent magnet direct-driven system for a mining scraper conveyor / E. Lu, W. Li, X. Yang, and S. Xu // *IEEE Access*. – 2017. – Vol. 5. – P. 22399–22408.
18. Lu E. Simulation study on speed control of permanent magnet direct-driven system for mining scraper conveyor / E. Lu, W. Li, X. Yang, and S. Xu // *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*. – 2018. – Vol. 10. – P. 1–11.

References

1. Vasilchenko V. A. *Skrebkovyy konveyer. Tyagovyy raschet* [Scraper conveyor. Traction calculation]. Vladivostok, Admiral G. I. Nevelsky Maritime State University Publ., 2009, p. 48.
2. Goncharenko S. N., Fedunets N. I. *Upravlenie proizvodstvennymi parametrami osnovnykh tekhnologicheskikh tsiklov gornorudnogo predpriyatiya* [Management of production parameters of the main technological cycles of the mining enterprise]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2007, no. 9, pp. 230–239.
3. Goncharenko S. N. *Otsenka vliyaniya effektivnosti ispolzovaniya tekhnologicheskogo oborudovaniya na rezultaty proizvodstvenno hozyaystvennoy deyatel'nosti gornodobyvayushhego predpriyatiya* [Evaluation of the impact of the efficiency of technological equipment use on the results of production and economic activities of a mining enterprise]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2007, no. 10, pp. 194–202.
4. Eshchin E. K. *Dinamika skrebkovykh konveerov. Obzor* [Dynamics of scraper conveyors. Review]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass State Technical University], 2015, p. 28.
5. Eshchin E. K. *Modelirovaniye i upravleniye dinamicheskim sostoyaniyem skrebkovykh konveerov* [Modeling and control of a dynamic condition of conveyors]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass State Technical University], 2015, pp. 118–121.
6. Eshchin E. K. *Upravleniye dinamicheskoy nagruzhennostyu zaboynykh skrebkovykh konveerov* [Management of dynamic loading of downhole scraper conveyors]. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2019, vol. 239, pp. 570–575.

7. Kazanin O. I., Le Van Khau. Sostoyanie i perspektivy razvitiya tehnologii podzemnoy dobychi uglia v bassejne Kuangnin Vjetnama [State and prospects of development of underground coal mining technologies in the Quang NIN basin of Vietnam]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2014, pp. 15–20.
8. Kozhushko G. G., Lukashuk O. A. *Raschet i proektirovanie lentochnykh konveerov* [Calculation and design of conveyor belts]. Yekaterinburg, Ural University Publ., 2016, p. 232.
9. Kondrakhin V. P., Borisenko V. B., Melnik A. A., Kosarev V. V., Kosarev I. I. Obosnovanie konechno-elementnoy modeli tyagovogo organa skrebkovogo konveera [Justification of the finite element model of the traction body of the scraper conveyor]. *Nauchnye trudy Donetskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Donetsk National Technical University], 2005, pp. 97–103.
10. Kondrakhin V. P., Borisenko V. B., Melnik A. A., Kosarev V. V., Stadnik I. V., Kosarev I. I. Matematicheskaya model dlya issledovaniya nagruzok v dvuhskorostnom mnogodvigatelnom privode i tyagovom organe skrebkovogo zaboynogo konveyera [Mathematical model for the study of loads in a two-speed multi-motor drive and traction organ of a scraper bottom-hole conveyor]. *Nauchnye trudy Donetskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Donetsk National Technical University], 2008, pp. 132–140.
11. Listopadova Yu. I., Nikolaev V. T., Sapozhnikova L. B. Modelirovanie lyufta elektroprivoda v programmnoy srede NI Multisim pri upravlenii skorostyu dvizheniya [Modeling of electric drive backlash in the software environment NI multisim when controlling the speed of movement]. *Elektronnyye informatsionnyye sistemy* [Electronic Information Systems], 2015, no. 2, pp. 19–31.
12. Serov V. A. Uglovoy skrebkovyy konveer prokhodchesko-ochistnogo kompleksa [Angular scraper conveyor of the tunneling and cleaning complex]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2000, pp. 205–206.
13. *Tekhnologiya sinkhronizirovannoy mekhanizatsii: povyshenie proizvoditelnosti dobychi uglia* [Technology of synchronized mechanization: increasing the productivity of coal mining]. NSCL, July 17, 2017. Available at: <http://nscl.vn/cong-nghe-co-gioi-hoa-dong-bo-nang-cao-nang-suat-khai-thac-than/> (accessed 20.04.2020).
14. Cenacewicz K., Katunin A. Modeling and simulation of longwall scraper conveyor considering operational faults. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2016, vol. 38, pp. 15–27.
15. Hieu L. D., Temkin I. O. Application of PSO and Bacterial Foraging Optimization to Speed Control PMSM Servo Systems. *2018 IEEE Seventh International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*. Hue City, Vietnam, 2018, pp. 196–201.
16. Hieu L. D., Temkin I. O. Application of Adaptive PSO and Adaptive Fuzzy Logic Controllers to Speed Control PMSM Motor Servo Systems. *IEEE-ICMSC 2018-International Conference on Mechanical, System and Control Engineering*. Moscow, Russian Federation, 2018, pp. 1–8.
17. Lu E., Li W., Yang X., Xu S. Composite sliding mode control of a permanent magnet direct-driven system for a mining scraper conveyor. *IEEE Acces.*, 2017, vol. 5, pp. 22399–22408.
18. Lu E., Li W., Yang X., Xu S. Simulation study on speed control of permanent magnet direct-driven system for mining scraper conveyor. *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*, 2018, vol. 10, pp. 1–11.