

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Тульский государственный университет»

Овсянников Дмитрий Сергеевич

**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЙ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫЙ
ЭЛЕКТРОПРИВОД СКРЕБКОВОГО КОНВЕЙЕРА
ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ**

Специальность: 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент Шпрехер Д.М.

Тула – 2025

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Скребокковые конвейеры (СК) широко используются в горнодобывающей промышленности и на промышленных предприятиях для транспортировки сыпучих материалов, таких как уголь, железная руда, порода, щебень и металлические детали и т.д. На угольных шахтах в настоящее время применение СК является основным способом транспортировки угля при выемке его очистным комбайном (ОК) в механизированном забое. В сложных и изменчивых условиях работы и переменной загрузки СК в механизированном забое угольных шахт его безопасная и надежная работа имеет решающее значение для производительности очистного комплекса и всей угольной шахты.

Как правило, электропривод СК является многодвигательным и включает головной и хвостовой приводы, каждый из которых может иметь минимум по два приводных электродвигателя (ЭД), работающих на ведущие звездочки. Головной и хвостовой приводы конвейера соединены упругой тяговой цепью с прикрепляющимися скребками, перемещающими груз вдоль решета.

На протяжении многих лет ряд технических компаний во всем мире вели разработки электроприводов (ЭП) СК и их систем управления, например: Siemens (Германия), Mitsubishi (Япония), Rockwell Automation (США), Omron (Япония), АВВ (Швейцария) и др. Наиболее значимый вклад в данной области внесли теоретические результаты и практические разработки таких ученых как Бабокин Г.И., Ещин Е.К., Гливанский А.А., Галкин, В.И., Дмитриев В.Г., Дьячков В.К., Запенин И.В., Козярук А.Е., Кубрин С.С., Мещеряков В.Н., Осичев А.В., Певзнер Л.Д., Соловьев А.С., Спиваковский А.О., Тарасов Ю.Д., Шахмейстер Л.Т., Blaschke F., Bose B.K., Holts J., Leonard W., Zhan Zhang, Guomundur Amar, Butko A. и др.

Несмотря на большой объем проведенных работ, и полученные результаты исследований, остался ряд нерешенных задач, связанных с ресурсосбережением при случайном характере грузопотока и повышением срока эксплуатации конвейера, путем снижения динамических нагрузок. Так к настоящему времени не решены вопросы, связанные с проектированием системы управления многодвигательным ЭП СК для: уменьшения пускового тока и уровня динамических усилий в тяговом органе (ТО) при пуске конвейера; выравнивания нагрузок между приводными ЭД в многодвигательном ЭП СК; ресурсосбережения при управлении скоростью движения ТО СК и скоростью подачи ОК. Таким образом, разработка методики проектирования ресурсосберегающей системы управления скребокковым конвейером является актуальной **научной задачей**, имеющей большое значение для угольной промышленности.

Цель работы повышение ресурсосбережения скребоккового конвейера очистного забоя на основе предложенной методики проектирования системы

управления многодвигательным электроприводом.

Идея работы заключается в том, что повышение ресурсосбережения в многодвигательном электроприводе скребкового конвейера очистного забоя достигается за счет реализации алгоритма скоординированного регулирования скоростей ЭД СК и ЭД подачи ОК, метода двухэтапного частотного пуска СК и способа согласованного управления приводными ЭД конвейера.

Для достижения поставленной цели в диссертационном исследовании были сформулированы следующие **задачи**:

1. Анализ особенностей условий эксплуатации СК с целью определения путей повышения ресурсосбережения.

2. Разработка математической и на ее основе имитационной модели частотно-регулируемого многодвигательного электропривода СК.

3. Разработка методики проектирования ресурсосберегающей системы управления многодвигательным ЭП СК включающей в себя:

– алгоритм скоординированного управления электроприводами СК и ОК,

– метод частотного пуска электропривода СК,

– способ согласованного управления многодвигательным ЭП СК.

Объект исследования: многодвигательный ЭП СК и его система управления (СУ) в составе очистного механизированного комплекса (ОМК) угольной шахты.

Предмет исследования: электромеханические процессы, возникающие в ЭП СК в условиях случайного характера грузопотока.

Новые научные результаты, выносимые на защиту:

1. Разработаны математическая и на ее основе имитационная модели частотно-регулируемого многодвигательного электропривода СК, *отличающиеся* тем, что они учитывают распределённые параметры ТО и величину распределения погонной нагрузки на СК и *позволяют* рассчитывать динамические процессы в ЭП с учётом положения ОК в лаве, его скорости подачи и взаимного направления движения ОК и ТО СК.

2. Разработана методика проектирования ресурсосберегающей системы управления многодвигательным ЭП СК включающей:

– новый алгоритм скоординированного регулирования скоростей ЭД СК и ЭД подачи ОК при их совместной работе в очистном забое, *позволяющий* уменьшить удельный расход электроэнергии ЭП СК и расстояние пробега ТО СК за один проход ОК за счет изменения скорости перемещения ТО в зависимости от направления и величины скорости подачи ОК;

– метод двухэтапного частотного пуска ЭП СК, *отличающийся* применением регулятора скорости на основе скользящего режима управления и *позволяющий* обеспечить плавное переключение между этапами пуска для снижения углового рывка и динамических усилий в ЭП конвейера;

– способ согласованного управления многодвигательным ЭП СК, отличающийся использованием регулятора выравнивания на основе скользящего режима управления и позволяющий обеспечить равномерное распределение нагрузки между приводными ЭД в статических и динамических режимах работы.

Теоретическая значимость работы: заключается в научном обосновании методики проектирования ресурсосберегающей системы управления для объектов поточно-транспортных систем с распределёнными параметрами.

Практическая значимость работы.

1. Разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать динамические процессы в ЭП и определять распределение погонной нагрузки на СК.

2. Разработано устройство автоматического управления ОК и конвейером.

Методы исследования. Методологической основой исследования послужили работы ведущих ученых в области разработки системы управления электроприводом горных машин. В работе использовались признанные научные методы анализа и исследования режимов работы конвейерных систем, теории автоматического управления, теоретические методы построения математических моделей. При разработке и исследовании систем управления, моделей и алгоритмов использованы методы идентификации, компьютерного моделирования.

Достоверность результатов исследования

Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается совпадением результатов имитационных экспериментов, полученных путем применения модельно-ориентированного проектирования в математическом пакете *Matlab*, с данными натурных экспериментов, взятых из открытых источников.

Достоверность новизны технических решений подтверждается 1 патентом РФ на изобретение и 2 свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Соответствие паспорту специальности.

Работа соответствует 1 и 3 пунктам паспорта научной специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы: п.1 паспорта специальности – Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем; п.3 – Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

Реализация и внедрение результатов работы. Внедрены и

используются результаты, полученные при разработке методики проектирования ресурсосберегающей системы управления многодвигательным ЭП СК, при эксплуатации поточно-транспортных систем АО «Щекиноазот» и при проектировании новых комплексов горных машин ООО «Электротехническая промышленная компания». Результаты данного исследования применяются в учебном процессе кафедры «Электротехника и электрооборудование» Тульского государственного университета по дисциплине «Основы автоматизированного вентильного электропривода» и «Автоматизация управления системами электроснабжения».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях: «Automation» RusAutoCon 2021 (г. Сочи, 2021 г.), «Industrial Engineering» ICIE-2023 (г. Сочи, 2023 г.), «Industrial Engineering» ICIE-2024 (г. Сочи, 2024 г.).

Личный вклад автора: Разработаны математическая и на её основе имитационная модели функционирования СК во всех режимах эксплуатации, включая распределение погонной нагрузки на ТО и потребление электроэнергии его ЭП за цикл добычи ОК; предложен алгоритм скоординированного регулирования скоростей ЭД СК и ЭД подачи ОК; разработан метод двухэтапного частотного пуска многодвигательного ЭП СК; предложен способ согласованного управления многодвигательным ЭП СК.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 23 печатных работах, в том числе 15 публикаций в научных журналах, входящих в перечень ВАК, 2 публикации в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования *Scopus*, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 3 доклада на международных конференциях, 1 патент на изобретение.

Объём и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 150 страницах машинописного текста и содержит 84 рисунка, 9 таблиц и 1 приложение, список литературы включает 142 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, определены цель и задачи исследований, показаны их научная новизна и практическая значимость. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлено общее состояние вопроса и перспективы развития ЭП современных СК. Показано, что динамика развития угольной промышленности движется в направлении отработки лав длинными столбами, с длиной лавы до 400 м и увеличением установленной мощности

оборудования очистного забоя. Получение такой мощности ЭП, в условиях ограничения оборудования по габаритам, стало возможным при применении многодвигательного ЭП. Поэтому современный высокопроизводительный ЭП СК для тяжелых условий эксплуатации включает по два приводных блока, расположенных в голове и хвосте.

Также в данной главе приводится анализ достоинств и недостатков существующих способов ограничения пусковых токов и борьбы с неравномерностью нагрузок приводных ЭД, а также задач повышения ресурсосбережения горного производства.

Таким образом, анализ состояния вопроса в области многодвигательного ЭП СК позволил обосновать и сформулировать задачи исследования.

Во второй главе разработаны математическая и на ее основе имитационная модели многодвигательного СК. ТО СК является системой с распределенными параметрами, поэтому для составления уравнений его движения принят метод конечных элементов на основе модели Кельвина - Фойгта. При этом, ТО (конвейерная цепь) длиной L разбивается на n равных участков (элементарных звеньев). Каждый участок длиной L_0 , равной шагу скребков, характеризуется эквивалентной массой m_i (скрепка, цепи и груза), упругостью c и вязкостью цепи β (рис. 1).

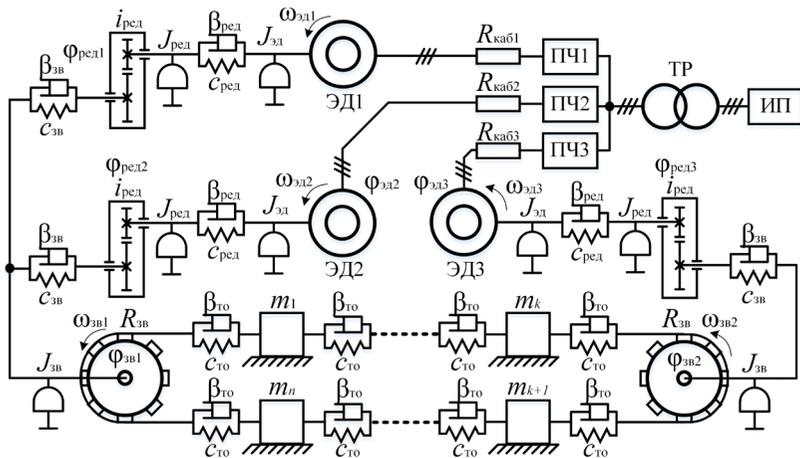


Рис. 1 – Структурная схема многодвигательного скребкового конвейера

На рис. 1 приняты следующие обозначения: $\Phi_{эд}$, $\Phi_{зв}$, $\omega_{эд}$, $\omega_{зв}$ – соответственно углы поворота и скорости вращения ротора электродвигателя и приводной звездочки; $J_{эд}$ и $J_{зв}$ – соответственно моменты инерции ротора ЭД и приводной звездочки; n – число сосредоточенных масс тягового органа, $k = n/2$; $c_{ред}$, $\beta_{ред}$, $c_{зв}$, $\beta_{зв}$, $c_{то}$, $\beta_{то}$ – соответственно коэффициенты жесткости и вязкости связей между ЭД и редуктором, между редуктором и приводной

звездочкой, между сосредоточенными массами тягового органа конвейера; $R_{зв}$ – радиус приводной звезды конвейера; $i_{ред}$ – передаточное отношение редуктора; ТР – питающий трансформатор; ПЧ – преобразователь частоты, питающий приводной ЭД; ИП – источник питания.

Для повышения точности расчетов (приближения модели к реальному объекту) увеличивают количество элементарных звеньев, что приводит к значительному росту числа дифференциальных уравнений, описывающих каждое элементарное звено. Предлагается представить математическую модель ТО ЧРЭП конвейера в виде матрично-векторного произведения с введением дополнительных матриц $A[n \times n]$ и $B[n \times n]$, $C[n \times I]$ и $D[n \times I]$. Система уравнений имеет следующий вид:

$$M \cdot \frac{dV}{dt} = (\beta \cdot V \times B + c \cdot X \times B) \times A - (\mu_{\Gamma} m_{\Gamma} + \mu_{ТО} m_{ТО}) \times D - M \times C; \quad (1)$$

$$F = \beta \cdot V \times B + c \cdot X \times B; \quad M = m_{\Gamma} + m_{ТО},$$

где $M = [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_n]^T$ – вектор элементарных масс конвейера, кг; состоящий из суммы векторов сосредоточенных масс груза – $m_{\Gamma} = [m_{\Gamma 1} \ m_{\Gamma 2} \ \dots \ m_{\Gamma n}]$, кг; и вектора сосредоточенных масс ТО – $m_{ТО} = [m_{ТО 1} \ m_{ТО 2} \ \dots \ m_{ТО n}]^T$, кг; $\mu_{\Gamma} = [\mu_{\Gamma 1} \ \mu_{\Gamma 2} \ \dots \ \mu_{\Gamma n}]^T$; $\mu_{ТО} = [\mu_{ТО 1} \ \mu_{ТО 2} \ \dots \ \mu_{ТО n}]^T$ – вектор коэффициентов трения груза и ТО; $V = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n]^T$ – вектор скорости масс, м/с; $X = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_n]^T$ – вектор положения масс, м; $F = [F_{12} \ F_{23} \ \dots \ F_{in}]^T$ – вектор упругих и вязких сил, Н.

Дополнительные матрицы $A[n \times n]$, $B[n \times n]$, $C[n \times I]$ и $D[n \times I]$ снимают ограничения по числу элементарных звеньев для описания ТО ЧРЭП СК, тем самым представляя его как объект с распределёнными параметрами:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 1 & -1 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} g \cdot \sin \alpha_1 \\ g \cdot \sin \alpha_2 \\ \vdots \\ -g \cdot \sin \alpha_n \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} k_1 \cdot g \cdot \cos \alpha_1 \\ k_2 \cdot g \cdot \cos \alpha_2 \\ \vdots \\ k_n \cdot g \cdot \cos \alpha_n \end{bmatrix}. \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; α – угол наклона конвейера; k – коэффициент учитывающий изгиб става СК.

Имитационная модель ТО СК в матрично-векторной форме, учитывающая упруго-вязкие силы, нелинейное трение ТО и угла, предварительное натяжение цепи представлена на рис. 2.

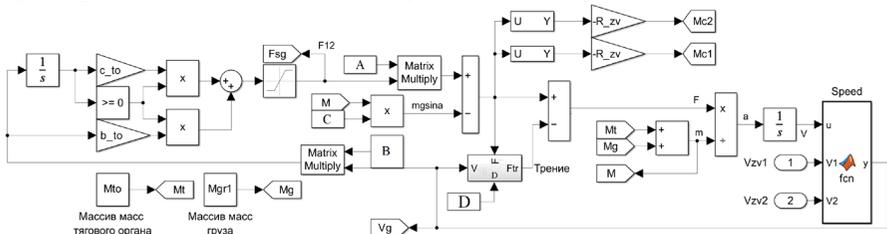


Рис. 2 – Реализация имитационной модели ТО СК в пакете *MatLab/Simulink*

Общепринятое допущение: нагрузка на грузеной ветви СК распределена равномерно. В действительности на распределение нагрузки на грузеной ветви СК влияет положение ОК вдоль забоя, его скорость и направление движения по направляющим решёткам СК (ОК и грузеная ветвь СК движутся в одну сторону, либо в разные).

Теоретическая производительность двухшнекового ОК – $Q_{\text{ОК}}$ определяется по выражениям:

$$\begin{aligned} Q_1 &= D \cdot B \cdot \gamma \cdot V_{\text{П}}; Q_2 = (H - D) \cdot B \cdot \gamma \cdot V_{\text{П}}, \\ Q_{\text{ОК}} &= Q_1 + Q_2 = H \cdot B \cdot \gamma \cdot V_{\text{П}}. \end{aligned} \quad (3)$$

где H – вынимаемая мощность пласта, м; B – ширина захвата исполнительного органа ОК, м; γ – удельная плотность отбитого угля, кг/м³; $V_{\text{П}}$ – скорость подачи ОК, м/с; D – диаметр шнека, м; Q_1 – производительность верхнего шнека, кг/с; Q_2 – производительность нижнего шнека, кг/с.

Масса отбитого угля на СК транспортируется при двух случаях: направление движения грузеной ветви СК и направление подачи ОК вдоль конвейера совпадают (обратный ход ОК), или они противоположны (прямой ход ОК).

Рассчитаем три основных промежутка времени, для двух случаев добычи, при различной начальной удалённости ОК от головы СК:

Для случая прямого хода (рис.3, а):

$$t_1 = (L_1 + L_2) / V_{\text{СК}}; t_2 = L_1 / V_{\text{СК}}; t_3 = (L - L_1 - L_2) / V_{\text{П}}. \quad (4)$$

Для случая обратного хода (рис.3, б):

$$t_1 = L_1 / V_{\text{СК}}; t_2 = (L_1 + L_2) / V_{\text{СК}}; t_3 = L_1 / V_{\text{П}}, \quad (5)$$

где t_1 – момент времени, когда уголь отбитый верхним шнеком ОК достигает головы СК; t_2 – момент времени, когда уголь отбитый нижним шнеком ОК достигает головы СК; t_3 – момент времени, когда ОК достигает головы СК; $V_{\text{СК}}$ – скорость перемещения ТО СК, L – длина скребкового конвейера, L_1 – расстояние между ОК и головой СК, L_2 – длина ОК.

Тогда количество угля m_{Γ} на СК за время добычи будет изменяться:

$$m_{\Gamma} = q_1 \cdot \left(\int_0^{t_1} V_{\text{СК}}(t) dt \pm \int_0^{t_3} V_{\text{П}}(t) dt \right) + q_2 \cdot \left(\int_0^{t_2} V_{\text{СК}}(t) dt \pm \int_0^{t_3} V_{\text{П}}(t) dt \right), \quad (6)$$

где: q_1 – количество угля, добытого верхним шнеком ОК в пределах единицы длины СК, кг/м; q_2 – количество угля, добытого нижним шнеком ОК в пределах единицы длины СК, кг/м.

$$q_1 = Q_1 / (V_{\text{П}} \pm V_{\text{СК}}), q_2 = Q_2 / (V_{\text{П}} \pm V_{\text{СК}}). \quad (7)$$

В (6) и (7) «+» – соответствует для прямого хода, а «-» – для обратного хода.

На рис. 4 приведена имитационная модель расчета погонной загрузки

СК и ее реализация в виде скрипта *Matlab Function*.

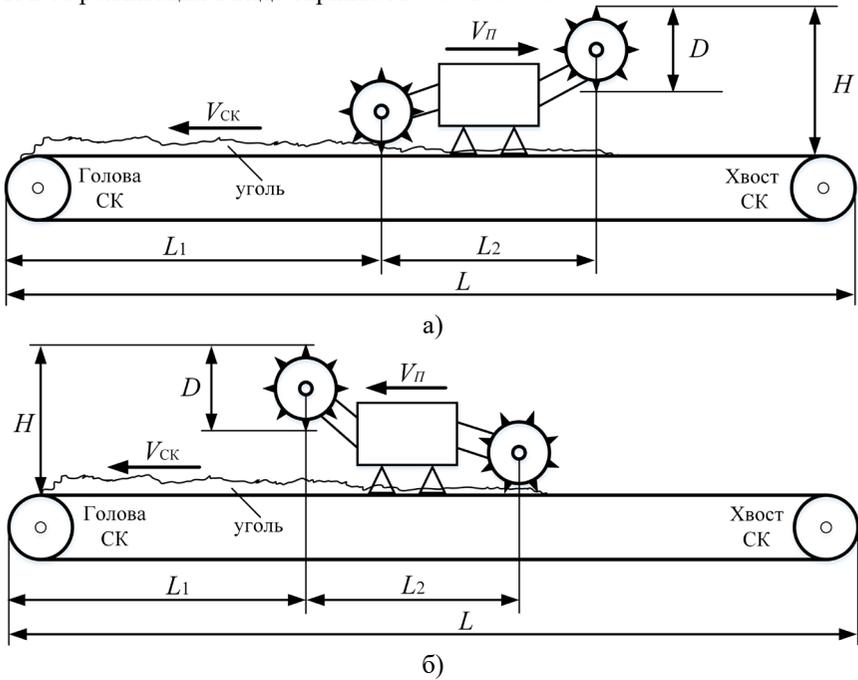


Рис. 3 – Схема совместной работы ОК и СК в угольном забое

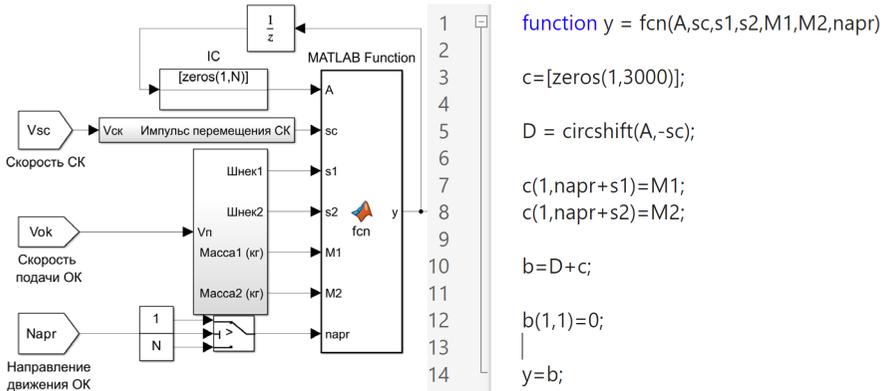


Рис. 4 – Имитационная модель расчета погонной загрузки СК и скрипт *Matlab Function*

Разработанные математическая и на её основе имитационная модели СК, за счёт представления ТО распределёнными параметрами, позволяют адекватно описывать динамические процессы в ЭП СК и рассчитывать

погонную нагрузку на ТО, с учётом положения ОК в лаве, его скорости подачи и взаимного направления движения ОК и тягового органа СК.

Верификация разработанных моделей проводилась путем их сравнения с практическими результатами, полученными для реальных конвейеров той же серии. Относительная погрешность расчётов в сравнении с экспериментальными данными по потребляемой мощности СК – 5,8%, по количеству транспортируемого груза – 7%, по расчёту усилий в цепи – 8,02%.

Третья глава посвящена исследованию и разработке алгоритма скоординированного управления ОК и СК при их совместной работе в очистном забое.

На рис. 5 (слева), представлены зависимости мощности P , потребляемой ЭП СК, от положения ОК в лаве при условно принятом прямом ходе, а на рис. 5 (справа) – при обратном ходе.

Из диаграмм потребляемой мощности рис. 5 следует, что характер изменения мощности ЭП СК при прямом и обратном движении ОК вдоль лавы различны: при прямом ходе ОК мощность линейно возрастает от мощности холостого хода (XX) до максимального значения; при обратном ходе ОК мощность на расстоянии от вентиляционного штрека до $L_M = L \cdot V_{п} / V_{ск}$ увеличивается до максимального значения, а затем линейно уменьшается до мощности XX. В результате электроэнергия при выемке ленты угля, потребляемая ЭП СК для прямого хода ОК на 6-8% меньше, чем для обратного хода ОК.

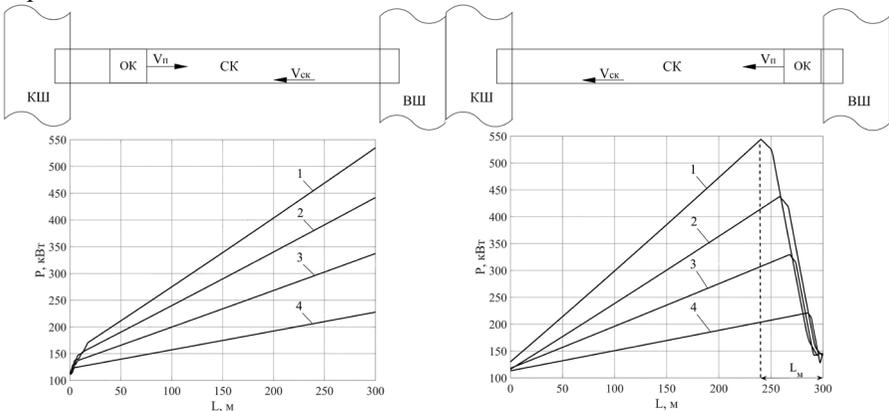


Рис. 5 – Зависимости мощности, потребляемой электроприводом СК, от положения ОК в лаве при прямом (слева) и обратном ходе ОК (справа) $V_{ск} = \text{const}$; 1 – $V_n = 8$ м/мин; 2 – $V_n = 6$ м/мин; 3 – $V_n = 4$ м/мин; 4 – $V_n = 2$ м/мин

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 5 позволил сформулировать алгоритм скоординированного регулирования скоростей СК и ОК при их работе в очистном забое, представленный на рис. 6.

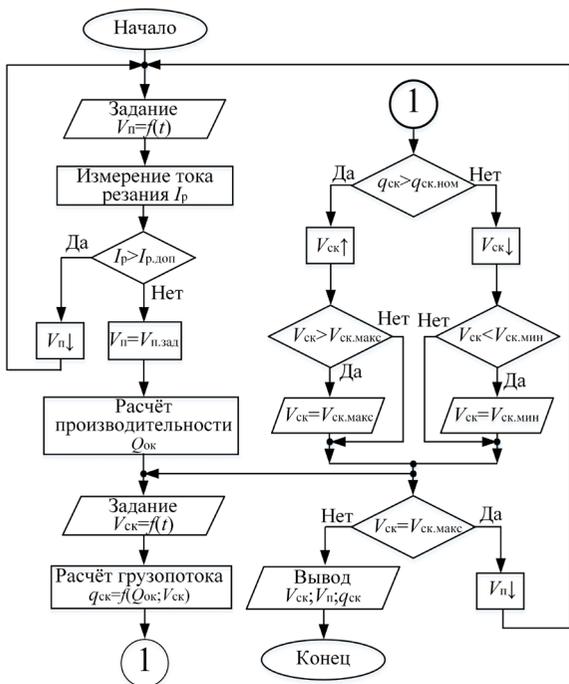


Рис. 6 – Алгоритм скоординированного регулирования скоростей ЭД СК и ЭД подачи ОК

На рис. 7 приведена структурная схема устройства скоординированного управления скоростями ЭД СК и ЭД подачи ОК по вышеприведенному алгоритму для обеспечения минимального удельного расхода электроэнергии СК путем поддержания постоянной погонной нагрузки его ТО.

На рис. 7 приняты следующие обозначения: ИП – источник питания; ДТ – датчик тока приводов резания; ПЧ – преобразователь частоты; $I_{p,доп}$ – сигнал задания допустимого тока резания; $V_{п}$ – сигнал скорости подачи ОК; $V_{ск}$ – сигнал скорости ТО СК; ДС – датчик скорости СК;

БВП – блок выделения положительного сигнала; БВМ – блок выделения максимального сигнала; ПП – переключатель полярности; q – сигнал входного грузопотока.

Равномерность погонной нагрузки конвейера $q_{ск}$ обеспечивается регулированием скорости перемещения его тягового органа, путем сравнения заданной скорости конвейера $V_{ск,зад} = [H \cdot B \cdot \gamma \pm q_{ск,ном} \cdot V_{п}] / q_{ск,ном}$, определяемой теоретической производительностью ОК ($Q_{ок} = HB \gamma V_{п}$), с фактической скоростью $V_{ск}$, контролируемой датчиком скорости (ДС).

Для оценки неравномерности загрузки СК использовалась величина коэффициента неравномерности, как разность между текущей (фактической) и заданной загрузкой по всей длине конвейера:

$$k_{н} = \sum_{i=1}^N \left| q_{тек,i}^* - q_{зад}^* \right| \Delta l_i / L, \quad (8)$$

где $q_{тек,i}^*$ – фактическая загрузка i -го участка конвейера, о.е.; $q_{зад}^*$ – заданная загрузка конвейера, о.е. ($q_{зад}^* = 1$).

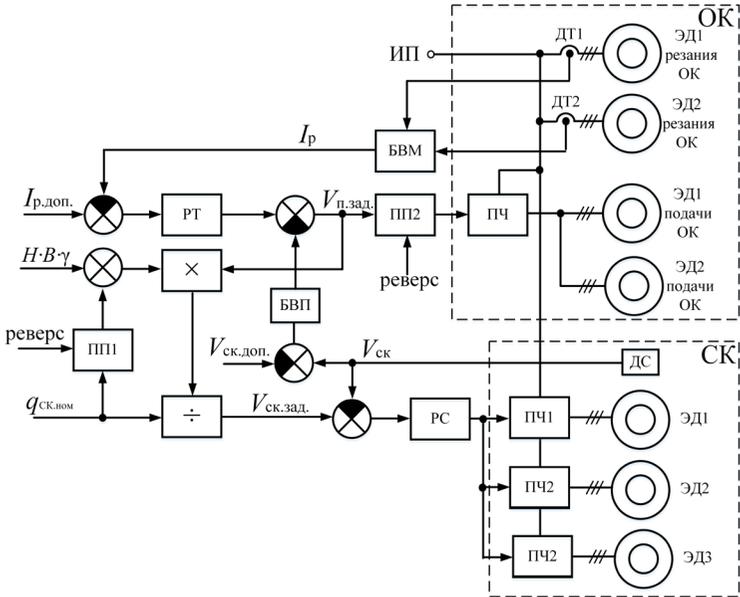


Рис. 7 – Структурная схема устройства скоординированного управления скоростями приводов конвейера и очистного комбайна

Результаты моделирования распределения погонной загрузки СК q^* по его длине при прямом и обратном ходе ОК показаны на рис. 8.

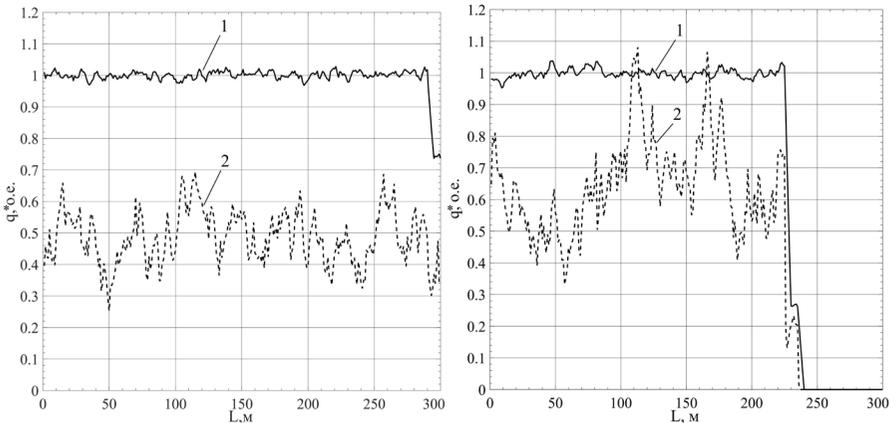


Рис. 8 – Зависимость загрузки СК по его длине при прямом ходе ОК (слева) и обратном (справа): 1 – при наличии устройства скоординированного управления; 2 – при отсутствии устройства скоординированного управления

Из анализа зависимостей загрузки СК, приведенных на рис. 8 следует,

что коэффициент неравномерности без применения предлагаемого устройства скоординированного управления скоростями приводов СК и ОК, для прямого и обратного хода составил 0,5 и 0,35 соответственно, а при наличии такого устройства не превышает 0,05 для прямого и обратного хода ОК.

На рис. 9 представлены результаты сравнения при наличии и отсутствии устройства скоординированного управления: удельного расхода электроэнергии ЭП СК (слева), и преодолеваемого расстояния ТО за цикл добычи (справа).

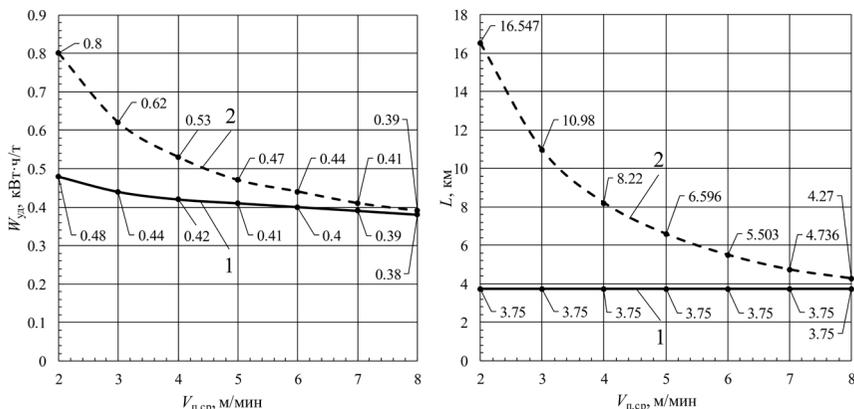


Рис. 9 – Зависимость удельного расхода электроэнергии ЭП СК (слева) и преодолеваемого расстояния ТО (справа) от скорости подачи ОК: 1 – при наличии устройства скоординированного управления; 2 – при отсутствии устройства скоординированного управления

По диаграммам удельного расхода, приведенным на рис. 9 (слева) следует, что при отсутствии устройства, когда скорость ТО СК постоянная, с уменьшением средней скорости подачи ОК с 8 до 2 м/мин погонная нагрузка СК уменьшается, а удельный расход электроэнергии, потребляемой ЭП СК, увеличивается в два раза – с 0,4 до 0,8 кВт·ч/т. Применение предложенного устройства, например, при средней эксплуатационной скорости подачи ОК (5 м/мин), позволяет снизить удельный расход электроэнергии СК на 14%. Одновременно с этим, как следует из рис. 9 (справа), расстояние, пройденное ТО СК за цикл работы ОК при выемке (прямой и обратный ход ОК), при наличии предлагаемого устройства уменьшается в 1,76 раза по сравнению со случаем, когда устройство отсутствует, что приводит к уменьшению износа тяговой цепи и рештаков СК.

Четвертая глава посвящена решению задачи выравнивания загрузки между приводными ЭД в многодвигательном ЭП СК. Применение многодвигательного ЧРЭП СК неизбежно влечет за собой неравномерную загрузку его приводных ЭД. Коэффициент неравномерности загрузки,

количественно оцениваемый как отношение развиваемых механических мощностей каждого ЭД, зависит от нагрузки привода, частоты f питающего напряжения, а также параметров самого ЭП. При самом неблагоприятном сочетании параметров ЭП и питающей сети коэффициент неравномерности может достигать значений в пределах 1,2 - 1,45.

Для устранения указанного недостатка было предложено использовать векторную систему управления с прямым управлением момента DTC , с выравниванием механической мощности на основе скользящего режима SMC .

Предложено применять один регулятор скорости (РС) на все ЭД, для которого в качестве обратной связи используется среднее значение скорости всех ЭД и два регулятора выравнивания (РВ), РВ1 для группы головного привода и РВ2, который выравнивает нагрузку между головным и хвостовым приводом, по средним значениям момента и скорости от головного и хвостового привода. Ошибки по скорости e_ω и по моменту e_M приводятся относительно скорости задания ω^* и среднего момента M_{cp} :

$$e_{\omega 1} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega^*}, e_{\omega 2} = \frac{\omega_3 - ((\omega_1 + \omega_2)/2)}{\omega^*} \quad (9)$$

$$\begin{cases} e_{M1} = \frac{M_1 - M_2}{M_{cp}} = \frac{M_{cp} - M_{pв1} + M_{pв2} - (M_{cp} + M_{pв1} + M_{pв2})}{M_{cp}} = -\frac{2M_{pв1}}{M_{cp}} \\ e_{M2} = \frac{M_3 - ((M_1 + M_2)/2)}{M_{cp}} = \frac{M_{cp} - M_{pв2} - ((M_{cp} - M_{pв1} + M_{pв2} + M_{cp} + M_{pв1} + M_{pв2})/2)}{M_{cp}} = -\frac{2M_{pв2}}{M_{cp}} \end{cases}$$

Разработанная система управления выравнивания нагрузки на основе РВ скользящего режима управления SMC приведена на рис. 10.

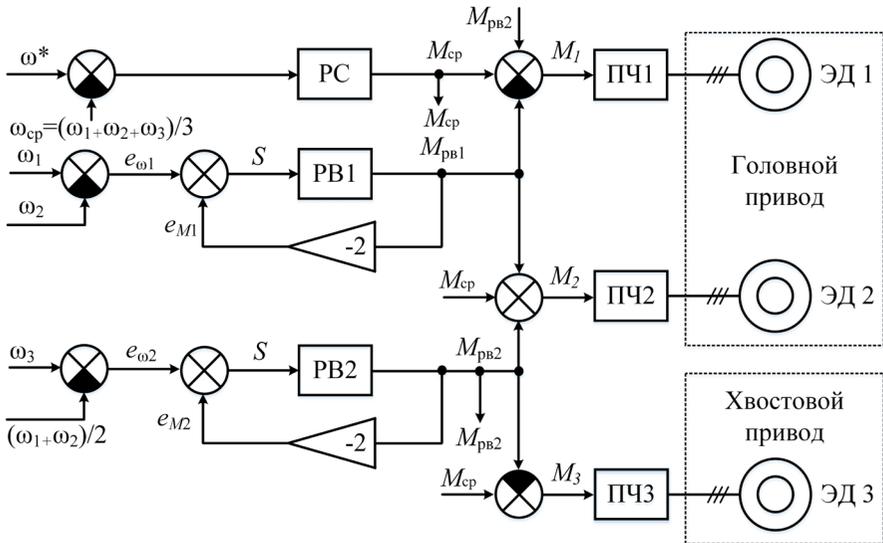


Рис. 10 – Система управления СК с скользящим РВ

Проверка разработанного способа согласованного управления многодвигательным ЭП СК для обеспечения равенства нагрузок на его приводных ЭД проводилась во всех режимах эксплуатации СК. На рис. 11 приведены временные зависимости развиваемой механической мощности приводных ЭД СК. Результат моделирования представлен для более тяжелого режима эксплуатации: при наличии провиса цепи, который возникает из-за малого предварительного натяжения цепи, т.е., когда головной привод не передаёт усилие на хвостовой привод.

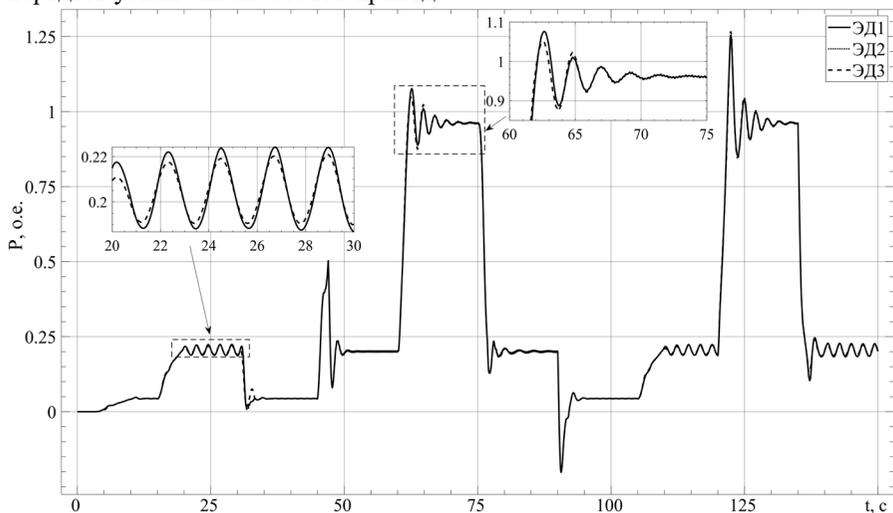


Рис. 11 – Развиваемая механическая мощность ЭД

Таким образом разработанный способ обеспечивает во всех рабочих режимах работы СК поддержание равенства механической мощности приводных ЭД многодвигательного ЭП СК с погрешностью, не превышающей 5%.

Пятая глава посвящена решению задачи улучшения показателей качества процесса пуска многодвигательного СК.

В качестве показателей, количественно оценивающих динамику процесса пуска, приняты: максимальные значения усилия в цепи ТО F_{max} (усилие возле головной звёздочки как наибольшее), пускового тока $I^* = I_{max}/I_{ном}$, развиваемого момента ЭД $M^* = M_{max.пуск}/M_{ном}$, динамического момента $M_{дин} = M_{эд} - M_{сопр.}$, углового рывка $j_{max} = d^2(\omega)/dt^2$. Величина углового рывка позволяет количественно оценить плавность пуска, т.к. угловой рывок отражает упругие деформации и удар в механической передаче ЭП СК.

Предлагается на первом этапе пуска осуществлять плавное нарастание момента ЭД с трапецидальной формой ускорения $\Delta M/\Delta t$, до тех пор, пока не будет выполнено условие для плавного переключения на второй этап с

работой по обратной связи. Наиболее подходящим вариантом решения этой задачи, является применение РС на основе скользящего режима управления *SMC*. Условием переключения между этапом плавного нарастания момента и работы по обратной связи, определено и принято достижение траектории скольжения на фазовой плоскости, когда $S=0$, тем самым обеспечивается плавное переключение между этапами, в качестве координат фазовой плоскости приняты ошибка по скорости e_ω и ошибка по ускорению e_ε :

$$S = e_\omega + e_\varepsilon = 0, \quad e_\omega = -e_\varepsilon. \quad (10)$$

РС на основе скользящего режима управления *SMC* будет иметь вид, представленный на рис. 12.

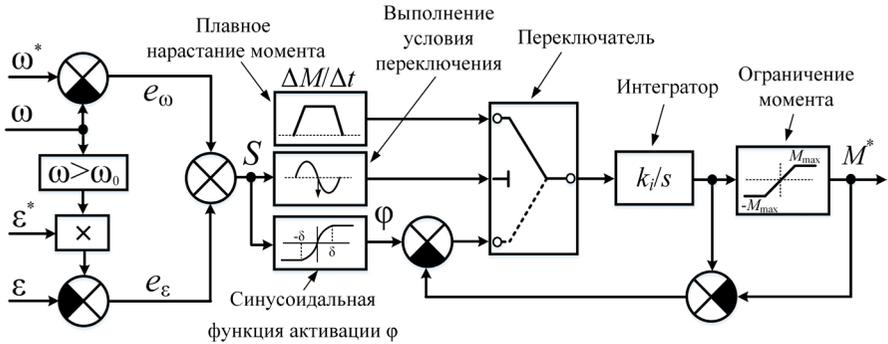


Рис. 12 – Регулятор скорости скользящего режима

После завершения пуска СК на пониженную скорость, скорость приводных ЭД необходимо увеличить до номинальной величины. Увеличение скорости (ускорение) связано с величиной прикладываемого динамического момента, поэтому необходимо определить такое ускорение СК, которое при номинальной его загрузке, не приведёт к значительной перегрузке ПЧ и ЭД.

По результатам моделирования разгона загруженного конвейера с пониженной скорости до номинальной при различном ускорении, величина максимального ускорения принята равной $\varepsilon_{\max}=0,125$ о.е., т.к. соответствует не превышению 10% перегрузки по току ПЧ.

В результате проведенного анализа была предложена новая форма ускорения «косинусно-трапецидальная». Данная форма ускорения характеризуется максимальным ускорением ε_{\max} в фиксированном интервале времени (T_1, T_2) и косинусоидальными кривыми в интервалах времени $(0, T_1)$ и (T_2, T) , фиксированные интервалы времени удовлетворяет выражению: $T_1=T/(2N+2)$, $T_2=(2N+1) \cdot T/(2N+2)$, где N – количество полупериодов косинусоидальной кривой.

Выражение для ускорения имеет вид:

$$\varepsilon^*(t) = \begin{cases} \frac{\varepsilon_{\max}}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{T_1} t\right) \right], & 0 \leq t \leq T_1 \\ \varepsilon_{\max}, & T_1 \leq t \leq T_2 \\ \frac{\varepsilon_{\max}}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{T_1} t\right) \right], & T_2 \leq t \leq T \end{cases} \quad (11)$$

В табл. 1 представлены результаты сравнения по выбранным выше показателям разработанного метода двухэтапного пуска с широко известным *S* образным. Рассматривались режимы пуска при различном коэффициенте загрузки СК, начиная с холостого хода $K_3=0$ о.е., заканчивая перегрузкой $K_3=1,25$ о.е.

Таблица 1

Электромеханические параметры СК марки Анжера-30 при различных методах пуска

Метод пуска	I_{\max} , о.е.	M_{\max} , о.е.	$M_{\text{дин.мак}}$, о.е.	j_{\max} , рад/с ³	F_{\max} , кН
$K_3=0$					
<i>S</i> образный	0,61	0,38	0,16	22	340
разработанный	0,58	0,32	0,09	15	335
$K_3=0,25$					
<i>S</i> образный	0,707	0,57	0,172	23	410
разработанный	0,67	0,51	0,1	13	410
$K_3=0,5$					
<i>S</i> образный	0,83	0,77	0,182	23	492
разработанный	0,79	0,71	0,107	12	491
$K_3=0,75$					
<i>S</i> образный	0,97	0,96	0,192	23	568
разработанный	0,93	0,92	0,115	12	565
$K_3=1,0$					
<i>S</i> образный	1,12	1,18	0,2	25	640
разработанный	1,1	1,14	0,13	12	637
$K_3=1,25$					
<i>S</i> образный	1,25	1,32	0,22	25	708
разработанный	1,2	1,3	0,15	12	707

В результате сравнительного анализа электромеханических параметров многодвигательного привода СК установлено, что при коэффициенте загрузки $K_3=0,75-1,25$ о.е., предложенный метода двухэтапного пуска обеспечивает уменьшение углового рывка в 1,9-2,1 раза и прикладываемого динамического момента на 35-40%, что, несомненно, повысит технический ресурс (срок службы) механических компонентов СК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано решение актуальной научной задачи, а именно повышение ресурсосбережения в многодвигательном электроприводе скребкового конвейера очистного забоя на основе разработанной методики проектирования ресурсосберегающей системы управления его электроприводом, имеющей важное теоретическое и практическое значение для горнодобывающей отрасли.

1. На основе анализа особенностей условий эксплуатации современного ОМК был сделан вывод, что традиционные приводные системы СК имеют ряд недостатков, связанные со сложностью запуска груженого конвейера и неравномерностью нагрузки его приводных двигателей из-за разброса электрических и механических параметров ЭП. Это, в свою очередь, приводит к возникновению больших пусковых токов и динамических усилий, а также уменьшению времени эксплуатации более загруженных приводных ЭД.

2. Разработанные математическая и на её основе имитационная модели частотно-регулируемого многодвигательного электропривода конвейера позволяют рассчитывать динамические процессы в ЭП и определять погонную нагрузку на СК. Полученные модели обеспечивают точность оценки электромеханических параметров ЭП СК по относительной погрешности расчётов в сравнении с экспериментальными данными для потребляемой мощности СК – 5,8%, для количества транспортируемого груза – 7%, для усилий в цепи – 8,02%.

3. Разработана методика проектирования ресурсосберегающей системы управления многодвигательным ЭП СК, включающей:

- алгоритм скоординированного регулирования скоростей ЭД СК и ЭД подачи ОК при их совместной работе в очистном забое, позволяющий уменьшить удельный расход электроэнергии ЭП СК и расстояние пробега ТО СК за один проход ОК. Например, для СК марки «Анжера-30» удельный расход электроэнергии для ЭП уменьшается до уровня 0,38 кВт·ч/т, а расстояние пробега ТО до 3,75 км. В результате ресурсосбережение СК по удельному расходу электроэнергии при средней эксплуатационной скорости подачи ОК (5 м/мин), повышается на 14%.

- метод двухэтапного частотного пуска ЭП СК, позволяющий снизить величину углового рывка. Так для СК марки «Анжера-30» угловой рывок снижается в 1,9-2,1 раза, а прикладываемый динамический момент на 35-40%, тем самым увеличивается ресурс электропривода СК.

- способ согласованного управления многодвигательным ЭП СК, обеспечивающий минимальную неравномерность загрузки между его приводными ЭД во всех рабочих режимах работы. Так для СК марки «Анжера-30» неравномерность загрузки между его приводными ЭД не превышает 5%, что исключает работу ЭД с перегрузкой.

4. Разработанная методика проектирования ресурсосберегающей системы управления многодвигательным ЭП является универсальной и может быть применена к любым типам многодвигательных ЭП, работающих на общую нагрузку.

В качестве рекомендаций по перспективе дальнейших разработок, можно отметить продолжение исследования многодвигательного ЭП СК с целью обнаружения аварийных режимов его работы, таких как заклинивание и обрыв цепи, на основе разработанных моделей, и создание средства для предотвращения таких режимов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Бабокин Г.И., Шпрехер Д.М., Зеленков А.В., **Овсянников Д.С.** Универсальная компьютерная модель для исследования динамики скребкового конвейера с двухдвигательным приводом // Изв. вузов. Электромеханика. – 2021. – Т. 64. – № 2. – С. 56 – 64. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-2-56-64.

2. Шпрехер Д.М., Бабокин Г.И., Колесников Е.Б., **Овсянников Д.С.** Исследование неравномерности нагружения двухдвигательного частотно-регулируемого электропривода скребкового конвейера // Известия вузов. Электромеханика. – 2021. – Т. 64. – № 4-5. – С. 37 – 45. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-37-45.

3. Шпрехер Д.М., **Овсянников Д.С.** Разработка модели двухдвигательного скребкового конвейера в программном пакете SIMSCAPE // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. – 2021. – Вып. 9. – С. 318 – 326. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-9-318-326.

4. **Овсянников Д.С.** Моделирование динамики распределения нагрузки на скребковом конвейере // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. – 2021. – Вып. 11. – С. 435 – 439.

5. **Овсянников Д.С.** Исследование двухступенчатого пуска электропривода скребкового конвейера методом математического моделирования // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. – 2021. – Вып. 11. – С. 558 – 562.

6. Бабокин Г.И., Шпрехер Д.М., Колесников Е.Б., **Овсянников Д.С.** Исследование частотного пуска двухдвигательного электропривода скребкового конвейера методом математического моделирования // Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 1. – С. 49 – 55. DOI:10.17213/0136-3360-2022-1-49-55.

7. Шпрехер Д.М., Бабокин Г.И., **Овсянников Д.С.** Система управления выравниванием нагрузки многодвигательного электропривода скребкового конвейера // Известия вузов. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 3. – С. 56 – 65. DOI: 10.17213/0136-3360-2022-3-56-65.

8. Шпрехер Д.М., **Овсянников Д.С.** Разработка и исследование систем управления многодвигательным электроприводом шахтного скребкового конвейера // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. – 2022. – Вып. 9. – С. 524 – 531. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-9-524-531.

9. **Овсянников Д.С.** Применение адаптивного регулятора скорости в системе управления электроприводом скребкового конвейера // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. – 2022. – Вып. 12. – С. 686 – 690. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-12-686-691.

10. Шпрехер Д.М., Бабокин Г.И., Колесников Е.Б., **Овсянников Д.С.** Разработка стратегии управления плавным пуском двухприводного лавного скребкового конвейера // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. – 2023. – Вып. 2. – С. 568 – 576. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-2-568-576.

11. **Овсянников Д.С.** Исследование двухступенчатого плавного пуска двухприводного скребкового конвейера // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. – 2023. – Вып. 5. – С. 326 – 327. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-326-327.

12. Шпрехер Д.М., Бабокин Г.И., Колесников Е.Б., **Овсянников Д.С.** Разработка алгоритма частотного пуска электропривода скребкового конвейера с минимальным рывком в цепи тягового органа // Известия вузов. Электромеханика. – 2023. – Т. 66. – № 2. – С. 58 – 67. DOI: 10.17213/0136-3360-2023-2-58-67.

13. Шпрехер Д.М., Корниенко С.В., **Овсянников Д.С.** Моделирование экстренных перегрузок скребкового конвейера для разработки средств по их ограничению // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. – 2023. – Вып. 12. – С. 327 – 334. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-327-328.

14. Шпрехер Д.М., Бабокин Г.И., **Овсянников Д.С.** Адаптивный регулятор выравнивания нагрузки скребкового конвейера // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. – 2024. – Вып. 5. – С. 349 – 353. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-5-349-350.

15. Шпрехер Д.М., Бабокин Г.И., **Овсянников Д.С.** Наблюдатель потокосцепления статора асинхронного двигателя на основе низкочастотного фильтра // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. – 2024. – Вып. 5. – С. 375 – 378. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-5-375-376.

В изданиях, индексируемых в Scopus:

16. Шпрехер Д.М., Бабокин Г.И., Колесников Е.Б., **Овсянников Д.С.** Ресурсосберегающая система управления электроприводом скребкового конвейера очистного забоя // Горный журнал. – 2023. – № 2. – С. 44 – 50. DOI: 10.17580/gzh.2023.02.07.

17. Шпрехер Д.М., Бабокин Г.И., Колесников Е.Б., **Овсянников Д.С.** Исследование закономерностей электропотребления электропривода скребкового конвейера очистного забоя // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 10. – С.

149 – 163. DOI: 10.25018/0236-1493-2023-10-0-149.

Объекты авторского права и интеллектуальной собственности

18. Шпрехер Д.М., **Овсянников Д.С.** Программа для исследования работы системы очистной комбайн - скребковый конвейер в высокопроизводительном механизированном очистном забое // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023610868. Заявка № 2022685702. Регистрация в Реестре программ для ЭВМ 13.01.2023.

19. Шпрехер Д.М., Зеленков А.В., **Овсянников Д.С.** Программа расчета динамических параметров тягового органа скребкового конвейера в варьируемым числом сосредоточенных масс // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023667634. Заявка № 2022366532. Регистрация в Реестре программ для ЭВМ 16.09.2023.

20. Шпрехер Д.М., Бабокин Г.И., Колесников Е.Б., **Овсянников Д.С.** Устройство автоматического управления забойной машиной и конвейером // Патент на изобретение, № 2814926. от 06.03.2024.

В изданиях, индексируемых в РИНЦ:

21. Shprekher D.M., Zelenkov A.V., **Ovsyannikov D.S.** Universal Computer Model for Studying the Dynamics of a Two-Motor Scraper Conveyor // Proceedings – 2021 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021. pp. 321 – 326. DOI: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537429.

22. Shprekher D.M., Kolesnikov E.B., **Ovsyannikov D.S.** Adaptive Scraper Conveyor Loading Control System // ICIE-2023. Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering. 2023. pp 365 – 374. DOI: 10.1007/978-3-031-38126-3-37.

23. Shprekher D.M., Zelenkov A.V., **Ovsyannikov D.S.** Dynamic analysis of the reaction of a scraper conveyor when a chain jammed // ICIE-2024. Proceedings of the 10th International Conference on Industrial Engineering. 2024. pp 983 – 989. DOI:10.1109/ICIEAM60818.2024.10553797.