

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС»**

ЛЕ ДИНЬ ХИЕУ

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЗАБОЙНЫМИ
СКРЕБКОВЫМИ КОНВЕЙЕРАМИ НА ОСНОВЕ МЯГКИХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: Доктор технических наук, заведующий кафедрой
автоматизированных систем управления ФГАОУ ВПО НИТУ «МИСиС»
Темкин Игорь Олегович

Москва – 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из важнейших задач, стоящих перед угольной промышленностью Республики Вьетнам, является дальнейшее совершенствование технологии подземной добычи угля при одновременном повышении уровня технико-экономического развития шахт и уровня безопасности ведения работ в них.

Из 57 млн т добытого угля в 2017 году, 95% добывались при помощи буровзрывных и ручных работ, а добыча угля с использованием средств комплексной механизации в том же году составила (по данным вьетнамской компании: Винакомин) всего лишь 3%. Предположительно, доля подземной добычи угля в стране с 2018 до 2025 год увеличится с 45% до 89% и достигнет 63 млн т, а доля открытых горных работ понизится с 53% до 8 %.

В передовых угледобывающих странах мира основной объем подземной добычи угля обеспечивается комплексно-механизированными длиннолавыми системами, оснащенными самопередвигающимися механизированными крепями, гидроприводом и скребковыми конвейерными системами.

Следовательно, Вьетнаму также стоит сосредотачивать свои усилия на разработке, внедрении и повышении эффективности использования систем автоматизации технологических процессов, обеспечивающих добычу угля подземным способом.

В связи с вышеизложенным, разработка системы автоматизации работы скребкового конвейера и соответствующих алгоритмов управления, в целях повышения надежности и эффективности подземных работ по добыче угля в провинции Куангнинь, является важной научно-практической задачей, необходимость решения которой обуславливает актуальность проведения исследования в данной области.

Состояние вопроса. Научные, и практические основы технологии подземной добычи угля насчитывают историю более 260 лет. А вопросы теории и практики разработки средств автоматизации, автоматических и автоматизированных систем контроля и управления подземными горно-технологическими процессами активно развиваются уже более 60 лет. Вопросам стабилизации тягового фактора ленточных конвейерных установок посвящены работы многих ученых. Член корреспондент АН СССР Спиваковский А.О. впервые поставил задачу регулирования тягового фактора. В конце 60.х годов прошлого столетия Солод Г.И., Мерцалов Р.В., Шахмейстер Л.Г. сформулировали задачу создания системы автоматической стабилизации нагрузки на ленте конвейера. Над поставленными вопросами работали такие ученые, как Зарецкий О.М., Папоян Р.Л., Пономаренко В.А., Лобачева А.К.,

Певзнер Л.Д., Бишеле И.В., Кубрин С.С., Дмитриев В.Г., Назаренко В.М., Мамалыга В.М., Сокотнюк Ю.А., Zhan Zhang, Guomundur Amar, A. Butko, Gretarsson и др. Ими были получены существенные результаты, которые привели к тому, что сегодня актуальными являются уже не принципиальные вопросы механизации и автоматизации, а конкретные задачи совершенствования автоматизированных систем управления шахтными конвейерами.

Идея работы заключается в использовании аппарата нечеткой логики и методов эволюционной оптимизации, объединенных термином «мягкие вычислительные модели», для разработки алгоритмов управления пуском и скоростью перемещения конвейерной цепи скребкового конвейера.

Целью диссертации является повышение эксплуатационных характеристик скребковых конвейеров в условиях неравномерной нагрузки за счет разработки автоматизированной системы стабилизации скорости перемещения и силы натяжения конвейерной цепи, а также оптимизации процесса запуска скребкового конвейера.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ подходов к управлению пусковыми процессами скребкового конвейера, с учетом залегания подземных угольных пластов в шахтах Вьетнама.
2. Исследование способов применения метода двухскоростного плавного пуска с использованием алгоритмов оптимизации процессов запуска на основе нечеткой логики и возможности применения «Синхронного двигателя с постоянными магнитами» (СДПМ) в целях стабилизации скорости и силы натяжения скребкового конвейера.
3. Построение математической модели и алгоритма для управления натяжением цепи скребкового конвейера в процессе эксплуатации.
4. Разработка алгоритмов управления скоростью вращения двигателя СДПМ с использованием различных схем оптимизации, на основе мягких вычислительных моделей.
5. Экспериментальное исследование разработанных алгоритмов в системе dSPACE с использованием средств программно-аппаратного моделирования (ПАМ).

Научные положения, разработанные соискателем, и их новизна:

- Разработан алгоритм, основанный на использовании двухэтапной процедуры запуска приводов, с использованием анти S – образной схемы пуска («анти – S»), обеспечивающий снижение ударной нагрузки по сравнению процедурой прямого запуска в 2-2,5 раза.

- Разработанная схема «мягкие вычислительные модели - ПИД-регулятор» позволяет реализовать оперативную (в пределах 0,1 сек) автоматическую регулировку трех параметров K_p , K_i , K_d , обеспечивая ошибку по скорости в пределах 1-2% и, следовательно, эффективно управлять натяжением скребкового конвейера, снижая опасность его повреждений.
- Разработанный программный алгоритм управления скоростью и моментом двигателя «СДПМ», позволяет реализовать эффективное управление конвейером, снижающее расход энергии на 12-20% в зависимости от схемы расположения конвейера в забое.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

1. Существующими отечественными и зарубежными примерами разработки эффективных алгоритмов управления и методологиями проектирования оптимальных контроллеров с использованием нечеткой логики;
2. Корректным использованием комплексных теоретических подходов (теории дифференциальных уравнений, теории нечетких множеств, методов математического моделирования и теории автоматического управления) и технологий компьютерного моделирования;
3. Детальным изучением и корректным использованием при разработке алгоритмов технической документации по скребковым конвейерам;
4. Сходимостью результатов теоретических исследований с результатами компьютерного моделирования с использованием программ Matlab-Simulink и dSPACE.

Методы исследования. В работе использовались признанные научные методы анализа и исследования режимов работы конвейерной системы, теория автоматического управления, теория управления сложными системами, методы параметрического моделирования и оптимизации.

Практическое значение работы заключается в программно-аппаратной реализации алгоритмов управления функционированием забойного скребкового конвейера, которые в итоге могут быть оперативно адаптированы к различным условиям эксплуатации в шахтах Вьетнама.

Реализация полученных результатов исследования. Основные научные результаты данной работы приняты к использованию Ханойским институтом горной науки и технологий (ХИГНиТ) для документирования разработки и построения алгоритма управления скребкового конвейера в подземных угольных шахтах провинции Куангнинь, Вьетнам.

Апробация работы. Основные научные положения диссертационной работы докладывались на следующих научных форумах:

- IEEE Seventh International Conference on Communications and Electronics (ICCE) (Вьетнам, 2018 г);
- Международный симпозиум «Неделя горняка» (Москва, 2020 г);
- Conference of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Москва, 2021 г).

Публикации. По результатам научных исследований имеется 7 публикаций, в том числе 6 публикаций в журналах и сборниках конференций индексируемых в наукометрической базе данных – Scopus.

Структурный объем работы.

Работа состоит из введения, 4 главы, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 121 страниц машинописного текста, 14 таблицы, содержит 66 рисунков, список литературы из 100 источников и 1 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель диссертации и решаемые для ее достижения задачи, представлены основные научные положения, выносимые на защиту, а также сведения о научной новизне, практическом значении работы и реализации результатов работы.

В первой главе проведен анализ условий функционирования и перспектив развития угольной промышленности Вьетнама; выполнен краткий обзор технологий подземной добычи угля и перспективы использования скребковых конвейеров в шахтах Вьетнама; рассмотрены некоторые подходы к автоматизации функционирования скребковых конвейеров с использованием различных алгоритмов, в частности, алгоритмов управления на основе нечеткой логики и эволюционной оптимизации.

Разведанные ресурсы угольных шахт Вьетнама к настоящему времени оцениваются примерно в 25 млрд т. По результатам оценки и разведки Ханойского института горной науки и технологии (ХИГНиТ) в стране имеются большие запасы угля, значительная часть которого пригодна для коксования, которых почти 84% сосредоточено в бассейне Куанг Нинь. Учитывая это обстоятельство, он останется одним из важнейших сырьевых ресурсов для металлургии, энергетики и химической промышленности Вьетнама до 2040 года.

По перспективному плану компании «Винакомин» в период с 2010 до 2025 г. рост добычи угля должен составить более 12%. При этом к 2025 году уровень добычи угля подземным способом должен возрасти с 46% до 90%, а уровень добычи открытым способом снизится с 44% до 8% (рис. 1).

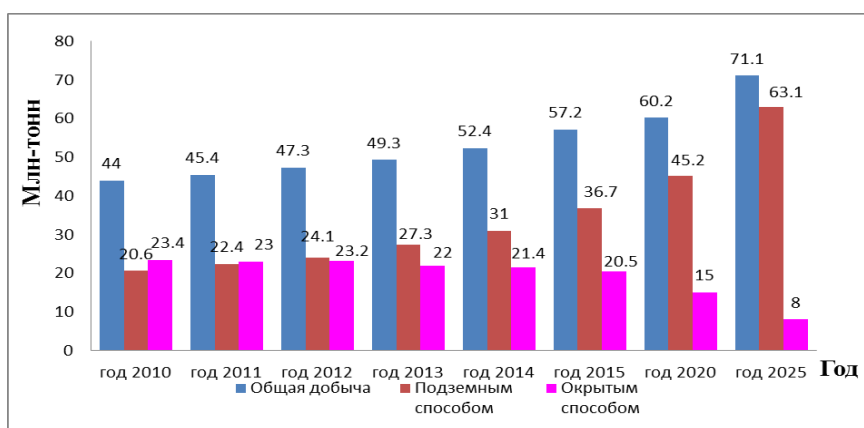


Рис.1. Общая добыча угля во Вьетнаме в период с 2010 по 2015 г. и прогноз добычи до 2025 г.

До недавнего времени в стране использовались преимущественно старые технологии добычи угля, из-за чего производительность труда была весьма низкой и составляла всего лишь 1,5-3 т в смену, а скорость отработки пластов составляла всего ~18-25 м/месяц. В течении следующих 10-20 лет Вьетнам планирует использовать механизированное и автоматизированные оборудования для разработки подземных угольных пластов, что позволит сократить ручной труд, повысить безопасность и эффективность эксплуатации и управления ее процессом при помощи компьютеров.

Скребковый конвейер (СК) – один из ключевых узлов механизации и автоматизации добычи угля. В вопросах его внедрения в процессы угледобычи, Вьетнам придерживается смешанной политики – импорт оборудования из-за границы и местная разработка с участием таких организаций, как «Институт энергетики и горного дела», «Уонгби», осуществляющих проектирование и разработку отдельных элементов и узлов СК.

Анализ перспектив и тенденций развития угольной промышленности Вьетнама показывает, что автоматизация управления скоростью, натяжением и построение программного модуля для управления работой СК позволит существенно повысить эффективность процессов угледобычи и будет содействовать решению задач, стоящих перед угольной промышленностью Вьетнама.

Также в данной главе приводится анализ достоинств и недостатков существующих схем запуска и алгоритмов управления натяжением цепи скребкового конвейера. Представлен краткий обзор примеров использования теории нечетких множеств, схем нечеткого логического вывода и методов эволюционной оптимизации в задачах управления технологическими устройствами и процессами.

Во второй главе проведено моделирование и расчет рабочих и пусковых режимов СК. Основная решаемая задача заключается в поиске оптимальных

режимов запуска двухскоростного СК. Для этой цели был исследован ряд режимов запуска, таких как: линейный, параболический, синусоидальный и Анти-S при следующих положениях конвейера: горизонтальное положение, подъем на 10° и спуск на -10° .

Длина скребкового конвейера и максимальная мощность электродвигателя определяется исходя из горно-геологических условий.

Интегральная модель системы СК была построена в программной среде MATLAB. За основу при построении модели была взята структурная схема, построенная на основе формализмов Кельвина-Фойгта, которая представлена на рис. 2.

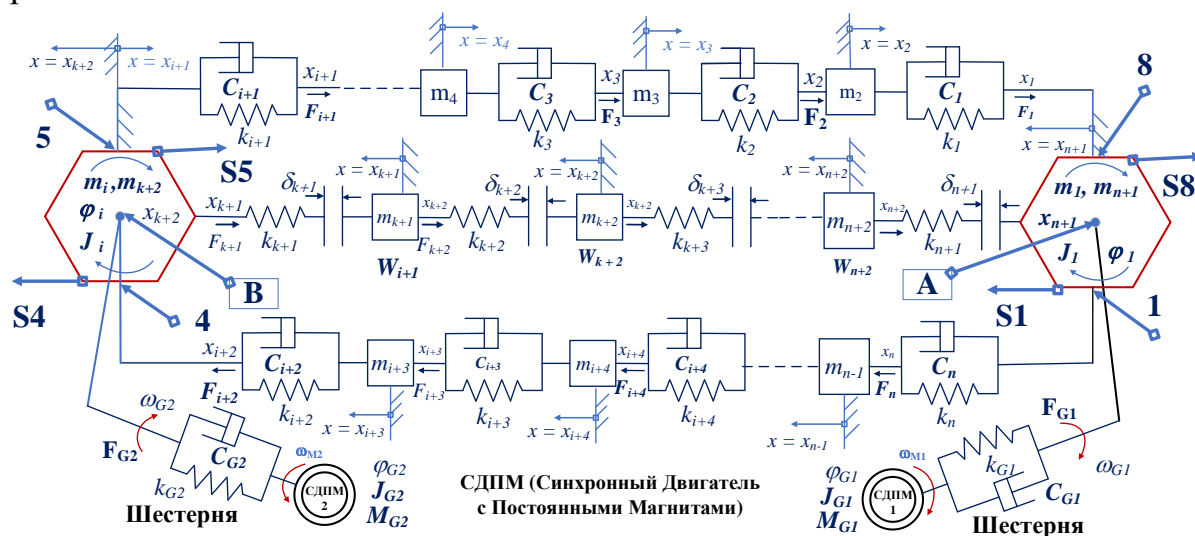


Рис. 2. Структурная схема модели скребкового конвейера.

При моделировании были использованы следующие параметры СК:

ТАБЛИЦА 1. ЗНАЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СК.

Название параметра	Единица измерения	Значение
Общая длина конвейера	м	$L = 240$
Транспортировочная мощность	т/ч	$Q = 450$
Скорость движения	м/с	$V_0 = 1,2$
Угол наклона конвейера	$^\circ$	$\beta = 1$
Длина центральной канавки	м	$L_C = 0,63$
Высота верхней и средней канавки	м	$h_1 = 0,122$
КПД передаточного устройства	%	$\eta = 0,86$
Коэффициент перегрузки двигателя	-	$\lambda_m = 2,5$
Насыпная плотность сырого угля	кг/м ³	$\rho = 1000$
Коэффициент трения цепи и угля по секционным желобам	-	$\mu_{sc} = (0,00625 \div 0,39)V$

Средствами управления для двух систем привода являются СДПМ, которые контролируют скорость вращения цепного колеса СК в соответствии с известным методом.

Номинальные параметры двух приводных систем СДПМ: мощность = 110 (кВт); скорость вращения = 1500 (об/мин); радиус окружности шага звездочки (м); число зубьев $z = 7$; стандартные размеры звена цепи $d \cdot t = 22(\text{мм}) \cdot 86(\text{мм})$. Учитывая быструю скорость передачи волны напряжения в цепи, головное и хвостовое приводные устройства цепи запускаются одновременно.

На рис. 3 представлены результаты имитационного моделирования. Из графиков, иллюстрирующих динамику основных параметров при различных режимах запуска видно, что выбор режима существенно сказывается на натяжении цепи в ключевых (определенных для исследования) точках СК.

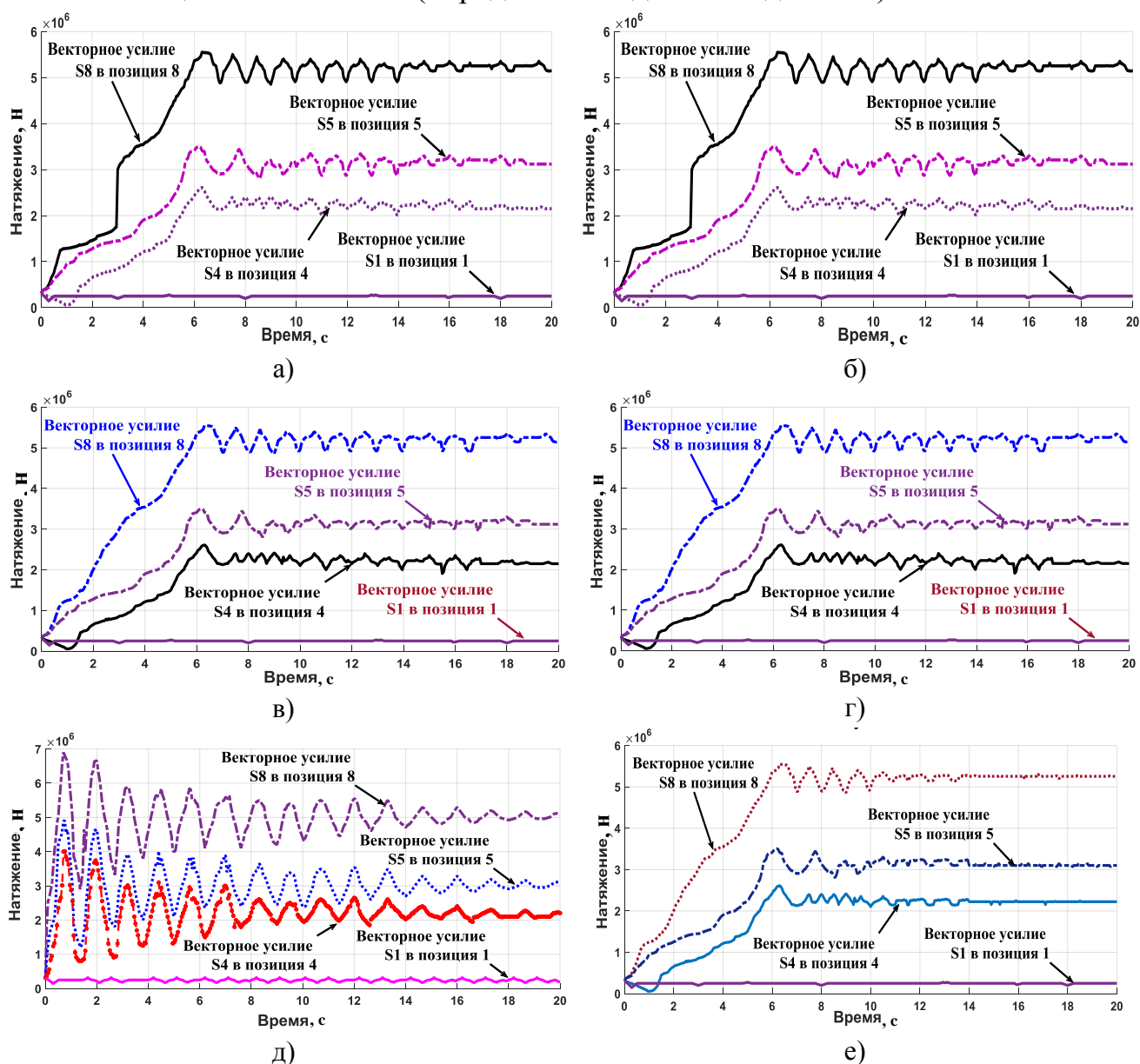


Рис. 3. Натяжение цепи в положениях 1-4, соответствующее: а) линейному режиму с предварительным запуском; б) анти-S режиму запуска; в) синусоидальному режиму с предварительным запуском; г) параболическому

режиму с предварительным запуском; д) прямому режиму запуска; е) анти-S режиму без предварительного запуска.

На рисунках показано начальное натяжение в точке 8, а также натяжение в других ключевых точках при различных режимах запуска системы.

В ходе всех вычислительных экспериментов параметры модели не менялись, варьировались только режимы и функции изменения скорости запуска после предварительного запуска. Для сравнительного анализа полученных в ходе имитационного моделирования результатов использовались следующие оценочные критерии:

K1. Отклонение результатов моделирования силы натяжения S_8 на временном интервале $[0-6]$ с от функции, соответствующей при запуске конвейера некоторой «идеальной кривой скорости», которая соответствует определенному оптимальному переходу с низкой скорости за период T_0 на вторую ступень скорости за период T_1 .

K2. Суммарное значение величины колебаний по всем траекториям (ключевым точкам) для различных режимов запуска.

K3. Минимальное время достижения условия $|F_r(t_i + 1) - F_r(t_i)| < e, r = 1, 2, 3, 4$, где $F_r(t_0)$ – начальное натяжение цепи $t_0 = 0$ (Н);

$F_r(t_i + 1)$ – натяжение цепи в моменты стабилизации $(t_i + 1)$ (Н);

r – точки натяжения цепи (рис. 2), $r = 1, 4, 5, 8$.

$F_1(r = 1) = S_1$ – натяжения в точке 1;

$F_4(r = 4) = S_4$ – натяжение в точке 4;

$F_5(r = 5) = S_5$ – натяжение в точке 5;

$F_8(r = 8) = S_8$ – натяжение в точке 8;

e – минимальное статическое отклонение. $F_r(t_0)$ будет удовлетворительным, если $e < 5\%$.

Как показано на рис. 3(д), во время прямого запуска системы электропривода, процесс имеет максимальное динамическое натяжение, и амплитуда колебания цепи крайне велика. В тоже время, процесс запуска Анти-S режима (рис. 3(б)) проходит плавнее по сравнению с прямым.

Управление анти-S типом изменения натяжения (даже без предварительного запуска) является весьма эффективным и превосходит все остальные варианты по критерию K_1 , а также не уступает большинству из них по критерию K_3 . Однако, использование режима предварительного запуска существенно снижает интегральную ударную нагрузку на СК в позициях (точках) 1, 4, 5, 8 (рис. 3(е)). Графики наглядно демонстрируют, что двухступенчатый запуск оказывает положительное влияние на систему (рис. 3(б) и рис. 3(е)). Причина этого: обеспечение систематической нагрузки на цепь

СК, которая в конечном итоге приводит к эффективному использованию конвейера в целом.

В итоге, могут быть сформулированы основные положения, связанные с оптимизацией процедурой запуска СК:

1) Натяжение цепи в точках 1, 4, 5, 8 (рис. 2) должна быть минимальным в процессе запуска.

2) Время стабилизации натяжения после запуска: 6-7 (с).

3) После стабилизации, натяжение в точках 1, 4, 5, 8 (рис. 2) должно иметь минимальное значение колебаний вокруг рабочей области.

4) Количество циклов колебаний натяжения в точках 1, 4, 5, 8 (рис. 2) до стабилизации натяжения цепи: 8-10 циклов.

5) Запуск СК с двухуровневой скоростью выполняется в 2 этапа: в первом этапе начальная скорость $V_0 = 0,12$ (м/с). При номинальной скорости $V_1 = 1,2$ (м/с) СК будет работать стабильно. Затем на втором этапе V_0 увеличивается до значения V_1 .

6) Увеличение скорости от V_0 до V_1 в режиме анти-S дает наилучшие результаты натяжения цепи в критических точках 1, 4, 5, 8 (особенно в точке 8 (с натяжением S8)).

Результаты сравнения имитационного моделирования сведены в таблице ниже:

ТАБЛИЦА 2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.

Способ запуска	Критерии оценки качества												Оценка
	Натяжение в точках 1, 4, 5, 8												
	K1 (%) < =5%				K2 (n) <= 3				K3 (с) < 8 (с)				
	S1	S4	S5	S8	S1	S4	S5	S8	S1	S4	S5	S8	
А	13	21	14	6	0	2	3	7	1,0	5,5	5,8	6,1	Удовл.
Б	6	17	8	6	0	1	2	4	1,0	5,4	5,8	6,0	Удовл.
В	6	13	11	5	0	1	2	4	1,0	5,2	5,5	5,7	Хорошо
Г	6	17	8	5	0	1	2	5	1,0	5,3	5,5	5,8	Хорошо
Д	19	72	51	27	1	10	10	11	2,0	12,3	13,8	14,5	Неудовл.
Е	3	4	5	1	0	1	1	3	1,0	5,1	5,3	5,5	Отлично

Для поддержания постоянного натяжения может быть использована гидравлическая поршневая система в сочетании с электромагнитным клапаном, который регулирует давление масла, подаваемого в цилиндр. Принципиальная схема управления натяжением цепи представлена на рис. 4.

На рис. 5 представлена структура системы управления с обратной связью, где нечеткий ПИД-регулятор управляет состоянием открытия/закрытия электромагнитного клапана, изменяя давление масла, подаваемого в цилиндр. Такой подход позволяет оперативно изменять длину шага поршня, что дает возможность вовремя регулировать натяжение цепи СК.

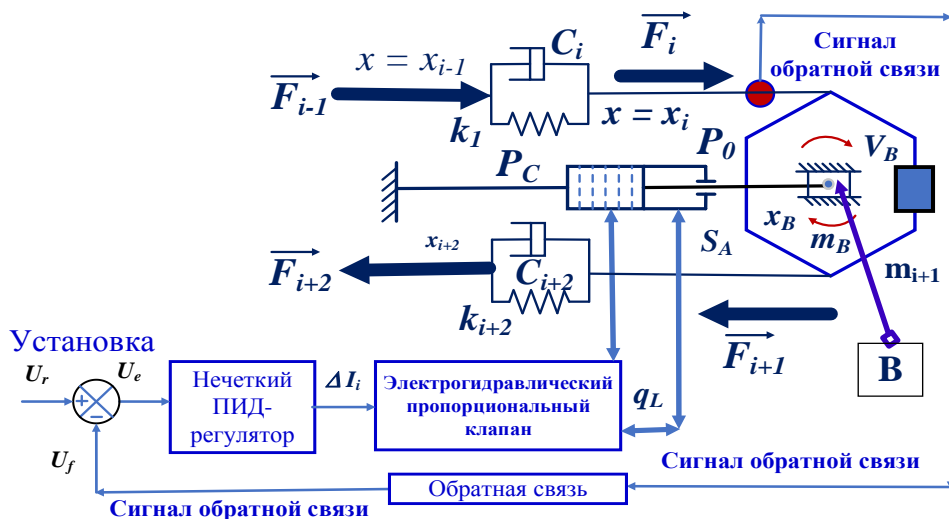


Рис. 4. Принципиальная схема управления натяжением цепи скребкового конвейера.

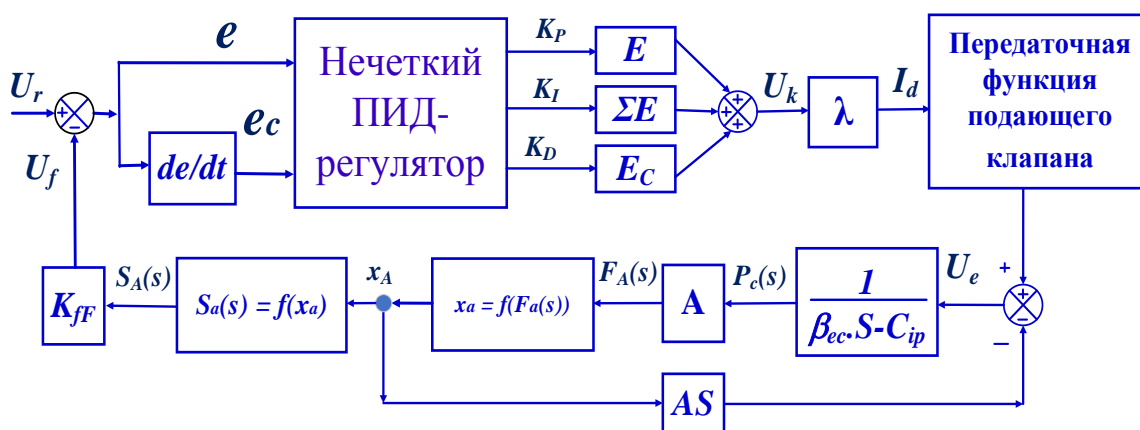
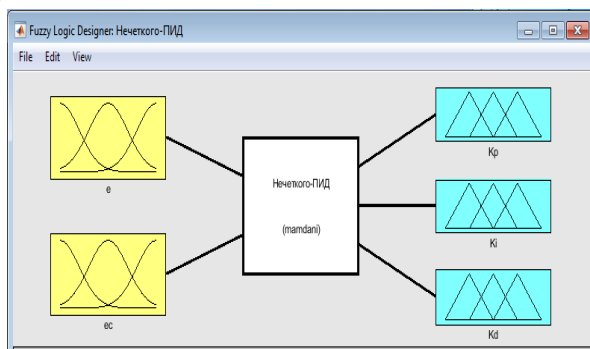
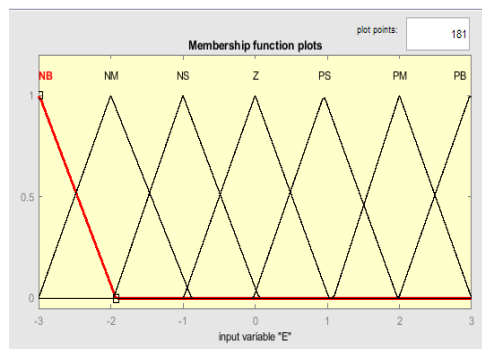


Рис. 5. Структура нечеткого ПИД-регулятора состояния клапана.

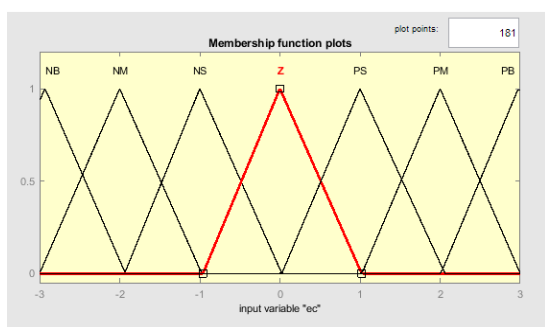
На рис. 6 иллюстрируется создание функции принадлежности ошибки (e) и производной ошибки (e_c) для построения нечеткого ПИД-регулятора в программе Matlab (FLT).



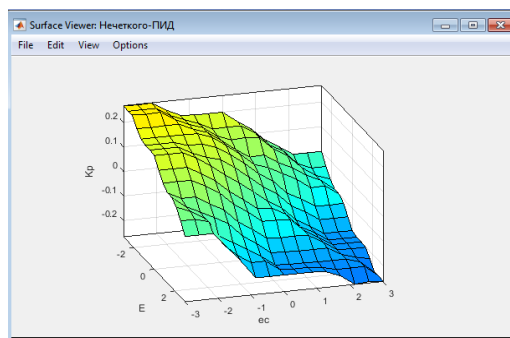
а)



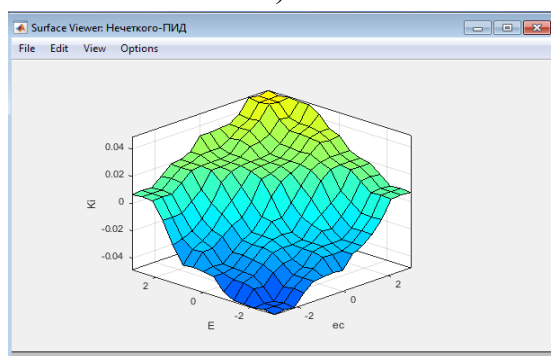
б)



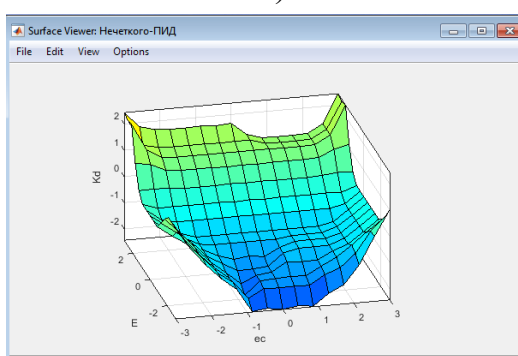
в)



г)



д)



е)

Рис. 6. нечеткий ПИД-регулятор натяжения цепи СК: а) Графический интерфейс редактора FIS; б) Функция принадлежности e ; в) Функция принадлежности e_c ; г) Средство просмотра поверхности параметра K_p ; д) Средство просмотра поверхности параметра K_i ; е) Средство просмотра поверхности параметра K_d .

Параметры системы СК были занесены в модель для расчета выходных параметров. На рис. 7 показаны результаты моделирования процесса управления натяжением цепи. При управлении натяжением с использованием ПИД-регулятора (красная линия), натяжение цепи СК сильно колеблется, доходя до пикового значения $245 \cdot 10^5$ (Н). Колебания затухают после 3 циклов и стабилизируется в течение 1,25 (с) при значении близком к $2,1 \cdot 10^4$ (Н).

Если при запуске СК мы используем Нечеткий ПИД-регулятор (синяя линия) для управления натяжением цепи, то силы, управляющие натяжением конвейера, нормализуются после 3 циклов по мере уменьшения колебаний и стабилизируются через 0,38 (с) при значении $2,1 \cdot 10^4$ (Н). При сравнении результатов управления натяжением СК с ПИД-регулятором и нечетким ПИД-регулятором, видно, что последний обеспечивает гораздо лучшее качество регулирования.

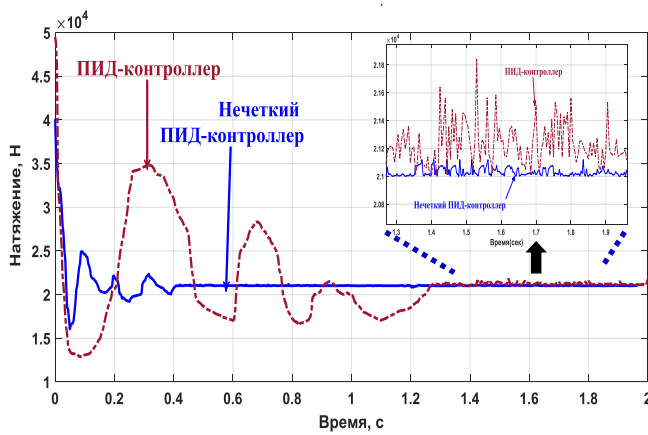


Рис. 7. Переходные процессы при управлении натяжением цепи (при сниженной нагрузке) СК с ПИД-регулятором и нечетким ПИД-регулятором.

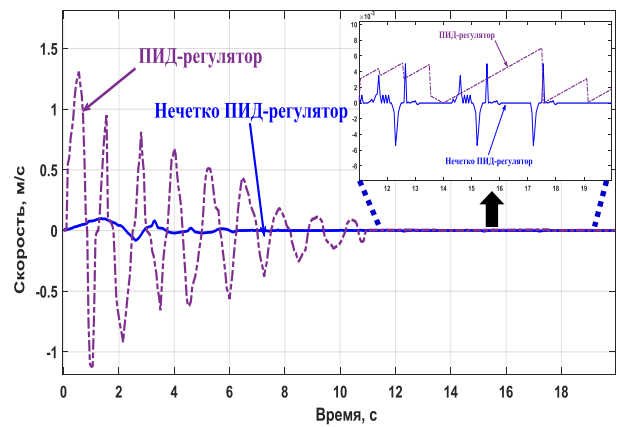


Рис. 8. Сравнение скорости движения гидроцилиндра при использовании ПИД-регулятора и нечеткого ПИД-регулятора.

При запуске с использованием ПИД-регулятора, скорость гидроцилиндра сильно колеблется доходя до пикового значения 1,41 м/с. Скорость поршня постепенно снижается после 7 циклов и стабилизируется в течение 10,25 с с примерно нулевым значением. При запуске СК с нечетким ПИД-регулятором для управления натяжением цепи, скорость поршня уменьшается уже после 3 циклов и достигает пикового значения 0,11 м/с, а затем стабилизируется через 5,8 (с) при примерно нулевом значении.

На рис. 8 представлены результаты сравнения переходных процессов при управлении скоростью поршня для аналогичных типов регуляторов. Результаты моделирования показывают, что нечеткий ПИД-регулятор более надежен и обеспечивает лучшее качество управления.

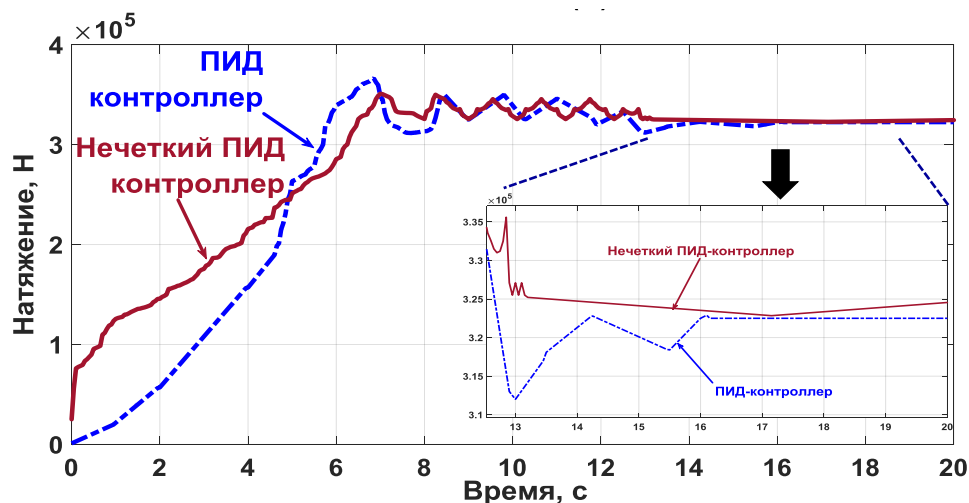


Рис. 9. Переходные процессы при управлении натяжением цепи (при номинальной нагрузке) СК с ПИД-регулятором и нечетким ПИД-регулятором.

На рис. 9 изображены процессы и сравнение изменений натяжения гидроцилиндра с помощью ПИД-регулятора и нечеткого ПИД-регулятора. Результаты показывают, что натяжение гидроцилиндра нечетким ПИД-регулятором более надежен и дает лучшее качество управления. Из рисунка также видно, что система имеет тенденцию к стабильности после $t = 12,1$ (с) при приблизительном значении равном $3,24 \cdot 10^5$ (h). Условия эксплуатации для пусковых условий $v_{A \max} = 200$ (л/с) и скорости ниже проектной максимальной. Максимальное расстояние выдвижения штока поршня $x_{A \max} = 0.324$ (м).

В третьей главе описан метод наблюдения за крутящим моментом нагрузки на валу двигателя СДПМ, отслеживающий изменение массы угля на СК. Построен алгоритм стабилизации коэффициента лобового сопротивления в условиях неравномерной нагрузки на звездочку. Разработан наблюдатель крутящего момента Нагрузки в Скользящем Режиме с Плавным Переключением (НСР-ПП), который быстро измеряет и обнаруживает изменение момента нагрузки на валу двигателя СДПМ в зависимости от значения тока и разности скоростей вращения двигателя.

Принципиальная схема НСР-ПП показана на рис. 10. На рис. 11 изображено соединение скользящей муфты НСР-ПП с моментом нагрузки T_L и стабилизатором скорости ω для подачи тока i''_q . Регулировка напряжения U_q осуществляется при помощи ПИ-регулятора i_q (рис. 12). Значение U_q преобразовывает систему координат dq в $\alpha\beta$ ($U\alpha\beta$) для пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ПВШИМ) инвертора. Таким образом, инвертор будет стабилизировать скорость двигателя (косвенное управление стабилизацией скорости работы СК), обеспечивая производительность и предотвращая перегрузку, вызванную крутящим моментом (уголь, загружаемый на СК).

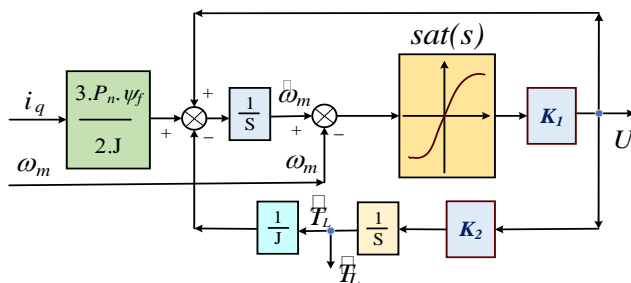


Рис. 10. Принципиальная схема НСР-ПП.

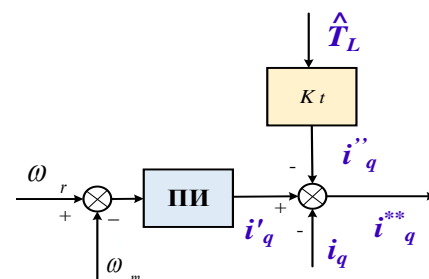


Рис. 11. Принципиальная блок-схема стратегии компенсации эталонного тока по оси i_q .

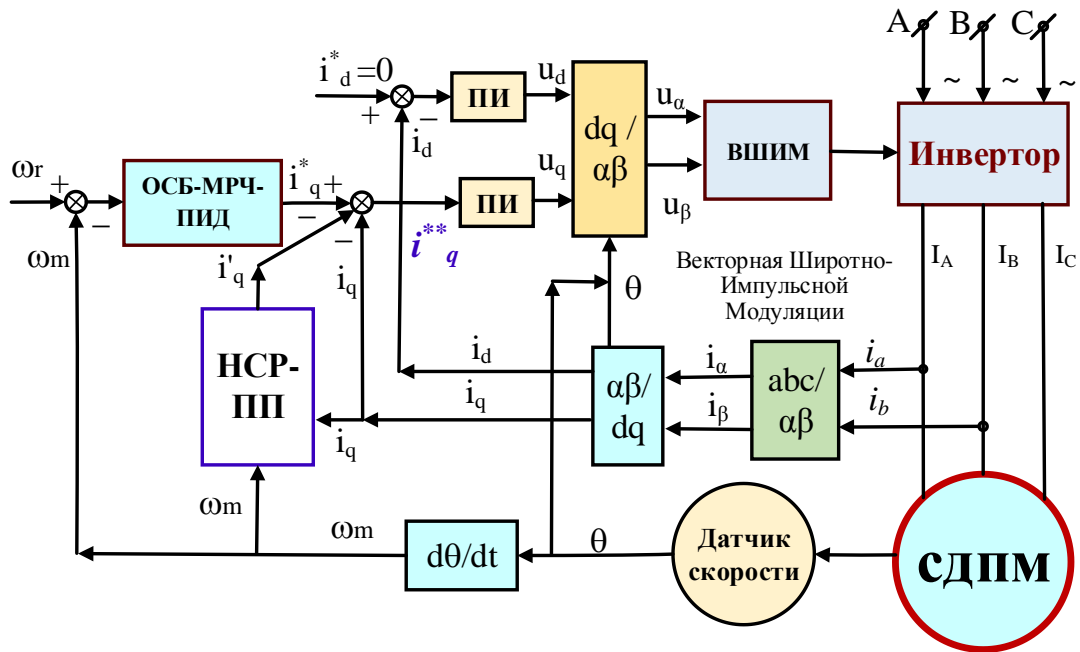


Рис. 12. Составная схема управления скользящим режимом СДПМ.

Как известно, упрощенное динамическое уравнение СК имеет следующий вид:

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + K x + W = F$$

где M - матрица масс; C - матрица демпфирования; K - матрица жесткости; W - матрица сопротивления; F - матрица внешних сил.

$$M = \text{diag}(m_1, m_2, m_3, \dots, m_{n-1}, m_w, m_{n+1}, m_{n+2}, m_{n+3}, \dots, m_{2n})$$

В этом уравнении вектор состояния определяется как:

$$x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, x_w, x_{n+1}, x_{n+2}, x_{n+3}, \dots, x_{2n}]^T$$

$$\dot{x} = [\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dots, \dot{x}_{n-1}, \dot{x}_w, \dot{x}_{n+1}, \dot{x}_{n+2}, \dot{x}_{n+3}, \dots, \dot{x}_{2n}]^T$$

$$\ddot{x} = [\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \ddot{x}_3, \dots, \ddot{x}_{n-1}, \ddot{x}_w, \ddot{x}_{n+1}, \ddot{x}_{n+2}, \ddot{x}_{n+3}, \dots, \ddot{x}_{2n}]^T$$

$$F = [f_1 / r_1, f_2, f_3, \dots, f_{n-1}, f_w / r_w, f_{n+1}, f_{n+2}, f_{n+3}, \dots, f_{2n}]^T$$

Смещение и скорость каждого элемента выбираются в качестве переменных состояния системы. Дифференциально алгебраические уравнения управления могут быть переписаны в виде уравнения состояния:

$$\begin{cases} \dot{V} = A \cdot V + B \cdot U \\ y = D \cdot V \end{cases}$$

где V - вектор состояния; y - выходной вектор; U - входной вектор; A - матрица состояний; B - входная матрица; D - выходная матрица.

$$V = V_{2n \times 1} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_2 \dots \dot{x}_w, \dot{x}_w, \dot{x}_{n+1}, \dot{x}_{n+1}, \dots \dot{x}_{2n-1}, \dot{x}_{2n-1}, \dot{x}_{2n}, \dot{x}_{2n} \end{bmatrix}^T$$

$$U = U_{2n \times 1} = [0, T_t / r_t, 0, -f_2, \dots, 0, T_w / r_w, 0, -f_{n+2}, \dots, 0, -f_{2n-1}, 0, -f_{2n}]^T$$

$$U = f(T_t, T_w, f_t, f_2, \dots, f_w, f_{n+1}, \dots, f_{2n})$$

$$D = D_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad B = B_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A = A_{2n \times 2n}; A \in R^{2n \times 2n}$$

где $2n$ - общее количество звеньев цепи.

На основе представленных уравнений с использованием Matlab-Simulink была полностью смоделирована система управления СК:

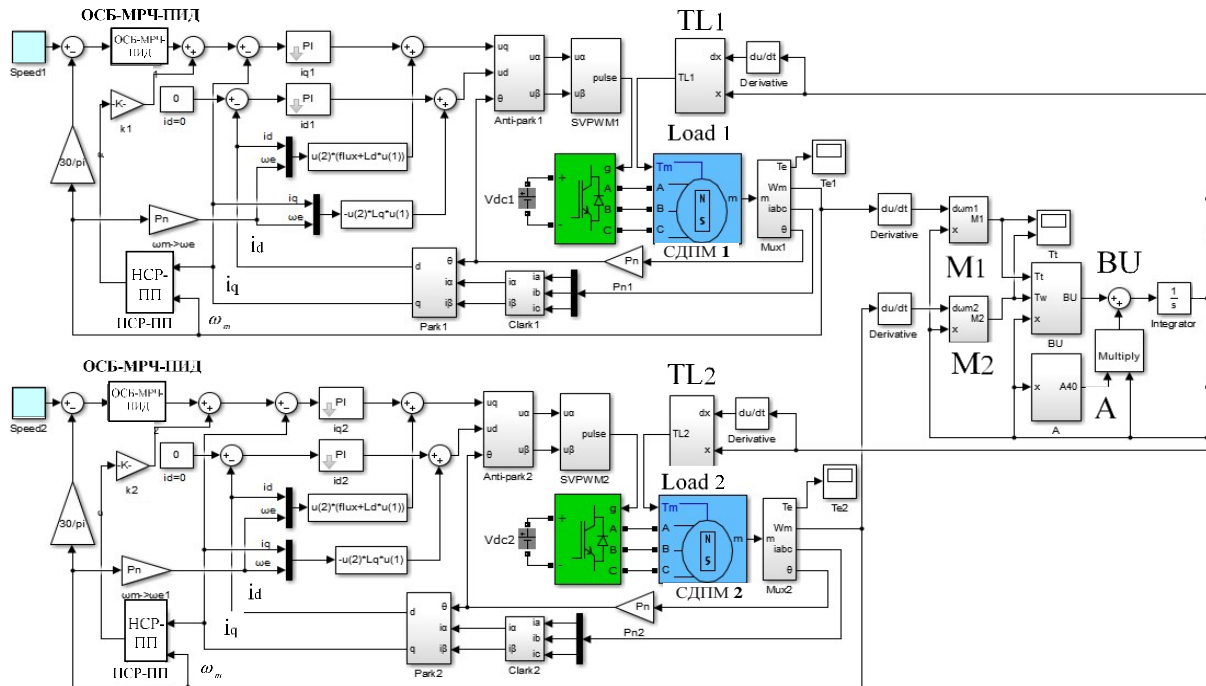


Рис. 13. Модель системы управления работой скребкового конвейера.

На рис. 13 изображены два электродвигателя СДПМ, приводящие в движение СК при помощи коробки передач и гусеничного хода, смоделированного двумя блоками $M1$, $M2$. Выходные крутящие моменты звездочки T_t , T_w цепляют и тянут вращающиеся элементы цепи в блоке BU (2, 3). Матрица состояния $A_{2n \times 2n}$ описывается в блоке A . Степень смещения элементов звена цепи x , dx отражается и вычисляется для момента нагрузки $TL1$, $TL2$ в блоках $Load1$, $Load2$. Крутящий момент нагрузки на двух гусеницах передается СДПМ со значением T_m .

При неравномерной загрузке угля на СК (генерируется угольным резаком, движущимся вдоль конвейера, или из-за изменения массы угля с течением времени), наблюдатель крутящего момента нагрузки в скользящем режиме обнаруживает текущее значение токов i_a, i_b, i_c , скорость двигателя w и измеряет обратную связь. Наблюдатель также отвечает за своевременный расчет и подачу тока i''_q (рис. 10, 11) для управления электромагнитным моментом двигателя, чтобы преодолеть момент нагрузки.

Блок «Оптимизация сбора бактерий - Метод роя частиц - Пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор» (ОСБ-МРЧ-ПИД) (рис. 13) - блок управления скоростью вращения элеткродвигателей СДПМ (1, 2), который также регулирует и скорость СК. В этом блоке были реализованы различные алгоритмы оптимизации скорости, такие как:

- 1) Адаптивный нечеткий ПИД.
- 2) МРЧ-ПИД (рис. 14).
- 3) ОСБ-МРЧ-ПИД (рис. 15).

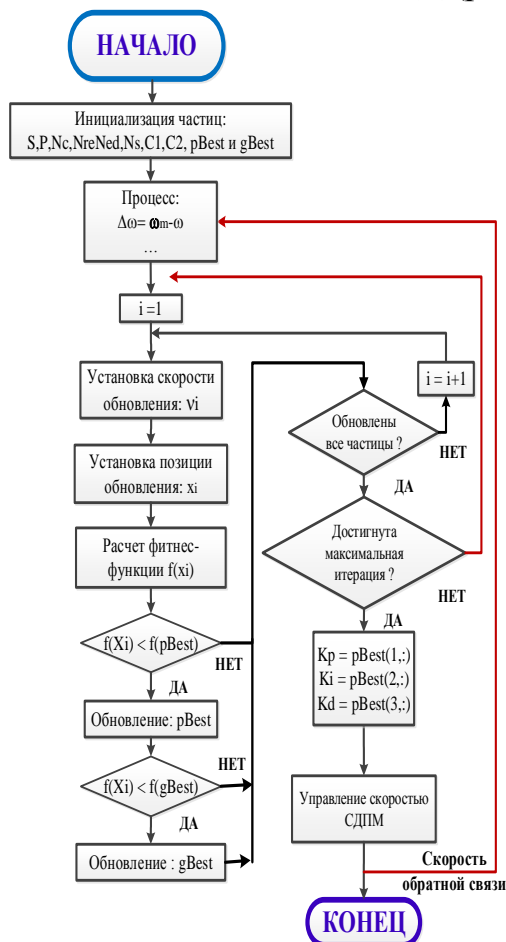


Рис. 14. Блок - схема алгоритма МРЧ оптимальных параметров ПИД.

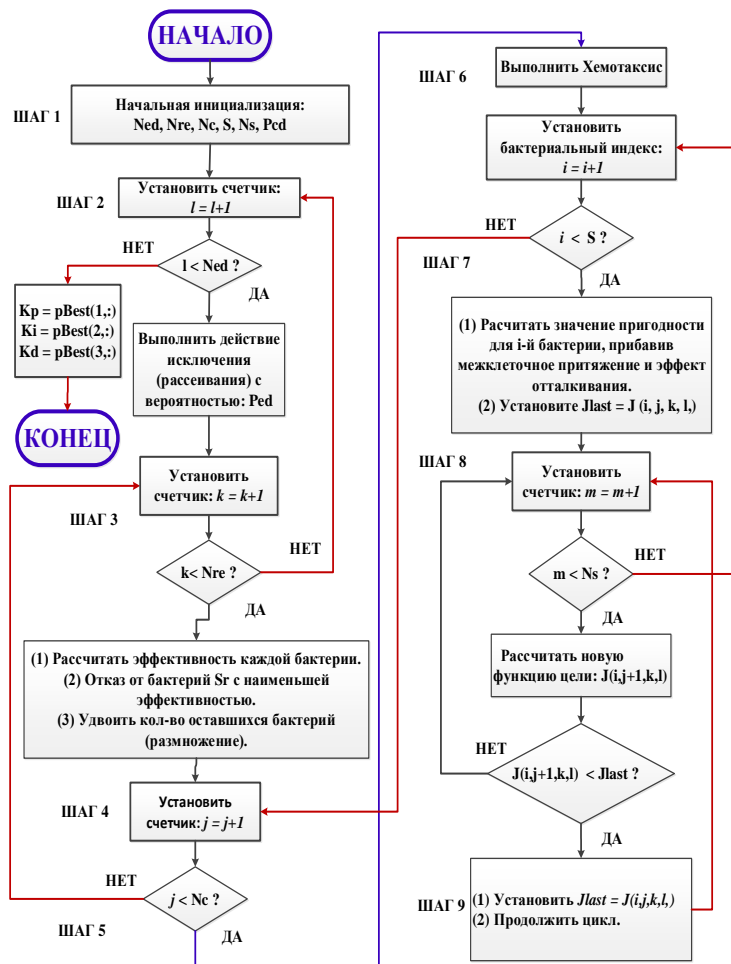


Рис. 15. Блок-схема алгоритма функционирования ОСБ-МРЧ-ПИД.

Разрабатываемая функция приспособленности, которую необходимо минимизировать с помощью алгоритмов МРЧ и ОСБ-МРЧ, называется

пороговой. В ней обобщена вся необходимая нам информация о прямой погрешности скорости, перерегулировании и и других возможных проблемах. Алгоритмы МРЧ и ОСБ-МРЧ эффективно находят лучшие параметры ПИД, эквивалентные функции минимальной стоимости.

Поскольку система СК слишком велика и сложна для комплексного внедрения в реальную технологическую среду, для проверки ее эффективности и подлинности был использован метод ПАМ (Программно-Аппаратное Моделирование).

Метод ПАМ СК был выполнен в программе Matlab-Simulink на встроенном компьютере dSPACE-DS-1005 и платах расширения DS-3002; DS-2103 и DS-2003, где на практике можно протестировать алгоритмы управления системой СК (рис. 16-18).

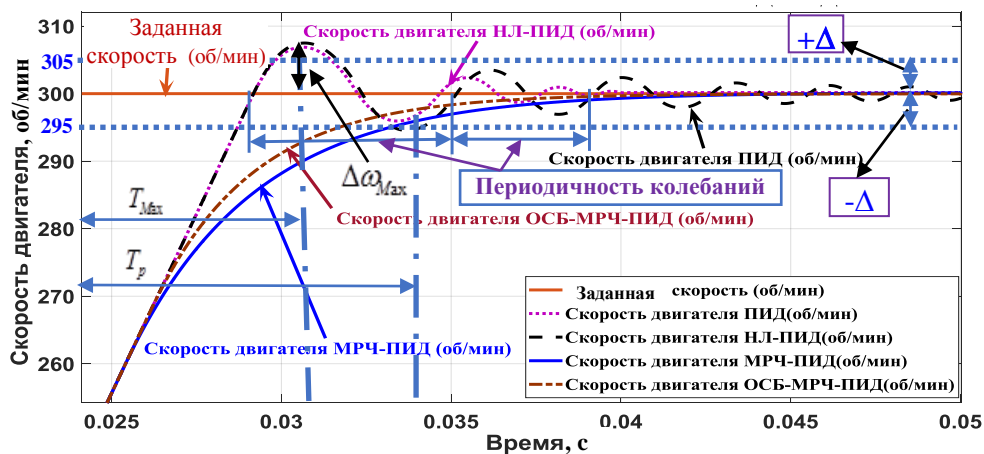


Рис. 16. Режимы пуска СДПМ 0-200 (об/мин) с помощью ПИД, НЛ-ПИД, МРЧ-ПИД и ОСБ-МРЧ-ПИД регуляторов (Запуск 0 - 200(об/мин)). (Δ : Статическое отклонение $<5\%$, T_{\max} : время достижения максимального значения скорости).

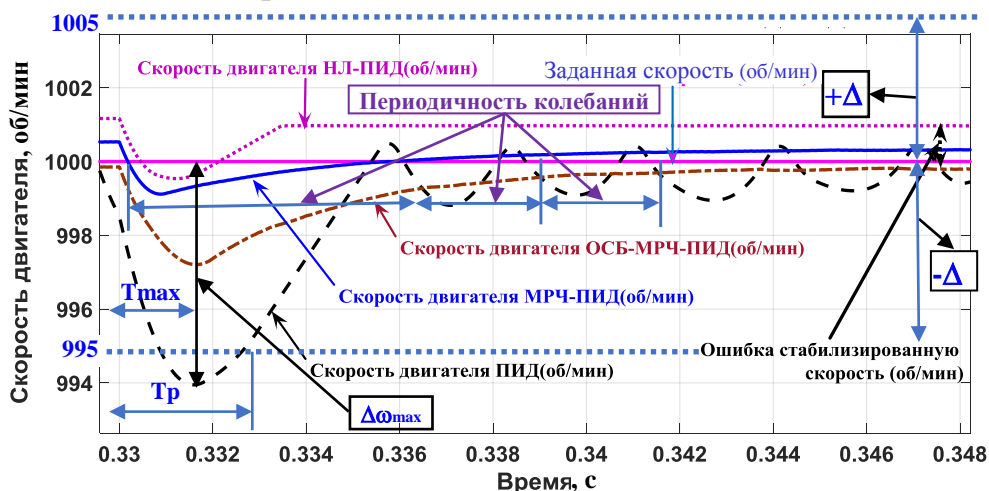


Рис. 17. Изменение нагрузки СДПМ при использовании ПИД, НЛ-ПИД и МРЧ-ПИД (Нагрузка T_L при разгрузке от 0 до $2 \cdot 10^4$ Н.м; $t = 0,05$ (с)).



Рис.18. Изменение разгрузки СДПМ с использованием ПИД, НЛ-ПИД и МРЧ-ПИД (Нагрузка T_L при загрузке от $30 \cdot 10^4$ до $15 \cdot 10^4$ Н.м; $t = 0,44$ (с))

Полученные результаты оценки качества алгоритмов НЛ-ПИД, МРЧ-ПИД, ОСБ-МРЧ-ПИД представлены в таблице 3. В ней также представлены сравнительные результаты различных критериев трех алгоритмов по контролю стабильности скорости СДПМ СК.

ТАБЛИЦА 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТЫ МРЧ-ПИД И ОСБ-МРЧ-ПИД ДЛЯ СДПМ ПРИ: ЗАПУСКЕ; ЗАГРУЗКЕ И РАЗГРУЗКЕ.

	Запуск 0 - 200(об/мин)			T_L при загрузке от $30 \cdot 10^4$ до $15 \cdot 10^4$ Н.м при $t = 0,44$ (сек)			T_L при разгрузке от 0 до $2 \cdot 10^4$ Н.м при $t = 0,05$ (сек)		
Критерии оценки качества/ Регуляторы	НЛ- ПИД	МРЧ- ПИД	ОСБ- МРЧ- ПИД	НЛ- ПИД	МРЧ- ПИД	ОСБ- МРЧ- ПИД	НЛ- ПИД	МРЧ- ПИД	ОСБ- МРЧ- ПИД
Перерегулирование $\Delta\omega_{\max}$ (об/мин)/(%)	5,0/ 2,5	0,8/ 0,27	0,02/ 0,02	2,25/ 0,52	1,25/ 0,52	1,2/ 0,32	3,7/ 1,23	4,0/ 1,33	3,7/ 1,23
Время отклика T_p (сек)	0,02	0,03	0,02	0,01	0,016	0,015	0,018	0,019	0,019
Состояние устойчивости (%)	0,21	0,52	0,22	0,22	0,08	0,04	0,001	0,001	0,001
Коэффициент ошибки скорости (об/мин)	1,12	0,56	0,25	1,22	0,5	0,25	1,05	0,45	0,2
Количество циклов колебаний	1	0	0	2	1	1	2	1	1
Статическое отклонение (Δ) <5%	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да

Из таблицы видно, что коэффициент ошибки регулятора ОСБ-МРЧ-ПИД ниже, чем у регуляторов НЛ-ПИД и МРЧ-ПИД, тем временем как 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, использующего мягкие вычислительные алгоритмы, делаем вывод, регулятор ОСБ-МРЧ-ПИД является наиболее качественным для управления СК.

В четвертой главе представлен процесс тестирования и применения модели системы СК. Разработан человеко-машинный интерфейс для мониторинга работы СК. Дана рекомендация по применению программного обеспечения для системы управления СК.

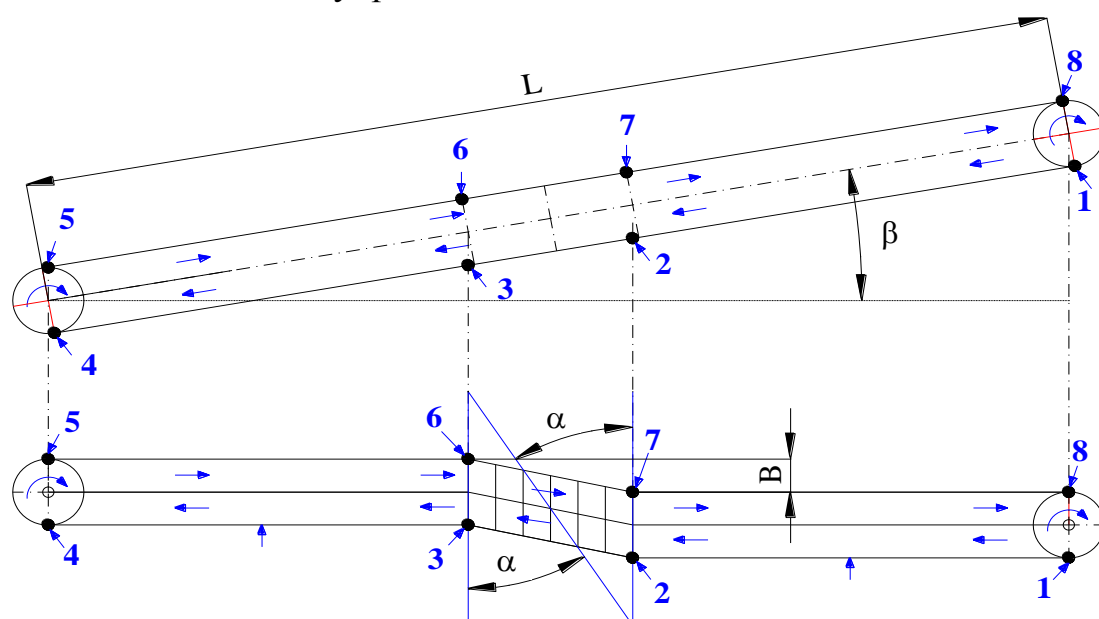


Рис. 16. Модель СК с изогнутым посередине желобом.

На рисунке 16 изображена Модель СК, где:

- Точка 1: выход цепи из приводной звездочки 1;
- Точка 2: начало изгиба желоба (по нижней части желоба);
- Точка 3: конец изгиба желоба (по нижней части желоба);
- Точка 4: вход цепи в натяжную звездочку 2;
- Точка 5: выход цепи из натяжной звездочки 2;
- Точка 6: начало изгиба желоба (по верхней части желоба);
- Точка 7: конец изгиба желоба (по верхней части желоба);
- Точка 8: вход цепи в приводную звездочку 1.

В точках 1, 4, 5, 8 возможны случаи повреждения цепи, ее обрыва или же поломки шестерни звездочки. В частности это происходит из-за натяжения цепи в точке 8 при запуске СК и при разных положениях его работы.

Следовательно, нам нужно установить контроль над натяжением цепи (S) в этих точках так, чтобы оно всегда было меньше номинального натяжения цепи ($S_{\text{ном}} = 7,2 \cdot 10^3$ (кН)), при этом общая мощность СК (P) не должна превышать общей мощности двух выбранных нами СДПМ ($P_{\text{ном}} = 110$ (кВт) $\times 2 = 220$ (кВт)).

Результаты тестирования модели системы СК и расчетов натяжения в точках (1, 4, 5, 8), общей мощности и максимальной транспортной длины (L_{max}) при различных положениях работы, таких как горизонтальное $\beta = 0^\circ$, наклонное под углом $\beta = -10^\circ$, наклонное под углом $\beta = +10^\circ$ и наклонное под углом $\beta = -17,6^\circ$ (особый случай, когда рабочий угол СК при максимальном расчетном угле составляет 17,6 градуса) представлены в таблице ниже:

ТАБЛИЦА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ СК.

Положение СК	Натяжение цепи в точках (кН)				Общая мощность P (кВт)	Макс. Транспортная длина L (м)
	S1	S4	S5	S8		
$\beta = 0^\circ$	5,0	29,83	32,36	143,58	158,3	186
$\beta = -10^\circ$	5,0	39,82	43,21	113,4	123,84	212
$\beta = +10^\circ$	5,0	19,3	20,9	169,8	188,11	172
$\beta = -17,6^\circ$	5,0	46,9	50,9	88,2	95,11	258
Выводы и рекомендации по результатам расчетов:						
Натяжения цепи в критических точках: $S_1 < S_4 < S_5 < S_8 < S_{\text{ном}} = 7,2 \cdot 10^3$ (кН)				Цепь при работе СК в этом положении не рвется/не повреждается		
Общая мощность СК меньше, чем общая мощность двух СДПМ: $(P < P_{\text{ном}} = 2 \cdot 110 \text{ (кВт)})$				Оба двигателя работают в нормальном режиме		

Человеко-машинный интерфейс для мониторинга скорости СК в реальном времени, напряжения, крутящего момента, переменного тока двигателя СДПМ, скорости потока Q ($\text{м}^3/\text{с}$) был реализован в программе Control Desk-Matlab-Simulink.

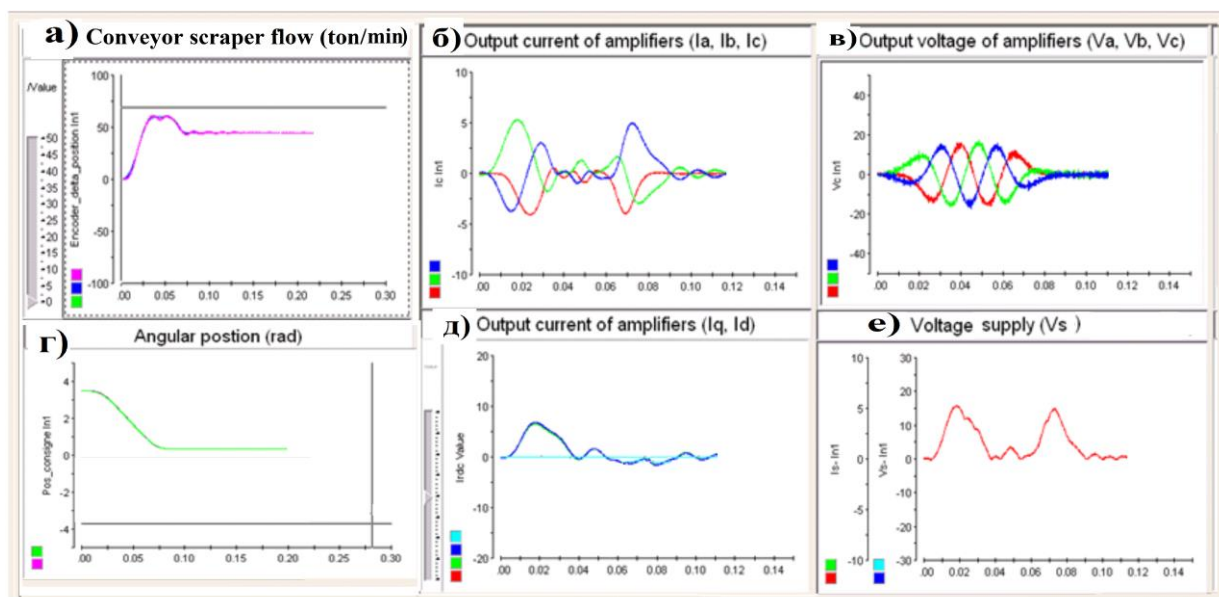


Рис. 17. Интерфейс системы скребкового конвейера на dSPACE Control Desk.

На рис. 17 изображены следующие экраны: а) Загрузка угля (т/мин); б) Ток статора тягового двигателя СК; в) Напряжение питания СК; г) Скорость СК; д) Текущее значение i_q ; i_d двигателя в системе координат dq ; е) Напряжение постоянного тока, подаваемое в цепь инвертора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в основе которой лежат теоретические и экспериментальные исследования. Решена актуальная научно-техническая задача, имеющая большое значение для угольной промышленности Республики Вьетнам и заключающаяся в повышении эффективности функционирования забойных СК за счет выбора оптимальных параметров эксплуатации.

Основные научно-практические результаты, полученные лично автором:

1. Исследован и разработан алгоритм управления запуском СК, позволяющий оптимизировать процедуру пуска конвейера и обеспечить значительное снижение ударной нагрузки и, следовательно, снизить риск повреждений, таких как: обрыв цепи, разрыв поперечного сечения, излом поверхности цепной шестерни из-за внезапного запуска с высоким крутящим моментом.

2. Осуществлено моделирование и расчет максимальной длины СК, соответствующей рабочему углу, номинальной нагрузке, без перегрузки двух приводных двигателей на обоих концах конвейера.

3. Разработан алгоритм, обеспечивающий стабильное управление скоростью СДПМ с использованием многоцелевых алгоритмов оптимизации с набором параметров ПИД: МРЧ-ПИД, ОСБ-МРЧ-ПИД и НЛ-ПИД-регулятор и

снижение расход энергии на 12-20% в зависимости от схемы расположения конвейера в забое.

4. Анализ отдельных узлов конвейера показал, что гидравлические натяжные устройства СК могут быть использованы как многофункциональная система, которая, помимо безопасного натяжения узла, регулирует натяжение при установившемся движении тягового элемента и защищает от перегрузки. При этом критерии, подтверждающие параметры, режим и эффективность устройств гидравлического натяжения, отсутствуют, из-за чего есть необходимость в дальнейшем изучении закономерности формирования нагрузки в натяжном элементе конвейера при воздействии этих устройств.

5. Разработан метод управления на основе нечеткой логики для автоматического регулирования натяжения двух тяговых цепей СК. Нечеткая логика регулируется в соответствии с законом адаптации, при этом минимальное натяжение поддерживается в точке натяжения цепи с самым низким натяжением, в зависимости от нагрузки конвейера и его величины уклона.

6. Изучены закономерности формирования нагрузок в тяговом элементе, и оценена эффективность контроля натяжения.

7. Разработан машинный интерфейс HMI в программе dSPACE Control Desk для мониторинга, контроля и диагностики проблем во время работы СК.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах автора:

В научных изданиях, индексируемых в наукометрической базе данных - Scopus

1. LD Hieu, IO Temkin, **Application of PSO and Bacterial Foraging Optimization to Speed Control PMSM Servo Systems**, 2018 IEEE Seventh International Conference on Communications and Electronics (ICCE), с. 196-201, DOI: 10.1109/CCE.2018.8465728, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8465728>.
2. Le Dinh Hieu and Temkin Igor Olegovich, **Application of Adaptive PSO and Adaptive Fuzzy Logic Controllers to Speed Control PMSM Motor Servo Systems**, 2018 The 2nd International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC 2018), № 220, с. 1-8, //MATEC Web of Conferences 220,08003, (2018); DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822008003>, https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/79/mateconf_icmsc2018_08003/mateconf_icmsc2018_08003.html.
3. L.D Hieu, Temkin I.O, L.V Tung, **The application on the fuzzy controller for tension system control of the scraper conveyor in the mines**, Conference of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, с. 1-10, Accepted.

4. M.D Ngo, V.Q.B Ngo, K.A Nguyen, **Dinh-Hieu Le & H.Tran, A Powerful Model Predictive Control Via Stability Condition For Direct Matrix Converter.** Springer Nature Applied Sciences, № 2, 2020, с. 1-10, DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03857-x>,
<https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-020-03857-x>
5. Le Van Tung, Ngo Van An, **Dinh-Hieu Le**, Pham Thanh Long, **Evaluation of SVM modulation methods for indirect two-level three-phase frequency converter and direct frequency converter**, Conference of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, с. 1-5. Accepted.
6. Le Vinh Thang; Zaw Myo Naing; Ngo Xuan Cuong; **Le Dinh Hieu**; Schagin Anatolii, **The research of solar tracking controller for PV panel based on fuzzy logic**, Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, 2021, с. 1-5, DOI: [10.1109/ElConRus51938.2021.9396105](https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396105),
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9396105>.

В прочих научных изданиях

7. Д.Х. Ле, И.О. Темкин, А.Т. Агабубаев, Оптимизация управления режимами пуска скребкового конвейера на основе анализа результатов имитационного моделирования // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. -№3(51), 6-11-2020. – с. 10-21. DOI: [10.21672/2074-1707.2020.50.2.010-021](https://doi.org/10.21672/2074-1707.2020.50.2.010-021), <http://hi-tech.asu.edu.ru/?articleId=1224>.