

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Пермский национальный исследовательский политехнический университет



На правах рукописи

ТРИФАНОВ МИХАИЛ ГЕННАДЬЕВИЧ

**ОЦЕНКА НАГРУЖЕННОСТИ ПРИВОДОВ ПРОХОДЧЕСКО-
ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ «УРАЛ-20Р» ДЛЯ ВЫБОРА
ТЕХНИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность 05.05.06 – Горные машины и оборудование

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
к.т.н. Шишлянников Д.И.

Пермь – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОХОДЧЕСКО-ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ	13
1.1. Характеристика горнотехнических условий разработки калийных месторождений	13
1.2. Машины и комплексы, применяемые при разработке калийных месторождений механизированным способом	15
1.2.1. Разработка калийных пластов с использованием узкозахватных комбайнов.....	16
1.2.2. Камерная система разработки калийных пластов с использованием проходческо-очистных комбайнов непрерывного действия	20
1.3. Анализ конструктивных особенностей проходческо-очистных комбайнов «Урал».....	24
1.3.1. Исполнительные органы и рабочее оборудование комбайнов «Урал-20Р».....	25
1.3.2. Системы управления, индикации и защиты проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р»	31
1.4. Режимы работы проходческо-очистных комбайнов «Урал» для добычи калийных руд	37
1.4.1. Общие сведения о нагруженности приводов комбайнов «Урал».....	38
1.4.3. Основные параметры выработок, формируемых проходческо-очистными комбайнами «Урал».....	45
Выводы по главе и задачи исследования.....	50
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ НАГРУЗОК НА ПРИВОДАХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОХОДЧЕСКО-ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ «УРАЛ-20Р».....	52
2.1. Исследование процесса формирования нагрузок на приводах исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов.....	52
2.1.1. Режимы работы приводов проходческо-очистного комбайна	53

2.1.2. Математическое описание процесса формирования нагрузок на приводах исполнительных органов очистных комбайнов при случайном характере внешнего воздействия.....	61
2.1.3. Влияние свойств шахтной сети на характеристики электродвигателей	63
2.2. Расчет эксплуатационных параметров проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р»	66
2.2.1. Определение силовых и энергетических параметров разрушения калийного массива	66
2.2.2. Методика определения тяговой способности, напорного усилия и мощности привода гусеничного органа перемещения.....	71
2.3. Определение рациональных параметров работы проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р».....	75
2.4. Оценка эффективности использования проходческо-очистных комбайнов «Урал».....	80
Выводы по главе 2.....	88
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ НАГРУЗОК НА ПРИВОДЫ ПРОХОДЧЕСКО-ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА «УРАЛ-20Р».....	89
3.1. Основные положения методики экспериментальных исследований ...	89
3.2. Программно-регистрационный комплекс «Ватур».....	91
3.2.1. Структура и состав программно-регистрающего комплекса «Ватур».....	91
3.2.2. Описание принципа работы комплекса «Ватур».....	93
3.3. Порядок проведения экспериментальных исследований	98
3.4. Анализ результатов экспериментальных исследований.....	100
3.4.1. Работа комбайна при отработке забоя полным сечением.....	100
3.4.2. Работа комбайна при обработке забоя неполным сечением	108
Выводы по главе 3.....	114

ГЛАВА 4. ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОМБАЙНОВ «УРАЛ-20Р» В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ	115
4.1. Обоснование рациональных режимов работы планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р».....	116
4.2. Алгоритм управления приводами проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р».....	119
Выводы по главе 4.....	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	130
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	152
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	163
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	165

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Современные отечественные горные предприятия, осуществляющие добычу калийно-магниевых солей подземным способом, широко используют механизированные комбайновые комплексы и камерную систему разработки. Данная технология в обозримом будущем останется приоритетной для калийной отрасли России, так как обеспечивает наибольшую производительность и безопасность ведения горных работ при реализации процессов отбойки и транспортирования руды в очистных камерах.

На сегодняшний день на рудниках России и стран СНГ наибольшее применение нашли проходческо-очистные комбайны типа «Урал» производства АО «Копейский машиностроительный завод» (г. Копейск, Челябинская область). Данные выемочные машины оснащены комбинированными планетарно-дисковыми исполнительными органами бурового типа и гусеничным ходовым оборудованием. Комбайны «Урал» серийно выпускаются более 30 лет и в целом характеризуются положительными отзывами сотрудников инженерно-технических и сервисных служб калийных предприятий.

Основываясь на опыте эксплуатации, завод-изготовитель комбайнов «Урал» ведет работы по совершенствованию своей продукции. В частности, современные комбайны «Урал-20Р» комплектуются системами визуализации и регистрации нагруженности электроприводов исполнительных органов по потребляемому току. Однако оценка степени загруженности приводов в режиме реального времени и регулирование режима работы комбайна возложены на оператора комбайна. Переменный характер нагрузок на приводах комбайна, недостаточная информативность и ограниченность возможностей регулирования параметров работы комбайна приводят к существенным погрешностям в процессе обеспечения рационального режима работы.

Корректная оценка нагруженности приводов выемочных машин при их работе в условиях калийных рудников позволяет обосновать рациональные режимные параметры процесса разрушения соляного массива исполнительными органами комбайнов, оценить эффективность использования выемочных машин, уменьшить удельные энергозатраты и улучшить гранулометрический состав руды, отделяемой от забоя. Таким образом, исследование процесса формирования нагрузок приводов исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов «Урал» в реальных условиях эксплуатации представляет теоретический и практический интерес и является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в решение вопросов, связанных с исследованием процессов формирования нагрузок приводов выемочных машин, обоснованием рациональных параметров работы добычных комбайнов и повышением показателей их надежности, внесли В.А. Бреннер, В.В. Габов, В.Н. Гетопанов, Л.Б. Глатман, А.В. Докукин, А.Б. Жабин, Э.А. Загривный, С.Л. Иванов, С.К. Кабиев, Л.И. Кантович, Н.Г. Картавый, М.Д. Коломийцев, Ю.Д. Красников, Е.З. Позин, Р.Ю. Подэрни, В.М. Рачек, В.И. Солод, Г.И. Солод, С.В. Солод, Л.И. Старков, Н.В. Чекмасов и др.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является процесс формирования нагрузок на приводы исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р», при их работе реальных условиях эксплуатации. Предметом исследования является оптимизация параметров работы комбайнов «Урал-20Р» по условию обеспечения минимальных удельных энергозатрат на разрушение массива планетарно-дисковыми исполнительными органами.

Цель работы

Обоснование рациональных параметров разрушения калийного массива пространственными планетарно-дисковыми исполнительными органами комбайнов «Урал-20Р» на основе выявленных закономерностей процесса формирования нагрузок их приводов.

Идея работы

Рациональные параметры разрушения калийного массива резцами пространственных планетарно-дисковых исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» имеют место в заданном диапазоне соотношения шага резания к толщине стружки и обеспечиваются изменением частоты вращения привода переносного вращения резцовых дисков при заданной скорости подачи, а эффективность использования комбайна оценивается двумя комплексными показателями: коэффициентом энергоэффективности и коэффициентом производительной работы.

Задачи исследования

1. Анализ конструктивных особенностей и режимов работы проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р».
2. Обобщение и анализ теоретических и экспериментальных исследований в области повышения энергоэффективности проходческо-очистных комбайнов.
3. Сбор и анализ статистических данных об отказах проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р».
4. Теоретические исследования процесса формирования нагрузок на приводы исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов.
5. Выбор и обоснование показателей эффективности использования проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р», разработка методики количественного определения их величин.

6. Экспериментальные исследования процесса формирования нагрузок на приводы исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р» при работе в условиях калийных рудников Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей.

7. Разработка алгоритма управления приводами проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р», обеспечивающего разрушение калийного массива с рациональными параметрами резания.

Научная новизна работы

1. Предложено обеспечивать разрушение калийного массива резцами пространственных планетарно-дисковых исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» с рациональными значениями отношения шага резания к толщине стружки t_{cp}/h_{cp} в диапазоне от 2 до 4, что реализуется изменением частоты вращения привода переносного движения резцовых дисков по разработанному алгоритму минимизации энергопотребления приводами комбайна при заданной скорости его подачи.

2. Предложены показатели оценки эффективности использования проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р»: коэффициент энергоэффективности, учитывающий удельные энергозатраты на добычу калийной руды путем отнесения базовой величины затрат энергии на тонну добытого полезного ископаемого к соответствующей фактической величине, полученной при производительной работе комбайна, и коэффициент производительной работы, который является показателем достигнутого уровня добычных работ комбайном, равный отношению времени производительной работы к разности времени эксплуатации и соответствующих затрат на восстановление работоспособного состояния комбайна.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Предложено научно обоснованное техническое решение оценки нагруженности отдельных приводов комбайна «Урал-20Р».

2. Исследован процесс формирования нагрузок приводов проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р» в реальных условиях эксплуатации при работе полным сечением забоя и при подрубке пласта, определены значения активных мощностей приводов породоразрушающих исполнительных органов при различных скоростях подачи комбайна на забой.

3. Предложен алгоритм автоматического управления приводами проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р» на основе информации о величине нагрузок электроприводов исполнительных органов и перемещении комбайна.

4. Результаты работы используются на предприятии ПАО «Уралкалий» в деятельности, направленной на повышение эффективности эксплуатации комбайновых комплексов и снижение количества аварийных отказов оборудования.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовался комплексный подход, включающий научный анализ и обобщение результатов ранее опубликованных исследований в области формирования нагрузок приводов выемочных машин, аналитические расчеты, производственный эксперимент по оценке нагруженности и энергопотреблению приводов исполнительных органов комбайнов «Урал» в условиях калийных рудников.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует п. 1 и п. 3 области исследований: «Изучение закономерностей внешних и внутренних рабочих процессов в горных машинах, комплексах и агрегатах с учетом внешней

среды» и «Обоснование и оптимизация параметров и режимов работы машин и оборудования и их элементов» соответственно.

Положения, выносимые на защиту

1. Эффективность функционирования проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» необходимо и достаточно определять по двум комплексным показателям: коэффициенту энергоэффективности и коэффициенту производительной работы, при этом первый оценивает удельные энергозатраты на добычу калийной руды путём отнесения базовых затрат энергии на тонну добытого полезного ископаемого к соответствующей фактической величине, полученной при производительной работе комбайна, а второй является показателем достигнутого уровня добычных работ комбайном, равным отношению времени производительной работы к общему времени работоспособного состояния комбайна за рассматриваемый период.

2. Установлено, что при разрушении калийного массива рабочим инструментом пространственных планетарно-дисковых исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» рациональное отношение шага резания к толщине стружки находится в диапазоне $t_{cp}/h_{cp} = 2...4$, обеспечивая минимум энергозатрат и максимальный выход руды обогатимых классов, при этом указанные значения t_{cp}/h_{cp} достигаются изменением частоты вращения привода переносного движения резцовых дисков по разработанному алгоритму минимизации энергопотребления приводами резания комбайна при заданной скорости его подачи.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Обоснованность и достоверность положений, выводов и рекомендаций подтверждаются результатами экспериментальных исследований процесса формирования нагрузок приводов проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» в реальных условиях эксплуатации. Основные выводы теоретических

исследований согласуются с общепризнанными представлениями о закономерностях работы приводов выемочных машин.

Основные положения работы, результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались на следующих конференциях: международная научно-практическая конференция «Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении» (г. Санкт-Петербург, 2014, 2015 гг.), международная научно-практическая конференция «Горная и нефтяная электромеханика» (г. Пермь, 2014, 2015, 2016, 2017 гг.), международный форум «Нефтегазовое и горное дело» (г. Пермь, 2014 г.), международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В.Р. Кубачека» (г. Екатеринбург, 2014, 2015 гг.), международная конференция «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (г. Тула, 2014, 2016 гг.), международный научный симпозиум «Неделя горняка» (г. Москва, 2014, 2015, 2017 гг.).

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 10 научных работ в рецензируемых журналах и изданиях, 4 из них в изданиях, рекомендованных ВАКом Минобрнауки Российской Федерации, получен один патент.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, трёх приложений, общим объемом 166 страниц печатного текста, содержит 12 таблиц и 39 рисунков, список литературы из 120 наименований.

Личный вклад автора

Проведен анализ конструктивных особенностей и режимов работы проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р». Сформулированы цель и задачи исследований. Выполнены теоретические исследования процесса

формирования нагрузок на приводы исполнительных органов комбайнов калийных рудников. Разработана методика и проведены экспериментальные исследования по оценке нагруженности приводов проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» в реальных условиях эксплуатации. Предложены комплексные показатели оценки эффективности использования комбайнов «Урал» на основе анализа записей регистраторов параметров работы. Разработан алгоритм автоматического управления приводами проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р».

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОХОДЧЕСКО-ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

1.1. Характеристика горнотехнических условий разработки калийных месторождений

Калийные соли относятся к группе хемогенных осадочных горных пород, образованных легкорастворимыми в воде калиевыми и калиево-магниевыми минералами. Природные калийные соли залегают среди каменной соли в виде пластов и линз мощностью до нескольких десятков метров [77].

По химическому составу соляные породы представляют собой водные и безводные соли соляной и серной кислот элементов К, Na, Mg, Ca. Среди хлоридов калия и магния доминируют сильвиниты, являющиеся основными калийсодержащими породами [25]. Плотность соляных пород калийных месторождений РФ и стран СНГ находится в пределах 1,8–2,4 т/м³. В большинстве своём соляные породы представляют собой плотные кристаллические породы с включением несолевых минералов (гипс, глина, ангидрит и др.).

На сегодняшний день в мире известно 37 месторождений ископаемых калийно-магниевых солей. Из них 20 находится в Европе, 5 – в Азии, 6 – в Северной Америке, 2 – в Южной Америке и 4 – в Африке. 16 месторождений являются промышленными и эксплуатируются в данное время. Основная часть мировых запасов калийной руды приходится на Канаду (38 %), Россию (33 %) и Белоруссию (9 %) [4, 119].

Крупнейшим месторождением высококачественных калийных солей в Евразии является Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей (ВМКМС), разработка которого ведётся с 1934 года. Оно имеет исключительно благоприятные горно-геологические условия. Протяжённость разведанной части: 140 км с севера на юг и около 60 км с запада на восток.

Разведанные запасы соли составляют 3,4 млрд тонн. Продуктивны отложения сильвин-галит-карналлитового состава на глубине 250–400 м. Действуют два рудника в г. Березники и три в г. Соликамске. Разрабатываются два сильвинитовых и один карналлитовый пласты. Основным продуктивным пластом является Красный II. Некоторые показатели физико-механических свойств сильвинита пласта Красный II приводятся в таблице 1.1 [99].

Таблица 1.1 – Основные физико-механические свойства калийной руды пласта «Красный II» ВМКМС

Плотность в массиве ρ , т/м ³	2,1
Предел прочности при одноосном сжатии σ , МПа	30,5–39,5
Коэффициент крепости по шкале М.М. Протоdjeяконова $f_{кр}$	3,5–4
Контактная прочность p_k , МПа	274–294
Коэффициент трения μ_t	0,3
Абразивность a , мг/км	34,3–41,9
Коэффициент вязкости ψ_0 , град	25–30
Коэффициент Пуассона ν	0,31
Модуль Юнга E , ГПа	11,1

Пласт Красный II состоит из чередования прослоев каменной соли (галита), красного сильвинита и тонких прослоев глин. Вынимаемая мощность пласта изменяется от 4,4 до 7,0 м, продольные углы наклона не превышают 15°, поперечные 10°. Применение комбайнов на пласте Красный II возможно повсеместно, газообильность пласта менее 0,15 м³/т [92]. Сопротивляемость резанию пород пласта Красный II составляет 370–490 Н/мм, что в среднем в 3–3,5 раза превышает сопротивляемость углей резанию [15, 32, 49]. Отжим пород в обрабатываемых забоях как системное явление отсутствует, что представляет собой неблагоприятный фактор для работы выемочных машин [16, 87].

По своей структуре и механической прочности сильвинитовые породы являются сравнительно однородными: диаметр зёрен 0,2–13 мм, крепкие включения в виде мельчайших частичек кварца диаметром 0,02–0,03 мм и

пирита размером 0,2–0,3 мм (иногда до 1–3 мм) встречаются в подстилающем пласте каменной соли [33]. Насыпная плотность при машинной выемке калийной руды составляет 1,27–1,35 т/м³, угол естественного откоса в покое составляет 35–40°, влажность – до 0,3 %. Сильвиниты Верхнекамского месторождения относятся к группе наименее абразивных горных пород, показатель их абразивности составляет 34,3–41,9 мг/км [77]. По категориям разрушаемости калийные руды относятся к весьма крепким горным породам.

Несмотря на ярко выраженное слоистое строение пластов, в большинстве работ, посвящённых изучению процесса резания калийной руды, калийный массив рассматривается как изотропное тело. Кристаллы слагающих минералов ориентированы хаотично, трещиноватость, характерная для угольных пластов, практически отсутствует [25].

1.2. Машины и комплексы, применяемые при разработке калийных месторождений механизированным способом

Разработка большинства калийных месторождений осуществляется подземным способом с использованием камерной системы разработки и системы отработки пластов длинными очистными забоями. Широкое применение получили очистные комбайновые комплексы, обеспечивающие механизацию технологических процессов отбойки, погрузки руды и установки крепи. В качестве выемочных машин в данных комплексах применяют, как правило, очистные и проходческо-очистные комбайны с исполнительными органами, оснащёнными режущим рабочим инструментом.

Развитие средств механизации очистных работ в калийной промышленности происходит в направлении решения основных экономических и социальных задач, а именно: повышения производительности и обеспечения безопасности труда шахтеров.

Повышение эффективности использования комбайнов калийных рудников обуславливает снижение себестоимости готовой продукции горнодобывающих и обогащательных предприятий, позволяет уменьшить удельные энергозатраты процесса разрушения калийного массива и снизить количество пылевидных, необогатимых классов (отходов горного производства) в отбитой руде.

Одним из путей улучшения технических характеристик очистных комбайнов калийных рудников является создание научно-обоснованных методик выбора и способов поддержания рациональных режимных параметров работы добычных машин, основанных на информации о нагруженности их приводов.

1.2.1. Разработка калийных пластов с использованием узкозахватных комбайнов

Системы разработки калийных пластов длинными очистными забоями с обрушением пород кровли применяются на рудниках США, Испании, Франции и Белоруссии. Такая технология разработки обеспечивает высокую степень извлечения полезного ископаемого (до 95 %), а также позволяет вести выемку маломощных пластов сильвинита с небольшим разубоживанием. Посадка пород кровли позволяет осуществлять работу добычных машин в зоне отжима, что снижает удельные энергозатраты на отделение калийной руды от массива. Принципиально важным моментом применения систем разработки соляных месторождений длинными очистными забоями с использованием узкозахватных комбайнов является наличие мощных водозащитных толщ в надрабатываемых зонах рудников [51, 69, 99].

За прошедшие десятилетия специалистами отечественных и зарубежных предприятий предложены, испытаны и внедрены технологические системы с валовой и селективной выемкой длинными

очистными забоями. Несмотря на отличие калийных забоев от угольных, выемочные комплексы для калийных рудников разрабатывались на базе выпускаемого оборудования для угольных шахт, с учетом опыта эксплуатации и горнотехнических условий калийных месторождений. Так, например, на Старобинском месторождении (республика Беларусь) в начале внедрения системы разработки длинными очистными забоями были применены очистные комплексы с узкозахватными комбайнами МК-67 и КШ-3М, в конструкцию которых были внесены незначительные изменения.

В качестве тягового органа комбайна использовали круглозвенную цепь, растянутую по лаве и закреплённую концами на приводной и концевой головках конвейера. Комбайн МК-67 использовался для выемки тонких пластов, имел гидравлический механизм подачи и исполнительный орган барабанного типа с вертикальной осью вращения. Комбайн КШ-3М по общей компоновке наиболее близок к современным двухшнековым комбайнам, имел высокую установленную мощность (2×145 кВт) и использовался для выемки пластов средней мощности. Опыт эксплуатации комбайнов показал, что из-за низкой энерговооружённости и цепного механизма подачи их производительность не превышает 10–15 тыс. т в месяц, что обуславливало необходимость дальнейшей модернизации и усовершенствования добычных машин.

С целью обеспечения высоких объемов добычи калийной руды для валовой выемки на пластах мощностью 1,7–2,6 м в 1980–1985 годах были закуплены механизированные комплексы ЭДВ-600Л с очистным комбайном ЭДВ-600 производства фирмы «Айкхофф» (Германия). Эксплуатация комбайнов показала наличие существенных конструктивных недостатков. Малая высота лопастей шнеков вместе с неудачным расположением забойных опор и качалок шнеков обуславливала низкую эффективность погрузки руды на забойный конвейер. Шнеки измельчали отделяемую от забоя руду, увеличивая энергоёмкость процесса разрушения [100].

Для замены импортного оборудования советскими специалистами был создан комплекс СК2В с очистным комбайном 2РКУ16К. При его эксплуатации достигались следующие максимальные показатели производительности: 800 т/смену, 1600 т/сутки, 25 844 т/месяц. Максимальная производительность труда горнорабочего очистного забоя составила 171 т/выход [85, 100]. Однако высокая аварийность комплекса не позволила достигнуть проектной производительности, вследствие чего он не был рекомендован к промышленному производству.

Длительный опыт эксплуатации различных типов механизированных комплексов позволил определить перспективные направления при создании и модернизации горно-шахтного оборудования. Для обеспечения калийных рудников высокопроизводительной техникой и расширения области применения систем разработки длинными очистными забоями были закуплены комбайны ЭВ-200/230-ЛН, СЛ-300НЕ, ЭДВ-300/760-Л, СЛ-500С, ЭСА-150Л (Германия), Электра 340-Сол, Электра700-Сол (Англия), КГС-800/2БП (таблица 1.2).

Комбайны оснащены автоматизированными механизмами подачи типа «Эйкоматик» или «Эйкотроник», с помощью которых нагрузка электродвигателя режущей части и тяговое усилие механизма подачи поддерживаются в рациональном режиме. Это позволяет более полно использовать установленную мощность электродвигателей комбайна и уменьшить число срабатывания защиты при недопустимом увеличении нагрузки. Кроме того, очистные комбайновые комплексы оснащаются телеметрическими системами, обеспечивающими непрерывный контроль газового состояния лавы, контроль положения выемочной машины и секций механизированной крепи в забое, оценку технического состояния элементов комбайна, конвейера и крепи.

Таблица 1.2 – Технические характеристики узкозахватных очистных комбайнов калийных рудников

Наименование параметров	Вынимаемая мощность, м										
	0,9-1,6		1,6-2,6								
	ЭВ-200/230 ЛН «Айкхофф», Германия	Электра 340-Сол «Андерсон», Англия	СЛ-300 НЕ «Айкхофф», Германия	ЭДВ-300/760-Л «Айкхофф» Германия	КГС-800С/2БП «Фамур», Польша	Электра 700-Сол «Андерсон», Англия	СЛ-300 «Айкхофф», Германия	ЭДВ-300/760-Л-230-СВ «Айкхофф», Германия	СЛ-500С «Айкхофф», Германия	ЭСА-150Л «Айкхофф», Германия	КШ-3М Горловский маш.завод, Украина
Исполнительный орган	одношнечковый	одношнечковый	одношнечковый	двухшнечковый	двухшнечковый	двухшнечковый	двухшнечковый	трехшнечковый	двухшнечковый	одношнечковый	двухшнечковый
Диапазон регулирования по мощности пласта, мм	900-1300	1250	1400-2450	1400-2600	1400-3200	1800-2500	1400-2520	1400-2600	1400-2600	1400-3390	1900-4000
Диаметр шнека, мм	900-1300	1250	1400	1350	1400	1300	1400	630; 1400; 1600	850; 1400	1400	630; 800
Число оборотов, мин ⁻¹	48	47	48; 56	44	32,4	47	51	90; 44	71; 51	39	50
Мощность электродвигателя исполнительного органа, кВт	230	300	400	2×380	2×300	2×300	2×300	2×380+230	2×300	150	2×160
Механизм подачи, тип	гидравлический	электрический	электрический	гидравлический	гидравлический	электрический	электрический	гидравлический	электрический	гидравлическая	гидравлическая
Скорость подачи, м/мин	0-9,0 0-4,5	0-13	0-6 0-10,3	0-6 0-12	0-8 0-16	0-13	0-7 0-12	0-6 0-12	0-7 0-13	0-5	0-5,5
Тяговое усилие, кН	96-196	300	315-166	568-284	660-330	600	537-270	568-284	554-277	280	250
Габариты, мм:											
- длина	7600	-	9255	10700	15070	11730	11300	13800	13690	4800	7750
- высота	830	917	-	1380	1870	1730	1490	1380	1490	1480	1720

Передовые технические решения в области автоматизации, управления, защит, технической диагностики и безопасности, разработанные для угледобывающего оборудования, активно внедряются при создании узкозахватных комбайновых комплексов калийных рудников [81].

К недостаткам системы разработки калийных пластов длинными очистными забоями с использованием узкозахватных комбайновых комплексов следует отнести необходимость крепления призабойного пространства лав и подготовительных выработок в зоне влияния очистных работ, что усложняет и удорожает технологический процесс добычи калийной руды.

1.2.2. Камерная система разработки калийных пластов с использованием проходческо-очистных комбайнов непрерывного действия

Отработка пластов на калийных рудниках зачастую осложнена наличием в вышележащей толще горных пород мощных водоносных горизонтов. В таких горно-геологических условиях параметры системы ведения горных работ выбираются с учётом обеспечения безопасности подработки водозащитной толщи (ВЗТ). Величина максимального оседания пород кровли ограничивается суммарной мощностью ВЗТ, в верхних слоях которой не возникает нарушений сплошности при деформировании, вызванном отработкой пластов. Это обуславливает повсеместное распространение на калийных рудниках России камерной системы разработки с выемкой пласта на полную мощность с оставлением ленточных опорных целиков. Ширина целиков и размеры выработок во многом зависят от глубины ведения горных работ, которая на отечественных калийных рудниках находится в пределах 250–600 м, длина камер, как правило, не превышает 150–200 м. Поперечное сечение очистной камеры выбирается, исходя из опыта ведения работ на смежных участках, устойчивости пород кровли, содержания в добываемой рудной массе полезного компонента и

нерастворимого осадка. Ширина междукамерных целиков определяется с учётом ограничений степени их нагружения, которая выражает отношение действующей на целик нагрузки к его несущей способности.

Камерная система разработки предусматривает использование механизированных комбайновых комплексов, представляющих собой комплект горных машин, в состав которого входят проходческо-очистной комбайн, бункер-перегрузатель и шахтный самоходный вагон [73].

Первые проходческо-очистные комбайны ШБМ-2, применённые на калийных рудниках Урала, изначально предназначались для проходки выработок на угольных шахтах. Они оснащались план-шайбовым буроскалывающим исполнительным органом и распорно-шагающей ходовой частью. Опыт эксплуатации данных машин показал их неэффективность и непригодность для разрушения крепких мелкозернистых сильвинитов Верхнекамского месторождения, обладающих большой вязкостью, прочностью и повышенной сопротивляемостью резанию [69, 91, 99]. Использование скалывателей сопровождалось неустойчивой работой комбайнов, скачкообразным характером нагрузок, ограниченными скоростями подачи. Отрицательные результаты испытаний комбайнов, оснащенных стреловидными исполнительными органами (4ПП-2, ПК-11, 2КСК), были обусловлены сложностью обеспечения поперечной устойчивости и низкой производительностью добычных машин [80].

В результате широкомасштабных опытных работ в 1971–1973 годах были созданы калийные комбайны непрерывного действия ПК-8М, «Урал-10КС» и «Урал-20КС», обладающие повышенной технической производительностью и послужившие базой для практически полного перехода к комбайновой выемке на калийных рудниках. Применение данных добычных машин обеспечило значительное снижение удельных энергозатрат процесса отбойки калийной руды по сравнению с буровзрывным способом, а также позволило механизировать основные технологические процессы в

очистном забое. Последующие работы были направлены главным образом на более полную реализацию потенциальных возможностей этих машин, в результате чего их техническая производительность была доведена до 5–6 т/мин (ПК-8МА, «Урал-10А», «Урал-20А») и 8 т/мин («Урал-20Р») [1, 85, 82, 88, 93]. Некоторые сравнительные характеристики современных проходческо-очистных комбайнов представлены в таблице 1.3 [10].

Таблица 1.3 – Технические параметры проходческо-очистных комбайнов для добычи калийных руд

№	Параметры	Значения параметров по типам комбайнов				
		Урал-10А	Урал-20Р	Урал-61	ПК-8МА	Мариетта-900А
1	Тип	Урал-10А	Урал-20Р	Урал-61	ПК-8МА	Мариетта-900А
2	Завод-изготовитель	«КМЗ»			«ЯМЗ»	«Сандвик»
3	Форма и размеры забоя	Овально-арочная			Арочная	Овально-арочная
	– площадь, м ²	8,3; 9,4; 10,5	15,5	8,2	8,1; 8,9	14,34
	– высота, м	2,3; 2,4; 2,6	3,1	3,0	3-3,2	3,15
	– ширина, м	4,1	5,1	3,1	3; 3,2	4,8
4	Сопrotивляемость разрушаемого массива резанию (норма), Н/мм	350–450				
5	Вид исполнительного органа	Планетарно-дисковый, сдвоенный, двухлучевой		Планетарно-дисковый, трёхлучевой	Буровой планшайбовый, соосный	Буровой планшайбовый, сдвоенный
6	Тип режущего инструмента	Резцы РС-14; ПС1-8У	Резцы РС-14У; ПС	Резцы РС-14; ПС1-8У	Резцы РС-14	Резцы неповоротные <i>PIG, PHB</i>
7	Установленная мощность электродвигателей, кВт	527	710	385	370,5	895
8	Производительность, т/мин	5,0	8,0	3,0	4,2	10,0
9	Масса, т	63	110	52,8	59,8	122,5

К основным недостаткам отечественных проходческо-очистных машин для добычи калийных солей следует отнести следующее:

- сложность конструкции исполнительных органов;
- низкая энерговооружённость по сравнению с зарубежными аналогами;
- недостаточная надёжность редукторов, узлов гидравлики и резцов;
- отсутствие эффективных систем и устройств защиты узлов трансмиссии от динамических нагрузок;
- отсутствие систем автоматизированного управления приводами комбайна [81].

Несмотря на указанные недостатки, следует отметить, что отечественные проходческо-очистные комбайны являются наиболее адаптированными добычными машинами для горно-геологических и технических условий калийных рудников России и стран СНГ. Опытная эксплуатация комбайнов зарубежных фирм «Сандвик», «Джой», «Гудмен», «Фест-Альпине» показала, что, несмотря на бóльшую энерговооружённость, наличие высокотехнологичных электронных систем контроля и управления, применение надёжных редукторов и породоразрушающего инструмента из износостойких легированных сталей, эффективность использования данных добычных машин ниже, чем у отечественных аналогов. Иностранные проходческо-очистные комбайны сложны в обслуживании и ремонте; для заправки гидросистем необходимы специальные рабочие жидкости; узлы отдельных систем плохо защищены от агрессивного воздействия атмосферы соляных рудников. Вышеуказанные факторы в сочетании со значительной стоимостью добычных машин и политикой экономических санкций, которые вынуждены поддерживать европейские и американские машиностроительные предприятия, обусловили отказ от широкого внедрения иностранных проходческо-очистных комбайнов на калийных рудниках России [85, 82, 88, 99].

Таким образом, на сегодняшний день основными добычными машинами проходческо-очистных механизированных комплексов,

используемых при камерной системе разработки месторождений калийно-магниевых солей на территории Российской Федерации, являются комбайны «Урал», оснащенные планетарно-дисковыми исполнительными органами и гусеничным ходовым оборудованием [40].

1.3. Анализ конструктивных особенностей проходческо-очистных комбайнов «Урал»

Комбайны «Урал» производства АО «Копейский машиностроительный завод» относятся по назначению к классификационной группе проходческо-очистных буровых комбайнов, по способу, технологическому принципу и типу исполнительного органа – к буровым непрерывного действия с пространственным планетарно-дисковым исполнительным органом. Комбайны используются для добычи калийно-магниевых руд, каменной соли и проведения выработок с овально-арочной формой сечения по пластам соляных пород с сопротивляемостью резанию A_p до 450 Н/мм при углах падения $\pm 12^\circ$ и температуре окружающей среды от +5 до +35 °С. Электродвигатели комбайнов работают при напряжении сети 660 и 1140 В, при частоте переменного тока 50 Гц [10, 11, 41, 42]. Компоновочные схемы комбайнов «Урал-10» и «Урал-20» (и их модификаций) аналогичны [67]. Комбайн «Урал-61» принципиально отличается от вышеуказанных добычных машин одинарным трёхлучевым планетарно-дисковым исполнительным органом [42].

1.3.1. Исполнительные органы и рабочее оборудование комбайнов «Урал-20Р»

Комбайн «Урал-20Р» (рисунок 1.1) состоит из следующих основных частей: сдвоенного исполнительного органа планетарного типа, разрушающего забой двумя парами поворотных дисков *1* и дисками забурников *10*, установленных на поворотных редукторах *2*; верхнего отбойного устройства *3*, оформляющего кровлю выработки; бермового органа, состоящего из боковых фрез *9* и шнеков *4*, осуществляющего выравнивание почвы, подрезку углов выработки и погрузку отбитой руды на скребковый конвейер *6*; гусеничного хода *8*, осуществляющего перемещение комбайна на рабочих и маневровых скоростях; щита ограждения *5*, ограничивающего распространение пыли из призабойного пространства в выработку; кабины *7*, предназначенной для защиты машиниста от пыли, шума и вибрации.

Кинематическая схема комбинированного исполнительного органа проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р» состоит из отдельных приводов планетарно-дисковых исполнительных органов, отбойного устройства и бермового режущего органа.

Планетарно-дисковые исполнительные органы комбайна «Урал-20Р» кинематически связаны между собой общим редуктором переносного вращения. Вращение резовых дисков осуществляется одновременно в двух направлениях:

– вокруг собственных осей – относительное движение с частотой вращения $n_{отн} = 40,7 \text{ мин}^{-1}$, привод от двух электродвигателей ВАО2-315М6 мощностью $N_{отн} = 160 \text{ кВт}$;

– вокруг оси раздаточного редуктора (води́ла) исполнительного органа – переносное движение с частотой вращения $n_{пер} = 4,2 \text{ мин}^{-1}$, привод от электродвигателя 2ВР250S4 мощностью $N_{пер} = 75 \text{ кВт}$.

Исполнительные органы, вращаясь в противоположных направлениях, перемещают разрушенную массу к приёмной части скребкового конвейера. Каждый исполнительный орган (левый и правый) комбайна (см. рисунок 1.1) состоит из раздаточного редуктора (води́ла) исполнительного органа и двух поворотных редукторов, двух резцовых дисков и двух дисков забурника. Резцовые диски оснащены резцами РС-14У или ПС1-8У. Забурники оснащены резцами РС-14У [41, 44].

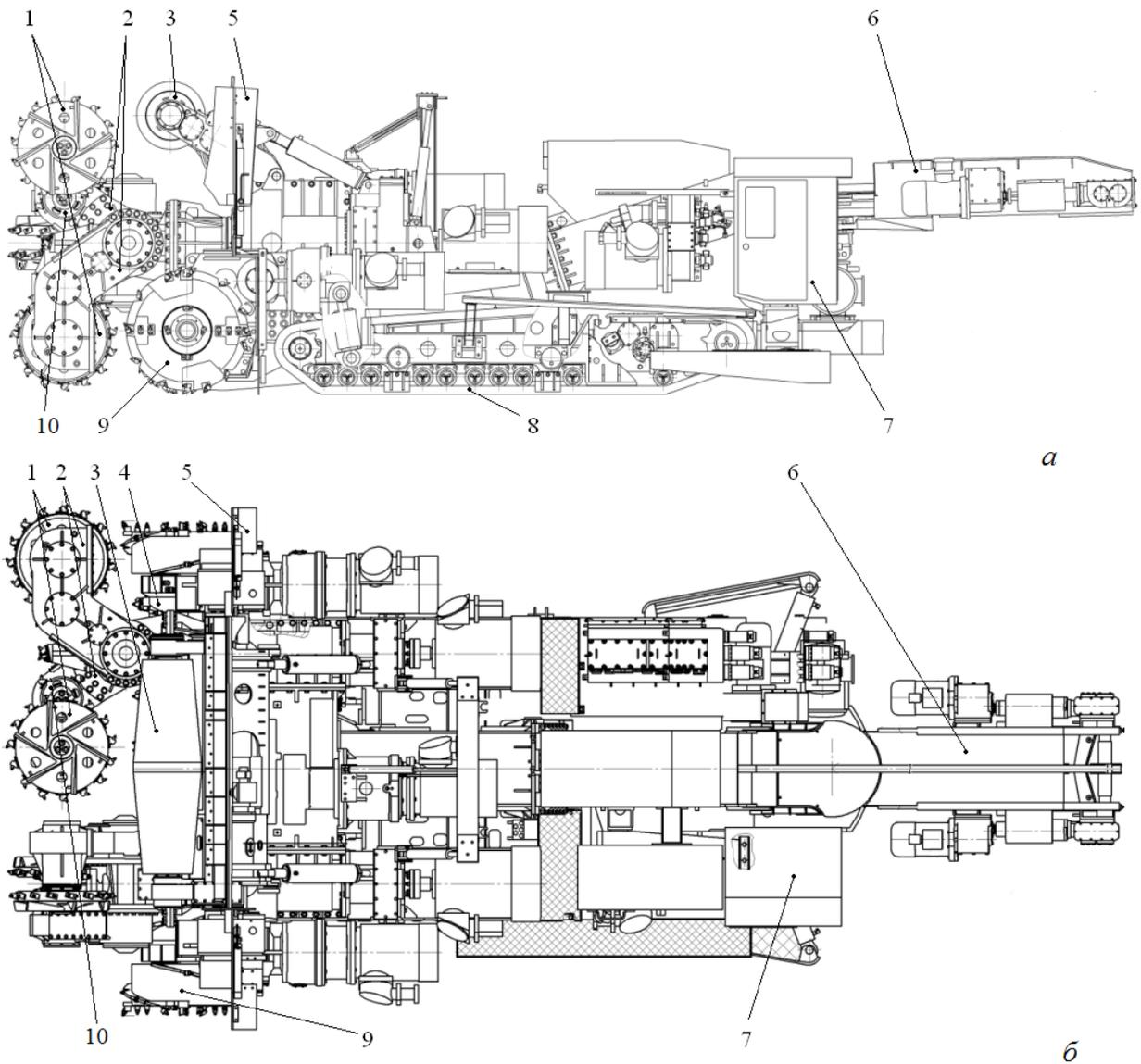


Рисунок 1.1 – Комбайн проходческо-очистной «Урал-20Р»:

а – фронтальная проекция; *б* – горизонтальная проекция; 1 – поворотные диски; 2 – поворотные редукторы; 3 – верхнее отбойное устройство; 4 – шнековые грузчики; 5 – щит ограждения; 6 – скребковый конвейер; 7 – кабина машиниста; 8 – гусеничный ход; 9 – бермовые фрезы; 10 – забурник [41]

Исполнительные органы смонтированы на общей платформе, которая установлена на передней раме скребкового конвейера. Верхнее отбойное устройство комбайна «Урал-20Р» предназначено для оформления верхней части выработки, устанавливается подвижно на редукторах исполнительного органа и может подниматься и опускаться двумя гидроцилиндрами, обеспечивая необходимый типоразмер выработки по высоте или зазор в транспортном положении. Конструктивно отбойное устройство представляет собой самостоятельный узел с приводом (электродвигатель ВРПВ 200L4P, мощностью 45 кВт) и редуктором, смонтированным в одной из рукоятей и включающим в себя две планетарные передачи типа 2К-Н и три пары цилиндрических колёс.

Бермовый орган выполненный в виде шнека и двух боковых фрез, предназначен для оформления нижней части выработки, транспортировки и погрузки отбитой горной массы в приёмную часть скребкового конвейера. Шнек бермового органа состоит из двух частей, имеющих встречное направление спирали, причем одна часть может проворачиваться относительно другой, что обеспечивает кинематическое разделение правого и левого приводов. Вращение бермового органа осуществляется от двух приводных электродвигателей 2BP250S4 мощностью 75 кВт [41].

К достоинствам исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р» следует отнести относительно небольшое количество одновременно контактирующих с забоем резцов, что обеспечивает передачу на них значительной мощности при малых напорных усилиях на забой. Резцы, установленные на исполнительных органах комбайна, контактируют с забоем с одинаковой скоростью, вследствие периодичности контакта происходит их охлаждение, что положительно сказывается на сроке службы породоразрушающего инструмента [6, 44].

Следует отметить также некоторые существенные недостатки исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р». Калийный массив

разрушается стружками серповидного сечения, что обуславливает повышенный выход мелких пылевидных классов руды в продуктах отбойки.

В конструкции редукторов планетарно-дисковых исполнительных органов используются конические передачи, что негативно отражается на ресурсе трансмиссий комбайна «Урал-20Р». Отсутствие демпфирующих устройств и значительные внешние динамические нагрузки обуславливают повышенный выход из строя опорных подшипников и валов поворотных дисков.

Мощность одного привода бермового органа составляет 75 кВт. На основании расчетов установлено, что на отбойку руды шнеком и фрезой затрачивается мощность, не превышающая 35 кВт [58], следовательно, основная часть энергии привода затрачивается на перемещение и погрузку горной массы. Значительные энергозатраты на погрузку свидетельствуют о том, что руда перемещается шнеками с значительным сопротивлением, при этом происходит интенсивное измельчение горной массы [53, 54, 113].

Скребковый конвейер (перегрузочный) комбайна предназначен для загрузки отбитой массы на транспортно-погрузочные средства, в качестве которых используются бункер-перегрузочники и самоходные вагоны. Последние обеспечивают перегрузку горной массы на ленточные конвейеры.

Перегрузочник состоит из передней опорной, переходной и поворотной разгрузочной рам. На поворотной раме установлены два электродвигателя ВРПВ180S4 мощностью 22 кВт. Ширина желоба скребкового конвейера – 710 мм. В качестве тягового органа применена круглозвенная скребковая цепь 18×64 – С11 ТУ12.44.1050-83 с шагом расстановки скребков 516 мм.

Рама конвейера в средней части шарнирно соединена с рамой гусеничного хода, а передней частью опирается на два гидроцилиндра, нижние концы которых закреплены на раме гусеничного хода. Гидроцилиндрами рама конвейера может быть опущена вниз или приподнята

вверх, что обеспечивает управление движением комбайна при выемке в вертикальной плоскости.

Работа скребковых конвейеров в качестве погрузочно-транспортных устройств проходческо-очистных комбайнов характеризуется рядом особенностей:

- большим углом наклона передней рамы конвейера (до 30°);
- неравномерностью поступления груза от двух однозаходных шнеков;
- подверженностью рамы конвейера значительной вибрации, обусловленной значительными динамическими нагрузками на исполнительном органе комбайна и приводе конвейера.

Угол естественного откоса отделённой от массива калийной руды в движении составляет около 20° , при погрузке часть горной массы скатывается с конвейера. Производительность скребкового перегружателя ещё больше снижается при работе комбайна в выработках с отрицательными углами наклона (движение комбайна вниз) [57, 58].

Однозаходные шнеки подают руду на конвейер неравномерно, отдельными порциями, что обуславливает динамический характер нагрузок приводов перегружателя.

Ходовая гусеничная тележка предназначена для подачи комбайна на забой с необходимым напорным усилием и скоростью, а также для выполнения маневровых операций: перегона, поворота и разворота комбайна. Особенность гусеничной ходовой тележки комбайна «Урал-20Р» состоит в том, что она обеспечивает сравнительно невысокие скорости перемещения при высоких напорных усилиях.

В состав ходовой тележки комбайна входит основная рама, к которой посредством цапф крепятся гусеничные рамы. Ходовая тележка имеет боковые направляющие лыжи, перемещаемые гидроцилиндрами, имеющими отдельное управление. Направляющие лыжи осуществляют распор тележки

о боковые стенки выработки и обеспечивают прямолинейное движение комбайна при перегонах, а также используются при поворотах [41, 42, 81].

Гусеничная рама состоит из корпуса с установленными на нем опорными и натяжными катками, натяжного устройства и гусеничных цепей. Гусеничная цепь состоит из траков шириной 390 мм с шагом установки 230 мм и соединительных пальцев диаметром 36 мм. В передней части рам гусеничного хода имеются кронштейны с обработанными вертикальными плоскостями, которые образуют направляющие для перемещения передней рамы конвейера при использовании домкратов подъема бермового органа.

Ходовая тележка комбайна «Урал-20Р» приводится в движение механизмом хода, состоящим из двух самостоятельных приводов, выполненных отдельно и предназначенных для передачи крутящих моментов от гидродвигателей к ведущим звездочкам гусеничных цепей. Гидропривод гусеничного хода обеспечивает рабочую и маневровую скорости движения комбайна [84, 99].

К недостаткам ходового оборудования комбайнов «Урал-20Р» необходимо отнести отсутствие устройств, осуществляющих контроль скорости подачи V_n комбайна на забой. При работе добычной машины на пластах с отрицательными углами наклона (движение вниз) нередки ситуации «задавливания» комбайна в забой под собственным весом, что приводит к превышению нагрузок на приводах исполнительных органов и, как следствие, к срабатыванию защит или возникновению аварийных отказов [58]. При работе комбайна в выработках с положительными углами наклона (движение вверх) гусеничный ход зачастую не обеспечивает необходимого напорного усилия, что приводит к проскальзыванию гусениц, уменьшению скорости подачи комбайна на забой и снижению качества отделяемой от массива руды [110, 111].

Органы перемещения имеют регулируемую скорость подачи комбайна на забой с ручным управлением. Режим и параметры работы комбайна во

многим определяются уровнем квалификации машиниста и его психоэмоциональным состоянием [39, 46].

Таблица 1.4 – Статистика аварийных отказов редукторов комбайнов «Урал-20Р»

№ п/п	Наименование узла	Доля от общего числа аварийных отказов, %
1	Поворотный редуктор планетарно-дискового исполнительного органа	35,6
2	Редуктор раздаточный планетарно-дискового исполнительного органа	9,7
3	Редуктор переносного вращения планетарно-дискового исполнительного органа	1,9
4	Редуктор относительного вращения планетарно-дискового исполнительного органа	3,8
5	Редуктор отбойного устройства	2,9
6	Редуктор бермового исполнительного органа	14,6
7	Редуктор конвейера быстроходный	5,7
8	Редуктор конвейера тихоходный	14,5
9	Редуктор маслостанции	2,6
10	Редуктор гусеничного хода	8,7

Отсутствие эффективных систем контроля параметров работы (в частности скорости подачи комбайна на забой), защит, устройств демпфирования динамических нагрузок является причиной значительной части аварийных отказов комбайнов «Урал-20Р». Согласно статистике, наиболее часто выходят из строя поворотные и раздаточные редукторы планетарно-дисковых исполнительных органов, редукторы бермовых исполнительных органов, а также тихоходные редукторы скребковых конвейеров-перегрузателей (таблица 1.4) [105, 70].

1.3.2. Системы управления, индикации и защиты проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р»

Электрооборудование комбайнов «Урал-20Р» предназначено для распределения электрической энергии приводам агрегатов комбайнов, управления этими приводами, освещения, сигнализации и защиты; выполнено в рудничном взрывобезопасном исполнении. Электроснабжение осуществляется по двум гибким экранированным кабелям сечением

3×95 мм². Питание комбайна осуществляется от одной или двух передвижных трансформаторных подстанций. Комбайны «Урал-20Р» оснащаются двумя пускателями, схема управления которыми построена таким образом, что при отключении любого из них отключается и второй.

Защиту от токов короткого замыкания питающих кабелей и утечек в питающей сети выполняет аппаратура передвижных трансформаторных подстанций. Заземление комбайнов выполняется с помощью жил заземления кабелей и специальной заземляющей сети в соответствии с «Инструкцией по устройству, осмотру и измерению сопротивления заземлений в условиях рудников Верхнекамского бассейна» [51]. Аварийное отключение энергии в условиях газового режима осуществляется устройством типа ИКУ-2, воздействующим на отключающие катушки выключателей питающих подстанций [41].

Комбайны «Урал-20Р» оснащаются электрогидравлической системой управления (СЭУ), которая обеспечивает управление гидросистемой гусеничного хода, гидросистемами цилиндров установочных перемещений (позиционирование стрелы конвейера, бермового исполнительного органа, отбойного устройства, натяжения цепи конвейера, перемещения боковых лыж, подъема щитков и буровой рамы) и бурильной установки. Цепи управления и сигнализации питаются напряжением 127 и 36 В соответственно от понижающего трансформатора, установленного в станции управления.

СЭУ имеет стационарный и вынесенные пульты управления. Стационарный пульт управления (рисунок 1.2, а) располагается в кабине машиниста, оснащается индикаторами токовых нагрузок электродвигателей комбайна, кнопками управления механизмами и рукоятями управления гидрораспределителей. Вынесенный пульт управления (рисунок 1.2, б) предназначен для дистанционного включения и отключения подачи комбайна, а также аварийного отключения питающей подстанции. На

лицевой панели пульта расположены кнопки «ПОДАЧА ВКЛ.», «ПОДАЧА ОТКЛ.», «СТОП АВАРИЯ», а также окно индикации заполнения бункера.

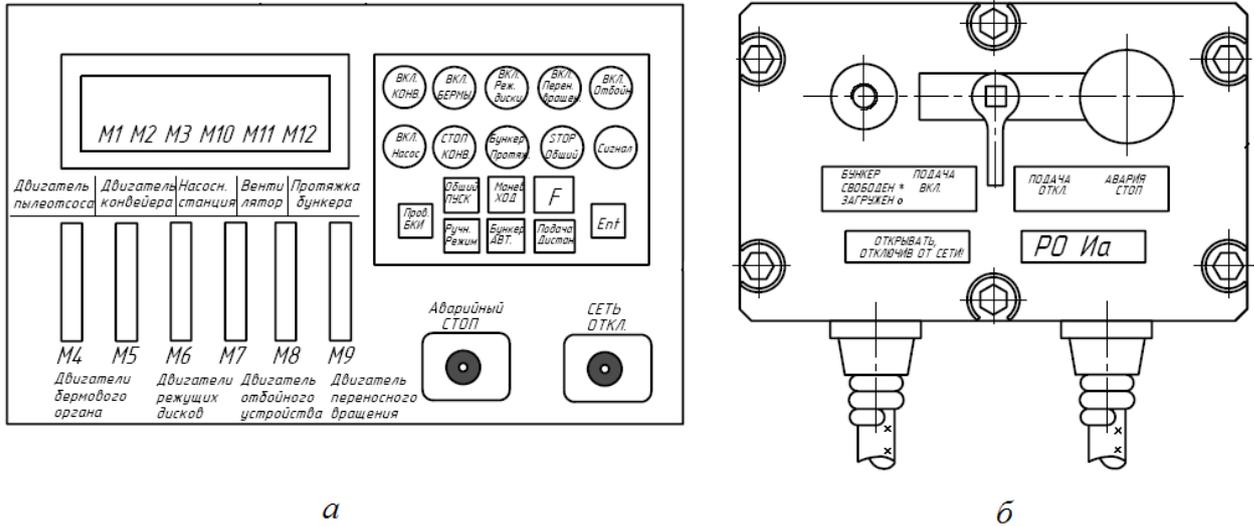


Рисунок 1.2 – Пульт управления комбайном комбайна «Урал-20Р»:

а – стационарный; *б* – вынесенный

СЭУ комбайнов «Урал-20Р» обеспечивает три режима работы добычной машины: холостой ход, рабочий ход и маневровый ход. В режиме холостого хода гидрораспределители управления комбайном находятся в нейтральных положениях, рабочая жидкость беспрепятственно проходит по трубопроводам и сливается в гидробак. При этом валы гидромоторов гусеничного хода зафиксированы тормозными гидроцилиндрами.

В режиме рабочего хода, посредством переключения гидрораспределителей выбора направления движения комбайна (табличка «ГУСЕНИЦЫ» на стационарном пульте управления), поток рабочей жидкости от насоса рабочего хода поступает в полости гидромоторов гусеничного хода. Скорость подачи комбайна на забой регулируется вручную, посредством изменения положения лимба регулятора расхода, расположенного на стационарном пульте управления. При открытии регулятора расхода часть рабочей жидкости сбрасывается на слив, уменьшая тем самым скорость вращения валов гидромоторов. Выбор значения рабочей

скорости осуществляется машинистом на основе данных с индикаторов токовых нагрузок электродвигателей комбайна.

Контроль предельной загрузки электродвигателей комбайнов осуществляется аппаратами типа «КОРД», которые имеют следующие выдержки времени на отключение:

- при опрокидывании и затянувшемся пуске – 2,2 с;
- при технологических перегрузках – 10 с.

При нормальном пуске двигателей аппараты защиты не срабатывают, но при опрокидывании, затянувшемся пуске (более 2,2 с) или при технологических перегрузках (более 10 с) аппарат срабатывает и своим контактом размыкает соответствующую цепь.

Движение комбайна с маневровой скоростью обеспечивается посредством включения насоса маневрового хода. В этом случае к гидромоторам гусеничного хода подаётся количество жидкости, равное суммарной производительности двух насосов – рабочего и маневрового хода [41, 81].

В 2012 году специалистами ООО «МК «Ильма» (г. Томск) разработана модернизированная СЭУ, состав которой дополнен системами мониторинга редукторов комбайна, газового контроля и передачи данных. Модернизированная СЭУ оснащена датчиками измерения концентрации метана в атмосфере очистных выработок, беспроводными датчиками измерения температуры и предельного уровня масла в редукторах комбайна, датчиками измерения температуры подшипниковых узлов.

Система обеспечивает непрерывный контроль величин потребляемых электроприводами токов, температур подшипниковых узлов и масляных ванн редукторов, концентрации метана в атмосфере выработки. Оперативные данные отображаются на пульте управления машиниста. Вся полученная информация соотнесена с реальным временем и фиксируется в

энергонезависимой памяти. Предусмотрена возможность копирования архива данных на съемный диск.

Разработчиками предусмотрена возможность передачи информации от комбайна в информационную сеть предприятия в режиме реального времени, посредством узкополосной *PLC (PowerLineConnection)* технологии передачи данных по силовому кабелю (рисунок 1.3) [22, 82, 70].

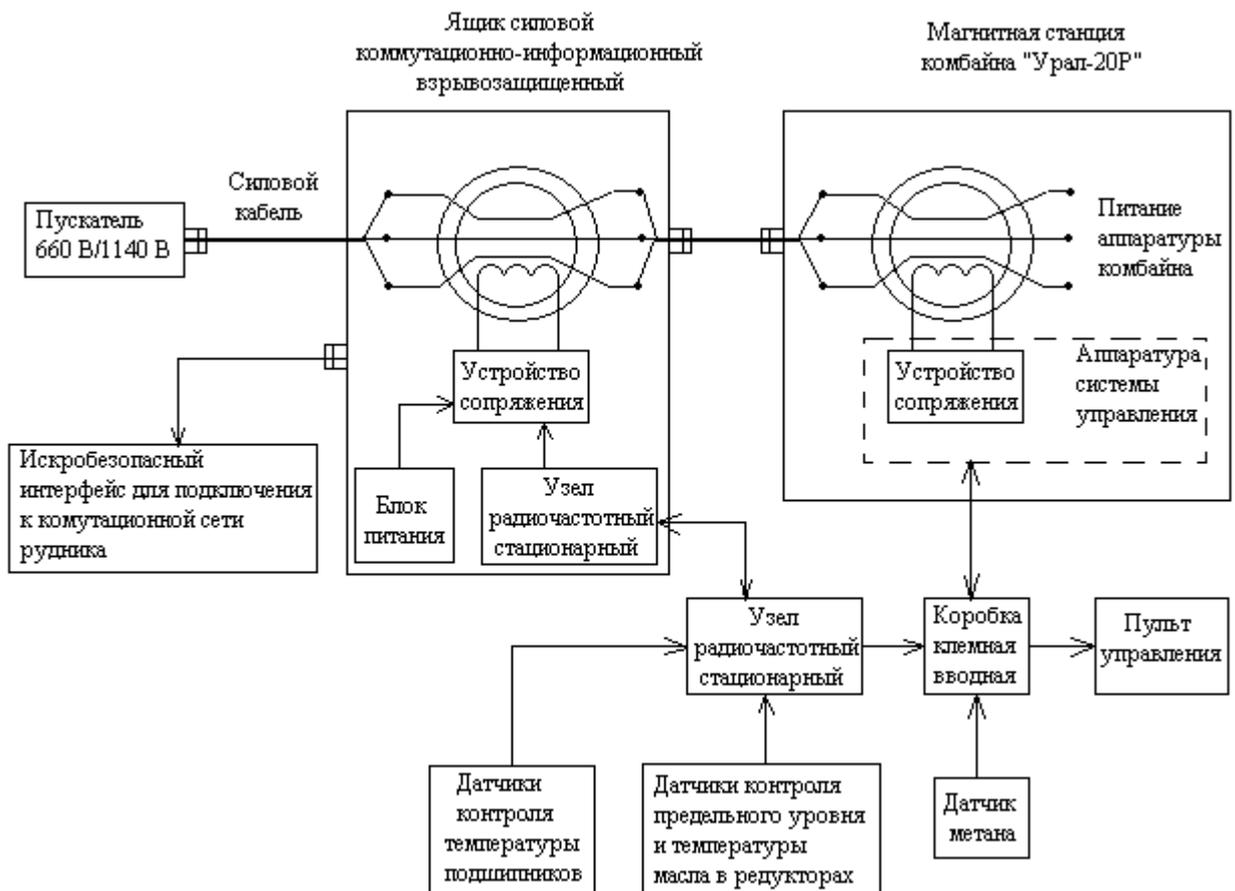


Рисунок 1.3 – Структурная схема системы передачи информации от комбайна в информационную сеть предприятия [70]

Известно, что термодинамические методы оценки технического состояния механических трансмиссий малоэффективны вследствие высокой инерционности и неоднородности среды (корпус, валы, подшипники, зубчатые колёса и т.д.). Местные перегревы нивелируются в общем поле температур редукторов. Сама же средняя температура трансмиссии является

результатирующей двух тепловых потоков: деградационного, связанного с диссипацией энергии в элементах трансмиссии (своеобразного источника нагрева), и теплового потока от корпуса редуктора в окружающую среду (эффективности охлаждающей системы), во многом зависящего от параметров этой среды, наличия загрязнений внешней поверхности редуктора. В свою очередь, установившаяся температура масла зависит от интенсивности охлаждения корпуса редуктора [61, 105, 52].

Низкая эффективность термодинамического мониторинга обуславливает необходимость периодического проведения дополнительных видов диагностики, в частности, вибрационного контроля приводов комбайна с целью уточнения неисправного состояния отдельных элементов. Но специальные виды диагностики обладают высокой трудоемкостью, временными затратами.

Вследствие неполной и неравномерной загрузки электродвигателей исполнительных органов комбайна регистрация действующих значений токов двигателей не позволяет в полной мере судить о характере изменения нагрузок на исполнительные органы. Высокая энерговооруженность оборудования механизированных комплексов и «мягкая» шахтная сеть электроснабжения вызывают «просадку» питающего напряжения, пропорционально увеличению тока нагрузки приводов, снижая эффективность работы систем автоматического управления, регулирования и защит, основанные только на контроле потребляемых токов [102].

Ручное управление комбайном зачастую обуславливает нерациональные режимы работы добычной машины: приводные двигатели недогружены или, наоборот, перегружены. Отсутствие информации о перемещении добычной машины затрудняют оценку степени устойчивости режима работы комбайнов с номинальными нагрузками, значений эксплуатационной производительности и эффективности использования технологического оборудования во времени. Наличие датчиков метана не

отменяет необходимости осуществления инструментального контроля выбросоопасности калийного массива, вызванной изменением напряженно-деформированного состояния соляных пород при интенсивном ведении очистных работ или в зонах геологических нарушений [24, 27, 101, 70].

Следует отметить, что, несмотря на указанные недостатки, конструкция комбайнов «Урал-20Р» хорошо адаптирована к использованию на калийных рудниках России [106]. Эффективная и безаварийная работа комбайнов определяется в первую очередь режимом работы и условиями эксплуатации добычных машин на руднике [34]. Таким образом, на сегодняшний день актуальной остается задача выбора технически обоснованных режимов работы комбайнов «Урал-20Р» с учетом реальных условий эксплуатации.

1.4. Режимы работы проходческо-очистных комбайнов «Урал» для добычи калийных руд

Под режимом работы выемочной машины принято понимать установленный порядок чередования периодов, характеризуемых величиной, продолжительностью и характером изменения нагрузки во время работы, количеством пусков и отключений, временем производительной работы и технологических перерывов. Обоснованный выбор рационального режима работы комбайна, соответствующего физико-механическим свойствам разрушаемого массива (нагрузкам со стороны забоя), определяет эффективность использования добычной машины и в первую очередь её техническую производительность в конкретных условиях эксплуатации. Значительное число случайных факторов, влияющих на нагруженность приводов проходческо-очистных комбайнов, обуславливает возникновение неизбежных ошибок при определении мгновенных величин нестационарных нагрузок элементов горных машин расчетными методами, что, в свою

очередь, приводит к повышенной аварийности комбайнов вследствие возникновения сверхнормативных нагрузок [85, 45, 46, 48].

Достоверная оценка величины мгновенных нагрузок приводов выемочных машин возможна посредством использования методов приборного контроля при работе комбайна непосредственно в забое. Анализ полученных данных позволяет оценить эффективность работы механизированного комплекса в целом, выявить и устранить негативные тенденции, снижающие эффективность использования добычного и транспортирующего оборудования в очистных камерах [104, 29].

1.4.1. Общие сведения о нагруженности приводов комбайнов «Урал»

К числу основных факторов, влияющих на нагруженность приводов выемочных машин, относятся:

- горно-геологические условия и физико-механические свойства разрушаемой руды, формирующие силы сопротивления на исполнительных органах комбайна;
- кинематика движения исполнительных органов комбайна;
- состояние режущего инструмента;
- параметры забоя, разрушаемого исполнительными органами комбайна;
- принятая планограмма работ и уровень организации технологических процессов в очистной камере;
- квалификация и психофизические характеристики операторов оборудования механизированного комплекса;
- параметры энергоснабжения.

Схема формирования нагрузок на приводы исполнительных органов проходческо-очистного комбайна представлена на рисунке 1.4 [116].



Рисунок 1.4 – Схема формирования нагрузок на приводы исполнительных органов при работе проходческо-очистного комбайна

Согласно схеме формирования нагрузок на приводы исполнительных органов комбайна (см. рисунок 1.4) мгновенную нагрузку можно представить в виде суммы трех составляющих:

$$P(T) = P_1(T) + P_2(T) + P_3(T), \quad (1.1)$$

где $P(T)$ – мгновенное значение нагрузки на приводе исполнительного органа выемочной машины; $P_1(T)$ – составляющая, характеризующая физико-механические свойства разрушаемого соляного массива; $P_2(T)$ – составляющая, характеризующая кинематику исполнительных органов, техническое состояние выемочной машины; $P_3(T)$ – составляющая, характеризующая режимные параметры работы выемочной машины, в частности скорость подачи комбайна на забой [46].

Расчетные зависимости по определению нагруженности приводов проходческо-очистных комбайнов «Урал» изложены в отраслевой методике, разработанной специалистами ВНИИ «Галургия» [43]. Используемые в расчетах величины коэффициентов являются усреднёнными и имеют

значительный разброс частных значений, что приводит к неизбежным ошибкам в определении мгновенной нестационарной нагрузки горных машин математическими методами [45].

В работах [18, 68, 37, 39, 45, 49, 85] указывается, что достоверная оценка величины и характера изменения внешних нагрузок на элементах приводов проходческо-очистных комбайнов возможна посредством регистрации значений активных мощностей, потребляемых двигателями добычной машины и скорости подачи комбайна на забой. В качестве показателей эффективности использования комбайна за рассматриваемый период, как правило, используют величины производительности, удельных энергозатрат процесса добычи руды, фракционный состав отделяемой от массива руды, а также показатели, характеризующие устойчивость режима работы механизированного комплекса в забое [36, 105, 112].

Особенности формирования нагрузок в элементах системы трансмиссий исполнительных органов могут быть учтены при проведении специальных замеров непосредственно в забое. Отметим, что выходные параметры обобщенно характеризуют совокупность внешних и внутренних факторов, а также показатели режима работы комбайна. При использовании соответствующих научно-обоснованных методик и регистрирующей аппаратуры математическое ожидание и амплитудно-частотный состав сигнала потребляемой мощности позволяют судить об изменении физико-механических свойств разрушаемого массива и показателях технического состояния выемочной машины.

1.4.2. Параметры разрушения забоя исполнительными органами комбайна «Урал-20Р»

Силовые и энергетические показатели процесса отделения руды от массива резцами проходческо-очистных комбайнов зависят от параметров исполнительных органов, скорости подачи комбайна на забой и физико-механических свойств разрушаемого массива. Кинематика и конструктивные

соотношения параметров планетарно-дискового исполнительного органа комбайна «Урал-20Р» представлены на рисунке 1.5.

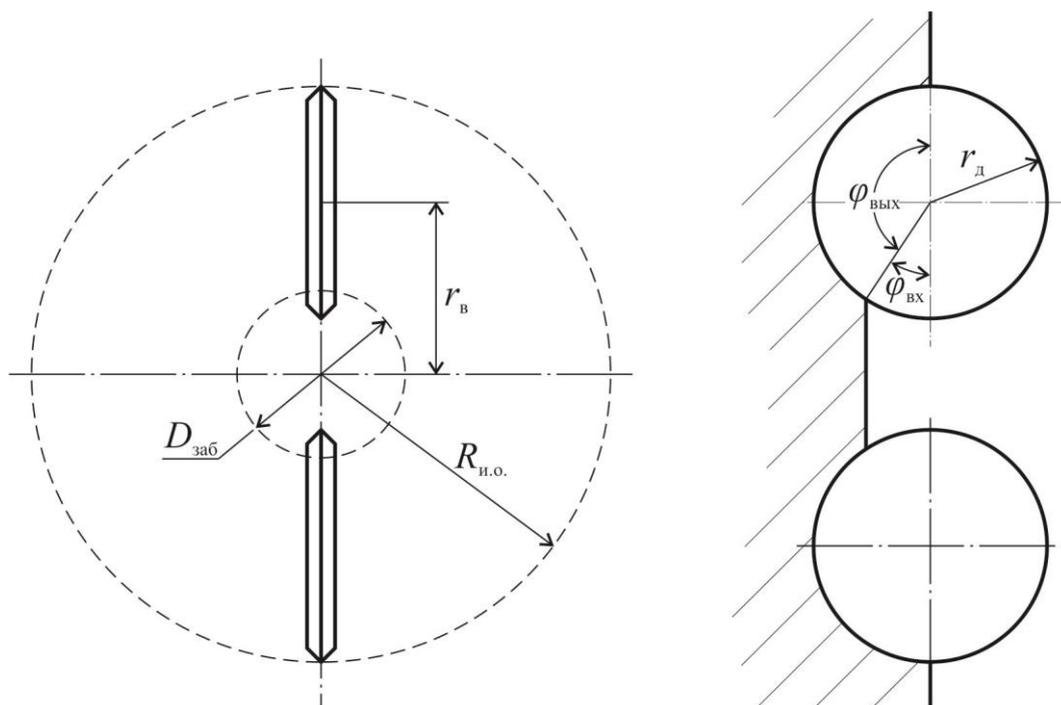


Рисунок 1.5 – Кинематика и геометрические параметры планетарно-дискового исполнительного органа комбайна «Урал-20Р»: $R_{и.о.}$ – внешний радиус исполнительного органа; $D_{заб.}$ – диаметр забурника; $r_д$ – радиус резцового диска; $r_в$ – расстояние от оси вращения диска до оси вращения водила; $\varphi_{вх.}$ – угол поворота диска относительно вертикали при входе резца в контакт с забоем; $\varphi_{вых.}$ – угол поворота диска относительно вертикали при выходе резца из контакта с забоем

Резцы планетарного исполнительного органа комбайна «Урал-20Р» разрушают забой последовательными радиальными резами, характеризующимися переменными шагом резания t и толщиной стружки h (рисунок 1.6). Изменение шага резания t и толщины стружки h в зависимости от угла поворота резцового диска описывается уравнениями [37]:

$$t = \frac{2\pi n_{пер} (r_в - r_д \cos \varphi)}{n_{отн} z_д}; \quad (1.2)$$

$$h = \frac{V_{п} \sin \varphi}{k_д n_{пер}}, \quad (1.3)$$

где φ – угол поворота диска, рад; r_d – радиус резцового диска, м; r_b – расстояние от оси вращения диска до оси вращения водила, м; z_d – количество резцов на поворотном диске, шт.; $n_{отн}$ – частота относительного вращения дисков, мин^{-1} ; $n_{пер}$ – частота переносного вращения дисков, мин^{-1} ; $V_{п}$ – скорость подачи комбайна на забой, мм/мин; k_d – количество резцовых дисков на исполнительном органе, шт.

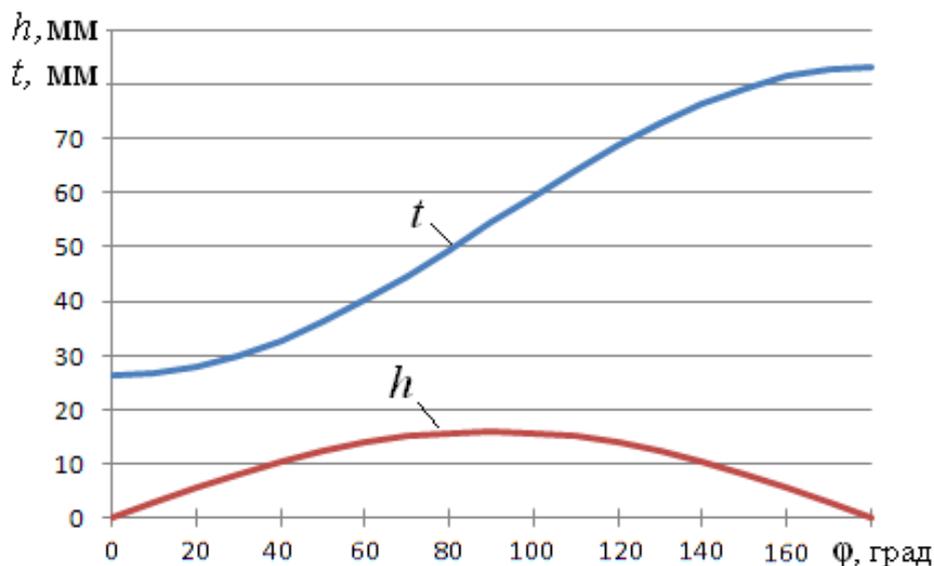


Рисунок 1.6 – Изменение шага резания t и толщины стружки h в зависимости от угла поворота диска планетарного исполнительного органа при работе комбайна «Урал-20Р», скорость подачи $V_{п}= 0,13$ м/мин

Величина шага резания t зависит от соотношения скоростей главного и переносного вращения режущего диска, числа режущих инструментов на нём, его конструктивных параметров и изменяется в зависимости от угла поворота диска [28]. При этом шаг резания увеличивается по мере удаления реза от оси водила исполнительного органа. На выходе режущего инструмента из массива шаг резания имеет наибольшее значение [37, 95].

Траектория движения одиночного реза, закреплённого на поверхности поворотного диска пространственного планетарного исполнительного органа комбайна «Урал-20Р», описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} X = (r_{\text{в}} - r_{\text{д}} \cos \varphi) \cos\left(\frac{\varphi}{n_{\text{отн}} / n_{\text{пер}}}\right); \\ Y = (r_{\text{в}} - r_{\text{д}} \cos \varphi) \sin\left(\frac{\varphi}{(n_{\text{отн}} / n_{\text{пер}})}\right); \\ Z = r_{\text{д}} \sin \varphi. \end{cases} \quad (1.4)$$

Резец, установленный на поверхности поворотного диска, совершает сложное движение по спирали радиусом $r_{\text{д}}$ с частотой относительного вращения $n_{\text{отн}}$ и частотой переносного вращения $n_{\text{пер}}$ (рисунок 1.7).

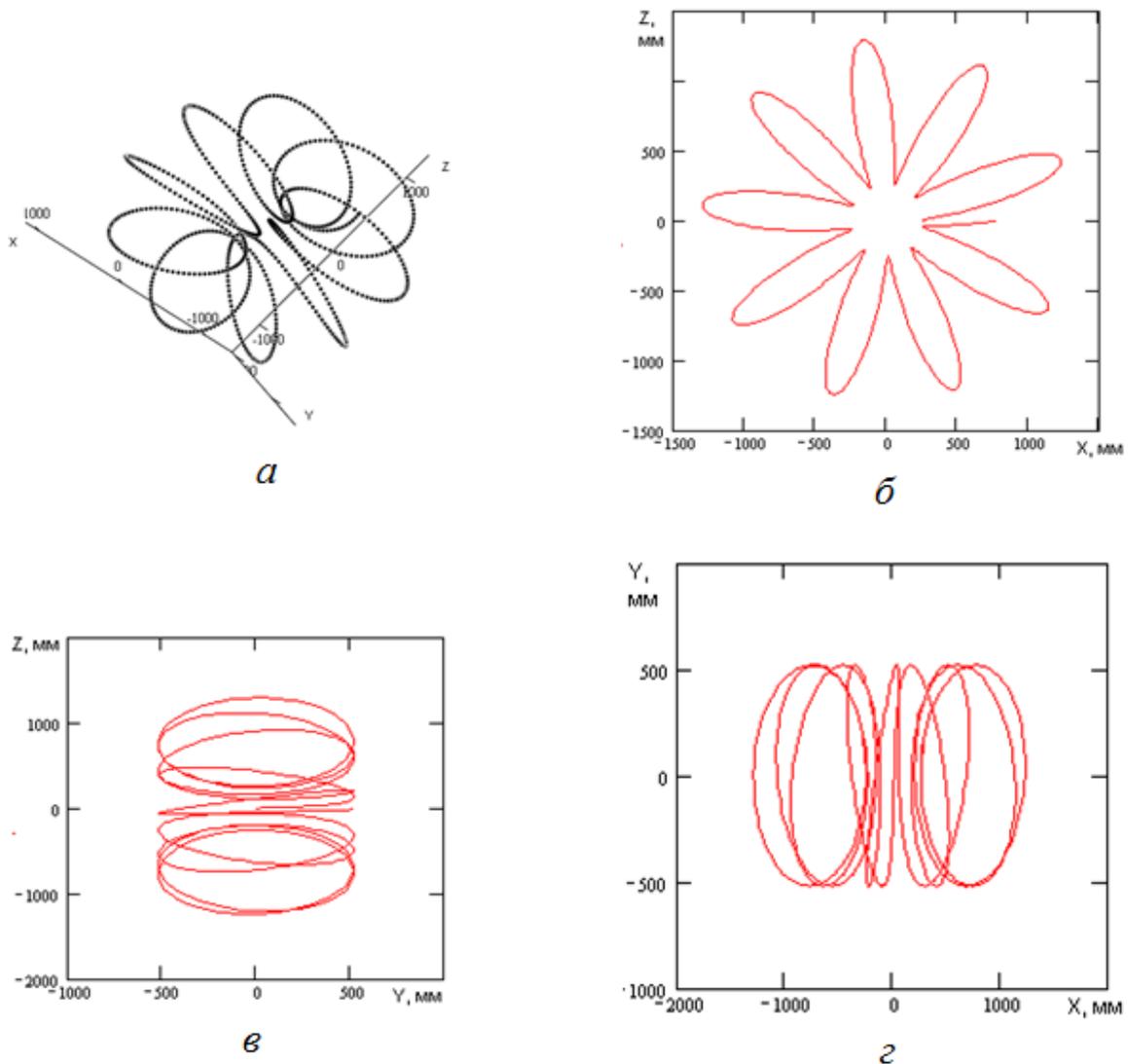


Рисунок 1.7 – Траектория движения резца, закреплённого на поверхности поворотного диска исполнительного органа комбайна «Урал-20Р»: *a* – в трёхмерном пространстве; *б* – в проекции на вертикальную плоскость забоя; *в* – в проекции на вертикальную плоскость, перпендикулярную к плоскости забоя; *г* – в проекции на горизонтальную плоскость

Траектория движения резца за один оборот переносного вращения при скорости подачи на забой $V_{\text{п}} = 0$ образует тороидальную поверхность (см. рисунок 1.7, *a*). При $V_{\text{п}} \neq 0$ резцовый инструмент участвует в трёх видах движения: относительном (вокруг оси поворотного диска), переносном (вокруг оси водила) и поступательном движении подачи комбайна на забой.

Шнековые и барабанные исполнительные органы комбайнов «Урал-20Р» оснащаются неповоротными тангенциальными резцами, разрушающими забой последовательными резами серповидной формы. Максимальное значение толщины стружки $h_{\text{ш.макс}}$ для шнековых и барабанных исполнительных органов определяется по формуле:

$$h_{\text{ш.макс}} = \frac{52,4D_{\text{ш}}V_{\text{п}}}{V_{\text{р}}m}, \quad (1.5)$$

где $h_{\text{ш.макс}}$ – максимальное значение толщины стружки, отделяемой от массива шнековым (барабанным) исполнительным органом, м; $D_{\text{ш}}$ – диаметр шнека (барабана) по резцам, м; m – число резцов в линии резания, шт.; $V_{\text{р}}$ – скорость движения резца, м/с.

Значение скорости движения резца $V_{\text{р}}$ определяется по формуле:

$$V_{\text{р}} = \frac{\pi D_{\text{ш}} n_{\text{ш}}}{60}, \quad (1.6)$$

где $n_{\text{ш}}$ – частота вращения исполнительного органа, мин⁻¹.

Шаг резания t для шнековых и барабанных исполнительных органов рассчитывается по формуле:

$$t = \frac{B}{n-1}, \quad (1.7)$$

где B – ширина шнека или барабана, м; n – число линий резания [41, 69].

Рациональная совокупность заданных параметров обеспечит наиболее высокую производительность исполнительных органов комбайна при минимальных удельных затратах энергии на разрушение массива [97, 98].

1.4.3. Основные параметры выработок, формируемых проходческо-очистными комбайнами «Урал»

Важными технологическими характеристиками проходческо-очистных комбайнов непрерывного действия являются форма и размеры образуемых выработок, так как от них зависят область рационального применения машин при их использовании в очистных камерах, величина и характер изменения нагрузок на элементах приводов, уровень энерговооруженности комбайнов и возможность применения самоходных вагонов той или иной грузоподъемности.

Комбайны «Урал» осуществляют проходку выработок с арочной формой сечения (рисунок 1.8). Ширина комбайнового хода определяется типом и габаритами применяемого комбайна, а число ходов в камере – устойчивостью кровли. Ширина межкамерных целиков зависит от ширины камеры, мощности пласта и свойств руды; принимается от 1,5 до 7 м.

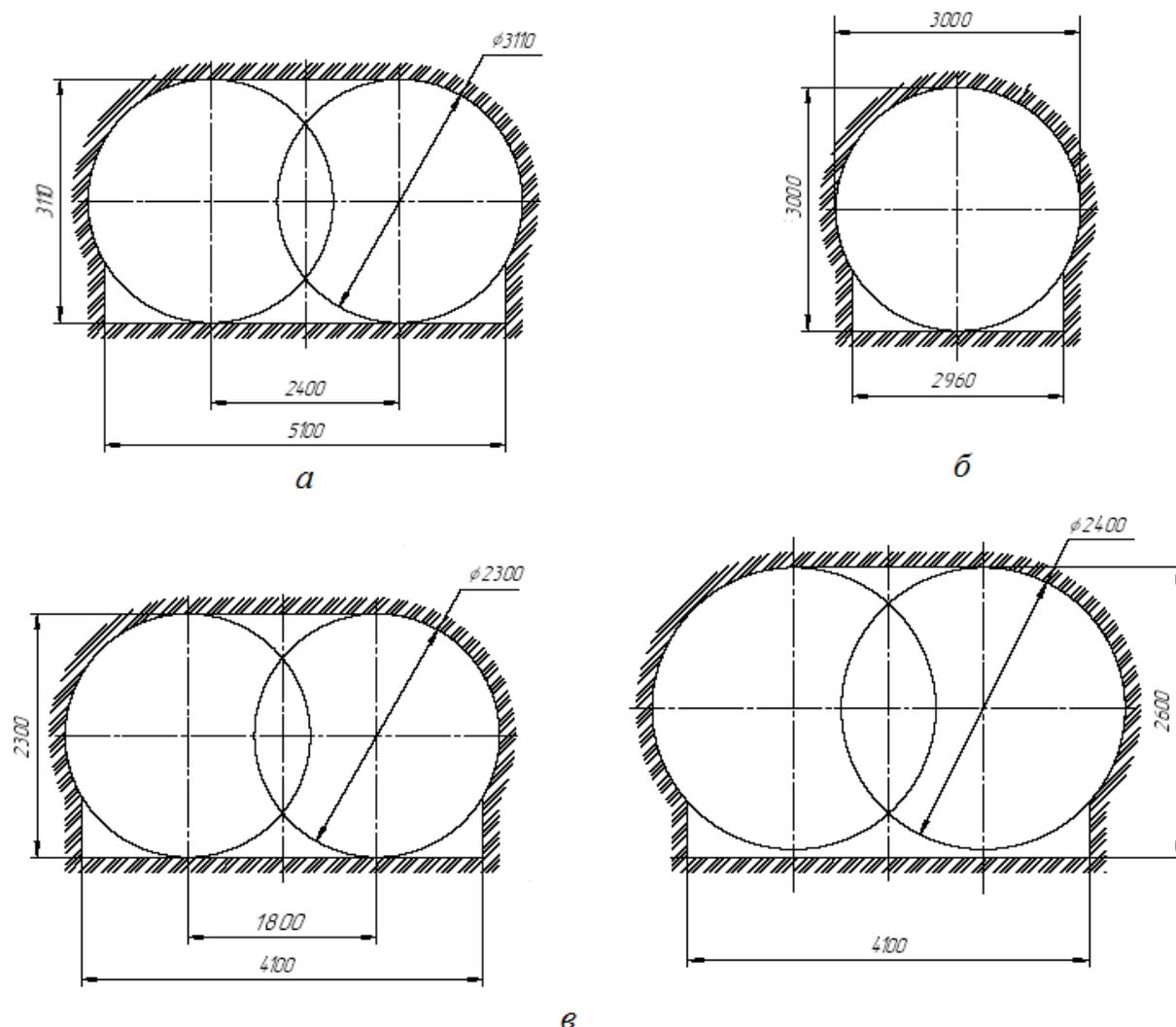


Рисунок 1.8 – Основные геометрические размеры и форма сечения выработок, проводимых комбайнами: *a* – «Урал-20Р»; *б* – «Урал-61»; *в* – «Урал-10А»

От формы выработки зависит полнота извлечения полезного ископаемого. Величина потерь в очистной камере определяется по формуле:

$$\Pi = \frac{F_{\text{оп}} - F_{\text{к}}}{F_{\text{оп}}} \cdot 100 \%, \quad (1.8)$$

где $F_{\text{оп}}$ – площадь прямоугольника, описанного вокруг контура выработки, м^2 ; $F_{\text{к}}$ – площадь сечения выработки, м^2 .

На Верхнекамском калийном месторождении камерная система используется при разработке свиты сближенных пластов В, АБ и Красный II с естественным поддержанием очистного пространства и выемкой

максимальной части блока или панели камерами. В условиях необходимости поддержания ВЗТ камеры и целики располагают соосно для оставления в выработанном пространстве целиков достаточной несущей способности.

На рисунке 1.9 представлена штрековая система, применяемая при разработке пластов АБ и Красный II.

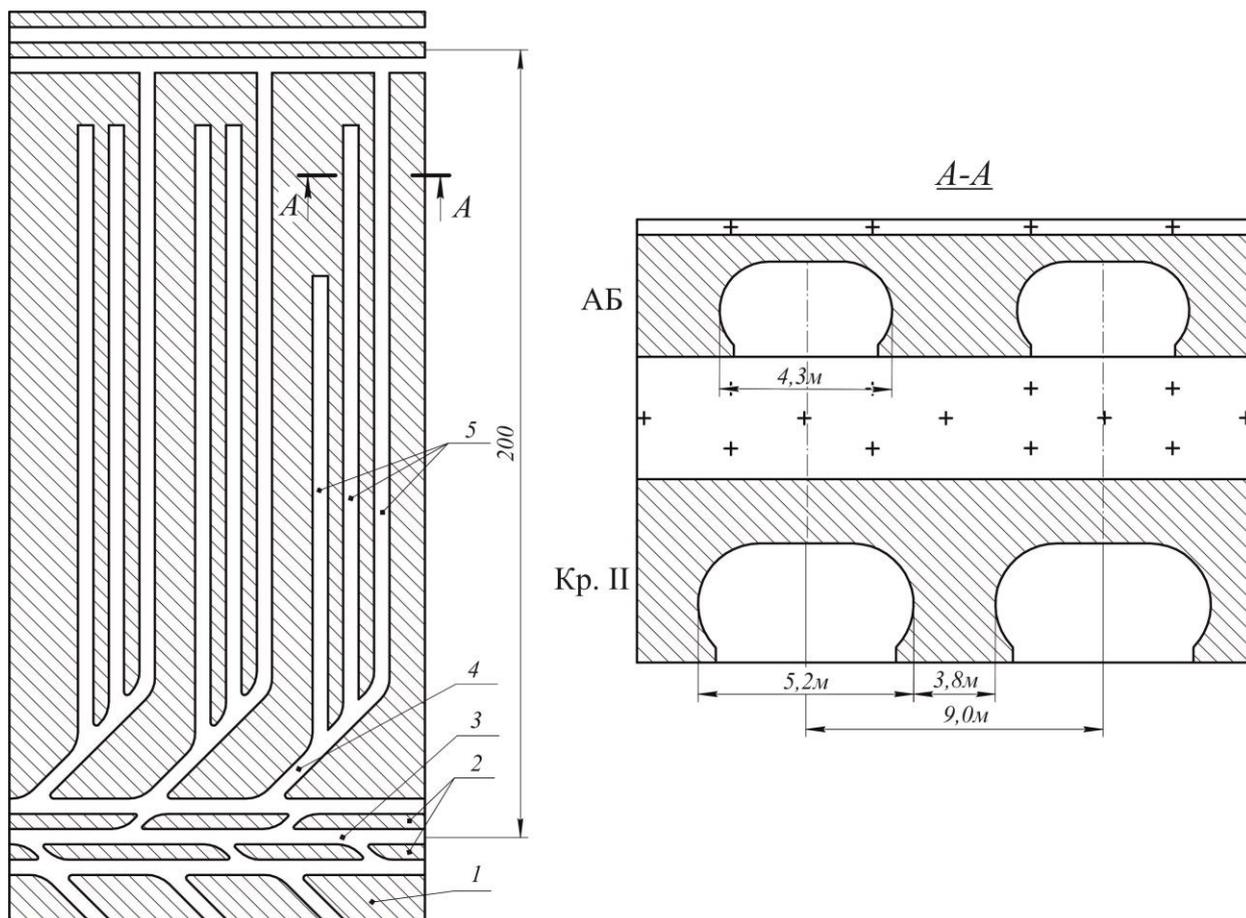


Рисунок 1.9 – Система разработки пластов АБ и Красный II, принятая на одном из рудников Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей: 1, 2 – целики; 3 – штрек; 4 – заездная выработка; 5 – очистные камеры [99]

Из выемочного штрека, под углом 45° к его оси, проводят заездные выработки, из которых ведут разработку трех очистных камер. Межосевое расстояние между ходами комбайна – 9 м. Ширина камер, проходимых по пласту Красный II комбайнами «Урал-20Р», составляет 5,2 м при мощности межкамерных целиков 3,8 м. Длина камеры 150–200 м. Параметры очистных камер, проходимых комбайнами «Урал-10А» на пласте АБ, составляют:

ширина – 4,3 м; мощность межкамерных целиков – 4,7 м; длина камер – 150...200 м [99, 107]. Каждый пласт отрабатывается выработками с «глухим забоем», то есть всей площадью исполнительного органа комбайна.

При мощности пласта Красный II свыше 4 м применяется двухслойная отработка камер. Отработка каждой выработки осуществляется двумя ходами комбайна «Урал-20Р» с наложением сечений по высоте: первым ходом комбайн осуществляет выемку верхнего слоя (комбайн работает глухим забоем), нижний слой отрабатывается вторым ходом после отгона комбайна, при этом площадь забоя меньше площади сечения исполнительного органа выемочной машины, осуществляется подрубка пласта (рисунок 1.10).

В результате опытно-промышленных работ, проведенных сотрудниками АО ВНИИ «Галургия» установлено, что лучшие технико-экономические показатели работы очистных механизированных комплексов обеспечиваются применением варианта камерной системы разработки с выемкой руды полосами на всю ширину камеры при увеличении площади очистного забоя в 3–4 раза. При этом разрезная выработка проходится комбайном полным сечением, а последующие выработки, расширяющие камеру, ведутся не на полное сечение исполнительного органа комбайна. Увеличенное сечение камеры позволяет интенсифицировать процесс транспортирования отбитой руды или работать с магазинированием руды на почву камеры [107].

Разрушение массива полным сечением забоя является наиболее благоприятным, позволяет обеспечить максимальную техническую производительность добычной машины при минимальных удельных энергозатратах и динамических нагрузках на элементы приводов.

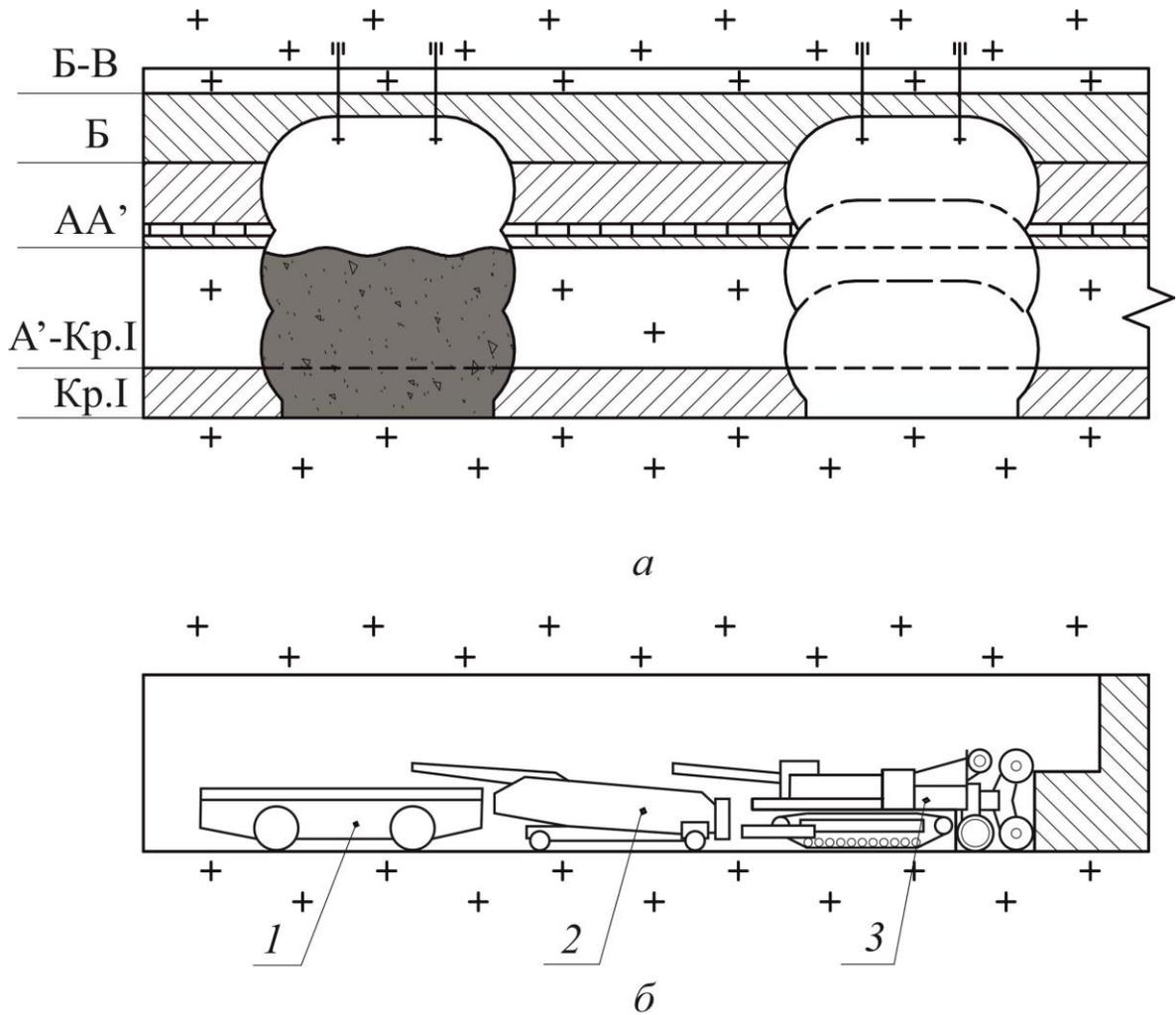


Рисунок 1.10 – Отработка сближенных пластов с подрубкой: *a* – поперечное сечение выработок; *б* – продольное сечение выработки; 1 – самоходный вагон; 2 – бункер-перегрузатель; 3 – выемочный комбайн [99]

Технологические операции зарубки, подрубки и расширения камеры сопровождаются значительными динамическими нагрузками на приводы исполнительных органов комбайнов. Пульсирующий характер нагрузок и отсутствие эффективных демпфирующих устройств приводят к возникновению ударов в зубчатых передачах и разрушению редукторов приводов переносного и относительного вращения резцовых дисков. Для предотвращения внезапных отказов в данных режимах работы требуется тщательно контролировать траекторию движения и выдерживать пониженную скорость подачи комбайна на забой, что негативно сказывается на значении эксплуатационной производительности выемочной машины.

Выводы по главе и задачи исследования

1. Формирование нагрузок на приводах исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов является сложным многофакторным процессом. Величина и характер изменения нагруженности приводов комбайна определяются физико-механическими свойствами руды, слагающей массив, способом и схемой разрушения забоя, кинематической схемой и характеристиками приводов, состоянием режущего инструмента и узлов комбайна, режимом работы выемочной машины в очистной камере.

2. Выбор рациональных режимных параметров работы комбайна типа «Урал» в условиях калийных рудников возможен путем оценки величины и характера изменения нагруженности приводных двигателей породоразрушающих исполнительных органов.

3. Величина и характер изменения нагрузки на приводах исполнительных органов комбайна достоверно оцениваются по значениям активной мощности, потребляемой двигателями выемочной машины, при работе проходческо-очистного комбайна.

4. Существующее техническое оснащение комбайна «Урал-20Р» не позволяет в полной мере контролировать процесс изменения нагруженности приводов выемочных машин. Отсутствие информации о перемещении добычной машины, значениях мгновенной и средней скорости подачи комбайна затрудняют оценку устойчивости режима работы комбайнов, значений эксплуатационной производительности и эффективности использования технологического оборудования во времени.

5. Ручное управление комбайном зачастую обуславливает нерациональные режимы работы добычной машины, что негативно сказывается на энергетических показателях процесса разрушения калийно-магниевого массива, надежности выемочной машины и устойчивости работы механизированного комплекса в целом.

Вышеизложенное позволяет сформулировать задачи последующих исследований.

Задачи исследования

1. Теоретические исследования процесса формирования нагрузок на приводы исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р».

2. Выбор и обоснование показателей эффективности использования проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р», разработка методики количественного определения их величин.

3. Проведение экспериментальных исследований по оценке величины и характера изменения нагруженности приводов режущих исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» в реальных условиях эксплуатации.

4. Разработка алгоритма управления приводами проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р», обеспечивающего разрушение калийного массива с рациональными параметрами резания.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ НАГРУЗОК НА ПРИВОДАХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОХОДЧЕСКО-ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ «УРАЛ-20Р»

2.1. Исследование процесса формирования нагрузок на приводах исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов

Нагруженность приводов рабочего оборудования проходческо-очистных комбайнов определяется параметрами процесса разрушения калийного массива резцами исполнительных органов, скоростью подачи выемочной машины на забой, характеристиками разрушаемого соляного массива и геометрическими параметрами забоя. При выборе режима работы комбайна важное значение имеет правильное определение величин и учет характера изменения нагрузок на приводах выемочной машины для обеспечения требуемых показателей производительности, надежности и ресурса деталей [18, 19, 26, 43].

Достаточно полная характеристика комбайна, как объекта исследования, может быть получена при совокупном учете множества влияющих факторов, определение которых требует изучения процесса формирования нагрузок на приводах комбайна в реальных условиях эксплуатации. Поэтому в работе принимаем комплексный, экспериментально-теоретический метод исследований. За теоретический базис исследований принимаются основные положения статистической динамики горных машин, теории надежности, экспериментально-статистической теории разрушения горных пород резанием [7, 18, 19, 26, 46, 61,72], теории электрических машин и электропривода [2, 5, 89].

2.1.1. Режимы работы приводов проходческо-очистного комбайна

Конструктивные особенности проходческо-очистных комбайнов и технология их использования во взаимосвязи с оборудованием выемочных комплексов определяют величину и характер изменения нагруженности приводов исполнительных механизмов. На рисунке 2.1. приведены графики изменения активных мощностей приводов исполнительных органов при работе комбайна «Урал-20Р» в очистной камере. По графикам нагрузок возможно выделить интервалы работы приводов в различных режимах: $T1$ – выключенного состояния двигателей, $T2$ – запуск двигателей, $T3$ – переходной режим, $T4$ – установившийся режим работы, $T5$ – режим холостого хода комбайна [29].

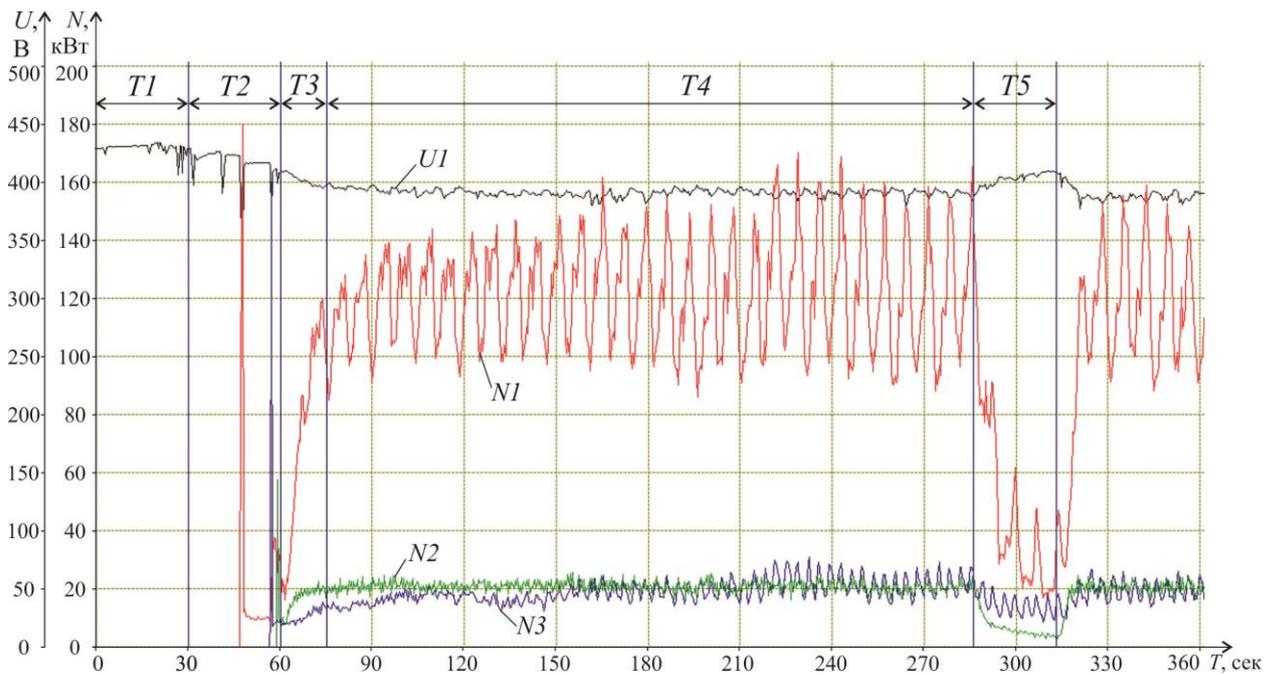


Рисунок 2.1 – Изменение энергетических параметров работы приводов комбайна «Урал-20Р»: $U1$ – фазное напряжение на вводе, В; $N1$ – активная мощность привода режущих дисков, кВт; $N2$ – активная мощность привода отбойного устройства, кВт; $N3$ – активная мощность привода переносного движения, кВт; $T1$ – длительность отключенного состояния электродвигателей комбайна, с; $T2$ – длительность запуска двигателей, с; $T3$ – длительность зарубки, с; $T4$ – длительность работы в установившемся режиме, с; $T5$ – длительность холостого хода, с

В режиме запуска электродвигателя комбайна включаются и выводятся на номинальные обороты. Процесс запуска сопровождается большими пусковыми токами (рисунок 2.2). Для облегчения запуска и сокращения его продолжительности исполнительные органы комбайна не должны быть нагружены. Затянувшийся пуск может привести к перегреву обмоток электродвигателя и выходу его из строя. Режим запуска электродвигателей завершается выводом исполнительных органов на номинальные скорости вращения. Система управления комбайном имеет функцию автоматического запуска электродвигателей, в ходе которой производится последовательный запуск двигателей комбайна и контроль пусковых токов.

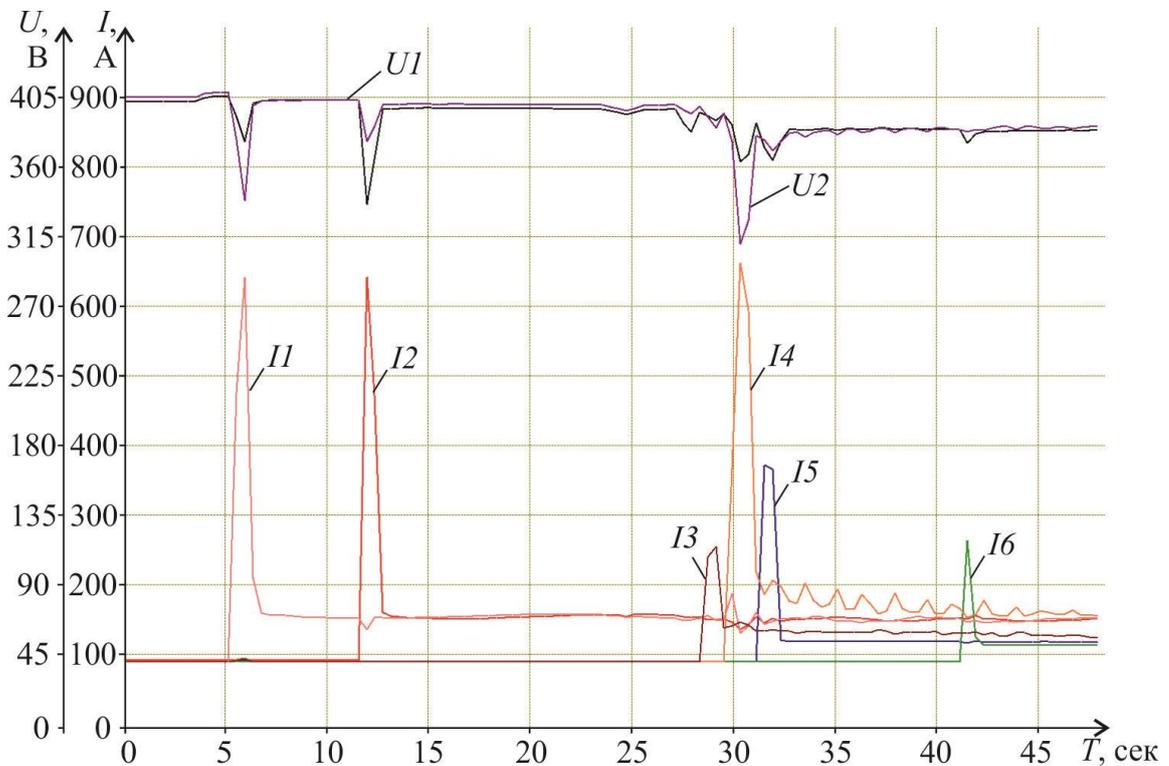


Рисунок 2.2 – Запуск электродвигателей комбайна «Урал-20Р»: U_1 – фазное напряжение на вводе №1; U_2 – фазное напряжение на вводе №2; В; I_1 – действующее значение силы тока двигателя резцовых дисков №1, А; I_2 – действующее значение силы тока двигателя резцовых дисков №2, А; I_3 – действующее значение силы тока двигателя конвейера, А; I_4 – действующее значение силы тока двигателя бермовых фрез (сумма токов двух двигателей), А; I_5 – действующее значение силы тока двигателя переносного вращения резцовых дисков, А; I_6 – действующее значение силы тока двигателя отбойного устройства, А

Установившийся режим работы приводов комбайна характеризуется постоянными или периодически изменяющимися (относительно некоторого среднего значения) нагрузками, что достигается при постоянной скорости подачи комбайна на забой. Горно-геологические условия и технология ведения добычных работ определяют факторы, оказывающие влияние на параметры установившегося режима работы приводов комбайна. Основными факторами являются: скорость подачи комбайна, площадь и форма сечения разрушаемого массива, угол наклона обрабатываемого пласта, сопротивляемость пород разрушению.

Графики активных мощностей приводов планетарных исполнительных органов, при отработке забоя полным сечением, представлены на рисунке 2.3.

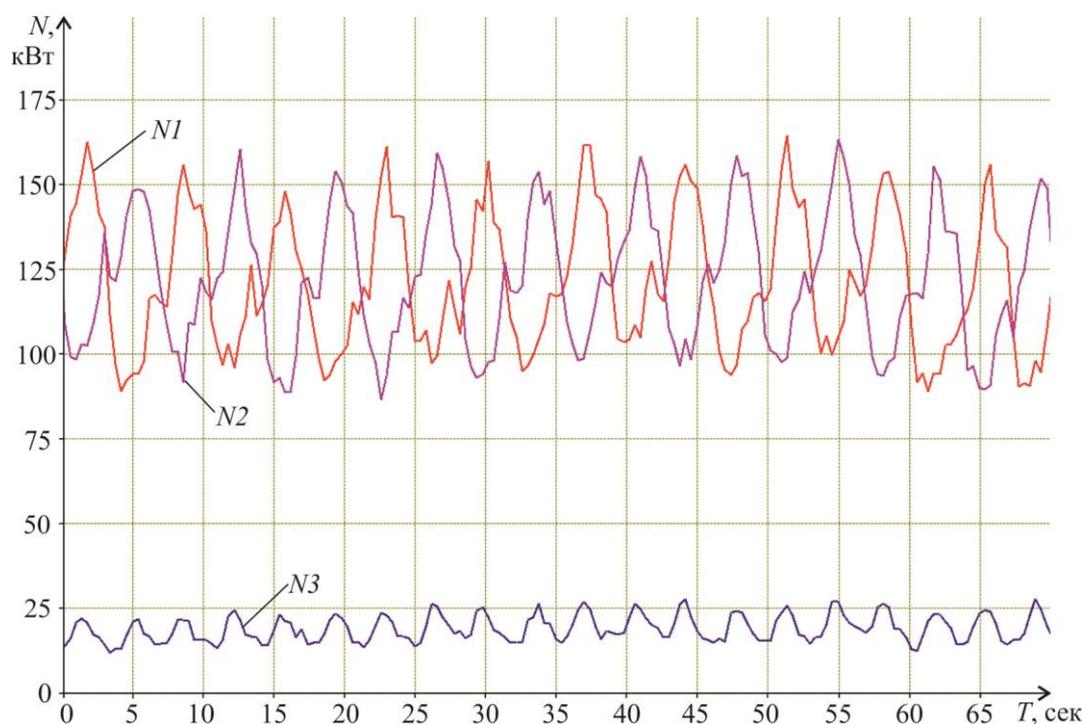


Рисунок 2.3 – Работа двигателей планетарных исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» в установившемся режиме: $N1$ – активная мощность привода резцовых дисков №1, кВт; $N2$ – активная мощность привода резцовых дисков №2, кВт; $N3$ – активная мощность привода переносного вращения, кВт

Планетарные исполнительные органа комбайна имеют зону взаимного

перекрытия площади обработки забоя. Это обуславливает переменный характер графиков активной мощности, частота колебаний которых равняется двойной частоте переносного вращения водила. Амплитуды нагрузок на приводы планетарных исполнительных органов зависят от горно-геологических условий и скорости подачи комбайна на забой.

При обработке забоя неполным сечением, динамические составляющие нагрузок увеличивается, а при больших скоростях подачи наблюдаются ударные нагрузки. Амплитуда колебаний нагрузки на приводы режущих дисков, в течение каждого оборота водила дважды изменяется от значений холостого хода до максимальных. Такой режим работы привода неблагоприятно сказывается на ресурсе трансмиссий. На рисунке 2.4. приведены графики изменения активных мощностей приводов планетарных исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» при подрубке продуктивного слоя пласта в установившемся режиме.

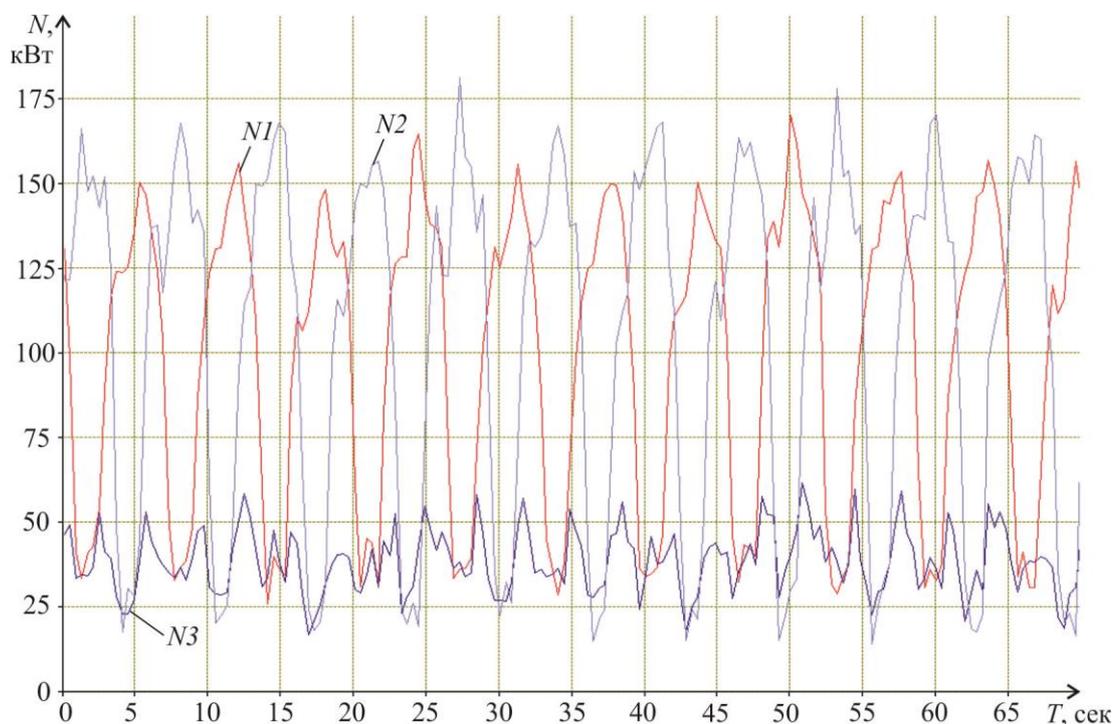


Рисунок 2.4 – Работа двигателей планетарных исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» в установившемся режиме при обработке забоя не полным сечением: $N1$ – активная мощность привода режущих дисков №1, кВт; $N2$ – активная мощность привода режущих дисков №2, кВт; $N3$ – активная мощность привода переносного вращения, кВт

Бермовый исполнительный орган комбайна Урал-20Р состоит из двух боковых рез и двух шнеков, приводимых от двух электродвигателей, отвечающих за правую и левую часть органа. Бермовый исполнительный орган выполняет функции разрушения массива у почвы выработки (формируя ее нижнюю часть) и погрузки отбитой комбайном руды на скребковый конвейер. Разрушение массива резами бермовых и шнековых исполнительных органов осуществляется на участках забоя, форма которых формируется разницей площадей полного сечения выработки и площади, обрабатываемой планетарными исполнительными органами, нижняя часть пространства которого заполнена отбитой рудой. Работа приводов в установившемся режиме (рисунок 2.5) характеризуется высокими амплитудными значениями графиков активной мощности и высокой вариабельностью.

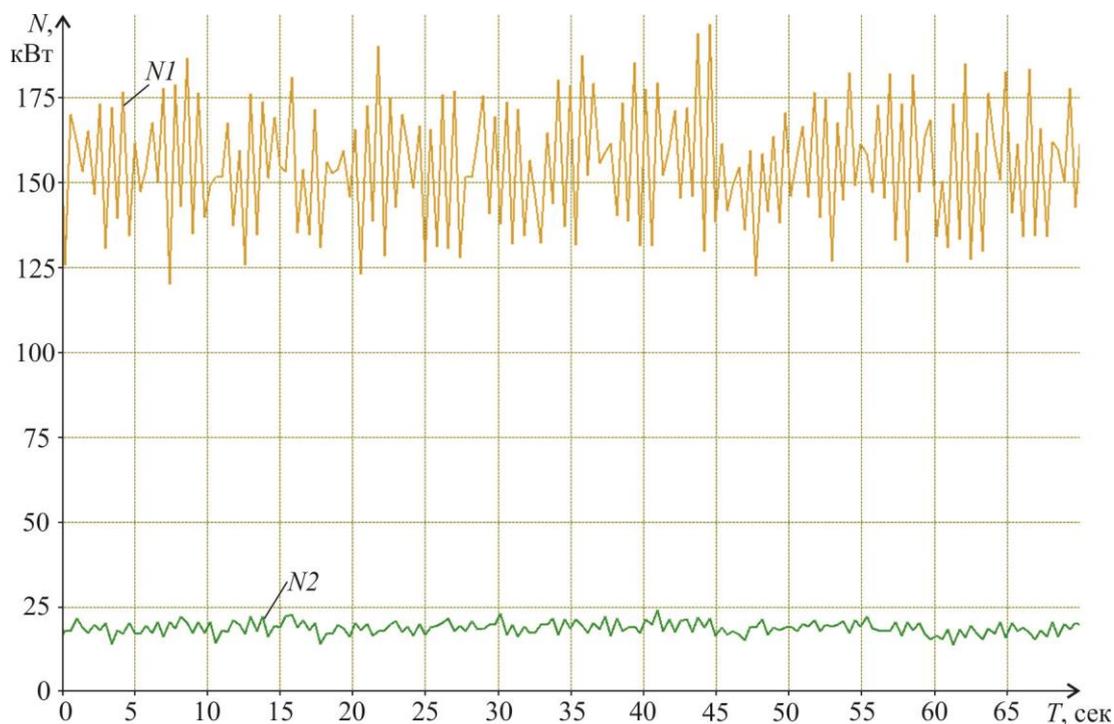


Рисунок 2.5 – Работа двигателей исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» в установившемся режиме: $N1$ – активная мощность привода бермового исполнительного органа (2 двигателя), кВт; $N2$ – активная мощность привода отбойного устройства, кВт

Отбойное устройство формирует верхнюю часть выработки и имеет постоянную площадь забоя. На работу отбойного устройства не оказывает влияния изменение параметров работы других исполнительных органов комбайна, что определяет низкую (по сравнению с другими исполнительными органами) вариабельность нагрузки.

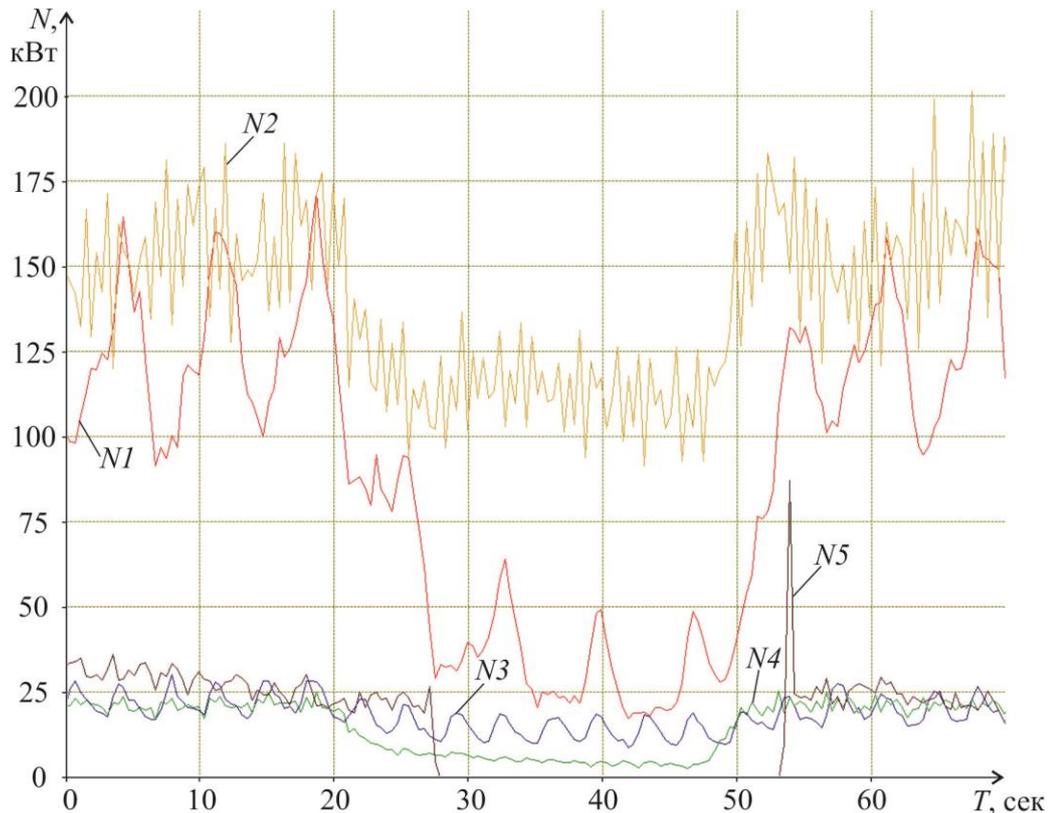


Рисунок 2.6 – Работа двигателей исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» в режиме холостого хода: $N1$ – активная мощность привода режущих дисков, кВт; $N2$ – активная мощность привода бермового исполнительного органа (2 двигателя), кВт; $N3$ – активная мощность привода переносного вращения, кВт; $N4$ – активная мощность привода отбойного устройства, кВт; $N5$ – активная мощность привода конвейера (2 двигателя), кВт

При остановке комбайна нагрузка на приводы породоразрушающих исполнительных органов снижается. На рисунке 2.6 приведены графики активных мощностей приводов комбайна при нулевой скорости подачи. Привод конвейера $N5$, в период остановки, отключен. Нагрузка на привод

отбойного устройства *N4* - снижается до минимальных значений. Нагрузка на приводы планетарных исполнительных органов снижается не полностью, на графиках *N1*, *N3* наблюдаются переменные составляющие, кратные частоте переносного движения. Это вызвано тем, что в призабойном пространстве осталась отбитая руда, которая препятствует свободному прохождению исполнительных органов в нижнем положении. Бермовый исполнительный орган *N2*, в период паузы, остается загруженным не менее 50 % от номинальной нагрузки. Вследствие отключенного конвейера шнеки не имеют возможности транспортировать остающуюся в забое руду, переизмельчая ее в призабойном пространстве.

Работа комбайна в режиме холостого хода характеризует длительность технологических перерывов, вызванных, как правило, низкой производительностью средств доставки руды из очистных камер. При существующей технологии ведения очистных работ производительность шахтных самоходных вагонов (ШСВ) изменяется в зависимости от расстояния доставки и в среднем в 2–2,5 раза ниже технической производительности комбайнов (таблица 2.1) [30].

Таблица 2.1 – Производительность доставки ШСВ

Грузоподъемность вагона, т	Производительность ШСВ, т/мин при длине доставки, м			
	35	100	150	200
15	4,15	3,18	2,75	2,38
18	4,98	3,82	3,3	2,86
22	5,62	4,38	3,8	3,3
30	7,12	5,64	4,93	4,32

В периоды ожидания средств доставки машинист останавливает подачу комбайна и выключает конвейер. На рисунке 2.7 приведены графики нагрузок на приводы комбайна при его работе в очистной камере. При производительной работе комбайна скребковый конвейер включен, средние значения активных мощностей приводов режущих дисков *N1* и бермовых фрез *N2* в эти периоды близки к номинальным значениям. В периоды

остановки подачи комбайна конвейер отключается, нагрузки на режцовых дисках снижаются до 15 % от номинала, а мощность приводов бермового исполнительного органа (более 50 % от номинала) расходуется на преизмельчение руды.

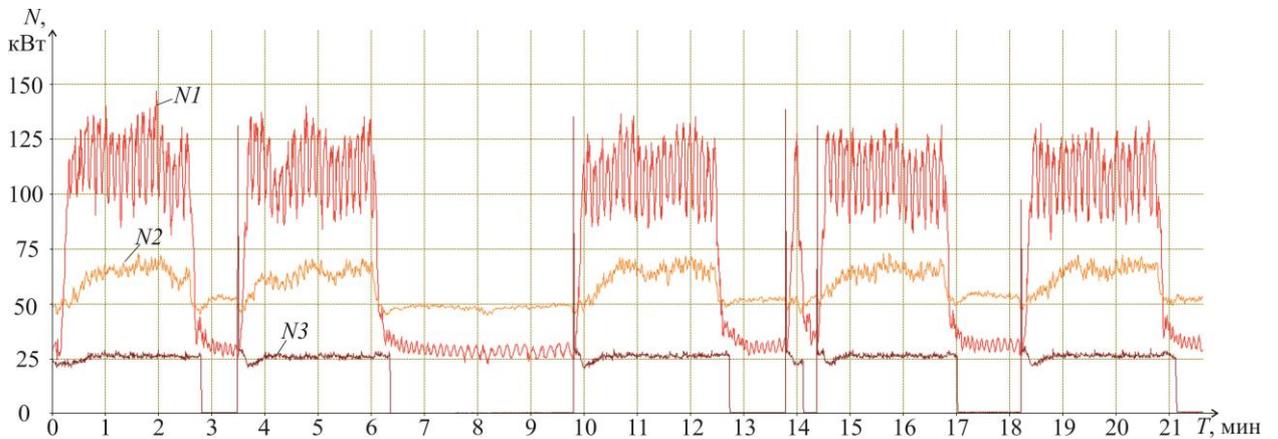


Рисунок 2.7 – Работа комбайна «Урал-20Р»: $N1$ – активная мощность привода режущих дисков, кВт; $N2$ – активная мощность привода бермового исполнительного органа, кВт; $N3$ – активная мощность привода конвейера, кВт

Для снижения нагрузки на привод бермового органа в период остановки комбайна целесообразно не прекращать работу конвейера до разгрузки призабойного пространства. Это потребует своевременно предусмотреть свободный объем в бункере перегружателе при выборе момента остановки подачи комбайна.

Путем анализа графиков активных мощностей приводов за продолжительный интервал времени, возможно определить длительность периодов работы приводов комбайна в различных режимах. На основании данных о режимах работы приводов исполнительных органов комбайна, насосной станции и конвейера могут быть определены длительности выполнения комбайном конкретных технологических операций и дана оценка режимам работы комбайна по критерию энергоэффективности.

2.1.2. Математическое описание процесса формирования нагрузок на приводах исполнительных органов очистных комбайнов при случайном характере внешнего воздействия

Мощность, потребляемая электродвигателями очистных комбайнов в установившемся режиме работы, изменяется относительно среднего значения с определенной амплитудой и частотой колебаний. Исполнительные органы комбайна разрушают неоднородный массив, на процесс формирования нагрузок влияют внешние и внутренние периодические возмущения, обусловленные неравномерностью скорости подачи при проскальзывании гусениц, колебаниями корпуса комбайна, особенностями кинематики приводов исполнительных органов добычной машины и т.д.

Нагрузка на приводных двигателях режущих исполнительных органов комбайнов пропорциональна сопротивляемости массива резанию $A_p(T)$ и скорости подачи комбайна на забой $V_n(T)$. Силы резания $P_z(T)$ определяются произведением функций $A_p(T)$ и средней толщины среза $h(T)$, линейно зависящей от скорости подачи $V_n(T)$. Таким образом, мощность привода режущего исполнительного органа $N_p(T)$ определяется функциональной зависимостью:

$$N_p(T) = \xi_{\text{тр}} \left[A_p(T) K_{\text{пр}} V_n(T) K_{\text{ри}} V_p(T) \right], \quad (2.1)$$

где $\xi_{\text{тр}}$ – коэффициент, учитывающий динамические свойства трансмиссии и электропривода; $K_{\text{пр}}$ – коэффициент пропорциональности, характеризующий отношение толщины среза к скорости подачи комбайна; $K_{\text{ри}}$ – коэффициент, учитывающий конструктивные параметры режущего инструмента и параметры схемы резания; $V_p(T)$ – функция изменения скорости резания во времени T .

Скорость резания V_p на комбайнах, оснащенных трёхфазными асинхронными электродвигателями и механическими трансмиссиями, в первом приближении можно принять постоянной. Функцию $V_p(T)$,

коэффициенты $\xi_{тр}$, $K_{пр}$ и $K_{ри}$ объединим общим оператором ξ_t как постоянные сомножители, тогда формула (2.1) примет вид:

$$N_p(T) = \xi_t [A_p(T)V_{п}(T)], \quad (2.2)$$

Мощность $N_{п}(T)$, потребляемая приводными двигателями механизма подачи, формируется случайными функциями напорного усилия $F(T)$ и скорости подачи $V_{п}(T)$ комбайна:

$$N_{п}(T) = \lambda_T [F(T)V_{п}(T)], \quad (2.3)$$

где λ_T – оператор, учитывающий динамические свойства системы подачи и другие постоянные параметры, характерные для данного типа комбайна.

Скорость подачи комбайна при работе в очистной камере регулируется машинистом по условию [97]:

$$\begin{cases} N_p \rightarrow \text{const}; \\ V_p = \text{const}; \\ V_{п} = \text{var}. \end{cases} \quad (2.4)$$

Исходя из зависимостей (2.2) и (2.4), математическое ожидание и корреляционная функция мощности, потребляемой породоразрушающим исполнительным органом комбайна, определяются выражениями:

$$N_p = \xi_T [A_p V_{п} - D_{AV}]; \quad (2.5)$$

$$K_p(\tau) = \xi_T^2 (K_A(\tau)K_V(\tau)[1 - \eta_{AV}^2]), \quad (2.6)$$

где D_{AV} – взаимная дисперсия сопротивляемости резанию калийного пласта и скорости подачи комбайна; $K_A(\tau)$ и $K_V(\tau)$ – корреляционные функции сопротивляемости пласта резанию и скорости подачи комбайна соответственно; η_{AV} – коэффициент взаимной корреляции сопротивляемости пласта резанию и скорости подачи комбайна на забой [85, 46].

Случайный характер нагрузки определяет способ расчета средней устойчивой мощности двигателя. Исходя из требуемой перегрузочной способности, предельной температуры нагрева корпуса двигателя и принимая гипотезу о нормальном распределении случайной нагрузки, устойчивую мощность рассчитываем по формуле:

$$N_{уст} = N_{\max\phi} - k_N \sqrt{K_N^2(\tau)} \Big|_{\tau=0}, \quad (2.7)$$

где $N_{уст}$ – устойчивая мощность приводного двигателя, кВт; $N_{\max\phi}$ – максимальная мощность, эквивалентная опрокидному моменту в условиях шахтной сети, кВт; k_N – коэффициент, характеризующий относительное отклонение мощности; $K_N(\tau)$ – корреляционная функция мощности, потребляемой приводным двигателем [85, 18].

Используя вероятностное описание нагрузки на приводы комбайнов, можно определить устойчивую мощность приводных электродвигателей. Однако для практического применения выражения (27) необходимо получить количественные характеристики и эмпирические коэффициенты, значения которых определяются совокупностью случайных факторов и варьируются в достаточно широких пределах. В настоящее время нагрузки приводов и режимные параметры работы проходческо-очистных комбайнов калийных рудников рассчитываются в соответствии с существующими отраслевыми методиками, где в качестве исходных данных принимают некоторое постоянное (среднее) значение действующей нагрузки с чередующимися циклами включений. Данное допущение может вызвать расхождение результатов расчетов с реальными параметрами работы двигателей: при номинальной производительности комбайна двигатели могут работать с перегрузкой или, наоборот, недогруженными [85, 45, 46, 59].

2.1.3. Влияние свойств шахтной сети на характеристики электродвигателей

Допустимая нагрузка на электродвигатель комбайна определяется величиной максимального момента M_{\max} , развиваемого двигателем. При выполнении проектировочных расчетов величину максимального момента M_{\max} принимают по данным каталогов завода-изготовителя, где указываются значения M_{\max} , полученные на лабораторном стенде с сетью, имеющей

жесткие характеристики, когда сопротивление питающих кабелей мало, а мощность трансформатора значительно превышает мощность двигателя.

В реальных условиях эксплуатации проходческо-очистных комбайнов сопротивление питающей сети значительно больше, а мощность подстанции не намного превышает суммарную мощность оборудования, работающего в очистной камере, что обуславливает существенное изменение величины напряжения (просадку напряжения), питающего электродвигатели, особенно во время их пуска и изменения режимов работы [70, 120].

В соответствии с технической документацией завода-изготовителя работа электродвигателей проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» допустима при колебании напряжения в питающей сети не более $\pm 5\%$ [40]. Длительная работа трёхфазных асинхронных электродвигателей при повышенном или пониженном напряжении недопустима. В том и в другом случае при номинальной нагрузке ток в обмотках двигателя превышает нормативные значения, что сопровождается перегревом и может привести к выходу двигателя из строя [2].

Между подведенным напряжением к обмотке статора асинхронного двигателя и магнитным потоком вращающегося поля существует зависимость [5]:

$$U = 4,44fw\Phi k_{01}, \quad (2.8)$$

где f – частота напряжения в питающей сети, Гц; w – число витков в обмотке; Φ – магнитный поток одного полюса двигателя, Вб; k_{01} – обмоточный коэффициент, $k_{01} = 0,91–0,95$.

Как следует из выражения (2.8), при увеличении питающего напряжения пропорционально возрастает магнитный поток статора, следовательно, увеличиваются ток намагничивания ротора и ток в обмотках статора.

При пониженном напряжении магнитный поток уменьшается. Пропорционально уменьшению магнитного потока увеличивается ток ротора I_p и, следовательно, ток статора. При пониженном напряжении существенно

уменьшаются пусковой и максимальный моменты электродвигателя, так как они пропорциональны квадрату напряжения [5].

Существенные просадки питающего напряжения рудничных подстанций наблюдаются во время запуска двигателей комбайнов и при одновременной работе большого числа потребителей. Нестабильность значений питающего напряжения обуславливает изменение токов. Таким образом, в условиях рудничных сетей и наличия динамических составляющих нагрузки оценку нагруженности электроприводов очистных комбайнов целесообразно производить с учетом питающего напряжения, по показателям потребляемой мощности. В настоящее время оценку величины нагрузок приводов комбайнов и расчет устойчивой мощности электродвигателей осуществляют в соответствии с отраслевой методикой [43].

2.2. Расчет эксплуатационных параметров проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р»

2.2.1. Определение силовых и энергетических параметров разрушения калийного массива

Сила резания на неповоротном резце определяется по формуле:

$$P_z = A_p h k_{t/h} k_b k_\alpha k_{\text{зат}} k_\phi k_\psi, \quad (2.9)$$

где P_z – сила резания на неповоротном резце, Н; A_p – сопротивляемость массива резанию, Н/м; h – толщина стружки, м; $k_{t/h}$ – коэффициент степени блокированности реза; k_b – коэффициент ширины режущей кромки рабочего инструмента; k_α – коэффициент угла резания; $k_{\text{зат}}$ – коэффициент затупления резца; k_ϕ – коэффициент формы передней грани резца; k_ψ – коэффициент ориентации резца.

Для роторных исполнительных органов комбайна толщина стружки рассчитывается по формуле:

$$h = \frac{V_{\text{п}}}{n_{\text{ио}} m}, \quad (2.10)$$

где $V_{\text{п}}$ – скорость подачи комбайна на забой, м/с; $n_{\text{ио}}$ – оборотная частота исполнительного органа, с^{-1} ; m – число резов в линии резания.

Для барабанных, шнековых и планетарно-дисковых исполнительных органов комбайна толщина стружки находится по формуле:

$$h = \frac{V_{\text{п}} \sin \varphi}{n_{\text{ио}} m}, \quad (2.11)$$

где $V_{\text{п}}$ – скорость подачи комбайна на забой, м/с; φ – угол поворота исполнительного органа; $n_{\text{ио}}$ – оборотная частота исполнительного органа (для планетарно-дискового органа – оборотная частота переносного вращения) с^{-1} ; m – число резов в линии резания (для планетарно-дискового органа – число резцовых дисков).

Для барабанных и шнековых исполнительных органов средняя толщина стружки находится по формуле:

$$h_{\text{cp}} = h_{\text{max}} \frac{360H}{\pi \left[\arccos \left(1 - \frac{2H}{D_{\text{ио}}} \right) \right] D_{\text{ио}}}, \quad (2.12)$$

где h_{max} – максимальная толщина стружки, м; H – высота массива, разрушаемого исполнительным органом, м; $D_{\text{ио}}$ – диаметр барабана или шнека по резцам, м.

Коэффициент степени блокированности реза определяется из выражения [43]:

$$k_{t/h} = \frac{\sqrt{68,1 - \left(\frac{t}{h} - 7,2 \right)^2} - 3,25}{5}, \quad \text{при } \frac{t}{h} \leq 7,2, \quad (2.13)$$

где t – шаг резания, м. При $t/h > 7,2$ взаимное влияние соседних резов друг на друга отсутствует, при этом коэффициент степени блокированности реза следует принять $k_{t/h} = 1$.

Шаг резания для роторных исполнительных органов определяется по формуле:

$$t = \frac{D_{\text{ио}}}{2 \left(\frac{z}{m} + 1 \right)}, \quad (2.14)$$

где $D_{\text{ио}}$ – внешний диаметр исполнительного органа, м; z – число резцов; m – число резов в линии резания.

Шаг резания для шнековых и барабанных исполнительных органов:

$$t = \frac{B}{\frac{z}{m} - 1}, \quad (2.15)$$

где B – ширина шнека или барабана, м; z – число резцов; m – число резов в линии резания.

Траектория движения резцов пространственного планетарно-дискового исполнительного органа в забое определяется относительным движением резцового диска и переносным движением водила. Шаг резания для резца, установленного на угле φ режущего диска находится из выражения:

$$t = \frac{2\pi \left(r_{\text{в}} - \frac{D_{\text{ио}}}{2} \cos \varphi \right)}{n_{\text{отн}} z_{\text{ио}}}, \quad (2.16)$$

где $r_{\text{в}}$ – радиус водила, м; $D_{\text{ио}}$ – диаметр диска по резцам, м; $n_{\text{отн}}$ – частота относительного вращения резцового диска, с^{-1} ; $z_{\text{ио}}$ – число резцов на исполнительном органе.

Коэффициент ширины режущей кромки k_b определяется по формуле:

$$k_b = 0,16 + 42b_{\text{к}}, \quad (2.17)$$

где $b_{\text{к}}$ – расчётная ширина режущей кромки, м. Для неповоротных резцов она устанавливается в зависимости от формы режущей кромки, толщины среза и высоты контакта резца с массивом по ОСТ 12.44.258-84 [59].

Коэффициент угла резания определяется из выражения [85]:

$$k_{\alpha} = 0,55 + 0,009\alpha_{\text{р}}, \quad (2.18)$$

где $\alpha_{\text{р}}$ – угол резания, град.

Коэффициент затупления резца:

$$k_{\text{зат}} = 1 + 0,01S_{\text{зат}}, \quad (2.19)$$

где $S_{\text{зат}}$ – проекция площадки притупления задней грани неповоротного резца на плоскость резания.

Коэффициент формы передней грани $k_{\text{ф}}$ выбирается исходя из формы режущей кромки резца, по данным таблицы 2.2.

Таблица 2.2 – Коэффициент формы передней грани k_{ϕ} [43]:

Форма режущей кромки	Коэффициент формы передней грани k_{ϕ}		
	Форма передней грани		
	плоская	полукруглая выпуклая	крышевидная
Полукруглая выпуклая	0,57 – 0,62	0,57	0,66 – 0,74
Прямоугольная долотчатая	0,93 – 1,0	–	–
Треугольная	0,79 – 0,84	0,68 – 0,71	0,77 – 0,85

Для планетарно-дисковых исполнительных органов коэффициент ориентации резца находится согласно выражения [93]:

$$k_{\psi} = \begin{cases} 1 - 0,0244\psi & \text{при } \psi \leq 16^{\circ} \\ 0,61 + 0,029(\psi - 16^{\circ}) & \text{при } \psi > 16^{\circ} \end{cases}, \quad (2.20)$$

где ψ – угол разворота резца между направлением вектора скорости и проекцией оси резца на плоскость резания, град.

$$\psi = \phi_{\text{уст}} - \psi_{\text{к}}, \quad (2.21)$$

где $\phi_{\text{уст}}$ – угол разворота резца на режущем диске, град; $\psi_{\text{к}}$ – угол, образуемый между вектором абсолютной скорости режущей части резца и плоскостью диска, град.

$$\psi_{\text{к}} = \arctan\left(\frac{V_{\text{пр}}}{V_{\text{отн}}}\right), \quad (2.22)$$

где $V_{\text{пр}}$ – линейная скорость переносного движения режущей части резца, м/с;
 $V_{\text{отн}}$ – линейная скорость относительного движения режущей части резца, м/с.

Для комбайна «Урал-20Р»:

$$V_{\text{отн}} = \frac{D_{\text{д}} n_{\text{отн}}}{19,10}; \quad (2.23)$$

$$V_{\text{пр}} = \left(r_{\text{в}} - \frac{D_{\text{д}} \cos \varphi}{2}\right) \frac{n_{\text{отн}}}{9,549}. \quad (2.24)$$

Мощность, необходимая на разрушение забоя резцами исполнительного органа комбайна, определяется как:

$$N = \frac{P_z Z_k V_p}{1000 \eta_{\text{ио}}}, \quad (2.25)$$

где Z_k – число резцов в контакте с забоем; V_p – скорость резания, м/с; $\eta_{\text{ио}}$ – КПД исполнительного органа [43].

Удельный расход энергии для каждого исполнительного органа добычной машины определяется с учётом мощности N , потребляемой приводом соответствующего исполнительного органа, площади забоя $F_{\text{ио}}$, обрабатываемой этим исполнительным органом, плотности руды ρ и скорости подачи комбайна $V_{\text{п}}$ из выражения [84, 112]:

$$H_w = \frac{N}{F_{\text{ио}} \rho V_{\text{п}}}. \quad (2.26)$$

Представленные зависимости легли в основу расчета, проведенного в программной среде *MathCAD* (приложение 1) [62]. Анализ результатов расчетов позволяет утверждать, что наиболее нагруженным приводом комбайнов «Урал-20Р» является привод относительного движения резцовых дисков. При заданном значении $A_p = 450$ Н/мм и скорости подачи $V_{\text{п}}$ мощность, развиваемая приводными двигателями комбайна «Урал-20Р», изменяется в соответствии с графиками, представленными на рисунке 2.8. Согласно проведенным расчетам при работе комбайна с максимальной производительностью 8 т/мин и заданной сопротивляемости резанию $A_p = 450$ Н/мм двигатели относительного движения резцовых дисков и отбойного устройства загружены практически полностью. В то же время двигатели бермовых исполнительных органов загружены на 65 % и имеют значительный резерв по установленной мощности. Нагрузки приводов берм, шнеков и отбойного устройства изменяются линейно, так как разрушение забоя во всем диапазоне рассматриваемых скоростей подач осуществляется блокированными резами при малых значениях h .

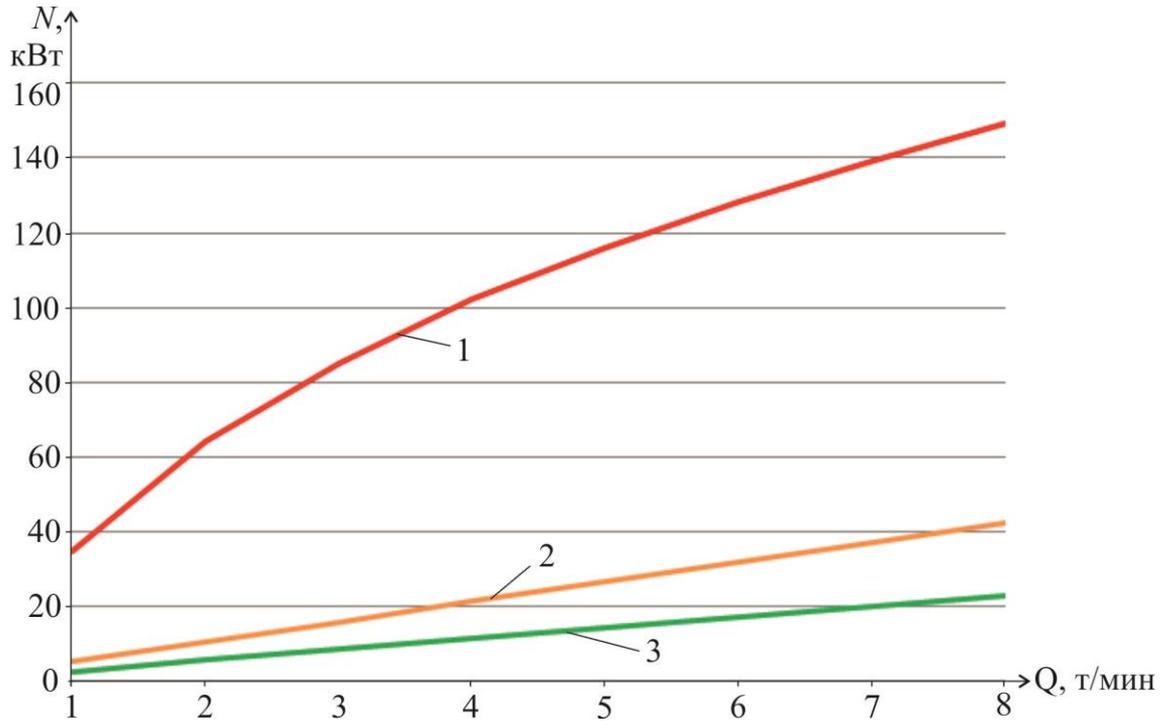


Рисунок 2.8 – Изменение мощностей, развиваемых приводами исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р», в зависимости от производительности комбайна:

1 – мощность привода относительного вращения планетарного исполнительного органа, кВт; 2 – мощность привода бермовых исполнительных органов, кВт; 3 – мощность привода отбойного устройства, кВт

График изменения мощности, потребляемой двигателями относительного движения, описывается полиномиальной функцией, так как при увеличении скорости подачи комбайна на забой V_{Π} изменяется коэффициент степени блокированности резов $k_{t/h}$, что обуславливает уменьшение интенсивности нарастания нагрузок на резцы поворотных дисков и определяет более выгодные энергетические показатели разрушения калийного массива.

2.2.2. Методика определения тяговой способности, напорного усилия и мощности привода гусеничного органа перемещения

Значения напорного усилия и тяговой способности гусеничного хода комбайна «Урал-20Р» определяются величинами сил реакции забоя на

исполнительные органы в направлении подачи выемочной машины и в перпендикулярном направлении соответственно.

Полная реакция забоя на исполнительные органы комбайна в направлении подачи определяется выражением [43]:

$$R_3 = \frac{Z_p}{\alpha_k} [P_Y (1 - \cos \alpha_k) + P_Z \sin \alpha_k], \quad (2.27)$$

где R_3 – полная реакция забоя на исполнительный орган в направлении подачи, Н; Z_p – количество резцов на исполнительных органах комбайна; α_k – угол контакта резца с забоем, рад (принимается $\alpha_k = \pi$); P_Y – сила реакции забоя на одиночный резец, Н.

Сила реакции забоя на одиночный резец рассчитывается по формуле

$$P_Y = 0,8P_z. \quad (2.28)$$

Полная реакция забоя T_3 на исполнительные органы комбайна в направлении перпендикулярном направлению подачи добычной машины, определяется выражением:

$$T_3 = \frac{Z_p}{\alpha_k} [P_Z (1 - \cos \alpha_k) + P_Y \sin \alpha_k]. \quad (2.29)$$

Расчетная схема сил и моментов, действующих на проходческо-очистной комбайн «Урал-20Р» при отработке забоя сплошным сечением в выработке с углом наклона β , представлена на рисунке 2.9.

Тяговая способность гусеничного органа перемещения зависит от сил прижатия гусениц, направленных по нормали к почве выработки, и от коэффициента сцепления. Значение коэффициента сцепления определяется по формуле:

$$f_{\text{сц}} = 0,4 + (10T_{\text{ш}})^{1,5}, \quad (2.30)$$

где f – коэффициент сцепления; $T_{\text{ш}}$ – толщина подушки штыба, м (при $T_{\text{ш}} \geq 0,07$ м, $f = 1$).

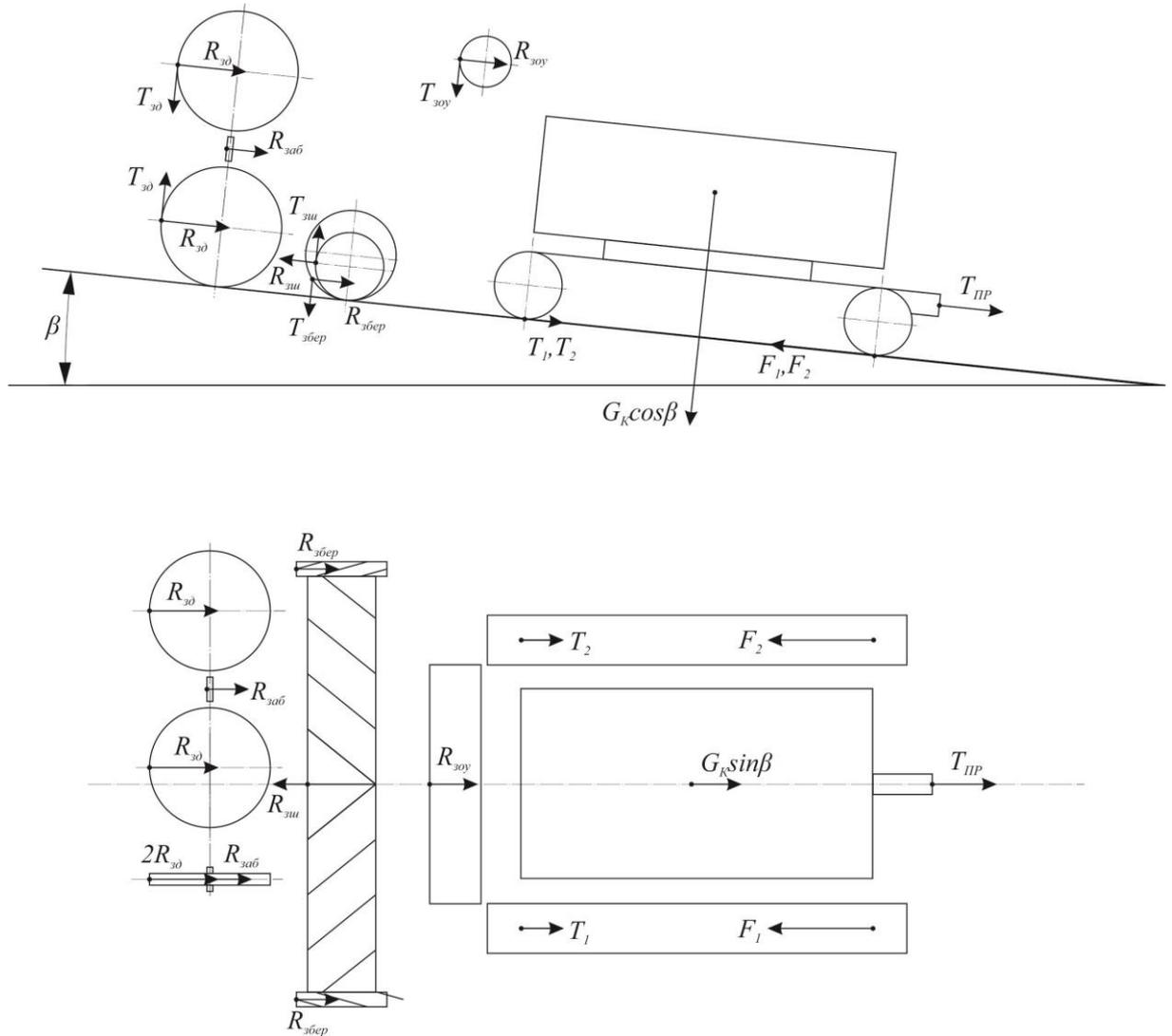


Рисунок 2.9 – Схема расчетных сил, действующих на комбайн:

$R_{зд}$, $T_{зд}$ – реакция заобя на реэовый диск, Н; $R_{заб}$ – реакция заобя на забурник, Н; $R_{зoy}$, $T_{зoy}$ – реакция заобя на отбойное устройство, Н; $R_{збер}$, $T_{збер}$ – реакция заобя на бермовые фрезы, Н; $R_{зш}$, $T_{зш}$ – реакция заобя на шнеки, Н; G_K – вес комбайна, Н; $T_{ПР}$ – тяговое усилие от прицепного устройства, Н; T_1 , T_2 – сопротивление перемещению гусениц, Н; F_1 , F_2 – напорные усилия гусениц, Н

Условие движения комбайна без проскальзывания гусениц:

$$\begin{cases} R_1 f_{сц} > F_1; \\ R_2 f_{сц} > F_2, \end{cases} \quad (2.31)$$

где F_1 , F_2 – напорные усилия гусениц, Н; R_1 , R_2 – силы прижатия гусениц к почве выработки, Н.

В соответствии с приведенной на рисунке 2.10 схемой:

$$\begin{cases} R_1 = R_2 = \frac{T_{\text{зоу}}}{2} - T_{\text{зш}} + T_{\text{збер}} + \frac{G_{\text{к}}}{2} \cos \beta; \\ F_1 = F_2 = 2R_{\text{зд}} + \frac{R_{\text{зоу}}}{2} + R_{\text{збер}} - R_{\text{зш}} + \frac{G_{\text{к}}}{2} \sin \beta + \frac{T_{\text{ппр}}}{2} + R_{\text{заб}}; \\ T_{\text{ппр}} = (G_{\text{бп}} + Q_{\text{бп}})(\omega_{\text{п}} \cos \beta + \sin \beta), \end{cases} \quad (2.32)$$

где; $Q_{\text{бп}}$ – грузоподъемность бункера-перегрузателя, Н; $G_{\text{бп}}$ – вес бункера-перегрузателя, Н; $\omega_{\text{п}}$ – коэффициент сопротивления качению колёс бункера-перегрузателя, $\omega_{\text{п}} = 0,05$.

Мощность, необходимая для подачи комбайна на забой:

$$N_{\text{пер}} = \frac{(F_1 + F_2)V_{\text{к}}}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta_{\text{пм}}}, \quad (2.33)$$

где $N_{\text{пер}}$ – мощность, необходимая для перемещения комбайна, кВт; $\eta_{\text{пм}}$ – КПД гусеничных органов перемещения с гидравлическим приводом, $\eta_{\text{пм}} = 0,3-0,5$ [84].

В случае недостаточной тяговой способности, гусеницы комбайна начинают проскальзывать, что обуславливает возникновение вибраций и динамических нагрузок на узлы комбайна, а также уменьшение толщины стружки и снижение сортности добываемой калийной руды [54,56].

2.3. Определение рациональных параметров работы проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р»

Выбор рациональных параметров работы проходческо-очистных комбайнов является многокритериальной задачей и требует детального исследования влияния конструктивных, кинематических и режимных параметров на эффективность использования выемочных машин. Разработка конструктивных решений по модернизации существующих добычных машин не является целью представленной диссертации, поэтому в дальнейшем сосредоточим внимание на изучении особенностей кинематики и режимов работы комбайна «Урал-20Р».

При выборе рациональных параметров разрушения горной породы пространственными планетарно-дисковыми исполнительными органами выемочных машин наиболее важным критерием является минимальный путь резания $L_{уд}$, отнесенный к единице объема разрушаемого массива, что обуславливает достижение наименьших значений удельных энергозатрат процесса разрушения калийного массива H_w , количества пылевидных (необогатимых) классов в продуктах отбойки M , износа режущего инструмента. Минимальный путь резания обеспечивается при максимальном значении толщины стружки h и, следовательно, скорости подачи $V_{п}$.

Максимально возможная скорость подачи проходческо-очистного комбайна $V_{п}$ при работе полным забоем ограничивается следующими условиями:

- вылетом резцового инструмента и, соответственно, максимальной толщиной стружки;
- величиной создаваемого напорного усилия гусеничного ходового оборудования при движении гусениц без проскальзывания;
- установленной мощностью электропривода рабочего оборудования [91, 97].

При работе комбайна в забое, скорость его подачи $V_{п}$ регулируется комбайнером в ручном режиме. Критерием выбора скорости выступает информация о степени загруженности электроприводов исполнительных органов, определяемой по индикаторам потребляемых токов.

На Верхнекамском месторождении калийно-магниевых руд изменчивость сопротивляемости резанию A_p в пределах одного пласта составляет 20–25 % [47, 66]. Вариация свойств разрушаемого массива является одним из источников динамических нагрузок в кинематической цепи «исполнительный орган – механическая трансмиссия – приводной электродвигатель» добычной машины. В некоторых случаях скорость изменения возмущений превосходит возможности регулирования при ручном управлении скоростью подачи комбайна, что обуславливает возникновение сверхнормативных нагрузок, определяющих интенсивный расход ресурса узлов и деталей приводов выемочной машины, а также возникновение аварийных отказов.

Исследованиями специалистов ИГД им. Скочинского установлено, что работа исполнительных органов выемочных комбайнов эффективна при определённом отношении шага резания к толщине стружки t/h , а толщина и шаг резания могут рассматриваться в качестве основных режимных параметров [18].

Сотрудниками Пермского национального исследовательского политехнического университета Н.А. Харламовой и Л.И. Старковым выполнены эксперименты по определению силовых и энергетических показателей процесса разрушения калийного массива последовательными и шахматными резами [109]. Полученные результаты позволили количественно оценить удельные энергозатраты процесса разрушения блоков калийной руды неповоротными резцами Д.6-22 (РС-14), а также выход мелких необогатимых классов руды в продуктах отбойки при заданных толщине и шаге резания (рисунок 2.10) [108].

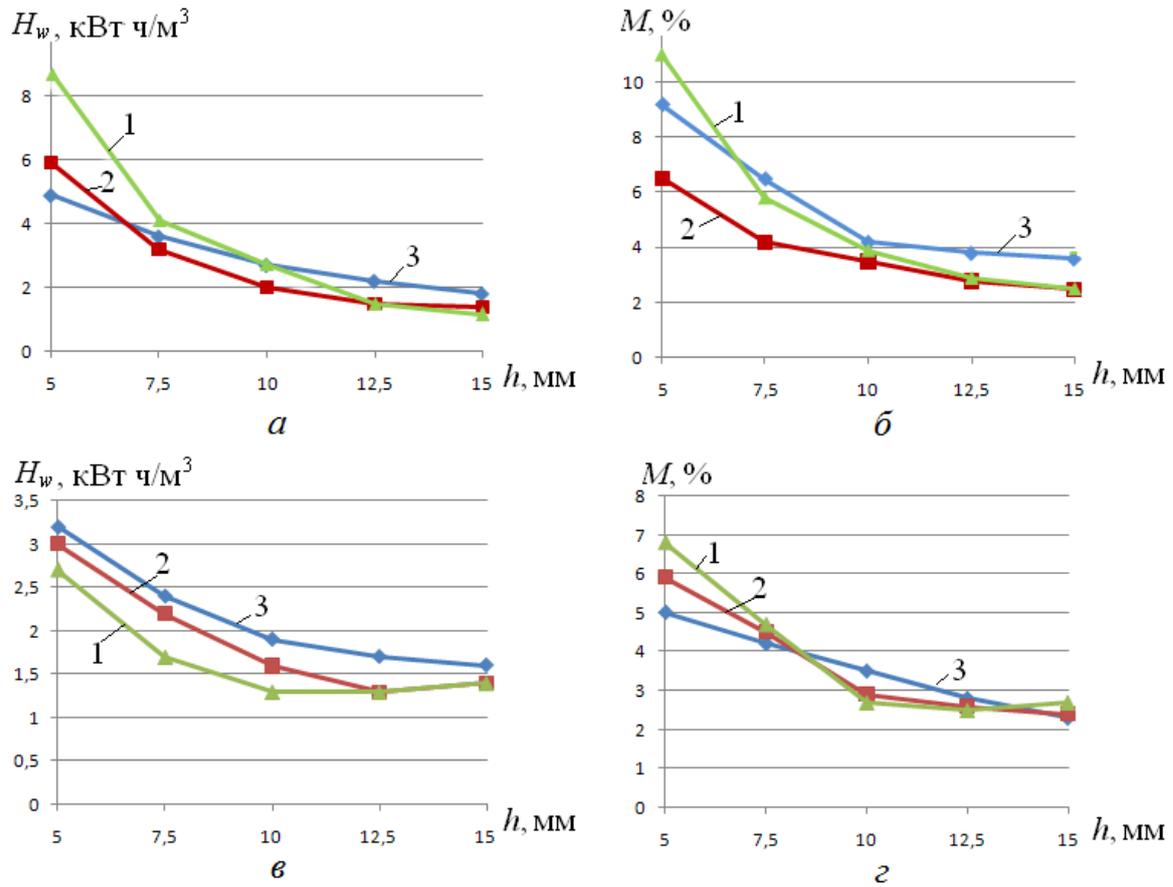


Рисунок. 2.10 – Зависимость изменения показателей процесса разрушения калийного массива последовательными (a , $б$) и шахматными ($в$, $г$) резами от толщины стружки: a – изменение удельных энергозатрат процесса разрушения блоков калийной руды последовательными резами; $б$ – изменение количества необогатимых классов при разрушении блоков калийной руды последовательными резами; $в$ – изменение удельных энергозатрат процесса разрушения блоков калийной руды шахматными резами; $г$ – изменение количества необогатимых классов при разрушении блоков калийной руды шахматными резами; 1 – шаг резания $t = 50$ мм; 2 – шаг резания $t = 40$ мм; 3 – шаг резания $t = 30$ мм (резец Д-6.22)

Зависимости $H_w(h)$ и $M(h)$ были представлены в виде $H_w(t/h)$ и $M(t/h)$, результаты приведены на рисунке 2.11.

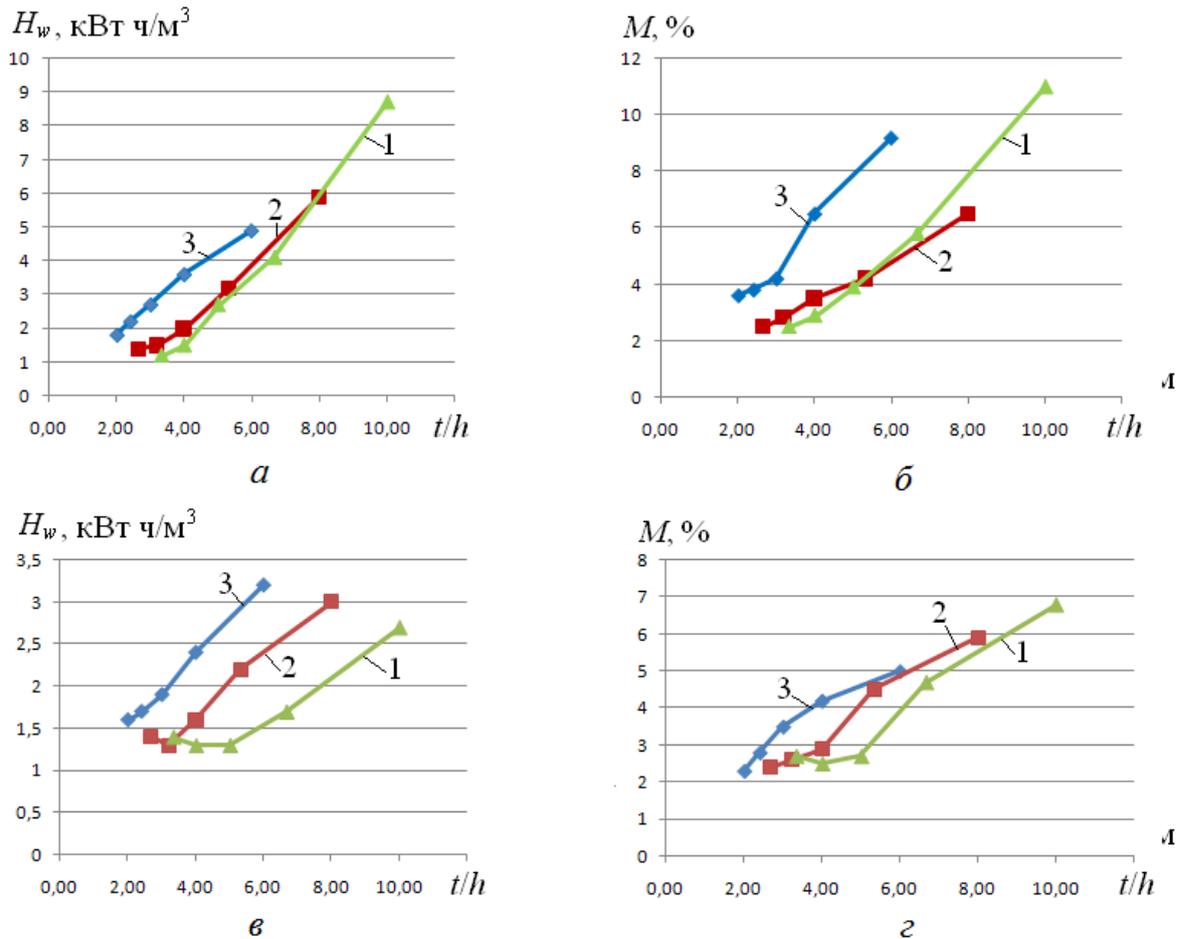


Рисунок 2.11 – Зависимость изменения показателей процесса разрушения калийного массива последовательными (*a, б*) и шахматными (*в, г*) резами от отношения t/h : *a* – изменение удельных энергозатрат процесса разрушения блоков калийной руды последовательными резами; *б* – изменение количества необогатимых классов при разрушении блоков калийной руды последовательными резами; *в* – изменение удельных энергозатрат процесса разрушения блоков калийной руды шахматными резами; *г* – изменение количества необогатимых классов при разрушении блоков калийной руды шахматными резами; 1 – шаг резания $t = 50$ мм; 2 – шаг резания $t = 40$ мм; 3 – шаг резания $t = 30$ мм (резец Д-6.22)

Анализ полученных графиков показывает, что наименьшие удельные энергозатраты и минимальное количество необогатимых классов в отбитой руде обеспечиваются при разрушении калийного массива резами с толщиной стружки $h = 12\text{--}15$ мм при отношении $t/h = 2\text{--}4$. При значениях отношения t/h менее 2 ухудшается гранулометрический состав отбитой руды, что приводит к потерям при транспортировке и обогащении. Полученные значения

согласуются с результатами определения рациональных значений t/h в работах А.А. Гаврикова и В.В. Семенова.

Планетарно-дисковые исполнительные органы комбайна «Урал-20Р» имеют сложную кинематическую схему движения режущего инструмента и, как следствие, переменные параметры резания. В связи с этим, оценку параметров резания возможно осуществить только по средним значениям. В п. 2.2.1 и приложении 1 настоящей работы приведены расчетные формулы для определения эксплуатационных параметров работы комбайна и выполнен расчет параметров разрушения массива планетарными исполнительными органами, при различных скоростях подачи. Результаты представлены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры разрушения забоя планетарно-дисковыми исполнительными органами комбайна «Урал-20Р»

Q_T , Т/МИН	$V_{п}$, М/МИН	$t_{ср}$, М	$h_{ср}$, М	$t_{ср}/h_{ср}$
2	0,0064	0,035	0,006	5,83
3	0,095	0,035	0,009	3,89
4	0,127	0,035	0,012	2,91
5	0,159	0,035	0,015	2,33
6	0,191	0,035	0,018	1,94
7	0,222	0,035	0,021	1,67
8	0,254	0,035	0,024	1,46

При номинальной производительности комбайна отношение среднего шага резания к средней толщине стружки $t_{ср}/h_{ср}$ не находится в диапазоне рациональных значений.

Минимальные удельные энергозатраты H_w процесса разрушения калийного массива резцами комбайна «Урал-20Р» могут быть достигнуты за счет изменения параметров отделяемой от массива стружки, которые, согласно зависимостям (1.2) и (1.3), определяются скоростью подачи комбайна на забой $V_{п}$, частотой относительного $n_{отн}$ и переносного $n_{пер}$

вращения режущих дисков, а также числа резцов на каждом поворотном диске z_d .

2.4. Оценка эффективности использования проходческо-очистных комбайнов «Урал»

Сравнительная оценка эффективности использования выемочных машин калийных рудников необходима для определения области их рационального применения, разработки мер по повышению надежности и модернизации существующих образцов горных комбайнов, контроля устойчивости технологических процессов в очистных камерах, оценки эффективности работы ремонтно-восстановительных служб горнодобывающих предприятий.

Решение задачи оценки эффективности использования проходческо-очистных комбайнов калийных рудников возможно посредством разработки и внедрения автоматизированных бортовых систем, осуществляющих регулирование параметров работы выемочных машин. В основу таких систем должны быть положены научно-обоснованные методики анализа регистрируемых данных, направленные на обеспечение безаварийной работы и повышение производительности.

В трудах сотрудников ведущих научно-образовательных учреждений и отраслевых институтов России неоднократно указывалось, что наиболее информативным и просто реализуемым методом контроля режимных параметров работы и повышения безопасности использования добычных машин является непрерывный контроль нагруженности электроприводов рабочего оборудования комбайнов, осуществляемый посредством замеров токов, напряжений, активных и полных мощностей, потребляемых электродвигателями [36, 86, 8, 18, 68, 39]. С целью определения производительности и удельных энергозатрат процесса разрушения калийного массива необходимо также осуществлять контроль перемещения выемочных машин и соотносить данные показатели с абсолютным временем.

Эффективность использования технических объектов в соответствии с государственным стандартом предлагается оценивать комплексным показателем – коэффициентом сохранения эффективности, который определяется как «отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают» [14].

В работах [85, 8, 37, 114] указывается, что достоверная оценка эффективности использования горных машин возможна посредством соотнесения величин базовых (номинальных) и фактических энергетических показателей, характеризующих их работу. Для проходческо-очистных комбайнов калийных рудников данным показателем являются удельные энергозатраты добычи калийной руды H_w .

Базовое значение удельных энергозатрат на разрушение массива резцами исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов может быть определено по формуле:

$$H_{wб} = \frac{\Sigma N_{р.и.о.}}{60Q_T}, \quad (2.34)$$

где $H_{wб}$ – базовое значение удельных энергозатрат процесса разрушения калийного массива резцами комбайна, кВт·ч/т; $\Sigma N_{р.и.о.}$ – расчетная мощность электродвигателей приводов режущих исполнительных органов, кВт; Q_T – техническая производительность комбайна, т/мин.

По результатам произведенных расчетов (приложение 1), для комбайна «Урал-20Р» при производительности $Q_T = 8$ т/мин и сопротивляемости резанию $A_p = 450$ Н/мм базовое значение удельных энергозатрат процесса разрушения калийного массива $H_{wб} = 1,2$ кВт·ч/т.

Фактические удельные энергозатраты, находится на основании значений активных мощностей приводов, зарегистрированных при работе комбайна за заданный период времени T_{ϕ} :

$$H_{w\phi} = \frac{T_{\phi} \Sigma N_{\phi.и.о.}}{m_{\phi}}, \quad (2.35)$$

где $H_{w\phi}$ – фактическая величина удельных энергозатрат процессов отбойки и погрузки калийной руды при работе выемочного комбайна в заданный период времени, кВт·ч/т; $N_{\phi.и.о.}$ – среднее за период T_{ϕ} значение активной мощности приводов комбайна, кВт; m_{ϕ} – масса отбитой руды, т.

Комплексный показатель сохранения эффективности при работе выемочной машины в очистной камере – коэффициент энергоэффективности использования проходческо-очистного комбайна $k_{э.эф.}$ рассчитывается по формуле:

$$k_{э.эф.} = \frac{H_{wб}}{H_{w\phi}}. \quad (2.36)$$

Поскольку при производительной работе комбайна базовое значение удельных энергозатрат $H_{wб}$ меньше фактического $H_{w\phi}$, значение $k_{э.эф.} \in (0...1)$.

На основании информации, полученной путем регистрации активных мощностей двигателей комбайна «Урал-20Р», при его работе в условиях эксплуатации одного из рудников Верхнекамского месторождения калийных солей, рассчитаны коэффициенты энергоэффективности (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Оценка энергоэффективности работы комбайна «Урал-20Р» в реальных условиях эксплуатации

№	Описание выполняемой операции	Длительность периода, ч	Среднее за период значение активной мощности, кВт	Потребленная энергия, кВт ч	Масса руды, т	Удельная энергоёмкость, кВт ч/т	Коэффициент эн.эффективности
1	Подрубка, площадь сечения забоя $S=7,81 \text{ м}^2$	6,86	253,7	1741,0	550	3,17	0,38
2	Подрубка, площадь сечения забоя $S=7,81 \text{ м}^2$	2,91	309,1	900,0	350	2,57	0,47
3	Работа полным сечением, $S=15,62 \text{ м}^2$	4,22	345,2	1456,0	800	1,82	0,66

Наибольший коэффициент энергоэффективности определен при работе комбайна полным сечением, в следствии участия в разрушении забоя всех исполнительных органов и полной загрузки приводов. Энергоэффективность также зависит от технической производительности комбайна, которая учитывает потери времени на выполнение вспомогательных операций.

По фактическим данным, полученным путем регистрации параметров работы приводов исполнительных органов комбайна «Урал-20Р», эксплуатируемого на руднике Верхнекамского месторождения калийных солей, определены слагаемые общего времени эксплуатации добычной машины. Длительность рассмотренного интервала – 26 суток. Анализ данных непрерывной регистрации нагрузок приводов комбайна позволил определить общее время работы комбайна, время его производительной работы, интервалы выполнения отдельных технологических операций.

Общее время эксплуатации комбайна на руднике складывается из следующих составляющих:

$$T_{\text{э.к.}} = \Sigma T_{\text{п.р.}} + \Sigma T_{\text{в.о.}} + \Sigma T_{\text{п.т.}} + \Sigma T_{\text{р.п.}} + \Sigma T_{\text{р.а.}}, \quad (2.37)$$

где $T_{\text{э.к.}}$ – время эксплуатации комбайна на руднике, ч; $\Sigma T_{\text{п.р.}}$ – суммарное время производительной работы комбайна, ч; $\Sigma T_{\text{в.о.}}$ – суммарное время выполнения вспомогательных операций при работе комбайна, ч; $\Sigma T_{\text{п.т.}}$ – суммарное время технологических перерывов, ч; $\Sigma T_{\text{р.п.}}$ – суммарное время плановых ремонтов, час; $\Sigma T_{\text{р.а.}}$ – суммарное время ремонтных работ, вызванных аварийными отказами оборудования, ч.

Уровень организации выемочных работ может быть оценен комплексным показателем сохранения эффективности – коэффициентом производительной работы $k_{\text{п.р.}}$, который рассчитывается как отношение времени производительной работы комбайна к времени пребывания комбайна в работоспособном состоянии:

$$k_{\text{п.р.}} = \frac{\Sigma T_{\text{п.р.}}}{T_{\text{э.к.}} - \Sigma T_{\text{р.п.}} - \Sigma T_{\text{р.а.}}}, \quad (2.38)$$

Значение коэффициента $k_{\text{п.р.}} \in [0...1)$.

Периоды производительной работы комбайна определены по времени работы привода скребкового конвейера, обеспечивающего транспортировку отбитой руды из забоя. Путем соотнесения полученных значений с календарным временем (за вычетом периодов технического обслуживания и ремонта), определены коэффициенты производительной работы. Значения коэффициентов, найденных за каждые сутки, приведены в виде диаграммы на рисунке 2.12.

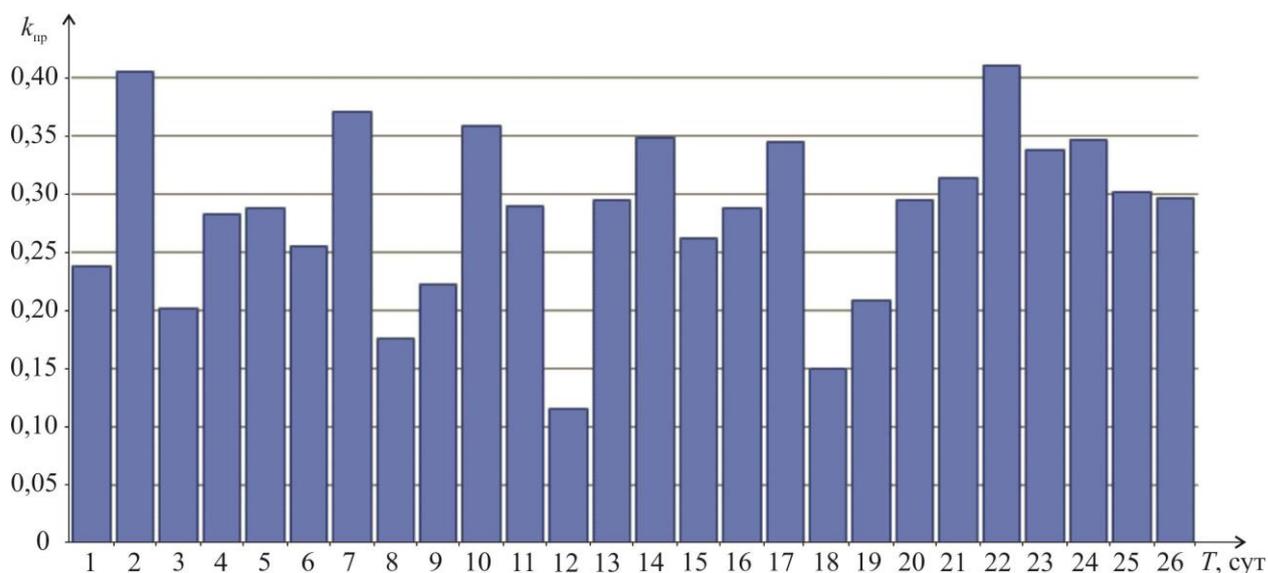


Рисунок 2.12 – Значения коэффициента производительной работы

Значение коэффициента производительной работы за весь рассматриваемый период составило 0,29.

На основании зарегистрированных данных о нагрузках на исполнительных органах комбайна возможно оценить длительности выполнения отдельных технологических операций. В течение рассматриваемого периода комбайн «Урал-20Р» осуществлял добычу калийной руды по технологии двухслойной отработки камер, включающей последовательное выполнение следующих технологических операции:

- 1) «зарубка» – подготовительная операция, при которой комбайн формирует заезд из штрека в камеру;
- 2) «сплошной забой» – производительная работа комбайна при разрушении массива полным сечением выработки;
- 3) «отгонка» – перемещение комбайна к началу камеры;
- 4) «подрубка пласта» – производительная работа комбайна при разрушении массива неполным сечением забоя.

Для каждой технологической операции были выделены отличительные признаки:

Технологическая операция «зарубка» выполняется при формировании комбайном въезда в очистную камеры из выемочного штрека. Нагрузка на

исполнительные органы комбайна несимметрична относительно вертикальной оси комбайна, что соответственно отражается на характере нагрузок приводов.

Работа комбайна при отработке забоя полным сечением («полным забоем») характеризуется равномерной загрузкой всех приводов комбайна.

Отгонка комбайна производится при отключенных приводах отбойного устройства и планетарно-дисковых исполнительных органов. Привод насоса гидросистемы и привод бермового исполнительного органа включены.

При «подрубке пласта» привод отбойного устройства отключен. Нагрузка на приводах планетарно-дисковых исполнительных органов имеет большую переменную составляющую.

По графикам нагрузок приводов, согласно определенных признаков, были найдены длительности технологических операций. Длительности операций просуммированы и для каждой операции определены коэффициенты использования и коэффициенты производительной работы (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Коэффициент использования комбайна по времени и коэффициент производительной работы для различных технологических операций

№	Наименование технологической операции	Общая длительность выполнения операции, ч	Суммарное время производительной работы комбайна, ч	Коэффициент производительной работы
1	Зарубка	48,08	10,14	0,21
2	Выдача сплошной забой	403,08	118,10	0,29
3	Отгонка	48,67	0,00	0,00
4	Подрубка	132,17	52,45	0,40

Длительности отдельных операций соотнесены с общей длительностью производительной работы комбайна (рисунок 2.13).

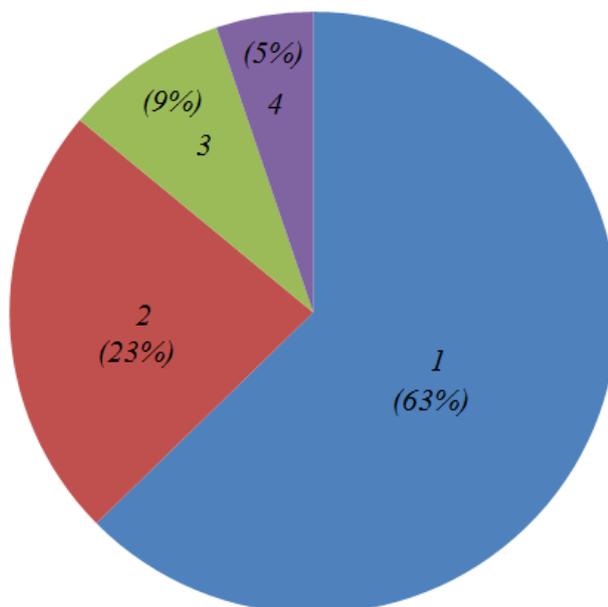


Рисунок 2.13 – Распределение длительностей выполнения технологических операций при работе комбайна «Урал-20Р»: 1 – работа комбайна полным забоем; 2 – работа комбайна при подрубке пласта; 3 – зарубка; 4 – отгонка комбайна из очистной камеры

На основании полученных данных возможно оценить технический и технологический уровень организации процесса использования добычного комбайна [3, 70].

Из вышеизложенного следует, что предложенные показатели оценки эффективности использования выемочных комбайнов позволяют определить количественные величины, характеризующие технический и технологический уровень организации процесса добычи калийной руды. Коэффициент энергоэффективности учитывает удельные энергозатраты на добычу калийной руды путем отнесения базовых затрат энергии на тонну добытого полезного ископаемого к соответствующей фактической величине. Коэффициент производительной работы является показателем достигнутого уровня добычных работ в очистной камере рудника.

Выводы по главе 2

1. Достоверное определение количественных величин, позволяющих оценить технический и технологический уровень организации процесса использования комбайнов, возможно посредством анализа графиков изменения мощностей, потребляемых электродвигателями рабочего оборудования выемочных машин калийных рудников.

2. При разрушении калийного массива резцами пространственных планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р» наименьшие удельные энергозатраты и минимальное количество необогатимых классов в отбитой руде обеспечиваются посредством разрушения массива шахматными резами с толщиной стружки $h = 12\text{--}15$ мм и отношении $t/h = 2\text{--}4$.

3. Эффективность функционирования проходческо-очистных комбайнов может быть оценена по комплексным показателям сохранения эффективности – коэффициенту энергоэффективности и коэффициенту организации работ, величина которых определяется на основании фактических данных о нагруженности приводов выемочных машин.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ НАГРУЗОК НА ПРИВОДЫ ПРОХОДЧЕСКО-ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА «УРАЛ-20Р»

Исследование процесса формирования нагрузок на приводы исполнительных органов проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р» при разрушении калийного массива является весьма сложной задачей. Величина и характер изменения нагрузки зависят от ряда случайных факторов, часть из которых аналитически учесть затруднительно.

Оценка нагруженности приводов комбайна в реальных условиях эксплуатации осуществлялась с использованием экспериментально-статистического метода исследований. Целесообразность и обоснованность применения этого метода объясняются тем, что он апробирован, проверен и является наиболее эффективным при разработке инженерных методик расчёта конструктивных и режимных параметров работы добычных машин [17, 55]. Данный метод предусматривает проведение ряда экспериментальных исследований, что обуславливает возможность воспроизведения основных режимов работы добычных машин, при этом результаты исследований являются достоверными, так как исключены влияние масштабного фактора и искажения физической природы изучаемых процессов.

3.1. Основные положения методики экспериментальных исследований

Целью экспериментальных исследований, результаты которых приводятся в данной главе, является определение основных закономерностей процесса формирования нагрузок на приводах исполнительных органов проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р» в реальных условиях эксплуатации. В соответствии с данной целью сформулированы основные задачи экспериментальных исследований.

1. Разработка методики проведения экспериментальных исследований.

2. Проведение замеров потребляемой мощности электроприводов комбайна «Урал-20Р» в реальных условиях эксплуатации. Определение количественных величин потребляемой мощности и энергоемкости процесса разрушения калийного массива резцами исполнительных органов.

3. Анализ полученных данных с использованием методов математической статистики и спектрального анализа.

В качестве основных положений методики экспериментальных исследований выделены следующие:

1. Выбор объектов испытаний. Выбор объектов исследования в конкретных условиях эксплуатации определяет адекватность полученных результатов. При выборе факторы, отражающие условия работы комбайна, такие как: техническое состояние комбайна, геологические свойства руды в забое, технологическая карта ведения работ, степень квалификации машиниста, должны оцениваться как типовые для рассматриваемых условий эксплуатации комбайна.

2. Порядок проведения исследования должен включать исследования переходных и установившихся режимов работы комбайна с различными скоростями подачи, работу комбайна полным и неполным сечением забоя.

3. Объем измерений отдельных режимов работы комбайна должен обеспечивать достоверность и повторяемость результатов.

4. Полученные в ходе исследования данные должны быть информативны для исследования. Точность измерительных каналов и частота дискретизации исходных данных должны обеспечивать доверительную вероятность результатов эксперимента [17].

3.2. Программно-регистрирующий комплекс «Ватур»

Для проведения экспериментальных исследований сотрудниками кафедры «Горная электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета совместно со специалистами ООО «Региональный канатный центр» (г. Пермь) разработан и изготовлен программно-регистрирующий комплекс «Ватур», обеспечивающий измерение, запись и сохранение основных параметров работы приводов проходческо-очистных комбайнов [75].

3.2.1. Структура и состав программно-регистрирующего комплекса «Ватур»

«Ватур» представляет собой программно-регистрирующий комплекс, предназначенный для измерения и регистрации напряжений, токов, активной мощности трехфазной цепи, углов наклона и пройденного комбайном пути. «Ватур» применяется как переносной прибор, устанавливаемый на период измерений во взрывонепроницаемую оболочку магнитной станции комбайна.

Комплекс «Ватур» выполнен из нескольких блоков для удобного размещения внутри магнитной станции комбайна. В состав комплекса (рисунки 3.1 и 3.2) входят вычислительный блок, блок питания, делители напряжения, датчики тока и датчик перемещения. Для удобства отладки прибора и калибровки измерительных каналов к вычислительному блоку может быть подключен пульт индикации. В качестве первичных преобразователей тока и напряжения применены датчики на эффекте Холла, обеспечивающие гальваническую развязку входных цепей. Датчики тока представляют собой токовые клещи-адаптеры, осуществляющие преобразование измеряемой силы тока в выходное напряжение датчика. Датчики напряжения размещены внутри вычислительного блока и подключаются к контролируемой цепи через делители напряжения.

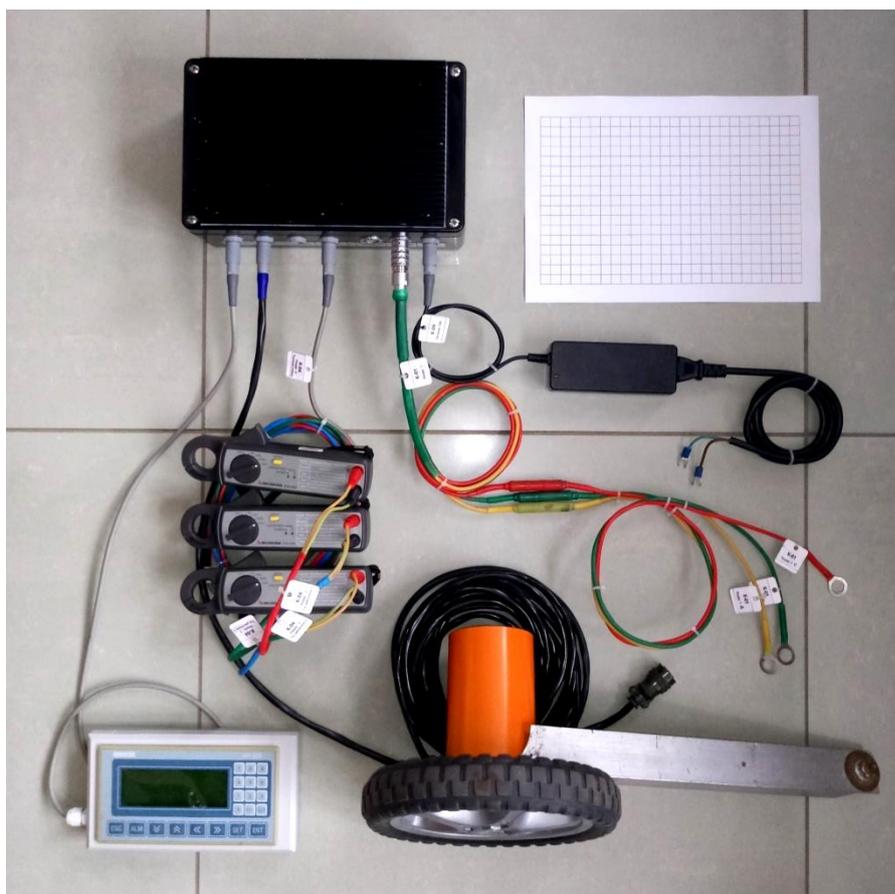


Рисунок 3.1 – Внешний вид оборудования программно-регистрирующего комплекса «Ватур»

Для исключения пробоя изоляции резисторы делителя вынесены из корпуса вычислительного блока комплекса. Датчик пути выполнен на базе преобразователя угловых перемещений с установленным на его валу мерным колесом. Датчик перемещения предназначен для установки на боковой распорной лыже комбайна со стороны магнитной станции. Наклон комбайна контролируется трехосевым акселерометром, размещенным внутри вычислительного блока. В процессе проведения измерений данные сохраняются в энергонезависимой памяти комплекса.

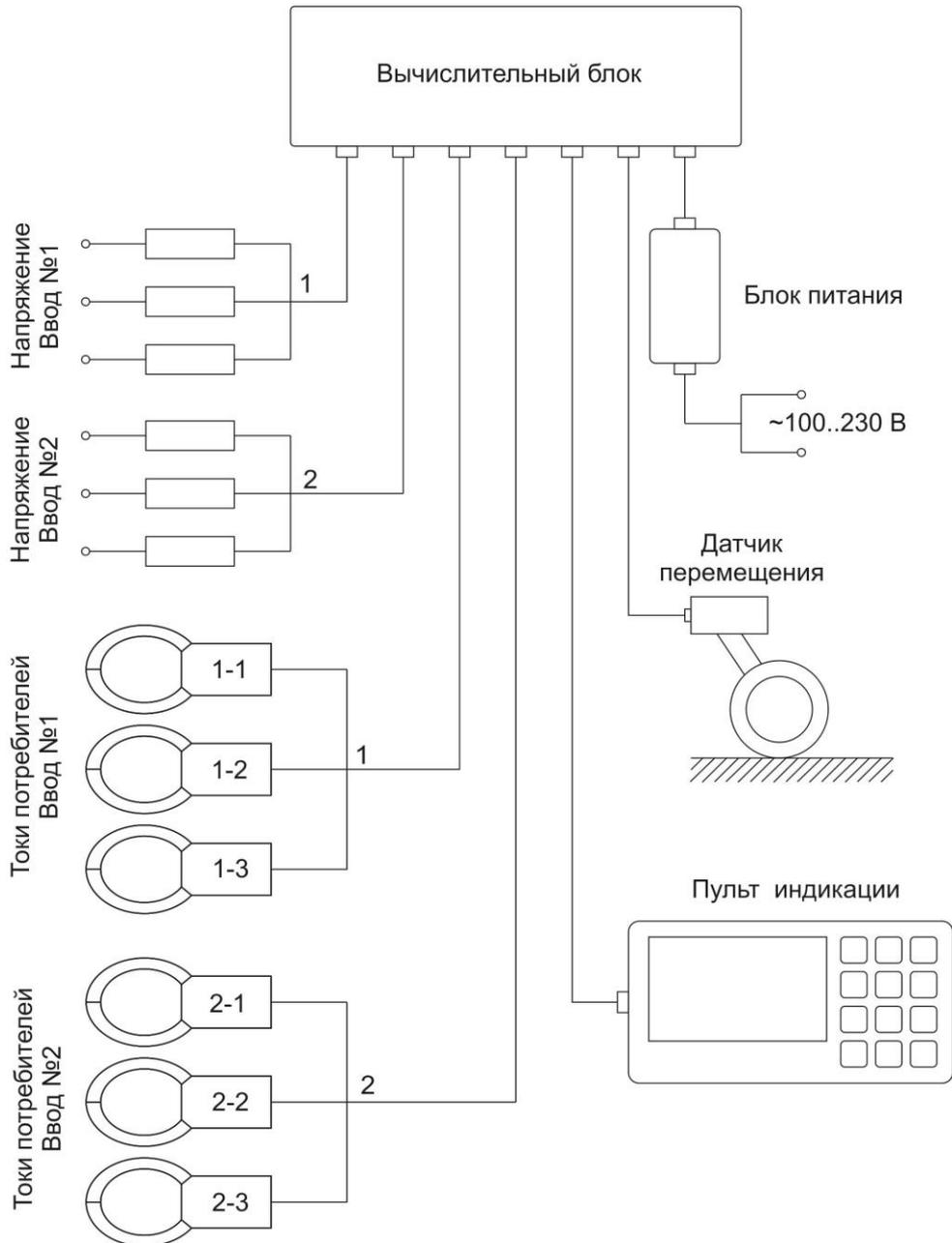


Рисунок 3.2 – Структурная схема комплекса «Ватур»

3.2.2. Описание принципа работы комплекса «Ватур»

«Ватур» регистрирует электрические параметры работы комбайна по двум вводам напряжения. На каждом вводе регистрируются нагрузки трех потребителей энергии, в качестве которых могут выступать как отдельные электродвигатели, так и группа из нескольких. Для измерения активной мощности в трехфазной цепи применяется метод одного ваттметра с искусственным нулем (рисунок 3.3). Значение фазного напряжения

(относительно искусственного нуля) находится с помощью делителя, величины сопротивлений которого удовлетворяют условию 3.1:

$$R_1 = R_3 = R_2 + R_{внW}, \quad (3.1)$$

где R_1 , R_2 , R_3 – сопротивление резисторов, Ом; $R_{внW}$ – внутреннее сопротивление канала измерения напряжения, Ом.

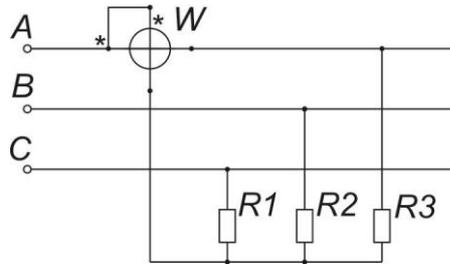


Рисунок 3.3 – Схема измерения активной мощности методом одного ваттметра с искусственным нулем

На рисунке 3.4 приведена схема подключения датчиков тока и напряжения на комбайне.

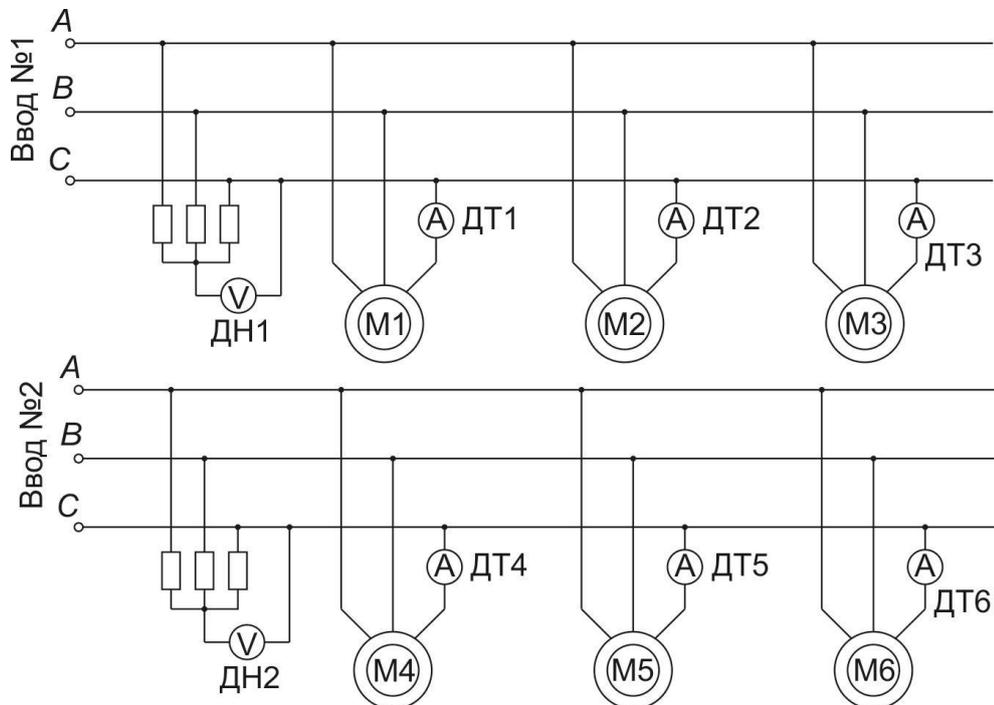


Рисунок 3.4 – Схема измерения электрических параметров комплексом «Ватур»:

ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока

Прибор осуществляет 100 измерений в течение одного периода колебания напряжения питающей сети. Первичная обработка мгновенных значений и вычисление количественных показателей работы комбайна осуществляются программным обеспечением вычислительного блока в ходе эксперимента. В процессе первичной обработки данных вычисляются следующие параметры.

Эффективное значение тока (по каждому датчику тока) определяется по формуле:

$$I_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n I_m^2}, \quad (3.2)$$

где $I_{\text{эф}}$ – эффективное значение тока, А; I_m – мгновенное значение тока в m -й момент времени, А; n – число точек измерения за фиксированный интервал времени ΔT .

Эффективное значение фазного напряжения по каждому кабельному вводу рассчитывается по формуле:

$$U_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n U_m^2}, \quad (3.3)$$

где $U_{\text{эф}}$ – эффективное значение фазного напряжения, В; U_m – мгновенное значение фазного напряжения, измеренное прибором в m -й момент времени, В.

Активная и полная мощности определяются по формулам:

$$N_a = \frac{3}{n} \sum_{m=1}^n U_m I_m; \quad (3.4)$$

$$S = 3 I_{\text{эф}} U_{\text{эф}}, \quad (3.5)$$

где N_a – активная мощность потребителя, кВт; S – полная мощность потребителя, кВА.

Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = \frac{N_a}{S}. \quad (3.6)$$

Скорость подачи комбайна:

$$V_{\Pi} = \frac{\sum_{m=1}^n (x_m - x_{m-1})}{\Delta T}, \quad (3.7)$$

где V_{Π} – скорость подачи комбайна, м/мин; x_m и x_{m-1} – положение комбайна в текущий m и предшествующий ему $m-1$ момент времени, м.

Вычисленные значения регистрируются в энергонезависимой памяти прибора. Дальнейшая обработка и анализ массива данных производится на персональном компьютере с помощью специализированного программного обеспечения «РС-Ватур».

В рабочем окне программы «РС-Ватур» (рисунок 3.5) массив данных замера представляется в виде набора графиков на одной временной оси. Границы анализируемых участков графиков выбирает исследователь в процессе обработки данных посредством установки меток начала и конца на оси времени замера. Для определения параметров работы комбайна в установленном режиме выбирается соответствующий участок замера без переходных режимов. При определении интегральных показателей границы обработки могут быть расширены [70, 105, 112].

Производительность комбайна вычисляется для конкретного участка диаграммы по формуле:

$$Q_{\text{тех}} = V_{\Pi} F_{\text{и.о.}}, \quad (3.8)$$

где $Q_{\text{тех}}$ – производительность комбайна на выбранном участке диаграммы, м³/мин; $F_{\text{и.о.}}$ – площадь забоя, обрабатываемого исполнительным органом комбайна, м².

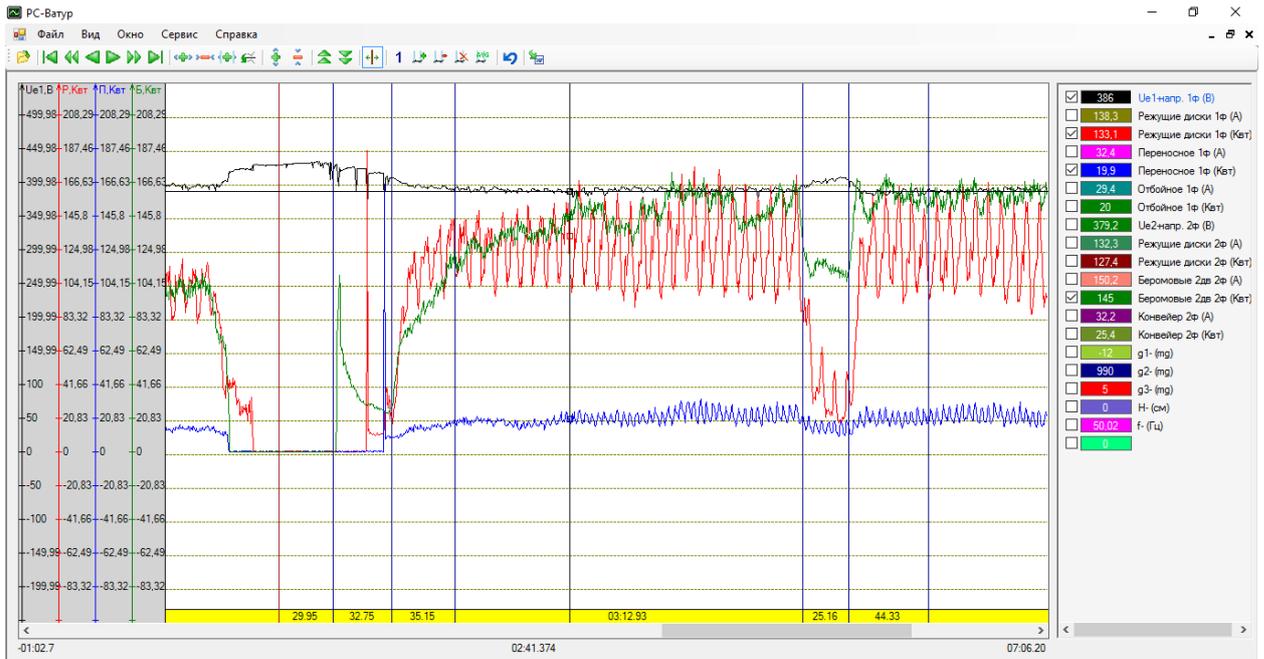


Рисунок 3.5 – Рабочее окно программы «РС-Ватур»

Удельные энергозатраты процесса разрушения соляного массива исполнительными органами комбайна определяются по формуле:

$$H_w = \frac{N_a}{60F_{\text{и.о.}} V_{\text{п}}}, \quad (3.9)$$

где H_w – удельные энергозатраты процесса разрушения соляного массива исполнительными органами комбайна, кВт·ч/м³.

Оценка динамических составляющих нагрузок на элементы приводов исполнительных органов комбайна осуществлялась путём определения дисперсии, среднего квадратичного отклонения и коэффициента вариации активных мощностей, потребляемых двигателями добычной машины. Оценка частотного состава механических колебаний систем «привод – редуктор – исполнительный орган» в процессе работы комбайна осуществлялась посредством спектрального анализа функций активных мощностей. В программе «РС-Ватур» реализован один из алгоритмов быстрого преобразования Фурье, что позволяет провести спектральный анализ сигнала на любом участке диаграммы по выбору пользователя.

Технические характеристики программно-регистрирующего комплекса «Ватур» представлены в приложении 3.

3.3. Порядок проведения экспериментальных исследований

Перед спуском в шахту для проведения экспериментальных исследований проверяются комплектность и исправность аппаратуры, определяются:

- место проведения испытаний;
- длительность проведения замеров;
- режимные параметры работы комбайна, при которых производятся замеры;
- схема подключения датчиков к обследуемым приводам комбайна.

Перед проведениями испытаний в журнале экспериментов фиксировалась следующая информация:

1. Данные по забою: местоположение забоя (рудник, участок, пласт, номер камеры), геометрические размеры выработки.
2. Данные по комбайну: марка и заводской номер комбайна, тип и схема установки резцов на исполнительных органах комбайна, паспортные данные электродвигателей (мощность, скорость вращения, КПД).
3. Параметры измерений: схема подключения каналов регистрирующей аппаратуры к датчикам и электродвигателям, частота опроса датчиков, время начала и конца замеров.

Характеристики обследуемого комбайна и горнотехнические условия его работы фиксируются в журнале исследований (см. таблицы П.2.1 и П.2.2, приложение 2).

Установка и подключение аппаратуры на комбайне осуществляются с привлечением специалистов из числа оперативно-ремонтного персонала предприятия, эксплуатирующего комбайновый комплекс. Порядок установки оборудования следующий:

1. Отключить питающее комбайн напряжение.

2. Открыть магнитную станцию комбайна и разместить внутри нее оборудование комплекса.
3. Подключить датчики напряжения к фазам кабельных вводов.
4. Подключить датчики тока к силовым цепям выбранных двигателей.
5. Установить и подключить датчик пути.
6. Подключить блок питания.
7. Закрывать магнитную станцию комбайна [75].

При подаче напряжения в магнитную станцию комбайна прибор включается и осуществляет измерения до момента снятия питающего напряжения. Демонтаж оборудования производится в обратной последовательности. После окончания измерений для контроля датчика перемещения с помощью рулетки производится контрольное измерение пути, пройденного комбайном за время испытаний.

Каждый замер включал в себя определение показателей при отбойке комбайном руды в объеме, равном от 5 до 10 самоходных вагонов [9, 79]. Оценивались величина и характер изменения нагрузок приводных двигателей при работе комбайна полным забоем и при подрубке продуктивного пласта в очистной камере.

Полученные результаты фиксировались в энергонезависимой памяти программно-регистрирующего комплекса.

В процессе испытаний определялись:

- величины питающих напряжений, подводимых по кабельным вводам комбайна;
- величины токов и мощностей, потребляемых отдельными двигателями комбайна;
- перемещение комбайна в выработке;
- угол наклона комбайна в продольной и поперечной плоскостях.

В отчёте по замерам приведены вычисленные на конкретных участках осциллограммы энергетические и технические показатели работы комбайна, которые представлены в виде таблиц (приложение 2).

Необходимая доверительная вероятность результатов экспериментов принята равной 0,95 при относительной погрешности результатов измерений на уровне 0,05 [17].

3.4. Анализ результатов экспериментальных исследований

3.4.1. Работа комбайна при отработке забоя полным сечением

Экспериментальные исследования работы комбайна при отработке забоя полным сечением производились на комбайне «Урал-20Р» одного из рудников Верхнекамского месторождения. Комбайн вел разработку пласта «Карсный II», угол наклона пласта в период исследования составлял $+1^\circ$, площадь сечения выработки составляла $15,787 \text{ м}^2$ (данные предоставлены маркшейдерской службой рудника).

Перед началом работы комбайна наблюдается завышенный уровень напряжения на вводных фидерах. Энергетики рудника намеренно увеличивают значения напряжения питающей сети минимум на 10 % для компенсации просадок. Так, величина фазного напряжения на первом фидере составила 738 В, на втором – 744 В. Номинальное напряжение питания приводных двигателей обследуемого комбайна «Урал-20Р» составляет 660 В.

В ходе измерений машинист задавал различные скорости подачи комбайна. На рисунках 3.6, 3.7 и 3.8 представлены графики энергетических параметров работы приводных электродвигателей комбайна «Урал-20Р», соответствующие постоянным скоростям подачи: $V_{п1} = 0,10 \text{ м/мин}$, $V_{п2} = 0,12 \text{ м/мин}$ и $V_{п3} = 0,14 \text{ м/мин}$.

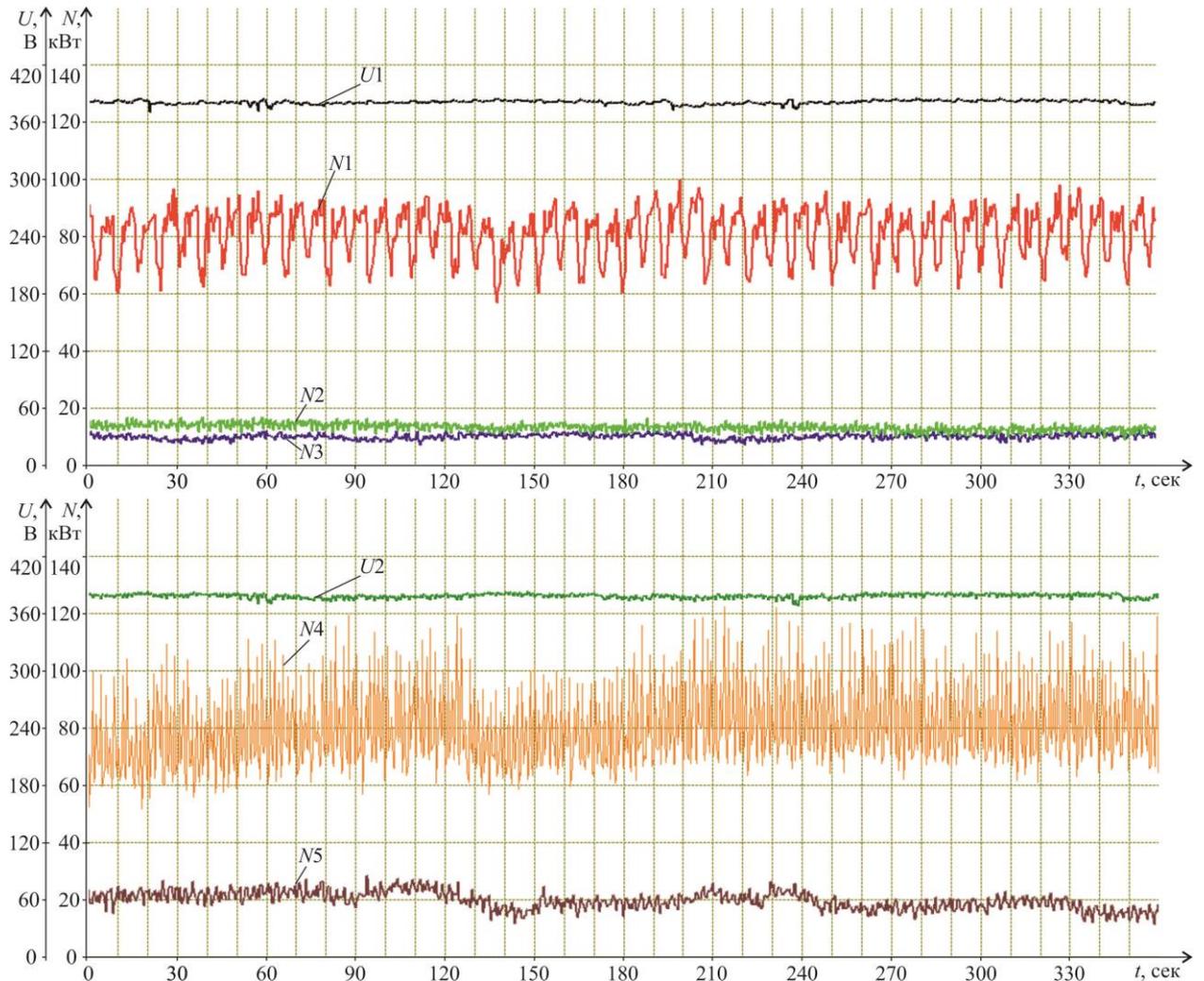


Рисунок 3.6 – Графики изменения энергетических параметров приводных электродвигателей комбайна «Урал-20Р» при отработке забоя полным сечением со скоростью подачи $V_{п} = 0,10$ м/мин: $U1$ – фазное напряжение на вводе № 1, В; $N1$ – активная мощность, потребляемая двигателем относительного вращения резцовых дисков, кВт; $N2$ – активная мощность, потребляемая двигателем отбойного устройства, кВт; $N3$ – активная мощность, потребляемая двигателем переносного вращения, кВт; $U2$ – фазное напряжение на вводе № 2, В; $N4$ – активная мощность, потребляемая двумя двигателями бермовых фрез, кВт; $N5$ – активная мощность, потребляемая двумя двигателями конвейера, кВт

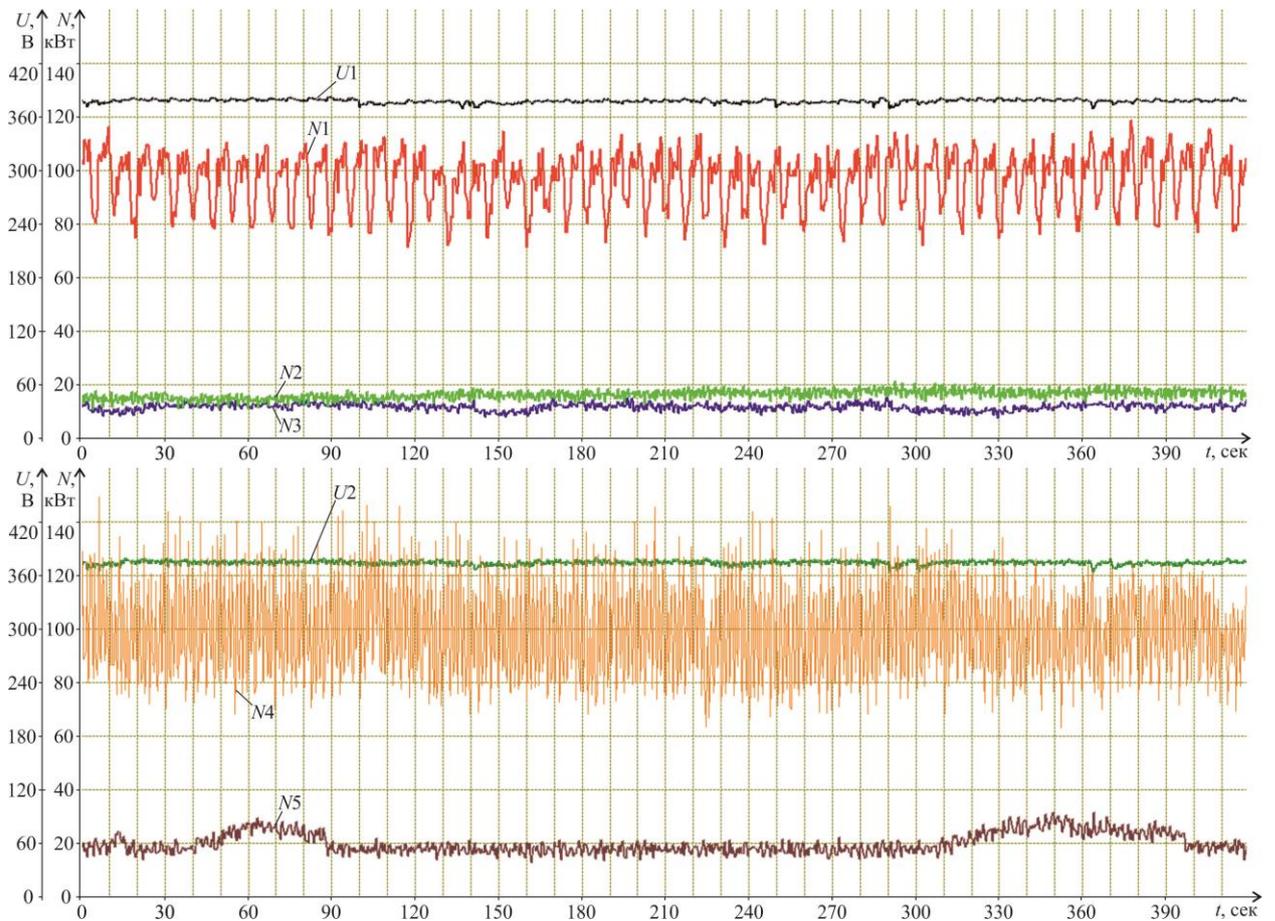


Рисунок 3.7 – Графики изменения энергетических параметров приводных электродвигателей комбайна «Урал-20Р» при отработке забоя полным сечением со скоростью подачи $V_{\text{п}} = 0,12$ м/мин: $U1$ – фазное напряжение на вводе №1, В; $N1$ – активная мощность, потребляемая двигателем относительного вращения резцовых дисков, кВт; $N2$ – активная мощность, потребляемая двигателем отбойного устройства, кВт; $N3$ – активная мощность, потребляемая двигателем переносного вращения, кВт; $U2$ – фазное напряжение на вводе № 2, В; $N4$ – активная мощность, потребляемая двумя двигателями бермовых фрез, кВт; $N5$ – активная мощность, потребляемая двумя двигателями конвейера, кВт

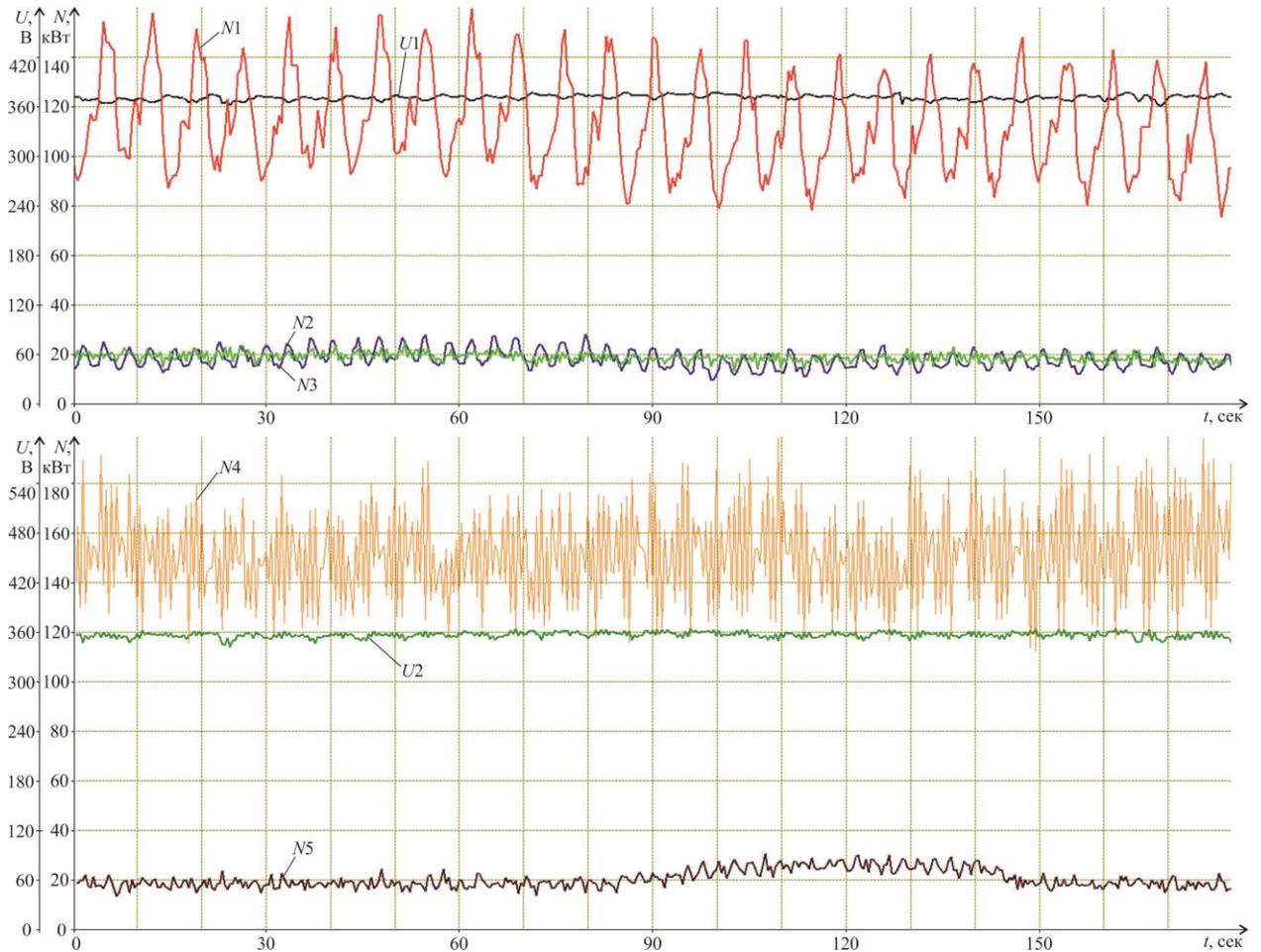


Рисунок 3.8 – Графики изменения энергетических параметров приводных электродвигателей комбайна «Урал-20Р» при при обработке забоя полным сечением со скоростью подачи $V_{\text{п}} = 0,14$ м/мин: $U1$ – фазное напряжение на вводе № 1, В; $N1$ – активная мощность, потребляемая двигателем относительного вращения резцовых дисков, кВт; $N2$ – активная мощность, потребляемая двигателем отбойного устройства, кВт; $N3$ – активная мощность, потребляемая двигателем переносного вращения, кВт; $U2$ – фазное напряжение на вводе № 2, В; $N4$ – активная мощность, потребляемая двумя двигателями бермовых фрез, кВт; $N5$ – активная мощность, потребляемая двумя двигателями конвейера, кВт

Планетарные исполнительные органы комбайна «Урал-20Р» имеют зону взаимного перекрытия площади обработки забоя, что обуславливает высокий уровень динамических составляющих нагрузок, действующих на элементы привода со стороны разрушаемого массива. Это отражается на графике потребляемой активной мощности приводов резцовых дисков. Частота колебаний графика равна двойной оборотной частоте переносного вращения исполнительного органа. При увеличении скорости подачи комбайна приводы относительного вращения характеризуются наибольшим

приращением величины среднего квадратичного отклонения сигнала потребляемой мощности, что объясняется бóльшей толщиной срезаемой стружки и как следствие бóльшей «ступенью» на линии пересечения траекторий движения дисков. Графики мощностей первого и второго приводов резцовых дисков лежат в противофазе (согласно пространственного расположения органов на комбайне). На рисунках 3.6, 3.7, и 3.8 показаны графики мощности одного привода резцовых дисков.

По данным измерений были произведены расчеты средних значений активных мощностей, потребляемых приводами комбайна и определены средние квадратичные отклонения сигналов активных мощностей, характеризующие уровень динамических нагрузок. Результаты расчетов средних величин активных мощностей потребляемых приводами комбайна «Урал-20Р», и средних квадратичных отклонений сигналов активных мощностей при работе комбайна полным сечением, представлены в таблице 3.1. и на рисунке 3.9.

Таблица 3.1 – Результаты расчетов средних значений активных мощностей двигателей исполнительных органов, при обработке забоя полным сечением

Обследуемые двигатели	Среднее значение активной мощности, кВт при скорости подачи:			Среднее квадратичное отклонение σ_N , кВт при скорости подачи:			Активная мощность при номинальной нагрузке двигателя, кВт
	$V_{п1}=0,10$ м/мин	$V_{п2}=0,12$ м/мин	$V_{п3}=0,14$ м/мин	$V_{п1}=0,10$ м/мин	$V_{п2}=0,12$ м/мин	$V_{п3}=0,14$ м/мин	
Относительное вращение 1	85,1	101,0	126,3	8,94	10,46	19,77	170,2
Относительное вращение 2	83,7	98,0	123,5	7,01	8,83	18,13	170,2
Бермовый орган	83,4	110,5	147,3	15,15	17,10	20,64	2×81,5
Отбойное устройство	15,2	18,3	21,9	1,41	1,84	1,94	49,5
Переносное вращение	11,8	13,5	20,9	1,00	1,36	3,90	81,5
Конвейер	21,9	22,0	25,3	2,39	3,83	5,11	49,6

По результатам замеров, наиболее нагруженными двигателями комбайна являются двигатели бермовых исполнительных органов, осуществляющих разрушение массива у почвы выработки и погрузку

отбитой руды на конвейер. Выше указывалось, что разрушение массива резцами бермовых и шнековых исполнительных органов реализуется резами с малой толщиной стружки. Часть потребляемой двигателями бермовых фрез мощности расходуется не на разрушение забоя, а на погрузку и переизмельчение руды шнеками [71, 58].

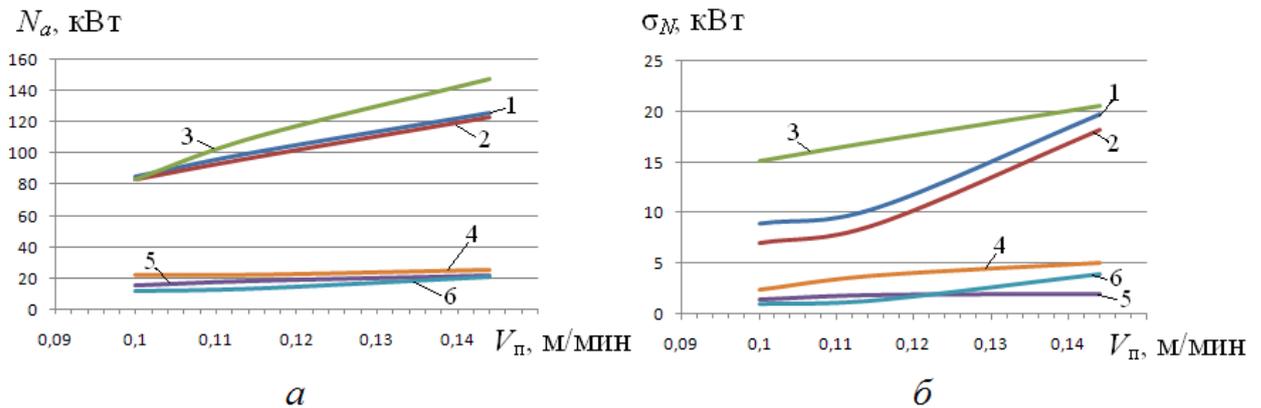


Рисунок 3.9 – Изменение активных мощностей (*а*) приводов комбайна «Урал-20Р», и средних квадратичных отклонений (*б*) сигналов активных мощностей при отработке забоя полным сечением: 1, 2 – двигатели относительного вращения резцовых дисков; 3 – двигатели бермовых исполнительных органов; 4 – двигатель конвейера; 5 – отбойное устройство; 6 – переносное вращение резцовых дисков

Уровень динамических нагрузок, характеризуемый величиной среднего квадратичного отклонения, для приводов бермовых исполнительных органов также является самым высоким по сравнению с остальными приводами комбайна. Данное явление обусловлено конструктивными особенностями шнековых грузчиков. Однозаходные шнеки комбайнов «Урал-20Р» обеспечивают подачу руды на конвейер порционно, что определяет значительные вибрации рамы при работе скребкового перегружателя. Неравномерность распределения горной массы по длине шнека обусловлена увеличением количества выдаваемой руды по направлению к разгрузочному концу шнека, а также напорным действием лопасти, перед которой образуется движущийся вал перемещаемого материала [48].

Рама скребкового конвейера комбайна «Урал-20Р» установлена под углом 18° к плоскости гусеничной ходовой тележки. Согласно техническим документам завода-изготовителя данные выемочные машины могут использоваться в выработках с углами наклона $\pm 12^\circ$. Соответственно, угол наклона конвейера относительно горизонтальной плоскости может составлять до 30° , в то время как угол естественного откоса калийной руды, отделённой от массива и находящейся в состоянии покоя, составляет $35\text{--}40^\circ$. При работе комбайна, сопровождающейся вибрациями рамы конвейера и неравномерностью движения цепи, угол естественного откоса перемещаемой по рештаку руды составляет $20\text{--}25^\circ$. Таким образом, работа комбайнов «Урал-20Р» в выработках с отрицательными углами наклона (движение выемочной машины вниз) характеризуется существенным снижением производительности скребкового конвейера. Большая часть отбитой руды не грузится на конвейер, а скатывается обратно в призабойное пространство, где циркулирует между лопастями шнеков и плоскостью забоя, переизмельчаясь при этом.

При скорости подачи $V_{\text{п}} = 0,14$ м/мин двигателя относительного вращения резцовых дисков исполнительных органов загружены соответственно на 74 и 72 %. Разность значений величин потребляемой мощности указанных приводов при работе комбайна «Урал-20Р» полным сечением может достигать 10 %, что обуславливается, как правило, техническим состоянием редукторов и двигателей выемочной машины [99].

Двигатели отбойного устройства, переносного вращения и конвейера при подаче комбайна на забой со скоростью $V_{\text{п3}} = 0,14$ м/мин загружены соответственно на 44,2, 25,6 и 51,0 %. Значительное недоиспользование установленной мощности двигателей определяет увеличение реактивной составляющей мощности, негативно влияющей на характеристики шахтной сети.

Результаты замеров обрабатывались с использованием методов спектрального анализа. Согласно теореме Котельникова спектр аналогового сигнала может быть однозначно представлен по своим дискретным выборкам, взятым с интервалом

$$\tau = 0,5f_{\text{пр}}^{-1}, \quad (3.10)$$

где τ – интервал дискретизации функции аналогового сигнала по времени, с;
 $f_{\text{пр}}$ – частота ограничения спектра аналогового сигнала, Гц [12, 23, 96].

Спектральный анализ сигналов активных мощностей (рисунок 3.10), полученных посредством программно-регистрирующего комплекса «Ватур», позволяет выявить частотные составляющие от 0 до 25 Гц, характеризующие колебания кинематической цепи «исполнительный орган – редуктор – приводной двигатель». Дефекты рабочих узлов и механических передач обуславливают возникновение переменных нагрузок, что вызывает появление новых спектральных составляющих. Периодическое измерение в спектре мощности величин, характеризующих конкретные дефекты в приводном электродвигателе и механической трансмиссии, позволяет осуществлять оценку технического состояния привода добычной машины и при необходимости осуществлять предупредительные ремонтные работы, направленные на предупреждение аварийных отказов.

Посредством анализа записей потребляемых мощностей в асинхронных электродвигателях могут быть обнаружены дефекты электрической части статора и ротора; статический и вращающийся эксцентриситеты; дефекты подшипников, приводящие к флуктуациям формы воздушного зазора. Кроме того, важными диагностическими признаками являются величина и длительность протекания пусковых токов. В трансмиссиях исполнительных органов по характеру изменения сигнала мощности могут быть диагностированы неисправности зубчатых зацеплений, посадки шестерён на вал, перекосы ведомых валов и их опор вращения, несоосность выстраиваемых в одну линию ведомых валов.

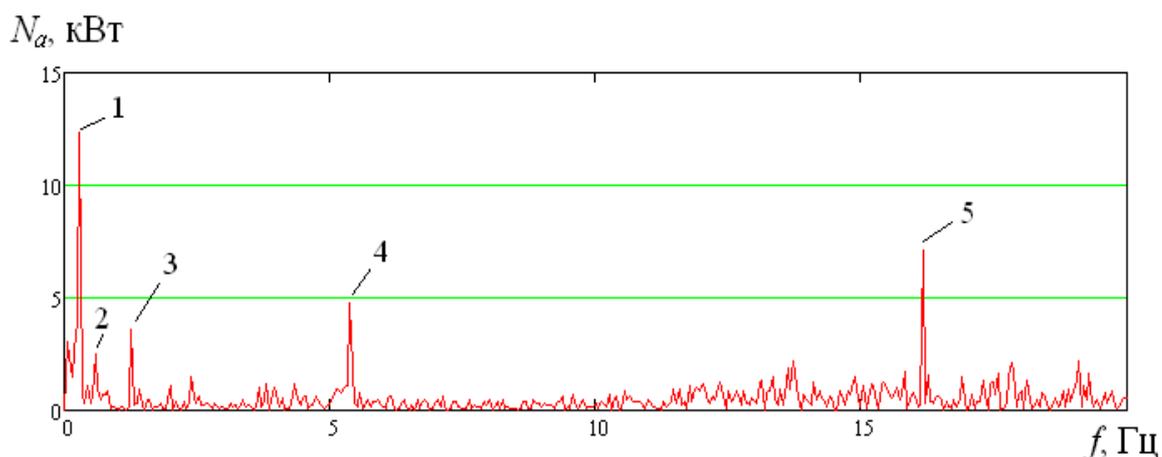


Рисунок 3.10 – Спектр сигнала активной мощности, потребляемой двигателем относительного движения резцовых дисков комбайна «Урал-20Р»:

1 – частота изменения нагрузки вследствие наличия на забое зоны перекрытия, обрабатываемой дисками обоих исполнительных органов ($f=0,2$ Гц); 2 – частота относительного вращения резцовых дисков ($f=0,6$ Гц); 3 – частота вращения конической шестерни раздаточного редуктора ($f=1,4$ Гц); 4 – частота вращения зубчатого колеса редуктора исполнительного органа ($f=5,4$ Гц); 5 – частота вращения вала приводного двигателя ($f=16,6$ Гц)

К недостаткам способа оценки технического состояния трансмиссий по потребляемой мощности относится трудность выявления ряда дефектов в начальной стадии развития. В первую очередь это дефекты подшипников качения, выявление которых осуществляется опосредованно, например, по изменениям характеристик зубчатого зацепления [49, 120]. Повышение информативности и достоверности диагноза возможно посредством реализации периодического многопараметрового контроля (акустико-эмиссионная, вибрационная диагностика) подшипниковых узлов [90, 103].

3.4.2. Работа комбайна при обработке забоя неполным сечением

Исследование работы комбайна неполным сечением производились при работе комбайна на подрубке продуктивного слоя пласта «Красный П», угол наклона выработки составлял $+2^\circ$ (движение вверх). Высота разрушаемого массива составляла 1,0 м, площадь забоя $5,5 \text{ м}^2$ (данные

предоставлены маркшейдерской службой рудника). Графики активных мощностей, потребляемых двигателями комбайна «Урал-20Р» представлены на рисунке 3.11.

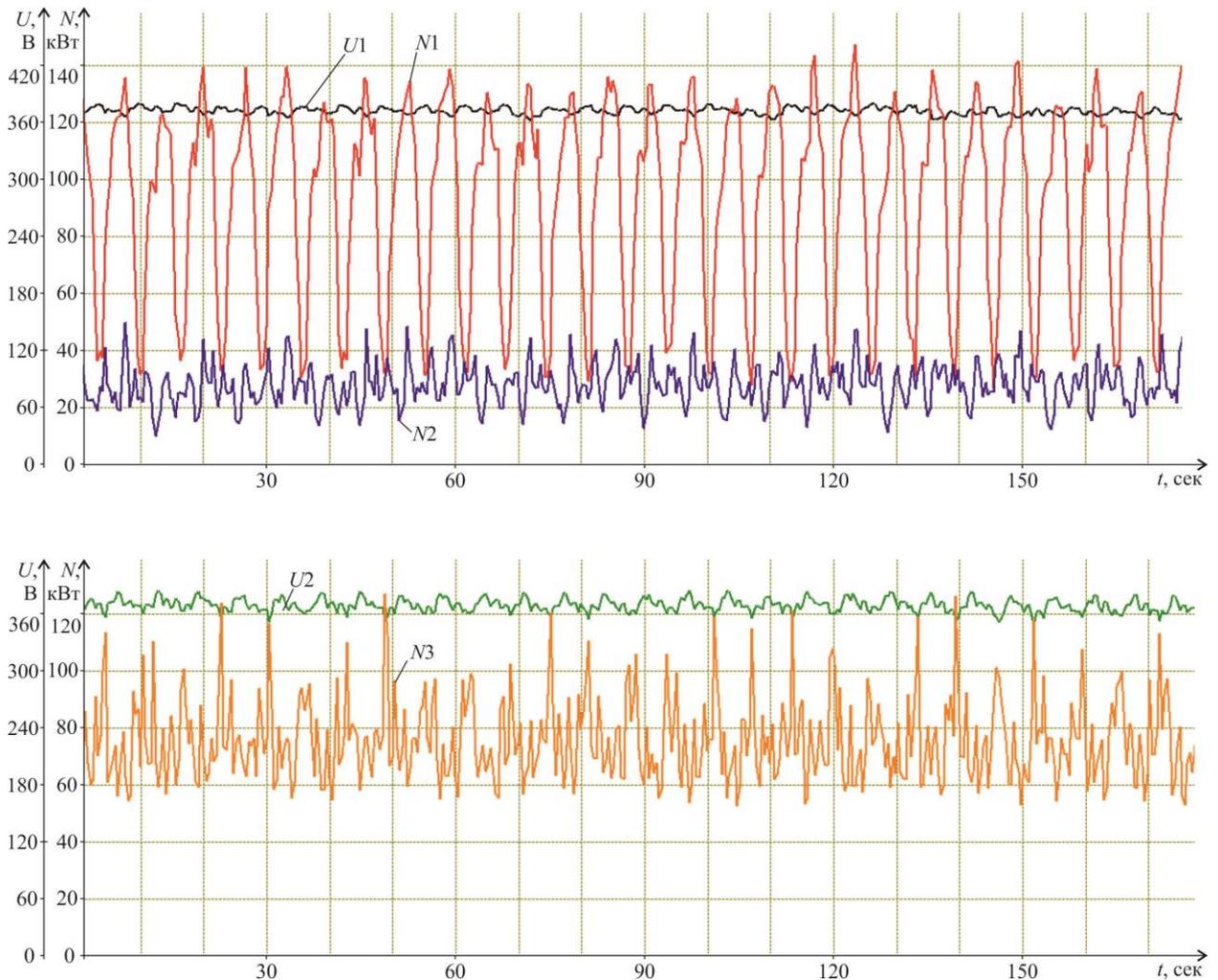


Рисунок 3.11 – Графики изменения энергетических параметров работы приводных двигателей комбайна «Урал-20Р» при обработке забоя неполным сечением ($V_{\Pi} = 0,40$ м/мин): U_1 – фазное напряжение на вводе № 1, В; N_1 – активная мощность, потребляемая двигателем относительного вращения резцовых дисков, кВт; N_2 – активная мощность, потребляемая двигателем переносного вращения, кВт; U_2 – фазное напряжение на вводе № 2, В; N_3 – активная мощность, потребляемая одним двигателем бермовых фрез, кВт

По данным измерений были произведены расчеты средних значений активных мощностей, потребляемых приводами комбайна и средние квадратичные отклонения сигналов активных мощностей, характеризующие уровень динамических нагрузок. Результаты расчетов представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты расчетов средних значений активных мощностей двигателей исполнительных органов, при обработке забоя неполным сечением

Обследуемые двигатели	Среднее значение активной мощности N_a (кВт) при скорости подачи:			Среднее квадратичное отклонение σ_N (кВт) при скорости подачи:			Активная мощность при номинальной нагрузке двигателя, кВт
	$V_{п1}=0,39$ м/мин	$V_{п2}=0,40$ м/мин	$V_{п3}=0,42$ м/мин	$V_{п1}=0,39$ м/мин	$V_{п2}=0,40$ м/мин	$V_{п3}=0,42$ м/мин	
Относительное вращение 1	92,8	95,7	103,0	35,17	35,20	44,11	170,2
Относительное вращение 2	100,5	105,7	107,9	42,30	42,97	51,42	170,2
Бермовый орган	157,6	168,5	183,1	15,87	16,30	20,50	163,0
Переносное вращение	29,8	31,0	47,8	6,92	6,89	8,91	81,5

В ходе измерений комбайн работал скоростями подачи, близкими к используемой в практике работы при выполнении подобных операций. Машинист ограничивал скорость подачи, ориентируясь на показания токовых индикаторов нагрузки двигателей.

По результатам расчетов потребляемая активная мощность двигателей бермовых фрез превышает номинальное значение. Наиболее существенное увеличение уровня динамических нагрузок наблюдается на приводах относительного и переносного движения резцовых дисков планетарных исполнительных органов. Значения средних квадратичных отклонений мощностей, потребляемых указанными приводами, увеличились в 2,3–2,5 раза по сравнению с режимом отработки забоя полным сечением (см. таблицы 3.1 и 3.2).

Анализ результатов исследований показывает, что, скорость подачи комбайна превышала допустимое значение $V_{п}$ по критерию максимально допустимой толщины стружки h_{\max} , значение которой определяется конструкцией планетарно-дискового исполнительного органа (рисунок 3.12). Разрушение калийного массива планетарными исполнительными органами комбайна «Урал-20Р» с такой скоростью подачи допускает контакт с забоем

кулаков-резцедержателей. В ходе визуальных наблюдений за движением комбайна были отмечены существенные вибрации корпуса комбайна, а также проскальзывания гусениц ходового оборудования.

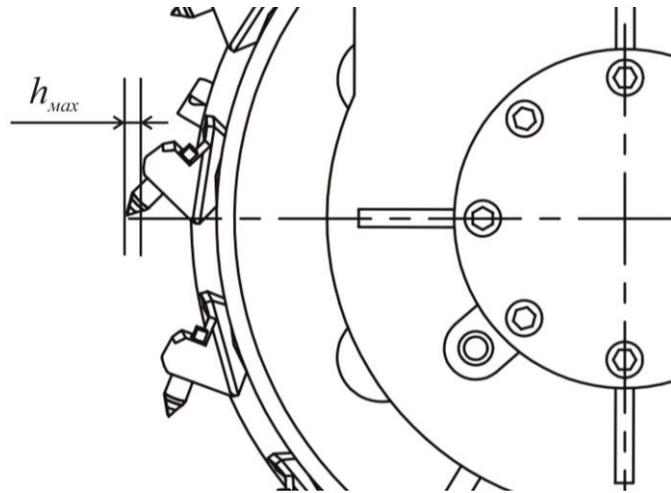


Рисунок 3.12 – Максимально допустимая толщина стружки резцового диска

Штатные системы управления и индикации комбайна не позволяют контролировать величину динамических составляющих нагрузок на приводы комбайна. Работа комбайна с большой скоростью подачи сопровождается значительными динамическими нагрузками, что приводит к ускоренному расходу ресурса узлов и деталей поворотных и раздаточных редукторов приводов относительного движения планетарных органов, редукторов бермовых исполнительных органов, приводных электродвигателей.

Меру относительного изменения мгновенных значений нагрузок приводов возможно оценить посредством определения коэффициентов вариации сигналов K_v активных мощностей. Анализ результатов, приведенных в таблице 3.3 и на рисунке 3.13, показывает, что при работе комбайна на подрубке пласта сигналы мощностей приводов планетарно-дисковых исполнительных органов сильно вариабельны ($K_v > 0,2$). В то же время шнековые грузчики комбайна при высоких скоростях подачи V_{II} заштыбовываются, что обуславливает низкую эффективность процесса погрузки отбитой руды и возникновение сверхнормативных нагрузок на приводах бермовых исполнительных органов.

Таблица 3.3 – Коэффициенты вариации K_v , активных мощностей, потребляемых двигателями исполнительных органов

Обследуемые двигатели	Значение коэффициентов вариации K_v , при работе комбайна					
	полным сечением забоя, со скоростью подачи:			неполным сечением забоя, со скоростью подачи:		
	$V_{п1}=0,10$ м/мин	$V_{п2}=0,12$ м/мин	$V_{п3}=0,14$ м/мин	$V_{п1}=0,39$ м/мин	$V_{п2}=0,40$ м/мин	$V_{п3}=0,42$ м/мин
Относительное вращение 1	0,11	0,10	0,16	0,38	0,37	0,43
Относительное вращение 2	0,08	0,09	0,15	0,42	0,41	0,48
Бермовый орган	0,18	0,15	0,14	0,20	0,20	0,21
Отбойное устройство	0,09	0,10	0,09	-	-	-
Переносное вращение	0,08	0,10	0,19	0,23	0,22	0,19

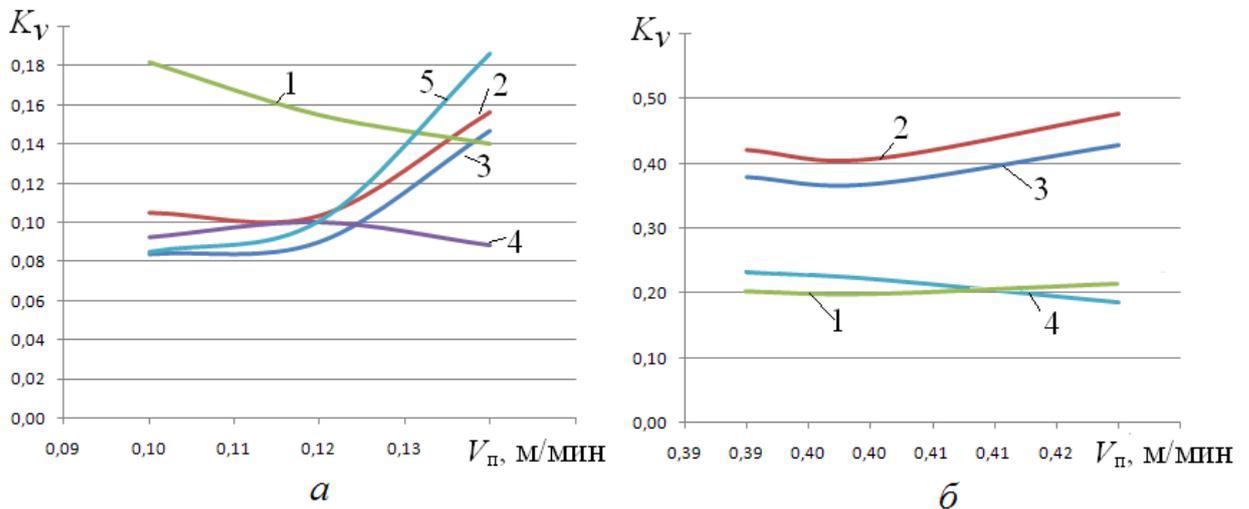


Рисунок 3.13 – Изменение коэффициентов вариации сигналов активных мощностей, потребляемых приводами комбайна «Урал-20Р» при отработке забоя полным (а) и неполным сечением (б): 1 – двигатели бермовых исполнительных органов; 2, 3 – двигатели относительного вращения резовых дисков; 4 – двигатель переносного вращения резовых дисков; 5 – двигатель конвейера

Результаты экспериментальных исследований согласуются с практическими данными инженерно-технических служб предприятия. По отзывам специалистов, в сферу деятельности которых входят задачи, связанные с эксплуатацией и ремонтом комбайнов «Урал», большинство аварийных отказов приводов планетарно-дисковых исполнительных органов происходит при работе комбайнов в режимах зарубки, подрубки и

расширения камер. Отработка забоя неполным сечением обуславливает ускоренный расход ресурса и, как следствие, уменьшение времени межремонтных периодов, узлов и деталей поворотных и раздаточных редукторов приводов относительного движения планетарных органов, редукторов бермовых исполнительных органов, приводных электродвигателей.

Выводы по главе 3

1. Разработана методика экспериментальных исследований процесса формирования нагрузок приводов исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов в реальных условиях эксплуатации.

2. Экспериментально определены величины и характер изменения нагрузок электродвигателей исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» при отработке забоя полным и неполным сечением.

3. Экспериментально доказано, что при работе проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» наиболее нагруженными приводами являются приводы бермовых исполнительных органов и относительного движения резцовых дисков. При этом приводы переносного вращения резцовых дисков, отбойного устройства и конвейера имеют резерв по мощности 40...70 %.

4. Экспериментально установлено, что спектральный анализ сигналов активных мощностей, потребляемых приводными двигателями режущих исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р», позволяет выявить частотные составляющие от 0 до 20 Гц, характеризующие колебания кинематической цепи «исполнительный орган – редуктор – двигатель».

5. Экспериментально установлено, что при отработке забоя неполным сечением со скоростью подачи $V_{\Pi} = 0,4$ м/мин возникают значительные динамические нагрузки на исполнительные органы выемочной машины.

ГЛАВА 4. ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОМБАЙНОВ «УРАЛ-20Р» В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Повышение эффективности использования комбайнов «Урал-20Р» возможно посредством разработки и внедрения систем автоматического управления, обеспечивающих поддержание рациональных режимных параметров породоразрушающих исполнительных органов выемочной машины с учётом изменения горно-геологических и горнотехнических условий работы.

В настоящее время регулирование режимных параметров комбайнов «Урал-20Р» осуществляется путём изменения скорости подачи выемочной машины на забой. Управление скоростью подачи осуществляется вручную, посредством изменения расхода рабочей жидкости через регулятор потока гидросистемы механизма хода комбайна и регулирование частоты вращения выходных валов гидромоторов. Зачастую использование ручного управления обуславливает нарушение технологических режимов работы, когда приводные двигатели исполнительных органов имеют максимальную возможную нагрузку по мощности вследствие чрезмерно большой скорости подачи, на что сознательно идут комбайнеры, чтобы минимизировать влияние организационных простоев в работе [85, 37, 39].

Оценка величин нагрузок приводных электродвигателей осуществляется машинистом по установленным в кабине комбайна приборам индикации, информация на которые передается от датчиков тока [81]. Существующая система индикации нагрузок, основанная только на контроле значений токов приводных электродвигателей комбайна, не обеспечивает должной информативности. Как показали экспериментальные исследования, при работе комбайна неполным забоем и превышении максимально допустимой скорости подачи приводные двигатели планетарно-дисковых исполнительных органов могут работать без превышения номинальных

значений токов, в то время как трансмиссии (в частности, поворотные редукторы) подвергаются сверхнормативным нагрузкам. Индикаторы загрузки двигателей не сигнализируют о недопустимых режимах, которые приводят к ускоренному расходу ресурса деталей комбайна и возникновению аварийных отказов.

В мировой практике горного машиностроения одной из основных тенденций является активное внедрение частотно-регулируемого привода при разработке новых конструкций проходческих и выемочных машин. Изменение частоты вращения исполнительных органов горных комбайнов позволяет оптимизировать процесс разрушения породных массивов по удельным энергозатратам, улучшить гранулометрический состав отделяемой горной массы, снизив количество необогащаемых пылевидных классов – отходов горного производства. Из выше изложенного следует, что разработка и внедрение способа автоматического управления проходческо-очистным комбайном «Урал-20Р», обеспечивающего работу выемочной машины с рациональными режимными параметрами, являются актуальной задачей.

4.1. Обоснование рациональных режимов работы планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р»

Рациональный режим работы проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р» предусматривает энергоэффективную работу выемочной машины во всем диапазоне рабочих скоростей подачи. Высокая эффективность может быть достигнута обеспечением рациональных параметров процесса разрушения массива исполнительными органами комбайна, наиболее нагруженными из которых являются планетарно-дисковые исполнительные органы.

В главе 2 настоящей работы установлено, что минимальные удельные энергозатраты H_w процесса разрушения калийного массива обеспечиваются за счет выбора рациональных значений режимных параметров планетарно-

дисковых исполнительных органов комбайна, которые определяются скоростью подачи выемочной машины на забой $V_{\text{п}}$, частотами относительного $n_{\text{отн}}$ и переносного $n_{\text{пер}}$ вращения режущих дисков. Для каждой скорости подачи комбайна возможно подобрать частоты относительного $n_{\text{отн}}$ и переносного $n_{\text{пер}}$ вращения режущих дисков, обеспечивающие в совокупности рациональные значения параметров резания.

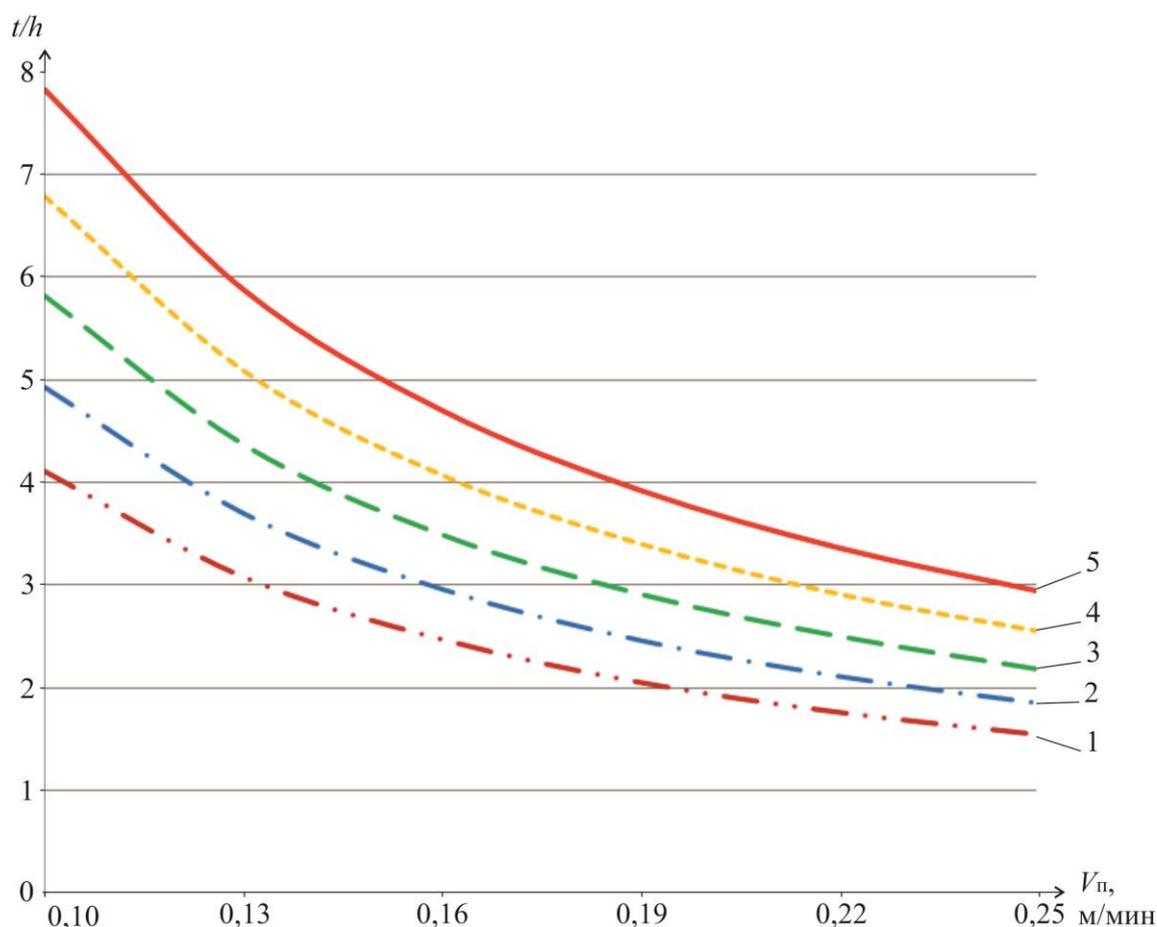


Рисунок 4.1 – Графики изменения отношения $t_{\text{ср}}/h_{\text{ср}}$ при работе планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р» в зависимости от скорости подачи $V_{\text{п}}$ и частоты переносного вращения $n_{\text{пер}}$: 1 – $n_{\text{пер}} = 4,2 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n_{\text{пер}} = 4,6 \text{ мин}^{-1}$; 3 – $n_{\text{пер}} = 5,0 \text{ мин}^{-1}$; 4 – $n_{\text{пер}} = 5,4 \text{ мин}^{-1}$; 5 – $n_{\text{пер}} = 5,8 \text{ мин}^{-1}$

На рисунке 4.1 представлены полученные расчетным путём графики изменения отношения среднего шага резания к средней толщине стружки $t_{\text{ср}}/h_{\text{ср}}$ при различных частотах переносного вращения режущих дисков

комбайна «Урал-20Р» (в диапазоне $n_{\text{пер}} = 4,2 \dots 5,8 \text{ мин}^{-1}$) в зависимости от скорости подачи выемочной машины на забой ($V_{\text{п}} = 0,10 \dots 0,25 \text{ мин}^{-1}$).

Анализ графиков показывает, что при работе комбайна со скоростью подачи, обеспечивающей номинальную производительность 8 т/мин, отношение $t_{\text{ср}}/h_{\text{ср}}$ не входит в диапазон рациональных значений от 2 до 4. Обеспечение рациональных значений отношения $t_{\text{ср}}/h_{\text{ср}}$ при работе планетарно-дисковых исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» возможно путём изменения частоты переносного вращения (см. рисунок 4.1, поз. 2–5), что позволит при заданной скорости подачи и производительности выемочной машины обеспечить минимальные удельные энергозатраты и улучшить гранулометрический состав отделяемой от массива руды.

Существующая система управления комбайном «Урал-20Р» не предусматривает возможности изменения частот вращения электроприводов. Таким образом, реализация предлагаемого способа управления потребует модернизации электропривода. В этих условиях наиболее простым вариантом является внедрение регулируемого электропривода переносного вращения, обеспечивающего движение двух исполнительных планетарно-дисковых исполнительных органов комбайна. Оценивать удельные энергозатраты разрушения возможно по значениям активных мощностей, потребляемых электроприводами исполнительных органов, и скорости подачи комбайна на забой.

4.2. Алгоритм управления приводами проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р»

Величина удельных энергозатрат процесса разрушения калийного массива планетарно-дисковыми исполнительными органами определяется выражением:

$$H_w = \frac{N_{отн1} + N_{отн2} + N_{пер}}{60F_{и.о.} V_{п}}, \quad (4.1)$$

где H_w – удельные энергозатраты процесса разрушения горного массива, кВт·ч/м³; $N_{отн1}$, $N_{отн2}$, $N_{пер}$ – мощности, потребляемые приводами относительного и переносного вращения резцовых дисков, кВт; $F_{и.о.}$ – площадь забоя, обрабатываемая планетарно-дисковым исполнительным органом, м²; $V_{п}$ – скорость подачи комбайна на забой, м/мин.

Учитывая, что в формуле (4.1) параметр $F_{и.о.}$ является постоянной величиной, а $V_{п} \rightarrow \text{const}$, то значение удельных энергозатрат определяется значением активной мощности, потребляемой наиболее нагруженными двигателями относительного вращения резцовых дисков [37, 89]. Таким образом, регулирование скорости переносного вращения резцовых дисков планетарных исполнительных органов должно осуществляться на основе информации о нагруженности приводов относительного вращения с учетом скорости подачи комбайна на забой.

С целью повышения эффективности использования выемочных машин калийных рудников предложен алгоритм управления приводами комбайна «Урал-20Р» (рисунки 4.2 и 4.3), обеспечивающий рациональные параметры разрушения массива планетарно-дисковыми исполнительными органами. Обеспечение рациональных значений параметров резания планетарно-дисковых исполнительных органов $t_{ср}/h_{ср}$ достигается посредством взаимного регулирования скорости подачи комбайна и частоты переносного вращения резцовых дисков.

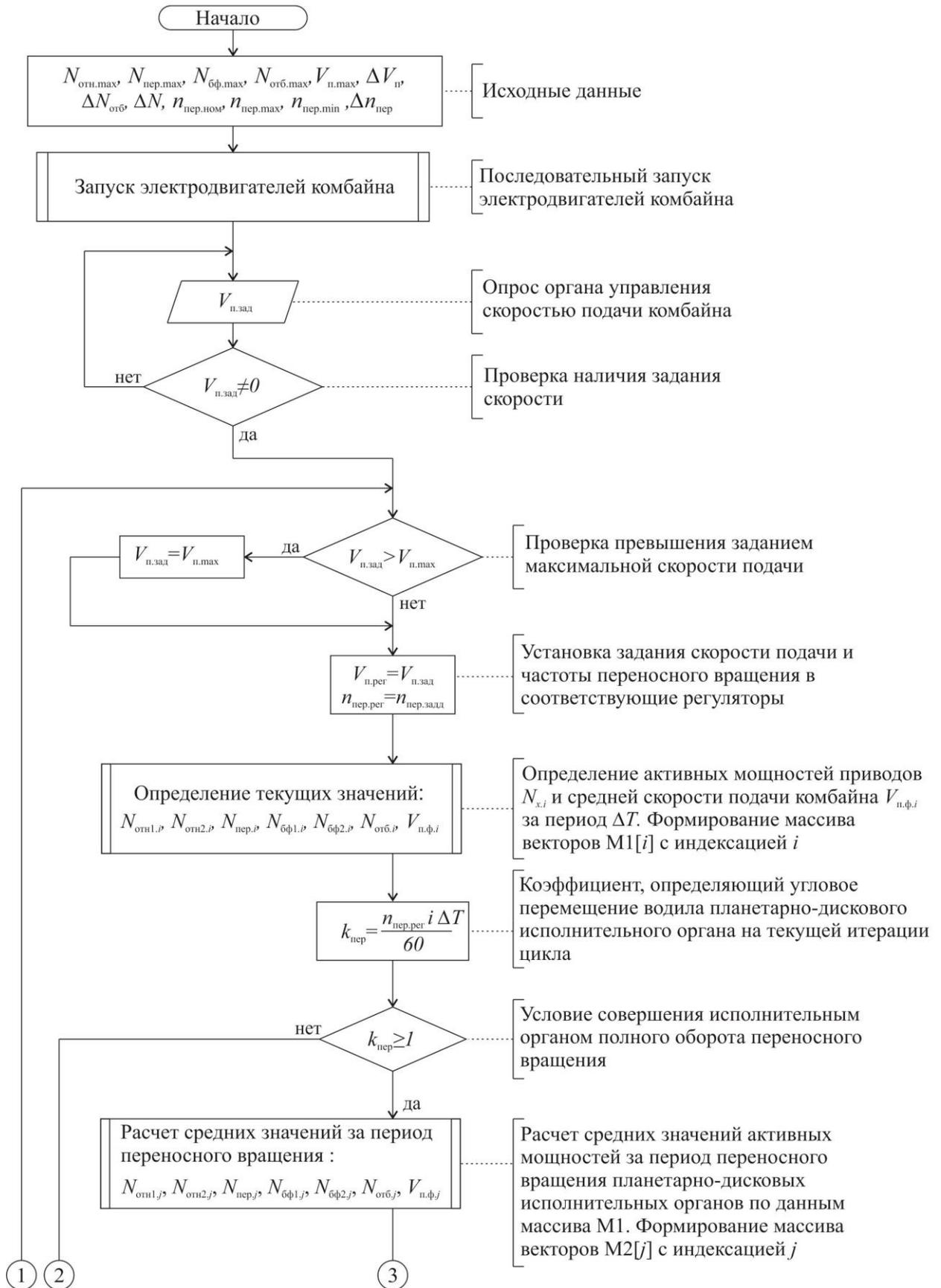


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритма, начало

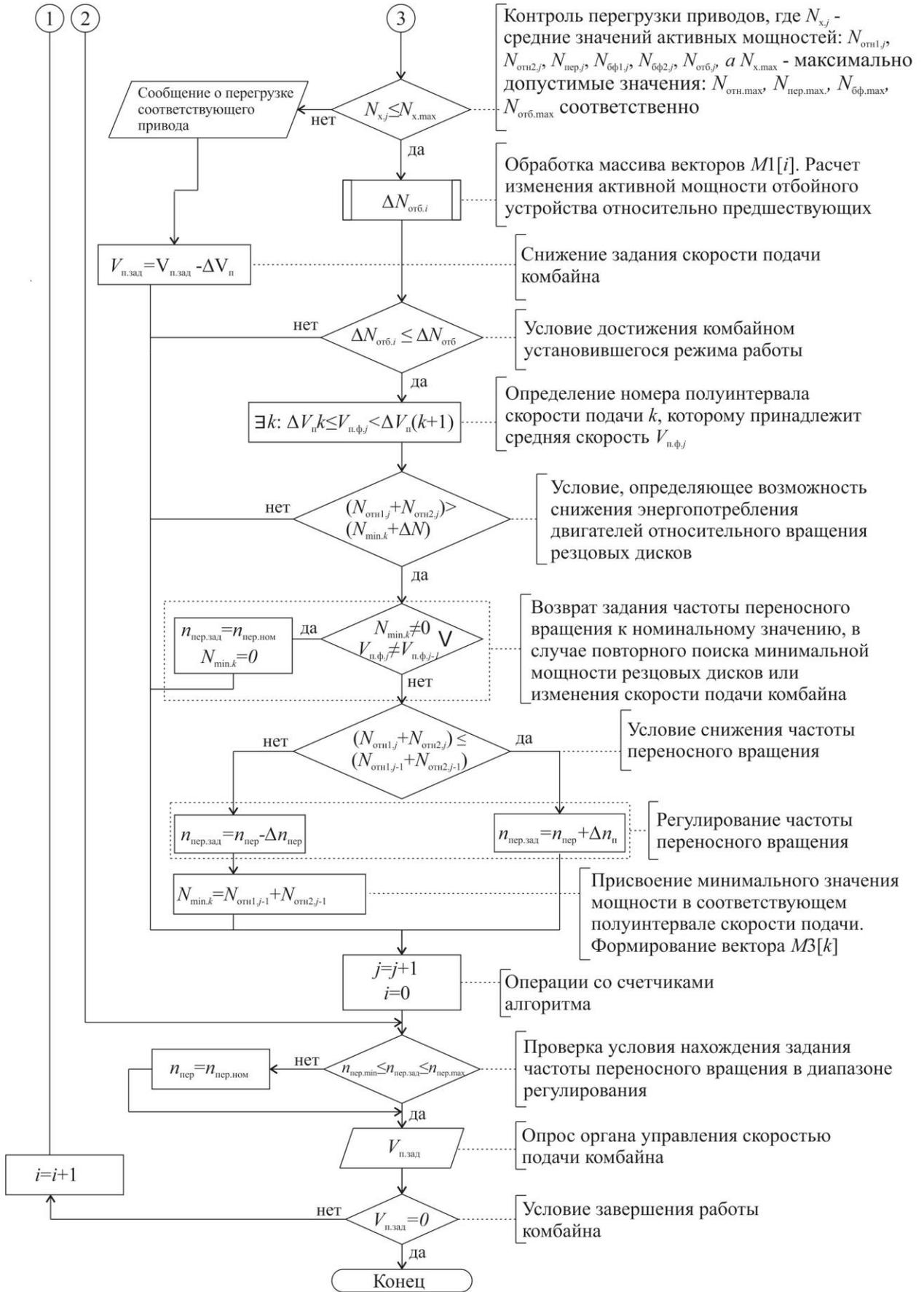


Рисунок 4.3 – Блок-схема алгоритма, окончание

Суть алгоритма заключается в следующем. При работе комбайна с заданной скоростью подачи $V_{\text{зад}}$ регулируется частота переносного вращения резцовых дисков, что изменяет параметры резания. Искомая скорость переносного вращения резцовых дисков находится при достижении рационального значения отношения шага резания к толщине стружки $t_{\text{ср}}/h_{\text{ср}}$, которое обеспечивает минимальные (близкие к минимальным) удельные энергозатраты процесса разрушения калийного массива.

Для защиты исполнительных органов от предельных значений нагрузок предусмотрено ограничение скорости подачи комбайна.

Для работы алгоритма требуется задать следующие исходные данные:

1) Значения максимально допустимых значений активных мощностей электродвигателей приводов комбайна, кВт: $N_{\text{отн.мах}}$ – относительного вращения резцовых дисков; $N_{\text{пер.мах}}$ – переносного вращения резцовых дисков; $N_{\text{бф.мах}}$ – бермовых фрез; $N_{\text{отб.мах}}$ – отбойного устройства.

2) Максимальная скорость подачи комбайна $V_{\text{п.мах}}$ и шаг регулирования скорости $\Delta V_{\text{п}}$, м/ч, при условии, что:

$$\frac{V_{\text{п.мах}}}{\Delta V_{\text{п}}} \in \mathbb{N}. \quad (4.2)$$

3) $\Delta N_{\text{отб}}$, кВт – значение отклонения активной мощности двигателя отбойного устройства относительно предшествующих значений при работе комбайна в установившемся режиме.

4) Номинальное значение, максимальная и минимальная частота переносного вращения планетарного исполнительного органа $n_{\text{пер.ном}}$, $n_{\text{пер.мах}}$, $n_{\text{пер.мин}}$, мин^{-1} . Шаг регулирования $\Delta n_{\text{пер}}$, мин^{-1} .

5) Внутренние переменные алгоритма: ΔT – период расчета значений активных мощностей приводов, с; z – количество точек базы расчета отклонения активной мощности двигателя отбойного устройства.

Работа комбайна начинается с запуска электродвигателей – подпрограмма «Запуск двигателей комбайна». Запуск производится на холостом ходу, при нулевой скорости подачи комбайна на забой. Двигатели

включаются последовательно с целью исключения большой просадки питающего напряжения. Привод переносного вращения выводится на номинальные обороты $n_{\text{пер.ном}}$.

После успешного запуска двигателей алгоритм ожидает установки задания скорости подачи комбайна $V_{\text{п.зад}}$. При появлении задания скорости ее значение сравнивается с максимально допустимым, в случае превышения скорость подачи ограничивается максимально допустимым значением.

Далее алгоритм работает циклично. Порядковый номер итерации цикла обозначается в алгоритме индексом i . Подпрограмма определения текущих значений, с установленной периодичностью ΔT , осуществляет расчет величин активных мощностей электроприводов исполнительных органов $N_{\text{отн1},i}$, $N_{\text{отн2},i}$, $N_{\text{пер},i}$, $N_{\text{бф1},i}$, $N_{\text{бф2},i}$, $N_{\text{отб},i}$ и фактической скорости подачи комбайна $V_{\text{п.ф},i}$.

$$N_{x,i} = \frac{3}{n} \sum_{m=1}^n U_{x,m} I_{x,m}, \quad (4.3)$$

$$V_{\text{п.ф},i} = \frac{\sum_{m=1}^n (x_m - x_{m-1})}{\Delta T}, \quad (4.4)$$

где $N_{x,i}$ – значение активной мощности, потребляемой соответствующим электродвигателем комбайна, Вт; i – порядковый номер периода вычислений; $I_{x,m}$, $U_{x,m}$ – мгновенные значения тока, А и напряжения, В, соответствующего электродвигателя в момент времени m ; n – число точек измерения m за фиксированный интервал времени ΔT ; $V_{\text{п.ф},i}$ – фактическая скорость подачи комбайна, м/мин, x_m и x_{m-1} – положение комбайна в текущий m и предшествующий ему $m-1$ момент времени, м.

Вычисленные значения формирует массив векторов $M1[i] = (N_{\text{отн1},i}, N_{\text{отн2},i}, N_{\text{пер},i}, N_{\text{бф1},i}, N_{\text{бф2},i}, N_{\text{отб},i}, V_{\text{п.ф},i})$, $i = 1, 2, 3, \dots$, где i – номер вектора вычисленных значений.

Положение водила планетарно-дискового исполнительного органа в момент вычислений с номером i определяется коэффициентом оборота $k_{\text{пер}}$:

$$k_{\text{пер}} = \frac{n_{\text{пер.рег}} i \Delta T}{60}, \quad (4.5)$$

где $n_{\text{пер.рег}}$ – регистрируемая частота переносного вращения, мин^{-1} .

По данным, накопленным в массиве векторов $M1[i]$, подпрограмма «Расчет средних значений за период переносного вращения» производит расчет средних значений активных мощностей и фактической скорости подачи комбайна за период полного оборота водила:

$$N_{x.j} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q N_{x.i}, \quad (4.6)$$

$$V_{\text{п.ф.}j} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q V_{\text{п.ф.}i}, \quad (4.7)$$

$$q = \frac{60}{n_{\text{пер.рег}} \Delta T}, \quad (4.8)$$

где $N_{x.j}$ – среднее значение активной мощности, потребляемой соответствующим электродвигателем комбайна в течение одного периода переносного вращения, Вт; q – число интервалов ΔT , в течение одного оборота переносного вращения; $V_{\text{п.ф.}i}$ – фактическая скорость подачи комбайна, м/мин, $n_{\text{пер.рег}}$ – частота переносного вращения, мин^{-1} .

Результаты расчета формируют массив векторов $M2[j]$ с индексацией j , включающий $M2[j] = (N_{\text{отн1},j}, N_{\text{отн2},j}, N_{\text{пер},j}, N_{\text{бф1},j}, N_{\text{бф2},j}, N_{\text{отб},j}, V_{\text{п.ф.}j})$, $j = 1, 2, 3, \dots$, где j – номер вектора вычисленных средних значений величин за период переносного вращения.

Перегрузка приводов комбайна контролируется сравнением средних значений активных мощностей электродвигателей за совершенный период переносного вращения, с соответствующими величинами максимальных значений мощностей. В случае превышения соответствующих максимальных значений производится уменьшение задания скорости подачи комбайна на величину $\Delta V_{\text{п}}$.

Оценка и регулирование параметров резания осуществляются при установившемся режиме работы комбайна. Установившийся режим определяется по динамике изменения активной мощности привода отбойного устройства, на работу которого не оказывает влияния изменение параметров работы других исполнительных органов комбайна. Величина изменения активной мощности отбойного устройства $\Delta N_{отб.i}$ относительно предшествующих значений определяется значением производной, построенной для функции $N_{отб.i}$ методом наименьших квадратов по данным массива векторов $M1[i]$:

$$\Delta N_{отб.i} = \frac{\sum_{l=i-z}^i l \cdot \sum_{l=i-z}^i N_{отб.l} - z \sum_{l=i-z}^i l \cdot N_{отб.l}}{(\sum_{l=i-z}^i l)^2 - z \sum_{l=i-z}^i l^2} \cdot \frac{1}{\Delta T}, \quad (4.9)$$

где z – количество точек базы расчета; i, l – номера векторов в массиве $M1$.

Сравнение значений активных мощностей, потребляемых двигателями исполнительных органов, производится для значений, найденных при близких скоростях подачи комбайна. Для этого скорость подачи комбайна разбивается на равные полуинтервалы:

$$[0, \Delta V_{п}), [\Delta V_{п}, 2\Delta V_{п}), \dots, [V_{п.макс} - \Delta V_{п}, V_{п.макс}), \quad (4.10)$$

где $\Delta V_{п}$, $V_{п.макс}$ – заданный шаг регулирования и максимальное значение скорости подачи комбайна м/мин. Для любой скорости подачи комбайна $V_{п.ф,j}$ номер полуинтервала k находится из условия:

$$\exists k : \Delta V_{п} k \leq V_{п.ф,j} < \Delta V_{п} (k + 1), \quad (4.11)$$

Сравнение мощностей производится вычислением сумм двух средних значений мощностей приводов резовых дисков, за период переносного вращения. Полученная сумма сравнивается с минимальным значением $N_{мин,k}$, найденным при соответствующем полуинтервале k скорости подачи.

В случае превышения минимальных значений мощности $N_{мин,k}$ в соответствующем полуинтервале скорости подачи k алгоритм переходит к регулированию скорости переносного вращения (если необходимо,

восстанавливаются начальные значения частоты переносного вращения $n_{\text{пер.зад}}$ и минимальной мощности $N_{\text{min.k}}$). Последовательным изменением частоты переносного вращения находится искомое значение частоты, при которой обеспечивается минимальное энергопотребление двигателей относительного вращения резцовых дисков $N_{\text{min.k}}$. Это значение формируют вектор $M3[k]$, $M3[k] = (N_{\text{min.k}})$, $k = 1, 2, \dots$, где k – номер полуинтервала скорости подачи комбайна.

После каждого шага регулирования частоты переносного вращения производится проверка нахождения задания частоты в диапазоне регулирования.

Работа алгоритма прекращается при обнулении скорости подачи комбайна.

Таким образом, на основе информации о нагруженности приводов проходческо-очистных комбайнов возможна работа систем автоматического управления, обеспечивающих разрушение калийного массива с рациональными параметрами резания. Предложенный способ защищен патентом [65].

Реализация предлагаемого способа автоматического управления предполагает дооснащение комбайна сервоприводом регулятора потока гидросистемы гусеничного хода, регулируемым электроприводом переносного движения резцовых дисков, а также системой контроля параметров работы комбайна, включающей контроль потребляемой мощности электродвигателей и перемещения машины.

Выводы по главе 4

1. При разрушении калийного массива резцами пространственных планетарно-дисковых исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» рациональное отношение шага резания к толщине стружки $t_{ср}/h_{ср}$, при заданной скорости подачи, обеспечивается изменением скорости переносного вращения дисков.

2. Разработан алгоритм управления приводами проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р», обеспечивающий реализацию процесса разрушения калийного массива с рациональными параметрами резания на основе информации о нагруженности приводных двигателей выемочной машины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной научно-технической задачи оценки нагруженности приводов проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» для выбора технически обоснованных режимов работы в реальных условиях эксплуатации.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ конструктивных особенностей и режимов работы проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р». Проанализированы статистические данные об отказах механических трансмиссий комбайнов.

2. Выполнен анализ теоретических и экспериментальных исследований в области повышения энергоэффективности проходческо-очистных комбайнов.

3. Выполнено математическое описание нагрузок на элементах приводов режущих исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р» при случайном характере внешнего воздействия.

4. Обоснованы рациональные параметры работы исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р». Доказано, что наименьшие удельные энергозатраты и минимальное количество необогатимых классов в отбитой руде обеспечиваются при разрушении калийного массива шахматными резами с толщиной стружки $h = 12...15$ мм при отношении $t_{cp}/h_{cp}=2...4$.

5. Обоснованы комплексные показатели оценки эффективности функционирования проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р».

6. Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что достоверная оценка величины и характера изменения нагрузок приводов проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» в условиях калийных рудников возможна посредством измерения активных мощностей, потребляемых приводными двигателями исполнительных органов

выемочных машин.

7. Выполнены экспериментальные исследования по оценке нагруженности приводов проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» при работе комбайна в условиях эксплуатации.

8. Экспериментально доказано, что при работе проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» наиболее нагруженными приводами являются приводы бермовых исполнительных органов и относительного движения резцовых дисков. При этом приводы переносного вращения резцовых дисков, отбойного устройства и конвейера имеют резерв по мощности 40...70 %.

9. Экспериментально доказано, что при работе комбайнов «Урал-20Р» неполным забоем на приводы исполнительных органов действуют значительные динамические нагрузки, что обуславливает снижение величины остаточного ресурса узлов комбайнов и возникновение аварийных отказов. Штатные системы индикации и контроля нагруженности приводов комбайнов «Урал» не позволяют корректно оценить уровень динамических составляющих нагрузок, действующих на узлы и детали приводов выемочной машины.

10. Разработан алгоритм управления приводами проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р», позволяющий осуществлять разрушение калийного массива с рациональными параметрами резания, что обеспечивает уменьшение удельных энергозатрат процесса добычи калийной руды. Предложенный способ защищён патентом.

11. Результаты работы переданы специалистам инженерно-технических служб ПАО «Уралкалий». Результаты исследований используются в учебном процессе при подготовке студентов по направлению 130400 – Горное дело. Опубликовано две работы – методические указания к лабораторным работам, которые включены в расписание проведения занятий.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

a – абразивность руды, мг/км;

A_p – сопротивляемость калийной руды резанию, Н/мм;

B – ширина шнека или барабанного исполнительного органа, мм;

b_k – ширина режущей кромки резца, м;

D_{AV} – взаимная дисперсия сопротивляемости резанию калийного пласта и скорости подачи комбайна;

$D_{заб.}$ – диаметр забурника планетарно-дискового исполнительного органа, мм;

$D_{ио}$ – диаметр диска, шнека или барабана по резцам, мм;

$D_{ш}$ – диаметр шнека по резцам, мм;

E – модуль Юнга, ГПа;

f – частота напряжения в питающей сети, Гц;

F_1, F_2 – напорные усилия гусениц, Н;

$F_{ио}$ – площадь забоя, обрабатываемая исполнительным органом комбайна, м²;

F_k – сечение выработки, м²;

$f_{кр}$ – коэффициент крепости руды по шкале М.М. Протоdjяконова;

$F_{оп}$ – площадь прямоугольника, описанного вокруг контура выработки, м²;

$f_{пр}$ – частота ограничения спектра аналогового сигнала, Гц;

$f_{сц}$ – коэффициент сцепления гусеничных тележек комбайна с почвой;

$G_{БП}$ – вес бункера-перегрузателя, Н;

G_K – вес комбайна, Н;

h – толщина стружки, м;

H_i – высота массива, разрушаемого исполнительным органом, м;

h_{max} – максимальная толщина стружки, м;

H_w – удельные энергозатраты процесса разрушения массива резцами выемочной машины, кВт·ч/т;

H_{wb} – базовое значение удельных энергозатрат процесса разрушения калийного массива резцами комбайна и погрузки отбитой руды, кВт·ч/т;

$H_{w\phi}$ – фактическая величина удельных энергозатрат процессов отбойки и погрузки калийной руды при работе выемочного комбайна в заданный период времени, кВт·ч/т;

h_{cp} – средняя толщина стружки, м;

$h_{ш.max}$ – максимальное значение толщины стружки, отделяемой от массива шнековым исполнительным органом, м;

I_m – мгновенное значение тока в момент времени t , А;

I_{ϕ} – эффективное значение тока, А;

k_{01} – обмоточный коэффициент электродвигателя;

$K_A(\tau)$ и $K_V(\tau)$ – корреляционные функции сопротивляемости пласта резанию и скорости подачи комбайна соответственно;

k_b – коэффициент ширины режущей кромки резца;

$K_N(\tau)$ – корреляционная функция мощности, потребляемой приводным двигателем;

$k_{t/h}$ – коэффициент степени блокированности реза;

K_v – коэффициент вариации сигнала активной мощности;

k_α – коэффициент угла резания;

k_ψ – коэффициент ориентации резца;

k_Γ – коэффициент готовности;

k_d – количество резцовых дисков на планетарно-дисковом исполнительном органе, шт;

$k_{зат}$ – коэффициент затупления резца;

$k_{и.}$ – коэффициент использования;

$k_{п.р.}$ – коэффициент производительной работы;

$K_{ри}$ – коэффициент, учитывающий конструктивные параметры режущего инструмента и параметры схемы резания;

$k_{с.э.}$ – коэффициент сохранения эффективности;

K_T – коэффициент, учитывающий потери времени на вспомогательные операции;

k_{ϕ} – коэффициент формы передней грани резца;

$k_{\text{э.эф.}}$ – коэффициент энергоэффективности использования проходческо-очистного комбайна;

$k_{\text{пер}}$ – коэффициент оборота водила планетарно-дискового исполнительного органа;

k – номер полуинтервала скорости подачи комбайна;

m – число резцов в линии резания, шт.;

$M_{\%}$ – количество необогатимых пылевидных классов руды в отделённой от массива горной массе, %;

$m_{\text{Ар}}$ – математическое ожидание сопротивляемости калийной руды резанию, Н/мм;

M_{max} – максимальный момент, развиваемый приводным электродвигателем, кН·м;

n – число линий резания, шт.;

$N_{\text{а}}$ – активная мощность, потребляемая обследуемым электродвигателем комбайна, кВт;

$N_{\text{max}\phi}$ – максимальная мощность, эквивалентная опрокидному моменту в условиях шахтной сети, кВт;

$n_{\text{отн}}$ – частота относительного вращения резцовых дисков планетарно-дискового исполнительного органа комбайна, мин⁻¹;

$N_{\text{отн}}$ – мощность электродвигателя относительного вращения резцовых дисков планетарно-дискового исполнительного органа комбайна, кВт;

$N_{\text{пер}}$ – мощность электродвигателя переносного вращения резцовых дисков планетарно-дискового исполнительного органа комбайна, кВт;

$N_{\text{ПЕР}}$ – мощность, необходимая для перемещения комбайна, кВт;

$n_{\text{пер}}$ – частота переносного вращения резцовых дисков планетарно-дискового исполнительного органа комбайна, мин⁻¹;

$n_{\text{пер.max}}, n_{\text{пер.min}}$ – максимальная и минимальная частота переносного вращения планетарного исполнительного органа, мин⁻¹;

$n_{\text{пер.ном}}$ – номинальное значение частоты переносного вращения планетарно-дискового исполнительного органа, мин^{-1} ;

N_{max} – максимальное значение мощности приводного двигателя, кВт;

$N_{\text{max.бф}}$ – максимальное значение мощности двигателя бермовых фрез, кВт;

$N_{\text{max.отб}}$ – максимальное значение мощности двигателя отбойного устройства, кВт;

$N_{\text{max.отн}}$ – максимальное значение мощности двигателя привода относительного вращения резцовых дисков, кВт;

$N_{\text{max.пер.}}$ – максимальное значение мощности двигателя привода переносного вращения резцовых дисков, кВт;

$n_{\text{ш}}$ – частота вращения шнекового исполнительного органа, мин^{-1} ;

$P(T)$ – функция мгновенного значения нагрузки на элементах привода исполнительного органа выемочной машины;

P_x – боковая сила, действующая на одиночный резец, Н;

P_z – сила резания на неповоротном резце, Н;

p_k – контактная прочность руды, МПа;

P_y – сила реакции массива на одиночный резец, Н;

$Q_{\text{БП}}$ – грузоподъемность бункера-перегрузателя, Н;

$Q_{\text{т}}$ – теоретическая производительность комбайна, т/мин;

$Q_{\text{тех}}$ – техническая производительность комбайна, т/мин;

$Q_{\text{э}}$ – эксплуатационная производительность комбайнового комплекса за заданный период времени (например, смену), т/мин;

$q_{\text{э.г.}}$ – стоимость одного машино-часа эксплуатационной готовности комбайна, руб/ч;

R_1, R_2, R_3 – сопротивление резисторов, Ом;

$r_{\text{в}}$ – радиус водила планетарно-дискового исполнительного органа, мм;

$R_{\text{внW}}$ – внутреннее сопротивление канала измерения напряжения ваттметра, Ом;

$r_{\text{д}}$ – радиус резцового диска, мм;

R_3 – реакция забоя на исполнительный орган в направлении подачи комбайна, Н;

$R_{и.о.}$ – внешний радиус планетарно-дискового исполнительного органа, мм;

$R_{пог}$ – сопротивление перемещению комбайна от погрузочных устройств, Н;

S – полная мощность, потребляемая обследуемым электродвигателем комбайна, ВА;

$S_{зат}$ – проекция площадки притупления задней грани неповоротного резца на плоскость резания, мм²;

T – время, мин (ч);

t – шаг резания, м;

T_1, T_2 – сопротивление перемещению гусениц, Н;

$T_{в.о.}$ – суммарное время выполнения вспомогательных операций при работе комбайна, ч;

T_3 – реакция забоя на исполнительный орган в направлении, перпендикулярном направлению подачи комбайна, Н;

$T_{п.р.}$ – время производительной работы комбайна, ч;

$T_{п.т.}$ – время технологических перерывов, ч;

$T_{ПР}$ – тяговое усилие от прицепного устройства, Н;

$T_{р.а.}$ – время ремонтных работ, вызванных аварийными отказами оборудования, ч;

$T_{р.п.}$ – время плановых ремонтов, ч;

$t_{ср}$ – средний шаг резания, м;

$T_{э.к.}$ – время эксплуатации комбайна на руднике, ч;

$T_э$ – заданный период времени эксплуатации комбайна, на котором осуществляется оценка эффективности работы выемочной машины, ч

U_i – мгновенное значение фазного напряжения, измеренное прибором в i -й момент времени, В;

$U_{эф}$ – эффективное значение фазного напряжения, В;

V_{max} – максимальная скорость подачи комбайна, м/мин (м/ч);

V_p – скорость движения резца, м/с;

$V_{зад}$ – заданная скорость подачи комбайна на забой, м/мин;

$V_{п}$ – скорость подачи комбайна на забой, м/мин;

$V_{факт}$ – фактическая (мгновенная) скорость подачи комбайна на забой, м/мин;

w – число витков в обмотке электродвигателя, шт;

$Z_{ио}$ – число резцов на исполнительном органе, шт;

Z_k – число резцов, находящихся в контакте с забоем, шт;

z – количество точек базы расчета отклонения активной мощности двигателя отбойного устройства;

α – коэффициент, учитывающий расход энергии на перемещение продуктов разрушения из призабойного пространства;

α_3 – угол заострения резца, град;

α_p – угол резания резца, град;

β – задний угол резца, град;

η – КПД трансмиссий приводов исполнительных органов комбайна;

η_{AV} – коэффициент взаимной корреляции сопротивляемости пласта резанию и скорости подачи комбайна на забой;

$\eta_{ио}$ – КПД исполнительного органа комбайна;

$\eta_{пм}$ – КПД гусеничных органов перемещения с гидравлическим приводом;

λ_T – коэффициент, учитывающий динамические свойства системы подачи комбайна;

μ_T – коэффициент трения руды;

ν – коэффициент Пуассона;

$\xi_{тр}$ – коэффициент, учитывающий динамические свойства трансмиссии и электропривода;

ρ – плотность в руды массиве, т/м³;

σ – предел прочности руды при одноосном сжатии, МПа;

σ_{Ap} – среднее квадратичное отклонение сопротивляемости калийной руды резанию, Н/м;

- σ_N – среднее квадратичное отклонение сигнала активной мощности, кВт;
- $\Delta N_{отб}$ – значение отклонения активной мощности двигателя отбойного устройства, относительно предшествующих значений при работе комбайна в установившемся режиме, кВт;
- $\Delta n_{пер}$ – шаг регулирования частоты переносного вращения планетарного исполнительного органа, мин⁻¹;
- ΔT – период расчета значений активных мощностей приводов;
- $\Delta V_{п}$ – шаг регулирования скорости подачи комбайна, м/мин (м/ч);
- $\Sigma N_{р.г.}$ – установленная мощность электродвигателей приводов режущих исполнительных органов и скребкового конвейера-перегрузателя комбайна, кВт;
- $\Sigma W_{ф.р.г.}$ – фактическое значение энергии, потреблённой приводами породоразрушающих и погрузочных органов комбайна в заданный период времени, кВт·ч;
- τ – интервал дискретизации функции аналогового сигнала по времени, с;
- φ – угол поворота резцового диска, рад;
- $\varphi_{вх.}$ – угол поворота резцового диска относительно вертикали при входе резца в контакт с забоем, рад;
- $\varphi_{вых.}$ – угол поворота резцового диска относительно вертикали при выходе резца из контакта с забоем, рад;
- ψ_0 – коэффициент вязкости руды, град;
- ψ_p – угол разворота резца относительно направления движения, град;
- $\omega_{п}$ – коэффициент сопротивления качению колёс бункера-перегрузателя;
- БП – бункер-перегрузатель;
- Φ – магнитный поток одного полюса двигателя, Вб;
- $\Phi_{з.р.}$ – материальные затраты, связанные с поддержанием исправного состояния добычной машины в расчетный период, руб.;
- ВЗТ – водозащитная толща;
- ВМКМС – Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей;

ИГД – Институт горного дела;

КМЗ – Копейский машиностроительный завод;

СЭУ – система электрогидравлического управления;

ШСВ – шахтный самоходный вагон;

ЯМЗ – Ясиноватский машиностроительный завод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акт о промышленных испытаниях опытных образцов проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» № 3, 7, 10 от 24.01.2002. – Соликамск: Сильвинит, 2002. – 5 с.
2. Андреев, В.П. Основы электропривода / В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 772 с.
3. Андреева, Л.И. Методология формирования технического сервиса горно-транспортного оборудования на угледобывающем предприятии: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук/ Л.И. Андреева. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2004. – 25 с.
4. Белов, В.Н. Добыча и переработка калийных солей / В.Н. Белов, А.В. Соколов. – Л.: Химия, 1971. – 319 с.
5. Борисов, Ю.М. Электротехника: учебник для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. / Ю.М. Борисов, Д.Н. Липатов, Ю.Н. Зорин – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 552 с.
6. Брусиловский, Д.В. Режущий инструмент отечественных и зарубежных калийных комбайнов/ Д.В. Брусиловский, Л.Н. Вировец, С.М. Ущеренко // Обзорная информация. Сер. Калийная промышленность. – М.: Изд-во НИИТЭХИМ, 1983. – 44 с.
7. Габов, В.В. Повышение эффективности отделения калийной руды от массива с использованием шахматной симметричной перекрестной схемы резания / В.В. Габов, Д.И. Шишлянников, Н.В. Чекмасов// Горное оборудование и электромеханика. – 2012. – № 11. – С. 41 – 44.
8. Габов, В.В. Прибор контроля режимов работы горных машин ИНМ-1 / В.В. Габов, Н.М. Третьяков, Ю.А. Модестов // Механизация горных работ на угольных шахтах: сб. науч. тр. – Тула: Изд-во ТПИ, 1984. – С. 59 – 63.
9. Гепотанов, В.Н. Выбор длительности хронометражных наблюдений при исследованиях надежности забойного оборудования/ В.Н. Гепотанов, Ю.Н. Алешин // Известия вузов. Горный журнал. – 1972. – Вып.7. – С. 31 – 35.

10. Горные машины и оборудование. Проходческо-очистной комбайн «Урал-10А». Ч.І. Устройство и принцип действия: метод. указания к лаб. работе/ сост.: В.В. Габов, Ю.В. Лыков, Е.С. Кузнецов, Н.В. Чекмасов, А.Я. Бурак, Д.И. Шишлянников; Санкт-Петербург. гос. горный ин-т (Техн. ун-т). – СПб, 2010. – 26 с.

11. Горные машины и оборудование. Проходческо-очистной комбайн «Урал-10А». Ч.ІІ. Гидросистема и гидрооборудование: метод. указания к лаб. работе/ сост. Д.И. Шишлянников, Н.В. Чекмасов, М.Г. Трифанов; Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – Пермь, 2013. – 18 с.

12. ГОСТ 21878-76. Случайные процессы и динамические системы. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 33 с.

13. ГОСТ 27.002–2009. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2011. – 28 с.

14. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике: Основные понятия. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.

15. Деветьев, В.З. Лабораторные и шахтные исследования по разрушению калийных пород Верхнекамского месторождения резцовым инструментом/ В.З. Деветьев, А.Н. Трегубов, Д.М. Светличный // Научные труды ПермНИУИ. – 1965. – Сб. 8.– С. 16-21.

16. Деветьев, В.З. Шахтные исследования по определению показателя буримости калийных солей/ В.З. Деветьев, А.Н. Трегубов, Д.М. Светличный // Научные труды ПермНИУИ. – 1964. – Сб. 7. – С. 23-29.

17. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1980. – 611 с.

18. Докукин, А.В. Выбор параметров выемочных машин. Научно-методические основы / А.В. Докукин, А.Г. Фролов, Е.З. Позин. – М.: Наука, 1976. – 144 с.

19. Докукин, А.В. Динамические процессы горных машин / А.В. Докукин, Ю.Д. Красильников, З.Я. Хургин. – М.: Наука, 1972. – 150 с.
20. Долгов, В.Л. Совершенствование плоско-планетарных исполнительных органов проходческих комбайнов/ В.Л. Долгов // Горная электромеханика и механизация горных работ. – 1969. – Вып. 6. – С. 61–64.
21. Ещин, Е.К. Теория предельных режимов работы горных машин / Е.К. Ещин. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1995. – 232 с.
22. Загвоздкин, И.В. Обеспечение безопасности и безаварийной работы комбайновых комплексов на рудниках ОАО «Уралкалий» / И.В. Загвоздкин, Г.П. Лесов, Д.М. Янович // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 9. – С. 46–49.
23. Залманзон, Л.А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях /Л.А. Залманзон. – М.: Наука, 1989. – 496 с.
24. Земсков, А.Н. Природные газы калийных месторождений и меры борьбы с ними / А.Н. Земсков, П.И. Кондрашев, Л.Г. Травникова – Пермь: Изд. дом «Типография купца Тарасова», 2008. – 414 с.
25. Зильбершмидт, В.Г. Разрушение соляных пород / В.Г. Зильбершмидт, В.В. Зильбершмидт, О.Б. Наймарк. – М.: Наука, 1992. – 144 с.
26. Иванов, С.Л. Повышение ресурса трансмиссий горных машин на основе оценки энергонагруженности их элементов / С.Л. Иванов. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. горного ин-та., 1999. – 92 с.
27. Измеритель концентрации газов ИКГ-9. Руководство по эксплуатации. – СПб.: Галус, 2005. – 37 с.
28. Изучение режимов разрушения соляных пород и разработка параметров добычных машин для Верхнекамских калийных рудников: отчёт / руковод. Д.М. Светличный; № ИС-27, ПермНИУИ. – Пермь, 1965. – 372 с.
29. Исследование нагруженности и возможности прогнозирования энергоресурса приводов исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» /

Г.Д. Трифанов, А.А. Князев, Н.В. Чекмасов, Д.И. Шишлянников // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 2. – С. 41–44.

30. Исследование нагруженности приводов шахтных самоходных вагонов 5BC-15М и BC-30 /Н.В. Чекмасов, Д.И. Шишлянников, М.Г. Трифанов, В.А. Романов, М.А. Васильева // Известия вузов. Горный журнал. – 2015. – №3.– С. 143–149.

31. Исследование основных закономерностей резания и скола соляных пород на калийных рудниках: отчёт/ руковод. А.В. Соболев; №52-62; ВНИИГ. – Л.,1967. – 219 с.

32. Исследование основных закономерностей резания калийных солей: отчёт. Ч.1/ руковод. И.Г. Шмакин; №72-31. – Тула: Изд-во ТПИ, 1973. – 126 с.

33. Исследование пород Верхнекамского месторождения на одноосное сжатие, контактную прочность и абразивность / Д.М. Светличный, В.З. Деветьев, А.И. Уразова, Л.С. Шутов // Научные труды ПермНИУИ. – 1964. – №7. – С. 37–44.

34. Исследование привода экспериментального комбайна «Урал-Ротор»: отчет о НИР/ руковод. Л.И. Старков; Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1990.

35. Исследование энергоёмкости и эффективности процесса разрушения калийных руд модернизированными рабочими органами: отчёт о НИР / руковод. Н.В. Чекмасов; ООО «РКЦ». – Пермь, 2003. – 36 с.

36. К вопросу оценки ресурса элементов трансмиссии горных машин / А.А. Артемьев, В.С. Потапенко, С.Л. Иванов, Э.А. Кремчеев, А.А. Поддубная, А.С. Фокин // Горные машины и электромеханика. – 2007. – №9. – С. 31–35.

37. Кабиев, С.К. Оптимизация параметров комбайнов для добычи калийных руд / С.К. Кабиев. – М.: Недра, 1992. – 239 с.

38. Кантор, Э.Л. Вероятностный анализ нагрузок очистных комбайнов / Э.Л. Кантор // Записки Ленинград. горного ин-та. – 1983. – Т.97. – С. 95–100.
39. Коломийцев, М.Д. Эксплуатация горных машин и автоматизированных комплексов: учеб. пособие / М.Д. Коломийцев. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1988. – 96 с.
40. Комбайн проходческо-очистной «Урал-20Р»: технические условия ТУ 3142-024-00165623. – 2002. – 21 с.
41. Комбайн проходческо-очистной «Урал-20Р»: руководство по эксплуатации/ ОАО «КМЗ». – Копейск, 2013. – 273 с.
42. Комбайн проходческо-очистной «Урал-61»: руководство по эксплуатации/ ОАО «КМЗ». – Копейск, 2004. – 245 с.
43. Комбайны проходческо-очистные для добычи калийных руд. Выбор показателей назначения и расчет параметров разрушения горных пород. Отраслевая методика/ ВНИИГ. – Л., 1986. – 54 с.
44. Крапивин, М.Г. Горные инструменты / М.Г. Крапивин, И.Я. Раков, Н.И. Сысоев. – М.: Недра, 1990. – 256 с.
45. Красников, Ю.Д. Анализ теоретической производительности очистного комбайна при добыче сильвинита / Ю.Д. Красников, Т.П. Щерба // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 8. – С. 34–37.
46. Красников, Ю.Д. Повышение надёжности горных выемочных машин / Ю.Д. Красников, С.В. Солод, Х.И. Хазанов. – М.: Недра, 1989. – 215 с.
47. Лаптев, Б.В. Предотвращение газодинамических явлений на калийных рудниках / Б.В. Лаптев. – М.: Недра, 1974. – 138 с.
48. Малевич, Н.А. Горнопроходческие машины и комплексы: учебник для вузов / под ред. В.А. Бреннера.– 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1980. – 384 с.

49. Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.А. Борисов, В.В. Федорищев, Д.В. Грищенко – СПб.: НОУ «Севзапучцентр», 2012. – 68 с.

50. Методика проведения измерений режимов работы двигателей комбайнов/ сост. Н.В. Чекмасов, М.Г. Трифанов; ООО «РКЦ». – Пермь, 2001. – 12 с.

51. Методическое руководство по ведению горных работ на рудниках ОАО «Сильвинит» / ОАО «Галургия». – Новосибирск: Наука, 2011. – 487 с.

52. Методы оценки технического состояния и ресурса механических трансмиссий проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р» /Н.В. Чекмасов, М.Г. Трифанов, Д.И. Шишлянников, С.Л. Иванов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 4. – С. 272–278.

53. Миничев В. И. Угледобывающие комбайны. Конструирование и расчет. – М.: Машиностроение, 1976. – 248 с.

54. Модернизация рабочих органов проходческо-очистных комбайнов с целью снижения энергоемкости разрушения и выхода мелких классов руды: отчет / руковод. Г.Д. Трифанов; ООО «РКЦ». – Пермь, 2005. – 41 с.

55. Монтгомери, Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д.К. Монтгомери. – Л.: Судостроение, 1980. – 381 с.

56. О результатах проведения измерений энергоемкости резания на комбайнах типа «Урал»: отчет/ руковод. Г.Д. Трифанов; ООО «РКЦ». – Пермь, 2001. – 47 с.

57. Обоснование технических предложений по повышению эффективности комбайна «Урал-20Р» при разработке калийных пластов «АБ», «В» и «Красный П»: отчет/ руковод. Г.Д. Трифанов; ООО «РКЦ». – Пермь, 2008. – 58 с.

58. Особенности расчета и увеличение производительности скребковых конвейеров проходческо-очистных комбайнов / Н.В. Чекмасов, А.Н. Чистяков, М.А. Мальчер, М.Г. Трифанов, В.В. Лаук // Горное оборудование и электромеханика. – 2006. – № 7. – С. 8-10.

59. ОСТ 12.44.258-84. Комбайны очистные. Выбор параметров и расчёт сил резания и подачи на исполнительных органах. Методика/ Мин-во угольного машиностроения. – М., 1986. – 108 с.

60. Отчёт о результатах измерений мощности, потребляемой двигателями комбайна «Урал-20Р», зав. № 10/ руковод. Н.В. Чекмасов; ООО РКЦ. – Пермь, 2001.

61. Оценка остаточного ресурса крупномодульных зубчатых колес карьерных экскаваторов / С.Л. Иванов, И.Е. Звонарев, Д.И. Шишлянников, А.Я. Бурак, В.М. Николаев // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 11. – С. 28–33.

62. Панферов, А.И. Применение *MathCAD* в инженерных расчетах: учеб. пособие / А.И. Панферов, А.В. Лопарев, В.К. Понамарев. – СПб: Изд-во СПбГУАП, 2004. – 88 с.

63. Пат. RU 2066757C1МПК Е 21 С35/24. Способ автоматического управления скоростью подачи угольных комбайнов и устройство для его осуществления / Я.П. Гринберг, В.С. Соловьев. – № 93025794/03; заявл. 28.04.1993; опубл. 20.09.1996. Бюл. № 8.

64. Пат. RU2170820 C2 МПК Е 21 С35/24. Способ автоматического регулирования нагрузки привода резания угольных комбайнов / Я.П. Гринберг, В.С. Соловьев, В.В. Рудаков. № 99121117/03; заявл. 06.10.1999; опубл. 20.07.2001., Бюл. № 9.

65. Пат. RU2618630 C1 МПК Е 21 С35/24. Способ управления горным комбайном с планетарно-дисковым исполнительным органом / Н.В. Чекмасов, Д.И. Шишлянников, М.Г. Трифанов, А.С. Асонов. № 2016110648; заявл. 22.03.2016; опубл. 05.05.2017. Бюл. № 13.

66. Пат. *SU* 1458571 МПК Е 21 С41/04. Способ текущего прогноза выбросоопасных зон массива горных пород / Б.В. Лаптев, М.М. Бей – № 4141628/22-03; заявл. 03.11.1986; опубл. 15.02.1989. Бюл. № 6.

67. Пат. РФ № 2319835. Комбайн проходческо-очистной / Ю. П. Волчок, М.А. Мальчер, С.П. Морозов [и др.]. № 2006130585/03; заявл. 24.08.2006; опубл. 20.03.2008. Бюл. № 8. – 8 с.

68. Пилотная диагностика состояния трансмиссий горных машин по параметрам питания электропривода / С.Л. Иванов, М.А. Семенов, А.С. Иванов, А.А. Поддубная, А.С. Фокин // Записки Горного института. – Т. 178: Проблемы горно-транспортных систем и электромеханики. – СПб., 2008. – С.159–161.

69. Пинский, В.Л. Развитие техники и технологии добычи калийных руд в России/ В.Л. Пинский // Известия вузов. Горный журнал. – 2007. – №8. – С. 13–17.

70. Повышение эффективности эксплуатации проходческо-очистных комбайнов калийных рудников на основе анализа записей регистраторов параметров / Д.И. Шишлянников, Н.В. Чекмасов, М.Г. Трифанов, В.В. Габов, С.Л. Иванов, С.А. Асонов // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – № 4 (113). – С. 3–10.

71. Позин, Е.З. Измельчение углей при резании / Е.З. Позин, В.З. Меламед, С.М. Азовцева. – М.: Наука, 1977. – 139 с.

72. Позин, Е.З. Разрушение углей выемочными машинами / Е.З. Позин, В.З. Меламед, В.В. Тон. – М.: Недра, 1984. – 288 с.

73. Покровский, Н.М. Технология строительства подземных сооружений и шахт. Ч.1. – М.: Недра, 1977. – 400 с.

74. Полянина, Г.Д. Газы соляных пород и газопроявления в рудниках Верхнекамского месторождения/ Г.Д. Полянина // Известия вузов. Горный журнал. – 1995. – №6. – С. 145–150.

75. Программно-регистрирующий комплекс «Ватур»: паспорт/ сост. М.Г. Трифанов; ООО «РКЦ». – Пермь, 2015. – 8 с.
76. Проскуряков, Н.М. Управление газодинамическими процессами в пластах калийных руд / Н.М. Проскуряков, О.В. Ковалев, В.В. Мещеряков – М.: Недра, 1988. – С. 239.
77. Проскуряков, Н.М. Физико-механические свойства соляных пород / Н.М. Проскуряков, Р.С. Пермьяков, А.К. Черников. – Л.: Недра, 1973. – 271 с.
78. Протасов, Ю.И. Пылевыведение при разрушении горных пород / Ю.И. Протасов // Горный журнал. Изв. ВУЗов. – 1993. – №1. – С. 51-53.
79. Протодяконов, М.М. Методика рационального планирования экспериментов / М.М. Протодяконов, Р.И. Тедер. – М.: Наука, 1970. – 76 с.
80. Проходческий комбайн конструкции Якова Гуменника / А.С. Архангельский. – М.: Углетехиздат, 1956. – 57 с.
81. Проходческо-очистные комбайновые комплексы калийных рудников: учеб. пособие для машинистов горн. выемоч. машин. Ч.1/ сост., Б.В. Васильев [и др.]. – Пермь: ЗАО «НИПО» ПГТУ, 1998. – 275 с.
82. Проходческо-очистные комбайны «Урал» для добычи калийной руды и каменной соли / В.В. Семенов, М.А. Мальчер, В.П. Петров, С.П. Морозов // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 8. – С. 17–21.
83. Разработка мероприятий по увеличению крупных фракций каменной соли и проведение испытаний новой техники: отчет/ руковод. Г.Д. Трифанов; ООО «РКЦ». – Пермь, 2006. – 50 с.
84. Расчет эксплуатационных параметров проходческо-очистных комбайнов для добычи калийных руд: метод. указ./ сост. Н.В. Чекмасов. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2003. – 31 с.

85. Режимы работы комбайнов для добычи калийных руд / В.А. Бреннер, И.С. Зильберт, В.А. Зыков, Д.М. Любошинский. – М.: Недра, 1978. – 216 с.
86. Резание угля / А.И. Берон, А.С. Казанский, Б.М. Лейбов, Е.З. Позин. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 439 с.
87. Результаты испытаний физико-механических свойств каменной соли: отчёт/ руковод. Ю.П. Ольховиков; УралВНИИГ. – Пермь, 1977. – 6 с.
88. Результаты сравнительных исследований исполнительных органов комбайнов «Мариятта-900А» и «Урал-20Р» / В.В. Семенов, И.Г. Шмакин, А.Б. Жабин, П.Н. Чеботарев // Горное оборудование и электромеханика. – 2012. – № 2. – С. 11–15.
89. Сажин, Р.А. Автоматизация технологических процессов горного производства: учеб. пособие / Р.А. Сажин. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2009. – 198 с.
90. Сальников, А.Ф. Виброакустическая диагностика технических объектов / А.Ф. Сальников. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 247 с.
91. Сафохин, М.С. Горные машины и оборудование: учебник для вузов / М.С. Сафохин. – М.: Недра, 1995. – 463 с.
92. Светличный, Д.М. Технико-экономическое обоснование применения выемочных машин на Верхнекамских калийных рудниках/ Д.М. Светличный, В.З. Деветьев, Л.А. Леденцов // Научные труды ПермНИУИ. – 1965. – № 8. – С. 63–71.
93. Семенов, В.В. Обоснование и выбор параметров исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов нового поколения для добычи калийных руд: дис... канд. техн. наук: спец. 05.05.06./ Семенов Виктор Владимирович. – Тула, 2011. – 219 с.
94. Система газового контроля и передачи данных СГКПД: рук-во по экспл. – Томск: Ильма, 2013. – 61 с.

95. Совершенствование исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов «Урал» / Н.В. Чекмасов, В.В. Буевич, Д.И. Шишлянников, В.В. Габов // Известия вузов. Горный журнал. – 2016. – № 4. – С. 52–55.
96. Соловьев, В.А. Элементарные методы обработки результатов измерений / В.А. Соловьев, В.Е. Яхонтова. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1977. – 72 с.
97. Солод, В.И. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов. / В.И. Солод, В.Н. Гетопанов, В.М. Рачек. – М.: Недра, 1982. – 350 с.
98. Старков, Л.И. Исследование схемы перекрёстного резания/ Л.И. Старков, Н.А. Харламова // Известия вузов. Горный журнал. – 1997. – №7-8. – С. 74–76.
99. Старков, Л.И. Развитие механизированной разработки калийных руд / Л.И. Старков, А.Н. Земсков, П.И. Кондрашев. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2007. – 522 с.
100. Старовойтов, Ю.В. Повышение надежности и эффективности использования высоконагруженного оборудования очистных комплексов на калийных рудниках: дис.... д-ра техн. наук / Старовойтов Юрий Вячеславович. – Солигорск, 2014. – 288 с.
101. Стационарный датчик СД-1: рук-во по экспл. – М.: Аэротест, 2010. – 15 с.
102. Стенд для оценки технического состояния трансмиссии по параметрам питания электропривода / Д.И. Шишлянников, М.Г. Трифанов, В.А. Романов, С.Л. Иванов, С.А. Асонов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 4. – С. 227–233.
103. Сумканов, А.И. Разработка методики оценки состояния оборудования очистных комплексов горных предприятий / А.И. Сумканов,

В.В. Зотов, С.С. Кубрин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012, – № 10. – С.260–264.

104. Технические предложения по совершенствованию комбайнов типа «Урал-КС»/ руковод. Л.И. Старков; Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1986. –18 с.

105. Трифанов, М.Г. Контроль параметров работы и оценка технического состояния приводов проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» / М.Г. Трифанов // Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении: сб. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. Т II; Санкт-Петербург, 16-17 апреля 2014. – СПб., 2014. – С. 82-85.

106. Уголкин, С.И. Организация технического сервиса горно-шахтного оборудования производства ОАО «КМЗ» / С.И. Уголкин, В.П. Петров // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 8. – С. 50–53.

107. Усовершенствование применяемых и разработка новых систем разработки на Солигорском калийном руднике на базе новой техники: отчёт/ руковод. Д.В. Брусиловский; №50СТ-63; ВНИИГ. – Л., 1964. – 28 с.

108. Харламова, Н.А. Влияние глубины и шага резания на энергоёмкость разрушения и выход некондиционной мелкой фракции/ Н.А. Харламова, В.Г. Зильбершмидт, М.Ф. Леонович // Известия вузов. Горный журнал. – 1997. – №1-2. – С. 8–12.

109. Харламова, Н.А. Исследование механизма разрушения соляных горных пород резцовым инструментом: дис... канд. техн. наук, 05.15.11 / Харламова Нэлли Артемьевна. – Пермь, 1998. – 173 с.

110. Чекмасов Н. В. Обоснование направлений совершенствования проходческо-очистных комбайнов / Н. В. Чекмасов, В. А. Немцев // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2005. – № 6. – С. 238–239.

111. Чекмасов Н.В. Определение рациональных параметров шнекового грузчика / Н.В. Чекмасов, Д.А. Сидякин // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – № 7. – С. 52–53.

112. Чекмасов, Н.В. Оценка эффективности процесса разрушения калийного массива резцами исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р» / Н.В. Чекмасов, Д.И. Шишлянников, М.Г. Трифанов // Известия вузов. Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 103–107.

113. Чекмасов, Н.В. Повышение эффективности погрузки калийной руды при работе проходческо-очистных комбайнов / Н.В. Чекмасов, Д.И. Шишлянников, В.М. Демин // Известия вузов. Горный журнал. – 2016. – № 6. – С. 4–10.

114. Шибанов, Д.А. Комплексная оценка факторов, определяющих наработку экскаваторов ЭКГ-18Р/20К, для планирования технического обслуживания и ремонтов: автореф. дис. ... канд. техн. наук./ Шибанов Даниил Александрович. – СПб.: НМСУ «Горный», 2015. – 21 с.

115. Шишлянников, Д.И. Использование регистраторов параметров работы проходческо-очистных комбайнов при прогнозировании газодинамических явлений на калийных рудниках / Д.И. Шишлянников // Известия Урал. гос. горного ун-та. – 2016. – № 1 (41). – С. 106–111.

116. Шишлянников, Д.И. Повышение эффективности отделения калийной руды от массива резцами добычных комбайнов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Шишлянников Дмитрий Игоревич. – СПб., 2012. – 20 с.

117. Шмарьян, Е.М. Исследование и разработка аппаратуры для непрерывной регистрации режимов эксплуатации горной техники / Е.М. Шмарьян, А.И. Лепихов, Ю.А. Гавинский // Труды ИГД им. А.А. Скочинского. – 1979. – №172. – С. 48 - 54.

118. Яризов, А.Д. Основы автоматики. Линейные непрерывные системы автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / А.Д. Яризов. – М.: Изд-во МГИ, 1971. – С. 78.

119. Stax, R. SalzohneGrenzen: Die chilenische SPL globalisiert den Geschäftsbereich Salts der K+S Gruppe / Reiner Stax, Manfred Koopmann// Kali und Steinsalz. – 2009. – Heft 1. – P. 22–31.

120. Substantiation of the rational method to control the operating and technical-condition parameters of a heading-and-winning machine for potash mines / D.I. Shishlyannikov, N.V. Chekmasov, M.G. Trifanov, S.L. Ivanov, I.E. Zvonarev // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2015. T. – 44. – № 3. – P. 283–287.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Расчет удельных энергозатрат разрушения калийного массива исполнительными органами комбайна Урал 20Р

Исходные данные

Условия работы комбайна

$$A_p := 450000 \quad \frac{\text{Н}}{\text{м}} \quad \text{сопротивляемость руды резанию}$$

$$\gamma := 2.032 \quad \frac{\text{т}}{\text{м}^3} \quad \text{плотность руды в массиве}$$

$$S := 15.5 \quad \text{м}^2 \quad \text{площадь сечения выработки}$$

$$Q_k := 8 \quad \frac{\text{т}}{\text{м}} \quad \text{производительность комбайна}$$

Резцы

$$b_p := 0.014 \quad \text{м} \quad \text{средняя расчетная ширина режущей кромки}$$

$$a_z := 60 \quad \text{град} \quad \text{угол заострения резца}$$

$$a_{\text{уст}} := 37.5 \quad \text{град} \quad \text{угол установки резца}$$

$$\phi_{\text{уст}} := 16 \quad \text{град} \quad \text{угол разворота резца относительно плоскости диска}$$

Планетарно-дисковый исполнительный орган

$$l_{\text{но}} := 2.4 \quad \text{м} \quad \text{- расстояние между центрами исполнительных органов}$$

$$D_{\text{но}} := 3.1 \quad \text{м} \quad \text{- диаметр исполнительного органа}$$

$$z_d := 2 \quad \text{шт} \quad \text{- число дисков на исполнительном органе}$$

$$D_d := 1.28 \quad \text{м} \quad \text{- диаметр диска по резцам}$$

$$z_{\text{но}} := 17 \quad \text{шт} \quad \text{- количество резцов на резцовом диске}$$

$$D_{\text{заб}} := 0.46 \quad \text{м} \quad \text{- диаметр забурника}$$

$$z_{\text{заб}} := 6 \quad \text{шт} \quad \text{- количество резцов на забурнике}$$

$$m_{\text{заб}} := 2 \quad \text{шт} \quad \text{- количество резцов в линии реза на забурнике}$$

$$n_{\text{отп}} := 40.7 \quad \frac{1}{\text{мин}} \quad \text{- частота вращения резцовых дисков}$$

$$n_{\text{пер}} := 4.2 \quad \frac{1}{\text{мин}} \quad \text{- частота вращения исполнительного органа}$$

Бермовые фрезы

$$D_{\text{ш}} := 0.75 \quad \text{м} \quad \text{- диаметр шнека по резцам}$$

$$n_{\text{ш}} := 40.5 \quad \frac{1}{\text{мин}} \quad \text{частота вращения шнека}$$

$$m_{\text{ш}} := 1 \quad \text{количество резцов в линии резания}$$

$$L_{\text{ш}} := 5.1 \quad \text{м} \quad \text{длина участка забоя, обрабатываемая шнеками и фрезами}$$

$$z_{\text{ш}} := 50 \quad \text{- количество резцов на шнеке}$$

$$D_{\text{ф}} := 1.3 \quad \text{м} \quad \text{диаметр фрезы по резцам}$$

$$B_{\text{ф}} := 0.58 \quad \text{м} \quad \text{ширина фрезы}$$

$z_{\phi} := 10$ общее количество резцов на фрезе

$n_{\phi} := 23.6 \frac{1}{\text{мин}}$ частота вращения фрезы

$m_{\phi} := 1$ количество резцов в линии резания

Отбойное устройство

$D_{\phi} := 0.6 \text{ м}$ - диаметр барабана по резцам

$n_{\phi} := 31.1 \frac{1}{\text{мин}}$ частота вращения барабана

$m_{\phi} := 1$ количество резцов в линии резания

$z_{\phi} := 51$ общее количество резцов на барабане

$l_{\phi} := 2.40 \text{ м}$ длина барабана

Общие данные

$\eta_p := 0.85$ КПД редуктора

$\eta_{ио} := 0.95$ КПД исполнительного органа

Определение сил резания на резцах дисков планетарного исполнительного органа

Скорость подачи комбайна, м/мин

$$V_{п} := \frac{Q_k}{S \cdot \gamma} = 0.254$$

Радиус водила, м

$$r_{в} := \frac{(D_{ио} - D_{д})}{2} = 0.91$$

Отношение частот относительного и переносного вращения

$$i := \frac{n_{отн}}{n_{пер}} = 9.69$$

Максимальная толщина стружки, м

$$h_{м} := \frac{V_{п}}{z_{д} \cdot n_{пер}} = 0.03$$

Угол установки резцов на диске, рад

$$a := \begin{pmatrix} 11.25 \cdot \frac{\pi}{180} \\ 32.75 \cdot \frac{\pi}{180} \\ 56.25 \cdot \frac{\pi}{180} \\ 78.75 \cdot \frac{\pi}{180} \\ 101.25 \cdot \frac{\pi}{180} \\ 123.75 \cdot \frac{\pi}{180} \\ 146.25 \cdot \frac{\pi}{180} \\ 168.75 \cdot \frac{\pi}{180} \end{pmatrix}$$

Толщина стружки на резце, м

$$h := \frac{V_n \cdot \sin(a)}{z_d \cdot n_{\text{пер}}} = \begin{pmatrix} 5.899 \times 10^{-3} \\ 0.016 \\ 0.025 \\ 0.03 \\ 0.03 \\ 0.025 \\ 0.017 \\ 5.899 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Шаг резания резца, м

$$t := \frac{2 \cdot \pi \cdot \left(r_b - \frac{D_d}{2} \cdot \cos(a) \right) \cdot n_{\text{пер}}}{n_{\text{отп}} \cdot z_{\text{ю}}} = \begin{pmatrix} 0.011 \\ 0.014 \\ 0.021 \\ 0.03 \\ 0.039 \\ 0.048 \\ 0.055 \\ 0.059 \end{pmatrix}$$

Коэффициент степени блокированности реза K_{th}

$$K_{th} := \frac{t}{h}$$

$$k_{th_j} := \begin{cases} \text{for } j \in 1..8 \\ k_{th_j} \leftarrow \begin{cases} \frac{\sqrt{68.1 - (K_{th_j} - 7.2)^2} - 3.25}{5} & \text{if } K_{th_j} \leq 7.2 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \\ k_{th_j} \end{cases}$$

Коэффициент ширины режущей кромки

$$k_b := 0.16 + 42 \cdot b_p = 0.748$$

Коэффициент угла резания

$$k_{\alpha} := 0.55 + 0.009 \left(a_{\text{уст}} + \frac{a_3}{2} \right) = 1.157$$

Коэффициент затупления резца

Площадь затупления задней грани неповоротного резца, мм²

$$S_{\text{зат}} := 20$$

$$k_{\text{зат}} := 1 + 0.01 \cdot S_{\text{зат}} = 1.2$$

Коэффициент формы передней грани резца

$$k_{\phi} := 1$$

Коэффициент ориентации резца

Линейной скоростью переносного движения резца, м/с

$$V_{\text{пр}} := \left(r_b - \frac{D_d}{2} \cdot \cos(\alpha) \right) \cdot \frac{n_{\text{пер}}}{9.549} = \begin{pmatrix} 0.124 \\ 0.164 \\ 0.244 \\ 0.345 \\ 0.455 \\ 0.557 \\ 0.634 \\ 0.676 \end{pmatrix}$$

Линейная скорость относительного движения резца, м/с

$$V_{\text{отн}} := \frac{D_d}{2} \cdot \frac{n_{\text{отн}}}{9.549} = 2.728$$

Угол отклонения вектора скорости движения резца относительно плоскости диска, рад

$$\psi_k := \text{atan} \left(\frac{V_{\text{пр}}}{V_{\text{отн}}} \right) = \begin{pmatrix} 0.045 \\ 0.06 \\ 0.089 \\ 0.126 \\ 0.165 \\ 0.201 \\ 0.228 \\ 0.243 \end{pmatrix}$$

Угол разворота резца, рад

$$\psi := \frac{\pi}{180} \cdot \phi_{\text{уст}} - \psi_k = \begin{pmatrix} 0.234 \\ 0.219 \\ 0.19 \\ 0.153 \\ 0.114 \\ 0.078 \\ 0.051 \\ 0.036 \end{pmatrix}$$

Коэффициент ориентации резца

$$k_{\psi} := \left(1 - 0.022 \cdot \psi \cdot \frac{180}{\pi} \right) = \begin{pmatrix} 0.705 \\ 0.723 \\ 0.76 \\ 0.807 \\ 0.856 \\ 0.902 \\ 0.936 \\ 0.954 \end{pmatrix}$$

Сила резания на резце, Н:

$$P_z := A_p \cdot \overrightarrow{(h \cdot k_{th} \cdot k_{\psi})} \cdot k_b \cdot k_{\alpha} \cdot k_{зат} \cdot k_{\phi} = \begin{pmatrix} 1.172 \times 10^3 \\ 2.258 \times 10^3 \\ 3.593 \times 10^3 \\ 4.938 \times 10^3 \\ 6.059 \times 10^3 \\ 6.555 \times 10^3 \\ 5.894 \times 10^3 \\ 2.632 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Расчет мощности, затрачиваемой на резание диском планетарного исполнительного органа

Скорость резания резца, м/с

$$V_{рез} := \sqrt{V_{пр}^2 + V_{отн}^2} = \begin{pmatrix} 2.731 \\ 2.733 \\ 2.739 \\ 2.75 \\ 2.766 \\ 2.784 \\ 2.801 \\ 2.81 \end{pmatrix}$$

Отношение линейных скоростей движения резца

$$K_v := \frac{V_{пр}}{V_{отн}}$$

Мощность, затрачиваемая на резание резцом, кВт

$$N_{рез} := \frac{\overrightarrow{(P_z \cdot V_{рез})}}{1000 \cdot \eta_p \cdot \eta_{но}} = \begin{pmatrix} 3.963 \\ 7.642 \\ 12.185 \\ 16.814 \\ 20.751 \\ 22.599 \\ 20.442 \\ 9.161 \end{pmatrix}$$

$$N_{рез.от} := \overrightarrow{(N_{рез} \cdot (1 - K_v))}$$

$$N_{рез.п} := \overrightarrow{(N_{рез} \cdot K_v)}$$

Суммарное мощность, расходуемая на резание резцами одного диска, с учетом влияния второго исполнительного органа, кВт

$$N_{диск} := \left(1 - \frac{1}{\pi} \arccos\left(\frac{l_{но}}{D_{но}}\right) \right) \cdot \sum N_{рез} + \frac{1}{3 \cdot \pi} \cdot \arccos\left(\frac{l_{но}}{D_{но}}\right) \left(\sum_{n=5}^1 N_{рез_n} + \sum_{n=6}^1 N_{рез_n} + \sum_{n=7}^1 N_{рез_n} \right)$$

$$N_{от} := \left(1 - \frac{1}{\pi} \arccos\left(\frac{l_{но}}{D_{но}}\right) \right) \cdot \sum N_{рез.от} + \frac{1}{3 \cdot \pi} \cdot \arccos\left(\frac{l_{но}}{D_{но}}\right) \left(\sum_{n=5}^1 N_{рез.от_n} + \sum_{n=6}^1 N_{рез.от_n} + \sum_{n=7}^1 N_{рез.от_n} \right)$$

$$N_{п} := \left(1 - \frac{1}{\pi} \arccos\left(\frac{l_{но}}{D_{но}}\right) \right) \cdot \sum N_{рез.п} + \frac{1}{3 \cdot \pi} \cdot \arccos\left(\frac{l_{но}}{D_{но}}\right) \left(\sum_{n=5}^1 N_{рез.п_n} + \sum_{n=6}^1 N_{рез.п_n} + \sum_{n=7}^1 N_{рез.п_n} \right)$$

Определение сил резания на резцах зубурника планетарного исполнительного органа

Шаг резания, м

$$t_{заб} := \frac{D_{заб}}{2 \left(\frac{Z_{заб}}{2} + 1 \right)} = 0.058$$

Толщина стружки, м

$$h_{заб} := \frac{V_{II}}{n_{пер} \cdot m_{заб}} = 0.03$$

Коэффициент блокированности реза

$$\frac{t_{заб}}{h_{заб}} = 1.902$$

Коэффициент степени блокированности реза K_{th}

$$k_{th,заб} := \frac{\sqrt{\left[68.1 - \left(\frac{t_{заб}}{h_{заб}} - 7.2 \right)^2 \right]} - 3.25}{5} = 0.615$$

Коэффициент ширины режущей кромки

$$k_b := 0.16 + 42 \cdot b_p = 0.748$$

Коэффициент угла резания

$$k_{\alpha} := 0.55 + 0.009 \left(a_{вет} + \frac{a_s}{2} \right) = 1.157$$

Коэффициент затупления резца

$$S_{зат} := 20 \text{ мм}^2$$

$$k_{зат} := 1 + 0.01 \cdot S_{зат} = 1.2$$

Коэффициент формы передней грани резца

$$k_f := 1$$

Коэффициент ориентации резца

$$k_{\psi} := 1$$

Сила резания на резце зубурника, Н

$$P_{Z,заб} := A_p \cdot h_{заб} \cdot k_{th,заб} \cdot k_b \cdot k_{\alpha} \cdot k_{зат} \cdot k_f \cdot k_{\psi} = 8.699 \times 10^3$$

Расчет мощности, затрачиваемой на резание зубурником планетарного исполнительного органа

Номер линии резания зубурника

$$x_{заб} := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Радиус резцов зубурника, м

$$r_{p,заб} := t_{заб} \cdot x_{заб} = \begin{pmatrix} 0.058 \\ 0.115 \\ 0.173 \end{pmatrix}$$

Скорость резания резцов на забурнике, м/с

$$V_{\text{заб}} := \frac{2\pi \cdot r_{\text{р.заб}} \cdot n_{\text{пер}}}{60} = \begin{pmatrix} 0.025 \\ 0.051 \\ 0.076 \end{pmatrix}$$

Мощность на резах забурника, кВт

$$N_{\text{рез.заб}} := \frac{z_{\text{заб}} \cdot P_{\text{з.заб}} \cdot V_{\text{заб}}}{3 \cdot 1000 \cdot \eta_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{ио}}} = \begin{pmatrix} 0.545 \\ 1.09 \\ 1.635 \end{pmatrix}$$

Суммарная мощность забурника, кВт

$$N_{\text{заб}} := \sum N_{\text{рез.заб}} = 3.269$$

Мощност, расходуемая на транспортировку отбитой массы планетарными исполнительными оранами, кВт

$$N_{\text{погр}} := 60 \cdot V_{\text{п}} \cdot 2 = 30.48$$

Расчет сил резания шнековым ИО

Скорость резания, м/с

$$V_{\text{рш}} := \frac{\pi \cdot D_{\text{ш}} \cdot n_{\text{ш}}}{60} = 1.59$$

Максимальная толщина стружки, м

$$h_{\text{мш}} := \frac{\pi \cdot D_{\text{ш}} \cdot V_{\text{ш}}}{60 \cdot V_{\text{рш}} \cdot m_{\text{ш}}} = 6.272 \times 10^{-3}$$

Длина одного шнека, м

$$l_{\text{ш}} := \frac{L_{\text{ш}}}{2} - B_{\text{ф}} = 1.97$$

Площади обработки массива шнеками, м²

$$S_1 := \frac{l_{\text{ио}}}{4} \cdot \left[\frac{D_{\text{ио}}}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_{\text{ио}}}{2}\right)^2 - \left(\frac{l_{\text{ио}}}{2}\right)^2} \right] = 0.341$$

$$S_2 := \frac{1}{2} \cdot \left(l_{\text{ш}} - \frac{l_{\text{ио}}}{2} \right) \cdot \left[\frac{D_{\text{ио}}}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_{\text{ио}}}{2}\right)^2 - \left(l_{\text{ш}} - \frac{l_{\text{ио}}}{2} \right)^2} \right] = 0.079$$

$$S_{\text{ш}} := S_1 + S_2 = 0.42$$

Средняя высота обработки массива шнеком, м

$$H_{\text{ш}} := \frac{S_{\text{ш}}}{l_{\text{ш}}} = 0.213$$

Толщина стружки шнека, м

$$h_{\text{ш}} := h_{\text{мш}} \cdot \frac{360 \cdot H_{\text{ш}}}{\pi \cdot D_{\text{ш}} \cdot \arccos\left(1 - \frac{2 \cdot H_{\text{ш}}}{D_{\text{ш}}}\right) \cdot \frac{180}{\pi}} = 3.171 \times 10^{-3}$$

Коэффициент блокированности реза

$$t_{ш} := \frac{l_{ш}}{z_{ш} - 1} = 0.04$$

$$\frac{t_{ш}}{h_{ш}} = 12.679 \quad \bullet > 7.2 \quad k_{t_{шш}} := 1$$

Коэффициент ширины режущей кромки

$$k_b := 0.16 + 42 \cdot b_p = 0.748$$

Коэффициент угла резания

$$k_{\alpha} := 0.55 + 0.009 \left(a_{\text{уст}} + \frac{a_3}{2} \right) = 1.157$$

Коэффициент затупления резца

$$S_{\text{зат}} := 20 \text{ мм}^2$$

$$k_{\text{зат}} := 1 + 0.01 \cdot S_{\text{зат}} = 1.2$$

Коэффициент формы передней грани резца

$$k_{\phi} := 1$$

Коэффициент ориентации резца

$$k_{\psi} := 1$$

Средние силы резания на неповоротном затупленном резце, Н

$$P_{z_{ш}} := A_p \cdot h_{ш} \cdot k_{t_{шш}} \cdot k_b \cdot k_{\alpha} \cdot k_{\text{зат}} \cdot k_{\phi} \cdot k_{\psi} = 1.483 \times 10^3$$

Расчет мощности, затрачиваемой на резание шнековым исполнительного органа

Количество резцов, одновременно участвующих в резании

$$z_{рш} := \frac{z_{ш} \cdot \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot H_{ш}}{D_{ш}} \right)}{2 \cdot \pi} = 8.952$$

$$N_{ш} := \frac{z_{рш} \cdot P_{z_{ш}} \cdot V_{рш}}{1000 \cdot \eta_p \cdot \eta_{ш}} = 26.141 \quad \text{кВт} \quad \text{мощность на отбойку шнеком}$$

$$N_{\text{погр}} := 21 \cdot V_{п} \cdot l_{ш} = 10.508 \quad \text{кВт} \quad \text{мощность на погрузку}$$

Расчет сил резания бермовой фрезы

Скорость резания фрезы, м/с

$$V_{рф} := \frac{\pi \cdot D_{ф} \cdot n_{ф}}{60} = 1.606$$

Максимальная толщина стружки, м

$$h_{мф} := \frac{\pi \cdot D_{ф} \cdot V_{п}}{60 \cdot V_{рф} \cdot m_{ф}} = 0.011$$

Средняя высота массива, обрабатываемого фрезой, м

$$H_{\phi} := \frac{D_{\text{но}} - \sqrt{\left(\frac{D_{\text{но}}}{2}\right)^2 - \left(\frac{L_{\text{ш}} - \frac{1_{\text{но}}}{2}\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{D_{\text{но}}}{2}\right)^2 - \left(\frac{1_{\text{ш}} - \frac{1_{\text{но}}}{2}\right)^2}}{2} = 0.497$$

Толщина стружки фрезы, м

$$h_{\phi} := h_{\text{мф}} \cdot \frac{2 \cdot H_{\phi}}{D_{\phi} \cdot \arccos\left(1 - \frac{2 \cdot H_{\phi}}{D_{\phi}}\right)} = 6.171 \times 10^{-3}$$

Шаг резанья фрезы, м

$$t_{\phi} := \frac{B_{\phi}}{z_{\phi} - 1} = 0.064$$

Коэффициент блокированности реза

$$\frac{t_{\phi}}{h_{\phi}} = 10.444 \quad \blacksquare > 7.2$$

$$k_{\text{т.л.ф}} := 1$$

Коэффициент ширины режущей кромки

$$k_b := 0.16 + 42 \cdot b_p = 0.748$$

Коэффициент угла резания

$$k_{\alpha} := 0.55 + 0.009 \left(a_{\text{уст}} + \frac{a_s}{2} \right) = 1.157$$

Коэффициент затупления резца

$$S_{\text{зат}} := 20 \text{ мм}^2$$

$$k_{\text{зат}} := 1 + 0.01 \cdot S_{\text{зат}} = 1.2$$

Коэффициент формы передней грани

$$k_{\phi} := 1$$

Коэффициент ориентации резца

$$k_{\psi} := 1$$

Средняя сила резания фрезы на резце фрезы, Н

$$P_{z\phi} := A_p \cdot h_{\phi} \cdot k_{\text{т.л.ф}} \cdot k_b \cdot k_{\alpha} \cdot k_{\text{зат}} \cdot k_{\phi} \cdot k_{\psi} = 2.885 \times 10^3$$

Расчет мощности, затрачиваемой на резание бермовой фрезой

Количество резцов, участвующих в резании

$$z_{\text{рф}} := \frac{z_{\phi} \cdot \arccos\left(1 - \frac{2 \cdot H_{\phi}}{D_{\phi}}\right)}{2 \cdot \pi} = 2.121$$

Мощность, затрачиваемая на резание одной фрезой, кВт

$$N_{\phi} := \frac{z_{\text{рф}} \cdot P_{z\phi} \cdot V_{\text{рф}}}{1000 \cdot \eta_p \cdot \eta_{\text{но}}} = 12.172$$

Общая мощность одного шнека, одной фрезой и погрузкой

$$N_{\text{бер}} := N_{\text{ш}} + N_{\text{погр}} + N_{\text{ф}} = 48.821 \quad \text{кВт}$$

Расчет сил резания отбойным устройством

Шаг резания, м

$$t_{\text{б}} := \frac{l_{\text{б}}}{z_{\text{б}} - 1} = 0.048$$

Площадь забоя, обрабатываемая барабаном, м²

$$S_{\text{б}} := \frac{l_{\text{но}}}{2} \cdot \left[\frac{D_{\text{но}}}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_{\text{но}}}{2}\right)^2 - \left(\frac{l_{\text{но}}}{2}\right)^2} \right] = 0.683$$

Средняя высота забоя, обрабатываемая барабаном, м

$$H_{\text{б}} := \frac{S_{\text{б}}}{l_{\text{б}}} = 0.284$$

толщина стружки барабана, м

$$h_{\text{б}} := h_{\text{мш}} \cdot \frac{2 \cdot H_{\text{б}}}{D_{\text{б}} \cdot \arccos\left(1 - \frac{2 \cdot H_{\text{б}}}{D_{\text{б}}}\right)} = 3.915 \times 10^{-3}$$

Коэффициент блокированности реза

$$\frac{t_{\text{б}}}{h_{\text{б}}} = 12.261$$

$$k_{\text{т.б}} := 1$$

Коэффициент ширины режущей кромки

$$k_{\text{б}} := 0.16 + 42 \cdot b_{\text{р}} = 0.748$$

Коэффициент угла резания

$$k_{\alpha} := 0.55 + 0.009 \left(a_{\text{уст}} + \frac{a_3}{2} \right) = 1.157$$

Коэффициент затупления резца

$$S_{\text{зат}} := 20 \quad \text{мм}^2$$

$$k_{\text{зат}} := 1 + 0.01 \cdot S_{\text{зат}} = 1.2$$

Коэффициент формы передней грани резца

$$k_{\text{ф}} := 1$$

Коэффициент ориентации резца

$$k_{\psi} := 1$$

Сила резания на резце барабана, Н

$$P_{\text{зб}} := A_{\text{р}} \cdot h_{\text{б}} \cdot k_{\text{т.б}} \cdot k_{\text{б}} \cdot k_{\alpha} \cdot k_{\text{зат}} \cdot k_{\text{ф}} \cdot k_{\psi} = 1.83 \times 10^3$$

Расчет мощности, затрачиваемой на резание отбойным устройством

Скорость резания резцов на барабане, м/с

$$V_{\text{рб}} := \frac{\pi \cdot D_{\text{б}} \cdot n_{\text{б}}}{60} = 0.977$$

Количество резцов, одновременно участвующих в резании

$$z_{p6} := \frac{z_6 \cdot \left(\arccos \left(1 - \frac{2 \cdot H_6}{D_6} \right) \right)}{2 \cdot \pi} = 12.329$$

Мощность на отбойку барабаном, кВт

$$N_6 := \frac{z_{p6} \cdot P_{z6} \cdot V_{p6}}{1000 \cdot \eta_p \cdot \eta_{ио}} = 27.306$$

Общая мощность режущих исполнительных органов комбайна, кВт

$$N_{общая} := N_6 + 4 \cdot N_{диск} + 2N_{заб} + N_{погр} + 2 \cdot N_{бер} = 569.756$$

Удельные энергозатарты на разрушение калийного массива исполнительными органами комбайна , кВт ч/т

$$H_w := \frac{N_{общая}}{Q_k \cdot 60} = 1.187$$

Таблица П 2.3 – Параметры подключения регистрирующего комплекса «Ватур»

Обследуемый узел	Резцовые диски 1	Резцовые диски 2	Переносное вращение	Бермовые фрезы 1	Бермовые фрезы 2	Отбойное устройство	Напряжение, ввод № 1	Напряжение, ввод № 2	Ходовая часть
Тип датчика									
Номер канала									
Частота опроса датчика, Гц									

Таблица П 2.4 – Энергетические и технические показатели работы комбайна

№ п/п	Время начала записи	t , с	L , м	V , м/час	N_1 , кВт	N_2 , кВт	N_3 , кВт	N_4 , кВт	N_5 , кВт	N_6 , кВт	Q_k , т/мин	H_w , кВт·ч/м ³
1												
2												

t – длительность записи, с; L – длина пройденного пути, м; V – скорость подачи комбайна на забой, м/час; N_1 – N_6 – средние значения мощностей, потребляемых двигателями комбайна (индекс соответствует каналу измерения), кВт; H_w – удельные энергозатраты при разрушении калийного массива резами исполнительных органов комбайна, кВт·ч/м³.

Таблица П 2.5 – Энергетические показатели работы электродвигателей комбайна

Время начала записи		Длительность записи						
Канал	Двигатели	I_{cp} , А	U_{cp} , В	N_{cp} , кВт	N_{max} , кВт	σ_p	$\cos\varphi$	H_w , кВт·ч/м ³
1	Резцовые диски 1							
2	Резцовые диски 2							
3	Переносное вращение							
4	Бермовые фрезы 1							
5	Бермовые фрезы 2							
6	Отбойное устройство							

I_{cp} – ток, потребляемый соответствующим двигателем, А; U_{cp} – напряжение в питающей сети, В; N_{cp} – средняя мощность, потребляемая соответствующим двигателем, кВт; N_{max} – максимальное значение мощности, потребляемой соответствующим приводом, кВт; σ_p – среднее квадратичное отклонение мощности, потребляемой соответствующим двигателем; $\cos\varphi$ – коэффициент мощности соответствующего двигателя

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица П 3.1 – Основные технические характеристики программно-регистрающего комплекса «Ватур»

Напряжение питания	100-240 В, 50 Гц.
Количество каналов измерения напряжения	2
Количество каналов измерения силы тока	6
Количество каналов измерения линейного перемещения	1
Количество каналов измерения отклонения от вертикали	1
Частота опроса первичных преобразователей	400Гц...10 кГц
Гальваническая развязка измерительных входов тока и напряжения.	1500 В

Таблица П 3.2 – Погрешности измерительных каналов программно-регистрающего комплекса «Ватур»

Наименование измерительного канала	Диапазон измерения	Первичный преобразователь			Вычислительный блок «Ватур»			Погрешность ИК
		Тип	Погрешность	Диапазон выходного сигнала	Диапазон входного сигнала	Погрешность	Диапазон выходного сигнала	
ИК напряжения	±1000 В	Прецизионный резистор С2-29В	0,3 % приведен.	±10В	±10В	0,5 % приведен.	±1000 В	1,1 % приведен.
ИК силы тока	±200 А	Токовые клещи АТА2504	2% приведен.	±200 мВ	±200 мВ	0,5 % приведен.	±200 А	2,5 % приведен.
	±1000 А	Токовые клещи АТА2502	2% приведен.	±100 мВ	±200 мВ	1,0 % приведен.	±1000 А	3,0 % приведен.
	±200 А	Шунт 75ШСМ-В 200А	0,5% приведен.	±75 мВ	±200 мВ	1,3 % приведен.	±200 А	1,8 % приведен.
ИК линейного перемещения	0..200 м	Инкрементальный энкодер RSI 503	±1импульс./ 1 оборот абсолютн.	2500 импульсов на 1 оборот	2500 импульсов на 1 оборот	0,5 % относит.	0..200 м	1,0 % относит.
ИК отклонение от вертикали	±1000мG	Акселерометр ММА1270	3% приведен.	2500 ± 750 мВ	2500 ±750 мВ	0,5 % приведен.	±1000 мG	3,5 % приведен.

Таблица П 3.3 – Точность величин, рассчитываемых по значениям, измеренным комплексом «Ватур»

Наименование расчетной величины	Измерительный канал, участвующий в расчете			Диапазон расчетной величины	Погрешность
	Наименование	Диапазон измерения	Погрешность		
Эффективное значение переменного напряжения	ИК напряжения	± 1000 В	1,1 % приведен.	0..700 В	1,1 % приведен.
Эффективное значение силы переменного тока	ИК силы тока	± 200 А ± 1000 А	3,0 % приведен.	0..140 А 0..700 А	2,5 % 3,0 % приведен.
Активная мощность трехфазной цепи	ИК напряжения	± 1000 В	1,3 % приведен.	0..300 кВт	2,73 % приведен.
	ИК силы тока	± 200 А	2,5 % приведен.		