

Учредитель: Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Главный редактор
КАНТОВИЧ Л.И.

Зам. гл. редактора
ИВАНОВ С.Л.
ЛАГУНОВА Ю.А.

Редакционный совет:
КОЗОВОЙ Г.И.
(сопредседатель)
ТРУБЕЦКОЙ К.Н.
(сопредседатель)
АНТОНОВ Б.И.
ГАЛКИН В.А.
КОЗЯРУК А.Е.
КОСАРЕВ Н.П.
МЕРЗЛЯКОВ В.Г.
НЕСТЕРОВ В.И.
ЧЕРВЯКОВ С.А.

Редакционная коллегия:

АНДРЕЕВА Л.И.
ГАЛКИН В.И.
ГЛЕБОВ А.В.
ЕГОРОВ А.Н.
ЕДЫГЕНОВ Е.К.
ЖАБИН А.Б.
ЗЫРЯНОВ И.В.
КАРТАВЫЙ Н.Г.
КУЛАГИН В.П.
МАХОВИКОВ Б.С.
МИКИТЧЕНКО А.Я.
МЫШЛЯЕВ Б.К.
ПЕВЗНЕР Л.Д.
ПЛЮТОВ Ю.А.
ПОДЭРНИ Р.Ю.
САВЧЕНКО А.Я.
САМОЛАЗОВ А.В.
СЕМЕНОВ В.В.
СТАДНИК Н.И.
СТРАБЫКИН Н.Н.
ХАЗАНОВИЧ Г.Ш.
ХОРЕШОК А.А.
ЮНГМЕЙСТЕР Д.А.

Редакция:

БЕЛЯНКИНА О.В.
ДАНИЛИНА И.С.

Телефоны редакции:

(499) 269-53-97, 269-55-10

Факс (499) 269-55-10

E-mail: gma@novtex.ru

<http://novtex.ru/gormash>

СОДЕРЖАНИЕ

ПОДЗЕМНЫЕ РАБОТЫ

Титов И.В. О механизированной крепи для пологих пластов мощностью 1,0...2,5 м 2

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДОБЫЧИ И ОБРАБОТКИ ПРИРОДНОГО КАМНЯ

Тамбовцев П.Н. Гравитационный пневмомолот для добычи крупноразмерных гранитных блоков 6

БУРОВЫЕ РАБОТЫ

Платовских М.Ю., Пивнев В.А., Юнгмейстер Д.А., Непран М.Ю., Судьенков Ю.В., Соколова Г.В. Экспериментальные и теоретические исследования перфоратора с ударной системой "поршень-боек-штанга" 9

НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ

Хазанович Г.Ш., Воронова Э.Ю. К вопросу об оценке эффективности горно-проходческих систем 15

Керопян А.М. Проблемы взаимодействия системы "колесо-рельс" карьерного железнодорожного транспорта 23

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. АВТОМАТИЗАЦИЯ

Игнатъев С.А., Муратбаекеев Э.Х. Обеспечение непрерывности технологического процесса путем автоматического восстановления электроснабжения 29

Брейдо И.В., Искаков У.К., Смагулова К.К. Разработка алгоритмов работы адаптивной системы защиты от токов утечки методами нечеткой логики 34

Ульянов В.Г., Димант Б.И., Зырянов И.В., Пархоменко В.А., Табакман И.Б., Антоненко Д.П. Автоматизация управления горно-транспортным комплексом на карьере "Нюрбинский" АК "АЛРОСА" 39

Соловьёв Д.Б. Новые фильтры симметричных составляющих для релейной защиты электроприводов горных машин и механизмов 45

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, и входит в систему Российского индекса научного цитирования.

УДК 622.232

И.В. Титов, асп., ННЦ ГП-ИГД им. А.А. Скочинского

E-mail: 4surprise@mail.ru

О механизированной крепи для пологих пластов мощностью 1,0...2,5 м

Предложено новое направление анализа крепей; дано уточнение распределения сопротивления крепи по ширине поддерживаемого пространства лавы.

Ключевые слова: механизированная крепь, секция, кинематическая схема, двухстоечная, двухрядная.

I.V. Titov

About Mechanized Roof Supports for 1,0...2,5 m Shallow Coal Seams

The new direction in analysis of mechanized roof supports is proposed, the specification of the distribution of resistance of mechanized roof supports by the width of the supported coal face lava is given.

Keywords: mechanized roof supports, section, kinematic scheme, two-row, two-column.

Возрастающие объемы добычи угля в РФ из тонких пластов мощностью от 1,0 (0,9) до 1,5 м настоятельно требуют объективной оценки и выбора одного из основных параметров крепи и ее составной части – секции крепи, по распределению сопротивления крепи по ширине поддерживаемого пространства лавы для обеспечения оптимального взаимодействия крепи с боковыми породами пласта.

В настоящей статье проведен анализ соответствия крепей горно-геологическим условиям. При этом использованы следующие условные обозначения:

R – результирующая горного давления – равнодействующая сопротивления крепи;

x_1, x_2 – расстояние от забоя соответственно до нижнего и верхнего пределов интервала расположения результирующей горного давления;

l_1, l_2 – расстояние от забоя соответственно до ряда стоек однорядной в двухрядной секции;

P_1, P_2 – усилия, развиваемые стойками;

B_0 – ширина поддерживаемого пространства лавы.

В работе [1] показано, что оптимальным является такое взаимодействие крепи, при котором в лаве обеспечиваются удовлетворительное со-

стояние кровли в призабойном пространстве, регулярное ее обрушение в выработанном пространстве, умеренное опускание кровли, не приводящее к посадке крепи на жестко, отсутствие вдавливания крепи в почву, безопасность работ при минимальных затратах на изготовление и эксплуатацию крепи.

В отечественной практике известны рекомендации [2, 3] по определению распределения сопротивления крепи по ширине поддерживаемого пространства лавы, основанные на теоретических исследованиях данной проблемы.

В работе [4] результаты исследований положения равнодействующей сопротивления крепи горному давлению, выполненных на основе обобщения многих сотен измерений фактического сопротивления стоек поддерживающих двухрядных механизированных крепей в шахтных условиях в диапазоне мощности пластов от 0,8 до 4 м, в дальнейшем использовались Гипроуглемашем при разработке практически всех новых крепей, включая М138, М142, М144, М145 и других, с положительными результатами.

В работе [1] для оптимизации взаимодействия крепей с боковыми породами пластов использованы рекомендации последней работы на основе

шахтных исследований и показано, что в условиях легких кровель координаты расположения равнодействующей сопротивления крепи l_0 (соответственно результирующая горного давления x) в общем случае должны находиться в интервале $0,64B_0 \leq l_0 \leq 0,79B_0$. Отмечено, что нижний предел интервала свойственен условиям со слабоустойчивыми непосредственными кровлями. 80 % зафиксированных положений равнодействующей соответствует интервалу $0,67B_0 \leq l_0 \leq 0,76B_0$. Наиболее плотное расположение равнодействующей для легких кровель подчиняется нормальному закону распределения и соответствует расположению результирующей горного давления $x = 0,715B_0$.

В развитие работы [1] исследования Гипроуглемаша и шахты "Распадская" независимо друг

Тип кровель по проявлению горного давления	Интервал расположения равнодействующей сопротивления крепи		Рекомендуемое расчетное расположение равнодействующей
	Предельный	80 % случаев	
Легкие	$0,64B_0 \leq l_0 \leq 0,79B_0$	$0,67B_0 \leq l_0 \leq 0,76B_0$	$x = 0,715B_0$
Тяжелые	$0,67B_0 \leq l_0 \leq 0,79B_0$	$0,7B_0 \leq l_0 \leq 0,78B_0$	$x = 0,74B_0$
Средние*	$0,66B_0 \leq l_0 \leq 0,79B_0$	$0,68B_0 \leq l_0 \leq 0,77B_0$	$x = 0,725B_0$

* Для средних кровель интервалы расположения равнодействующей сопротивления крепи даны оценочно, в том числе с учетом работ по исследованию механизированных крепей Ю.А. Коровкиным.

от друга показали, что в условиях тяжелых кровель координата расположения равнодействующей сопротивления крепи в общем случае соответствует интервалу $0,67B_0 \leq l_0 \leq 0,79B_0$. При этом 80 % положений равнодействующей соответствует интервалу $0,7B_0 \leq l_0 \leq 0,78B_0$, а наиболее плотное расположение равнодействующей соответствует $x = 0,74B_0$.

Предлагаемые рекомендации по легким и тяжелым кровлям сведены в табл. 1.

Данные рекомендации приемлемы и для поддерживающе-оградительных крепей с двухряд-

Таблица 2

Шифр крепи	Кровля	B_0 , мм	Расстояние от забоя до ряда стоек, мм	x	x_1	x_2	Рекомендации по работоспособности
1М137	Легкая	4470	3200	3200	3000	3400	Крепь работоспособна в условиях устойчивой кровли
3М137	Легкая	4400	3000	3145	2900	3340	Крепь работоспособна в условиях назначения
3М138	Тяжелая	4440	2650...3900	3285	3110	3460	Крепь работоспособна в условиях назначения
1М147	Тяжелая	4340	3200	3210	3040	3370	Крепь для устойчивых кровель
МКЮ.2У.0.55/1,3	Легкая	4410	3480	3155	2955	3355	Крепь неработоспособна. Результирующая горного давления опережает на 325 мм ряд стоек секции
МКЮ.2У.0.55/1,3	Тяжелая	4410	3480	3264	3087	3440	Крепь неработоспособна. Результирующая расположена на 216 мм впереди ряда стоек секции
М143	Легкая	3800	2300	2715	2545	2885	Крепь работоспособна в условиях назначения
М143	Тяжелая	3800	2350	2810	2660	2860	Крепь работоспособна в условиях назначения
М143/1,0	Легкая	4000	2600	2860	2680	3040	Крепь работоспособна в условиях назначения
М143/1,0	Тяжелая	4000	2600	2960	2800	3120	Крепь работоспособна в условиях назначения

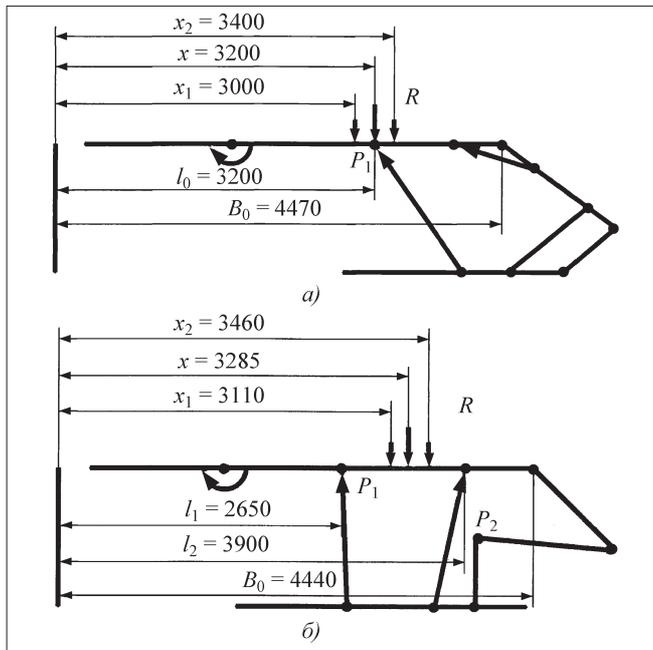


Рис. 1. Кинематические схемы секций крепей:
а – 1М137; б – 3М138

ными и однорядными секциями, с угловым стабилизирующим домкратом (домкратами).

Результаты анализа кинематических схем секций и определения распределения сопротивления по ширине поддерживаемого пространства лавы (параметры x_1 , x_2) представлены в табл. 2.

В рассмотренных однорядных секциях 1М137 (рис. 1, а) и 1М147 расчетная результирующая горного давления R расположена над рядом стоек, т.е. по середине упомянутого 80%-ного интервала расположения равнодействующих сопротивлений крепи. Отсюда около 40 % результирующих горного давления может быть расположено впереди ряда стоек, влияя на снижение усилий для поддержания призабойной полосы кровли перед стойками и вызывая разрушение кровли в призабойной зоне.

В связи с этим секции крепи с таким распределением сопротивления рекомендуются только для работы на пластах с устойчивой кровлей.

Для их работы в условиях малоустойчивых кровель следует обеспечить расположение интервала результирующих за рядом стоек.

Это возможно за счет увеличения ширины поддерживаемого пространства лавы B_0 в сторону завала или уменьшения шага передвижения секций – величины захвата комбайна, что нежелательно из-за снижения нагрузки на забой.

Расчеты по первому варианту показывают, что при работе в условиях тяжелых кровель для

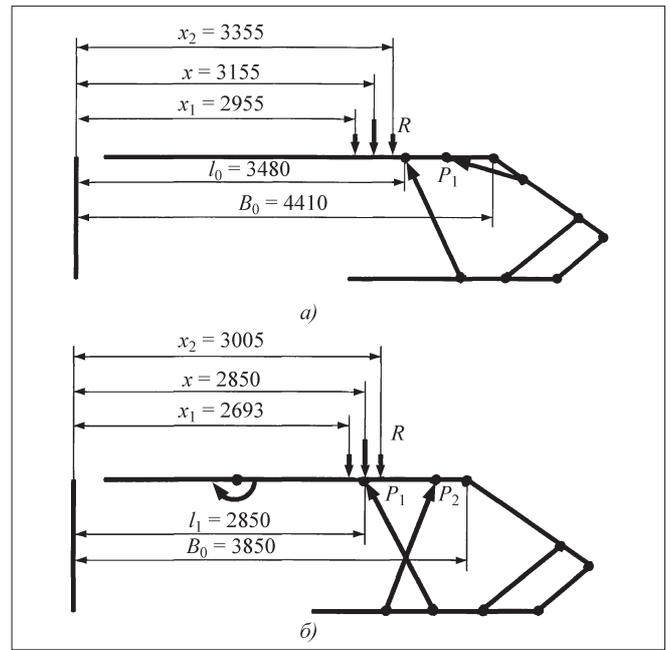


Рис. 2. Кинематические схемы секций крепей:
а – МКЮ.2У.0,55/1,3; б – МВРО3200Х

крепи 1М137 параметр B_0 следует увеличить на 306 мм, а для крепи 1М147 – на 231 мм.

В двухрядных секциях при расположении расчетной результирующей R между рядами стоек интервал результирующей крепи 3М138 (см. рис. 1, б) расположен также между рядами стоек, обеспечивая эффективную работу крепи в назначенных условиях.

Из табл. 2 и рис. 2, а видно, что в секции крепи МКЮ.2У.0,55/1,3 расчетный интервал результирующей сопротивлений крепи горного давления расположен впереди ряда стоек, что недопустимо, так как приведет к разрушению поддерживаемой непосредственной кровли по всей ширине пространства лавы, которое обычно происходит при малом подвигании лавы и в ремонтные смены.

Известно, что крепь работает в двух режимах:

- предварительного распора секции, при котором обычно обеспечивается контакт перекрытия по всей длине;
- в рабочем режиме при постоянной податливости секции, т.е. при постоянном сближении кровли и почвы пласта под действием сил горного давления.

При проявлении горного давления с расположением результирующей R впереди ряда стоек даже при наличии жесткой опоры на конце завальной консоли перекрытия и второй опоры в виде стоек при малейшей (обязательной) подат-

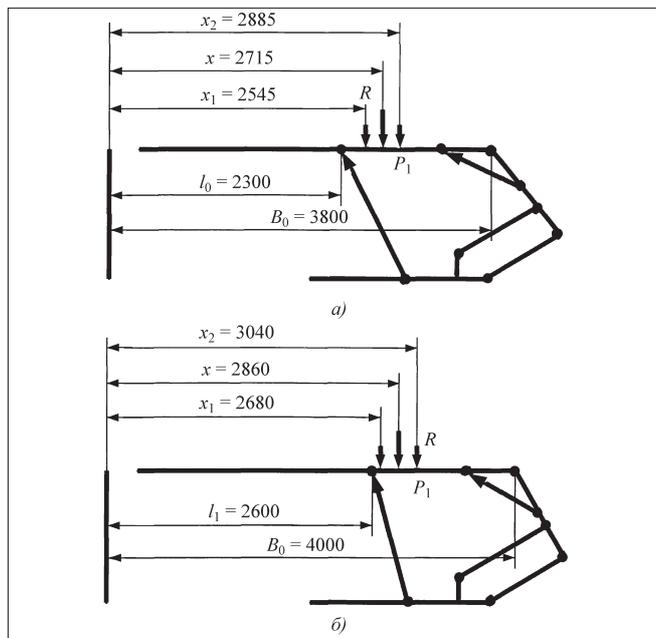


Рис. 3. Кинематические схемы секций крепей:
 а – М143 с шагом передвижки 0,8 м; б – М143 с шагом передвижки 1,0 м

ливости этой опоры произойдет отрыв перекрытия от кровли по длине перекрытия, начиная от опоры завальной консоли перекрытия, на значительную величину в призабойной части лавы.

Это начало разрушения кровли, которое будет прогрессировать при каждой новой передвижке секции.

При отсутствии жесткой опоры на конце завальной консоли перекрытия процесс разрушения непосредственной кровли будет происходить более интенсивно.

Анализ кинематических схем однорядных секций импортных крепей для тонких пластов показывает, что крепи ДМ (Донгипроуглемаш) и "Глиник" 06/15 имеют подобный недостаток взаимодействия с кровлей пласта.

Эксплуатация данных крепей возможна только в условиях устойчивых непосредственных кровель.

Анализ кинематических схем двухрядных секций импортных крепей для пластов мощностью до 1,5 м и мощностью 1,2...2,5 м показывает, что в крепи типа МВРО3200Х (см. рис. 2, б) результирующая горного давления расположена над передним рядом стоек, а в крепях типа КД90Т – в зоне переднего ряда стоек.

Эти секции оптимально взаимодействуют с боковыми породами пласта только в случае, если сопротивление переднего ряда стоек достаточно по условиям использования, например на мощ-

ности пласта с малой конструктивной высотой секции.

В других условиях секции будут способствовать разрушению непосредственной кровли.

Для выемки пластов мощностью 1,2...2,5 м Гипроуглемаш предложил крепь М143 с однорядными двухстоечными секциями с проходами перед и за стойками.

В работе [1] показано, что крепь М143 выгодно отличается от крепи М137 меньшей в 1,5 раза металлоемкостью за счет компактной конструкции, которая позволяет использовать их эффективно в сложных условиях эксплуатации, обеспечивая высокий уровень сопротивления в призабойной полосе.

Вместе с тем расположение интервала равнодействующей сопротивления крепи горному давлению от ряда стоек для легких кровель на 245...585 мм в сторону завала (рис. 3, а) также нельзя однозначно считать положительным фактором, так как повышение усилия распора передней консоли перекрытия может явиться причиной разрушения слабоустойчивой непосредственной кровли пласта. Однако такое расположение равнодействующей позволяет увеличить бессточное пространство лавы, увеличить захват комбайна и повысить нагрузку на забой.

В табл. 2 под шифром М143/1,0 приведены результаты расчета при захвате комбайна 1,0 м и ширине некрепленной призабойной полосы 200 мм (см. рис. 3, б). В последнее время конструктивная схема крепи М143 широко применяется в крепях для выемки пластов мощностью 2,5...6,0 м, включая крепи М144Б, М174, КМ1000, "Джой", ДБТ, "Глиник".

Выводы

На основе проведенного анализа кинематических схем секций крепей для обеспечения оптимального взаимодействия механизированной крепи с боковыми породами пласта рекомендуется в крепях с однорядными секциями расположение интервала равнодействующей сопротивления крепи горному давлению за рядом стоек с координатой $x_1 \geq l_1$; при двухрядных секциях – расположение интервала в середине между рядами стоек с координатой $x = \frac{l_1 + l_2}{2}$.

Список литературы

1. Орлов А.А., Баранов С.Г., Мышляев Б.К. Крепление и управление кровлей в комплексно-механизированных забоях. М.: Недра, 1993.
2. Хорин В.Н. Расчет и конструирование механизированных крепей. М.: Недра, 1988.
3. Косарев В.В., Вассерман И.Г., Андреев Г.В., Косарев И.В. Разработка методики исследования и выбора параметров двухстоечной кровли ДМ для тонких пластов // Горное оборудование и электромеханика. 2005. № 1. С. 40–44.
4. Мышляев Б.К., Быков С.В., Хайман А.Р. Распределение сопротивления между рядами стоек механизированных крепей // Уголь. 1979. № 10. С. 42–45.

УДК 622.232

П.Н. Тамбовцев, канд. техн. наук, доц., ИГД СО РАН, г. Новосибирск

Гравитационный пневмомолот для добычи крупноразмерных гранитных блоков^{НГ*}

Представлена новая конструкция гравитационного пневмомолота для реализации в промышленности способа добычи крупных гранитных блоков, основанного на принципе разрушения твердых тел пластичным веществом. Приведены результаты испытаний опытного образца.

Ключевые слова: пневмомолот, инструмент, массив, шпур, пластичное вещество, трещина, отделение, монолит.

P.N. Tambovtsev

A Pneumatic Hammer to Extract Large Granite Blocks

The paper presents the new design of a pneumatic hammer intended to assist in industrial extraction of large granite blocks using the concept of destruction of solids by plastic substance. The test results of a preproduction model are discussed.

Keywords: pneumatic hammer, splitting tool, rock mass, drill hole, plastic substance, crack, separation, monolith.

Крупноразмерные гранитные блоки (25...100 м³) для монументального строительства чаще всего добывают буровзрывными способами. Однако в большинстве они не обеспечивают требуемого качества монолита – образуются техногенные трещины и разломы.

Для добычи качественных блоков применяют безвзрывные технологии, основанные на буроклиновом способе разрушения камня, включающем бурение шпуров, стенки которых затем распирают клиньями, распорными устройствами, невзрывчатыми расширяющимися средствами (НРС) при их отвердении. При таком разрушении требуется большое количество шпуров (шаг 10...20 см) и распорных устройств, что обусловлено недостаточным усилием воздействия на массив из одиночного шпура и тем, что с удалением фронта формируемой трещины от места приложения нагрузки возникают изгибные напряжения, искривляющие поверхности откола. В связи с чем эти способы имеют малую производительность добычи (5...12 м³/смену – гидроклиньями), зна-

чительную себестоимость отделения (500...1000 руб./м³) и большую трудоемкость работ по бурению и перестановке распорных устройств.

В Институте горного дела СО РАН отделение блоков от массива предлагается осуществлять путем образования магистральной трещины в результате ударного внедрения инструмента в шпур, заполненный пластичным веществом [1]. Развитие трещины до требуемых размеров обеспечивается вытеснением пластичного вещества (ПВ) из шпура в формируемую полость трещины (рис. 1). При этом из шпура развивается трещина за счет раздвижения ее поверхностей до вели-

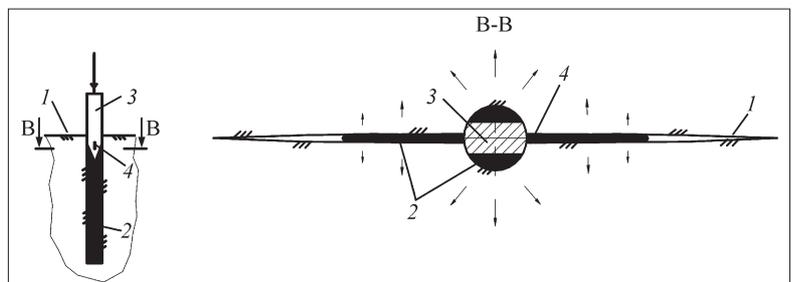


Рис. 1. Механизм разрыва породы 1 пластичным веществом 2 при воздействии клиновым инструментом 3 с твердосплавными вставками 4 (стрелками показано направление разрывных усилий)

* Символом НГ обозначены статьи, поступившие с "Недели горняка".

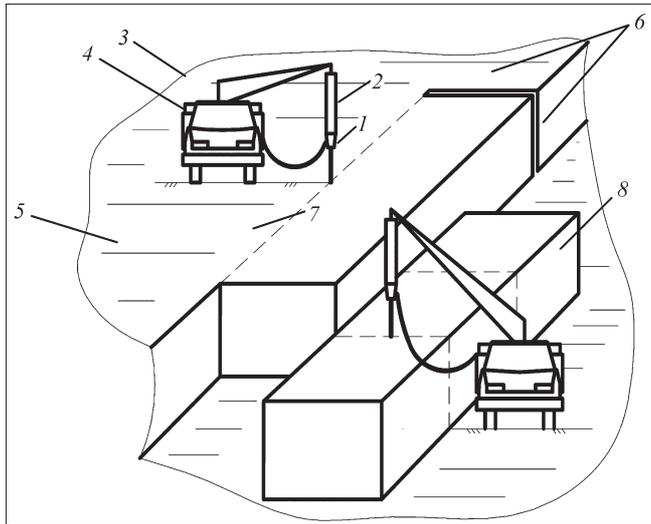


Рис. 4. Схема отделения и разделки гранитных монолитов:
 1 – рабочий инструмент; 2 – пневмомолот; 3 – компрессор; 4 – транспортное средство с краном; 5 – массив; 6 – торцовая щель; 7 – линия откола; 8 – отделенный монолит

ны, достаточной для отделения от массива монолита.

Полученные научно-практические результаты показали возможность добычи особо крупных блоков (рис. 2, 3, см. 2-ю стр. обложки).

Одна из возможных схем добычи блоков новым методом представлена на рис. 4. Порядок проведения работ подразделяется на основные этапы: бурение строчки шпуров; заполнение рабочих шпуров пластичным веществом; установка инструмента и пневмоударной машины на шпур с ПВ; работа ударной машины, формирование трещины и отделение блока; перемещение оборудования на следующий участок горной породы, подлежащей разрушению.

Широкое практическое применение данного способа в известной мере сдерживалось отсутствием эффективных специализированных технических средств для его реализации – надежного рабочего инструмента и ударной машины, приспособленной для его внедрения в шпур. Из экспериментов [2] установлено, что разрыв горных пород пластичным веществом предпочтительно осуществлять пневмоударным устройством, не имеющим отдачи. Анализ существующих пневмоударных машин [3–5] показал, что известные конструкции не удовлетворяют этому требованию. В качестве решения поставленной задачи предлагается гравитационный пневмомолот "Монолит" с ударником массой 9 кг (энергия удара 40 Дж, частота 1,6 Гц при давлении в сети 0,6 МПа), разработанный в ИГД СО РАН. Кон-

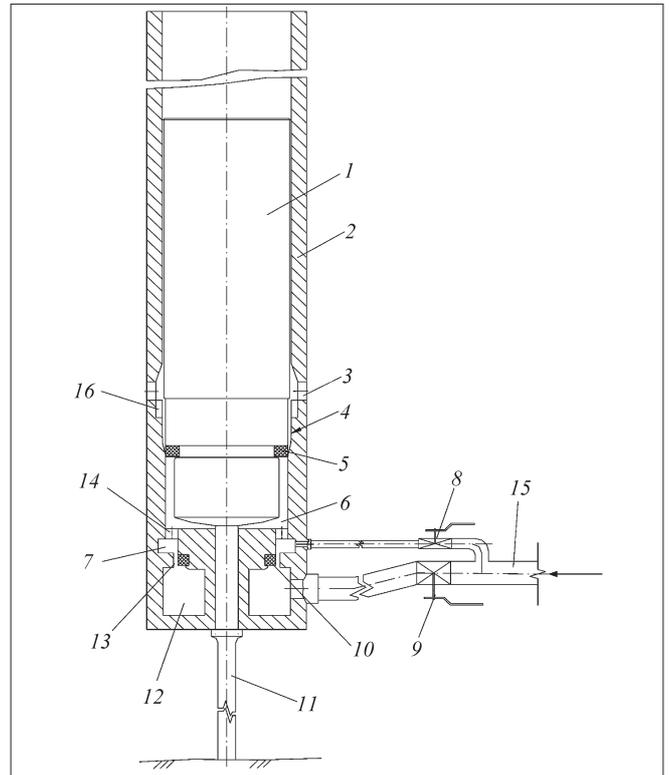


Рис. 5. Принципиальная конструктивная схема пневмомолота "Монолит":

1 – ударник; 2 – корпус; 3 – выхлопные отверстия; 4 – кольцевой выступ; 5, 10 – упругие клапаны; 6, 7, 12 – камеры сжатого воздуха; 8 – дроссельный канал; 9 – основной канал; 11 – рабочий инструмент; 13, 14 – воздухопроходные сечения; 15 – магистраль; 16 – выхлопные пазы

структивная схема экспериментального образца представлена на рис. 5.

Пневмомолот позволяет эффективно внедрять инструмент в шпур в режиме свободно падающего ударника. Он имеет более высокий КПД по сравнению с известными прототипами – пневмопробойниками, кольцевыми пневмоударниками "ПУМ-3", пневмомолотами "Тайфун" [3–5]. Это обусловлено отсутствием при его работе так называемой "воздушной подушки" перед ударником в момент удара, ударник и инструмент взаимодействуют непосредственно без промежуточного элемента (бойка или наковальни) и тем самым исключаются потери ударного импульса на упругие деформации. Машина имеет более низкий удельный расход сжатого воздуха благодаря наличию в ее конструкции упругого клапана 10 (см. рис. 5), отсекающего непроизводительную подачу сжатого воздуха из камеры (ресивера) 12. Наличие упругого клапана 5 и кольцевого выступа 4 увеличивает эффективную площадь ударника, исключает образование "воздушной подушки" и позволяет иметь зазор

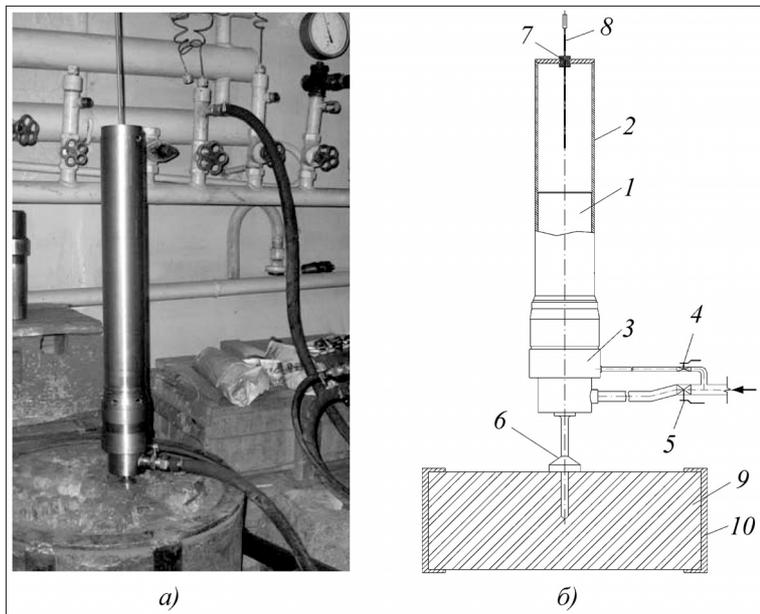


Рис. 6. Внешний вид (а) и конструктивная схема (б) стенда для испытания модели молота в лабораторных условиях:

1 – ударник; 2 – цилиндр; 3 – пневмоузел; 4 – дроссельный канал; 5 – основной канал; 6 – имитатор инструмента; 7 – резиновая втулка с траверсой; 8 – металлический шуп для измерения хода ударника; 9 – деревянный работополотитель; 10 – стальная оболочка

1...2 мм в сопряжении ударника с корпусом. Это гарантирует надежную без заклинивания и обмерзания на выхлопе работу пневмомолота в зимних условиях, а также в условиях запыления.

Проведенные первые испытания опытного образца в лабораторных (рис. 6) и полевых (рис. 7, см. 2-ю стр. обложки) условиях показали его высокую надежность, простоту в обслуживании и эксплуатации. Машина может по команде оператора работать в трех режимах: *дроссельном* – производить удары с повышенной частотой 4...6 Гц и энергией 3...4 Дж; *основном* – с частотой 1,4...1,7 Гц и энергией удара 28...43 Дж в зависимости от давления воздуха в сети (0,4...0,6 МПа); *режиме одиночного удара* – ударник наносит одиночный удар с энергией

28...43 Дж и останавливается, если не было повторной команды пуска от оператора.

Пневмомолот устойчиво работает на инструменте как при его запуске, когда инструмент только затравливается в шпур, так и при формировании и развитии трещины. В опыте отмечено, что начальная трещина возникла в заданной плоскости, ее дальнейшее развитие происходило в этом направлении в соответствии с количеством нанесенных ударов (см. рис. 7, б). Дроссельный режим работы молота благоприятно сказался при затравливании инструмента в шпур, основной режим – на этапе формирования и развития трещины, где требуется основной поток ударной мощности. Режим одиночного удара по команде позволял более эффективно контролировать процесс развития трещины на завершающей стадии отделения монолита.

В дальнейшем планируется продолжение работ, направленных на отработку технологических схем и средств механизации отделения камня от массива.

Список литературы

1. Кю Н.Г., Чернов О.И. Способ разрушения горных пород // Пат. РФ № 2131032, 1999.
2. Петреев А.М., Тамбовцев П.Н. Ударное нагружение твердой породы через пластичное вещество в шпуре // ФТПРПИ – 2006. № 6. С. 79–86.
3. Гурков К.С., Климашко В.В., Костылев А.Д., Плавских В.Д., Русин Е.П., Смоляницкий Б.Н., Тупицин К.К., Чепурной Н.П. Пневмопробойники. Новосибирск: ИГД, 1990. 213 с.
4. Смоляницкий Б.Н., Червов В.В., Трубицин В.В. Новые пневмоударные машины "Тайфун" для специальных строительных работ // Механизация строительства. 1997. № 7. С. 5–8.
5. Червов В.В., Кондратенко А.С. Пневмомолот "Тайфун" и новый метод очистки трубы от грунтового керна // Механизация строительства. 2006. № 8. С. 8–12.

УДК 622.063.23

М.Ю. Платовских, В.А. Пивнев, канд. техн. наук, ОАО "Апатит", г. Кировск, **Д.А. Юнгмейстер**, д-р техн. наук, проф., **М.Ю. Непран**, асп., **Ю.В. Судьенков**, канд. физ.-мат. наук, СПГУ, **Г.В. Соколова**, ст. преп., СПГГИ (ТУ), г. Санкт-Петербург

E-mail: mplat.63@gmail.com

Экспериментальные и теоретические исследования перфоратора с ударной системой "поршень—боек—штанга"

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований перфоратора с ударной системой "поршень—боек—штанга", в которой реализуется дребезг бойка. Показано, что даже при наличии воды в шпуре скорость бурения модернизированным перфоратором растет на 30...50 % в сравнении со стандартным. Лабораторные исследования демонстрируют возможность реализации ударного импульса не просто колоколообразной формы, а состоящего из серии высокочастотных подимпульсов. Теоретически доказана возможность увеличения передаваемого штанге импульса за счет дребезга.

Ключевые слова: бурение, перфоратор, модернизация, боек, штанга, импульс.

M.Yu. Platovskikh, V.A. Pivnev, D.A. Yungmeister, M.Yu. Nepran, Yu.V. Sudenkov, G.V. Sokolova

The Experimental and Theoretical Studies of Punch with a Shock the System "Piston—Striker—Shenk"

The results of experimental studies of punch with a shock the system "piston—striker—shenk", which sold striker chatter. It is shown that even in the presence of water in the borehole drilling speed modified perforator is growing at 30...50 % in comparison with the standard. Laboratory studies have demonstrated the feasibility of a shock pulse is not just a bell-shaped, and consists of a series of high-podimpulsov. Theoretically proved the possibility of increasing the transmitted pulse through the bar chatter.

Keywords: drilling, perforator, modernizing, shenk, striker, impulse.

Статья продолжает серию публикаций о перспективах создания перфоратора с ударной системой "поршень—боек—штанга", в которой боек (на порядок более легкий, чем поршень) совершает убыстряющиеся колебания в зазоре 1...3 мм между сближающимися поршнем и штангой [1, 2]. Использование таких перфораторов, отличающихся высокой эффективностью разрушения породы при малых габаритах, может значительно повысить эффективность бурения.

Исследования перфоратора в рудничных условиях

В сентябре 2010 г. на Кировском руднике ОАО "Апатит" были проведены промышленные испытания модернизированного перфоратора ПП-54 (в дальнейшем ПП-54М) с ударной системой "поршень—боек—штанга".

Перфоратор ПП-54М имел отверстие в стволе в зоне контакта поворотной и хвостовой букс. Использовались финская штанга "Комета" с укороченным хвостовиком (стандартный перфоратор имел штангу "Комета" длиной 970 мм) и боек, выполненный из хвостовой части штанги "Сандвик" длиной 38 мм. Модернизированная ударная система (рис. 1) включала усиленную толстостенную воздушную трубку (толщина стенки 1,5 мм) с оголовком из стали 40Х диаметром 12 мм* для центрирования бойка и поршня по внутренней поверхности бойка. Первоначальный зазор между штангой и бойком выдерживался в интервале 1,5...3 мм регулированием длины воздушной трубки путем перемещения гайки по резьбе трубки в месте ее крепления в корпусе перфоратора.

*Трубкой такого диаметра оснащен перфоратор ПП-632С, разработанный заводом "Пневматика" для калийных рудников.

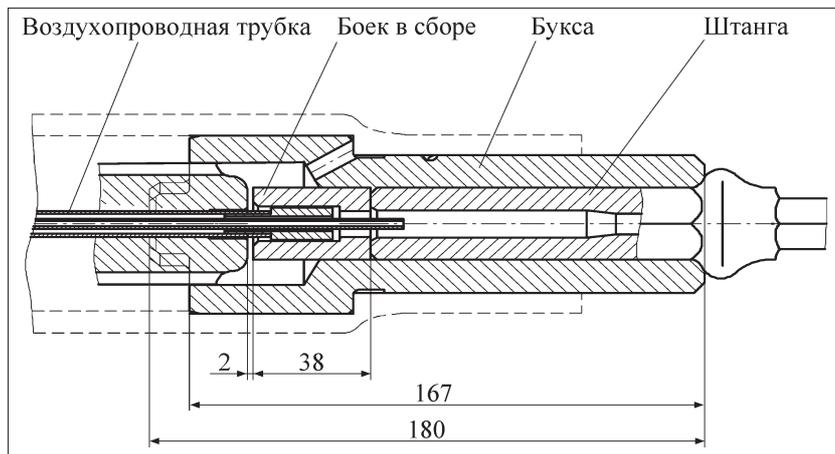


Рис 1. Конструкция ударной системы с центровкой бойка по внутренней поверхности

Испытания проводились при бурении монолитных глыб апатито-нефелиновой руды крепостью $f = 5...7$ (монолит № 1) и $f = 7...9$ (монолит № 2) на промплощадке Кировского рудника (рис. 2).

Бурение проводилось перфораторами со стандартной пневмоподдержкой без приложения дополнительных усилий на забой со стороны бурильщика. Давление воздуха – 0,5 МПа, использовались новые коронки КТШ-40, отрабатывались 5 шпуров в серии однотипных испытаний для получения усредненных и достоверных значений скорости бурения. Бурение каждого шпура проводилось в течение 30 с. Изменение зазора между бойком и штангой посредством выдвижения регулировочного болта крепления воздушной трубки к корпусу перфоратора позволяло в процессе каждого опыта регистрировать переменную глубину бурения за 30 с и в дальнейшем определять рациональную величину зазора между бойком и штангой для конкретных условий бурения.

Необходимо отметить, что при проведении исследований наблюдался большой разброс ре-



Рис. 2. Образцы апатито-нефелиновой руды с пробуренными шпурами и перфоратор на пневмоподдержке

зультатов даже при бурении в одинаковых условиях, так как на результат бурения каждого шпура стандартными и модернизированными перфораторами существенно влияли следующие факторы: погодные условия (бурение под дождем снижало скорость бурения в среднем на 20...25 %); снижение скорости бурения в конце некоторых серий опытов; качество и состояние штанг и коронок; сложность ручного регулирования усилия пневмоподдержкой; значительная сложность регулирования расхода воздуха через дроссель.

Бурение проводилось в особо сложных условиях: дождь, мокрый камень. Результат бурения за 30 с: перфоратор стандартный – 120...150 мм, перфоратор модернизированный – 170...200 мм, т.е. прирост скорости бурения составил 30...50 %.

Было определено очередное, возможно, самое главное условие дребезга – соблюдение центрального удара, когда центрирование бойка и поршня производится по внутренней поверхности бойка воздушной трубкой с увеличенным диаметром насадки из материала повышенной прочности. При косом ударе, т.е. при соударении бойка и поршня под углом в продольной оси, процесс дребезга нарушается.

Окончательный вариант модернизации перфоратора ПП 54М, рекомендуемый для создания опытной серии, должен включать: шайбу из вибростойкой резины толщиной не менее 10 мм для упора воздушной трубки; центрирование бойка и поршня по внутренней поверхности бойка воздушной трубкой с увеличенным диаметром насадки из материала повышенной прочности; дроссель необходимого диапазона регулирования для управления потоком воздуха в стволе и воздушной трубке перфоратора; боек с центральным отверстием в форме расширяющегося конуса из хвостовика шведской штанги "Сандвик" для предварительного отодвигания бойка от штанги.

Лабораторные исследования макета перфоратора

Результаты испытаний модернизированных перфораторов, полученные на практике, и теоретические исследования проверялись на лабораторном стенде в СПГГИ (ТУ). Испытательный стенд выполнен на базе электрического перфоратора фирмы "Dauer", закрепленный на станине, изготовленной из двух швеллеров. Штанга

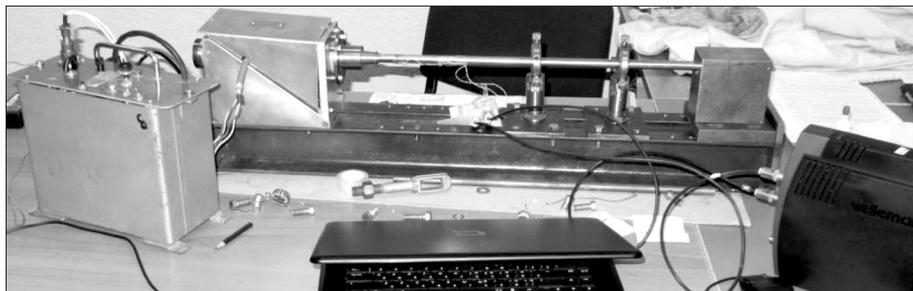


Рис. 3. Общий вид лабораторного стенда для исследования ударника

выполнена из высокопрочной стали 40Х. В первой трети длины штанги установлены два пьезодатчика с возможностью их подключения к осциллографу, предназначенные для снятия характеристик ударного импульса.

Исследование ударных систем "поршень–боек–инструмент" на таком стенде (рис. 3) позволяет получить экспериментальные зависимости и обосновать рациональные параметры ударного устройства на основе оптимизации ударного процесса в системе "поршень–боек–инструмент". При анализе графической информации, полученной в процессе проведения опытов на стенде, выявлены существенные отличия ударного импульса системы "поршень–боек–инструмент" по отношению к стандартной, доказана возможность создания различных форм импульса, отличных от стандартной, за счет варьирования параметрами бояка для эффективного разрушения пород различных свойств.

На рис. 4 и 5 показаны осциллограммы (шаг сетки оси абсцисс – 20 мкс), где фиксировалось электрическое напряжение (ось ординат), генерируемое пьезодатчиками, пропорциональное механическому напряжению в штанге стенда при различных режимах ударного воздействия. Сравнение осциллограмм

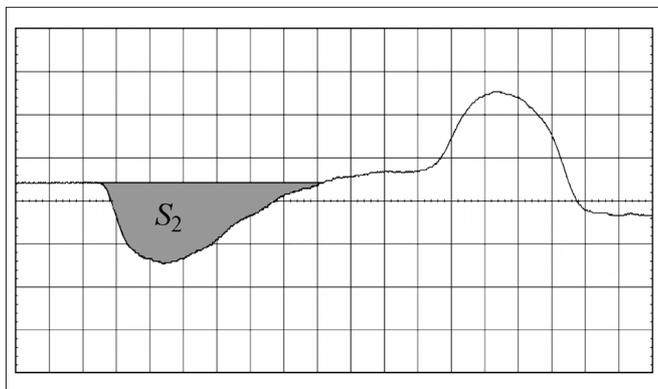


Рис. 4. Единичный удар без бойка

импульсов одиночного удара поршня стандартной ударной системы (см. рис. 4) и системы "поршень–боек–инструмент" (см. рис. 5) показало, что площадь, а значит и ударный импульс, который передается в штангу и далее в забой, в последнем случае на 15 % больше. Как видно на рис. 6, форма ударного импульса с применением ударной системы "поршень–боек–инструмент" изменяется, появляются всплески импульсов. За один рабочий ход поршня при многократном соударении поршня и бойка в сужающемся зазоре между поршнем и штангой в последней возбуждается сложная волна напряжения, представляющая собой совокупность многократного воздействия бойка на штангу в результате процесса дребезга. Датчик от ударов бойка фиксирует короткий импульс (40 мкс) колоколообразной формы (см. рис. 5), затем импульсы объединяются на графике огибающей. Видно, что это не меньше, чем 5...6 импульсов, отличающиеся амплитудой и длительностью. Общая продолжительность импульса (160 мкс) несколько больше, чем импульс стандартной ударной системы (см. рис. 4), составляющий 120...130 мкс. Ударный процесс в системе "поршень–боек–инструмент" (см. рис. 5) имеет более широкий спектр ударной нагрузки, что при воздействии на породу должно вызвать интенсификацию ее разрушения.

Можно сделать вывод, что система "поршень–боек–инструмент" обладает повышенным количеством ударных импульсов по отношению к стандартной системе за один рабочий ход

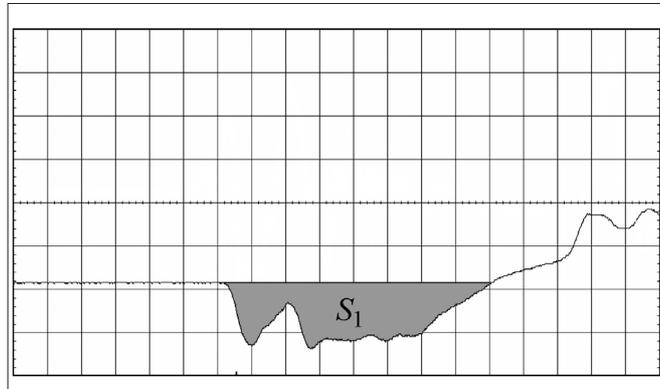


Рис. 5. Единичный удар с бойком

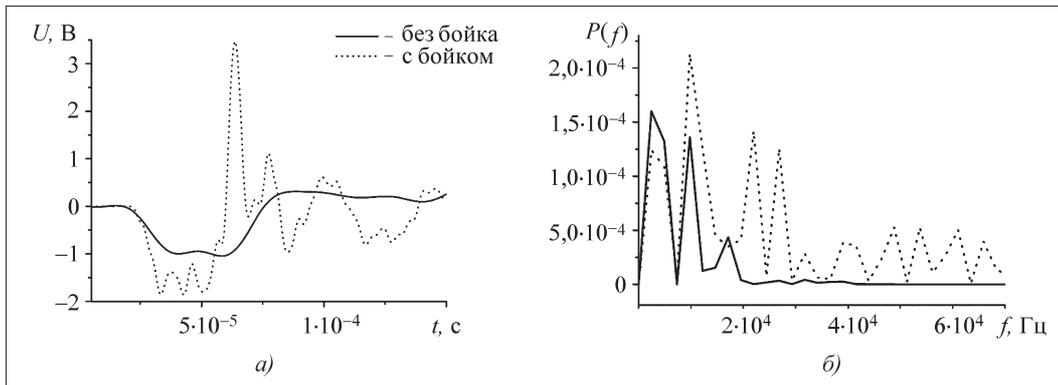


Рис. 6. Временные профили ударных импульсов в штанге длиной 820 мм (а) и их спектры мощности при одиночном режиме работы перфоратора "Dauer" (б)

поршня ударника и передает большее количество энергии инструменту.

На рис. 6 приведены импульсы с датчика при однократном соударении без промежуточного элемента – бойка и с бойком из титана длиной 30 мм. На рис. 7, б представлены соответствующие спектры мощности в относительных единицах этих импульсов. Видно, что при наличии бойка, т.е. эффекта "дребезга", максимум спектра сигнала смещается в область более высоких частот.

На рис. 7 приведены сигналы с датчика и соответствующие им спектры для случая периодического режима работы с частотой соударения 50 Гц и продолжительностью цикла ~1 с.

Естественно, что при такой длительности регистрации (1 с) сигнал содержит все моды колебаний, возбуждаемые в конструктивных элементах установки. В то же время период дискретизации не позволяет регистрировать высокочастотные моды. Поэтому в спектрах сигналов хорошо проявляется лишь мода собственных колебаний штанги 3,8 кГц (частоты основных мод ударника 25 кГц и бойка 100 кГц).

Видно, что амплитуда основной моды штанги при работе с бойком выше, чем при стандартном режиме (см. рис. 7, в, г). При этом наблюдается значительное превышение спектральной мощности на частотах как ниже основной моды штанги, что обусловлено значительным вкладом колебаний массивного элемента конструкции, в который упирается штанга, так и выше ее.

Сопоставление суммарной мощности ΣP ударных спектров в частотном диапазоне до 20 кГц представлено на рис. 8, а, а на рис. 8, б приведено относительное их изменение, также демонстрирующее увеличение эффективности в 1,3 раза ударной системы трех тел.

Исследования периодического режима работы ударного инструмента с промежуточным лег-

ким бойком подтверждают повышение эффективности переноса ударного импульса при реализации эффекта "дребезга" и возможность его применения в установках и инструментах ударного действия.

При этом отметим, что увеличение эффективности такого рода ударных систем определяется не только ростом эффективности переноса ударного импульса, но и увеличением эффективности разрушения гетерогенных

систем определяется не только ростом эффективности переноса ударного импульса, но и увеличением эффективности разрушения гетерогенных

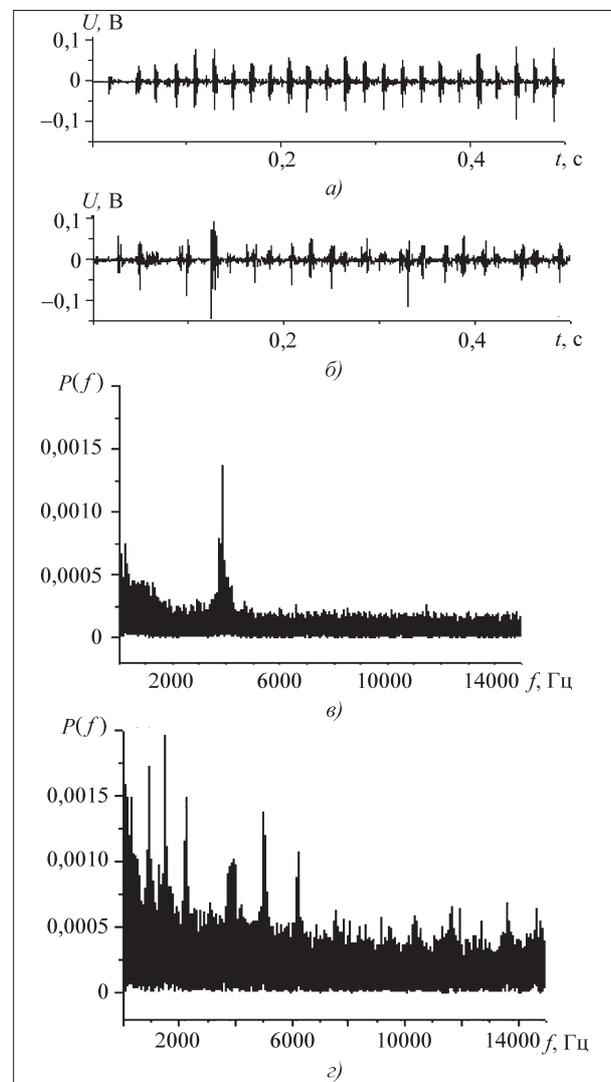


Рис. 7. Сигналы с пьезодатчика без бойка (а), с бойком (б) и соответствующие им спектры (в, г)

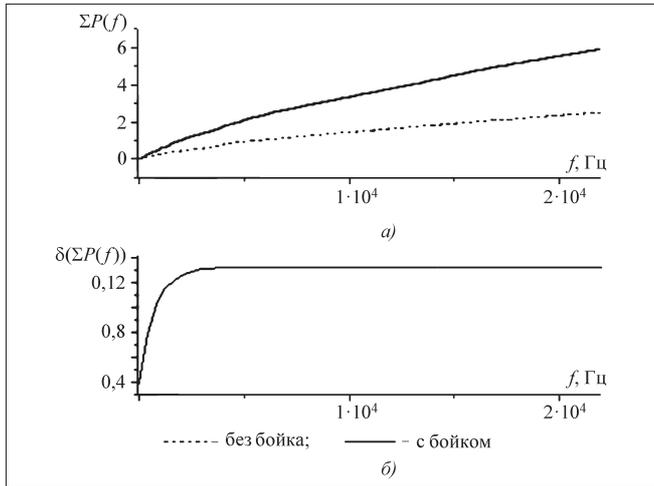


Рис. 8. Зависимости суммарной мощности ударных спектров в частотном диапазоне до 20 кГц

сред за счет сложного пространственно-временного спектра ударного импульса, генерируемого в системе из трех тел, способствующего процессу разрушений на масштабах микроструктуры гетерогенных сред.

Таким образом, можно сделать вывод, что двоякая ударная система обладает повышенным количеством ударных импульсов по отношению к стандартной системе за один рабочий ход поршня-ударника и, соответственно, передает большее количество энергии измерительной штанге.

Экспериментальные исследования подтверждаются теоретическими расчетами. Ниже дан анализ "теории дребезга", разработанный в последнее время и учитывающий особенности движения бойка, зависимость скорости бурения от свойств породы, а также конструктивных особенностей пневмоперфоратора.

Исследование динамики виброударной системы поршень–боек–штанга перфоратора ударного действия

Перфоратор моделируется системой трех масс: m_1 – поршень, m – боек и m_2 – штанга (рис. 9).

На поршень действует постоянная во времени сила $P_0 = 1200...1500$ Н. Рассматриваем единственный удар поршня. Считаем, что со стороны породы на штангу действует сила сопротивления, пропорциональная скорости $F_c = kq$, где k – коэффициент сопротивления породы, q – скорость бурения.

В системе возникает так называемый квазипластиче-

ский удар – процесс учащающихся повторных соударений убывающей интенсивности [3]. С помощью теоремы об изменении количества движения и условия, связывающего доударные и послеударные относительные скорости тел через коэффициент восстановления R [4], строится циклический алгоритм, описывающий движения масс в системе.

Процесс продолжается до тех пор, пока боек не окажется зажатым между штангой и поршнем. При этом происходит последний за i -й цикл удар поршня по штанге (вместе с бойком).

Построенный алгоритм реализован в программе в среде программирования DELPHI, позволяющей исследовать процесс "дребезга" и его влияние на передаваемый штанге суммарный импульс.

По экспериментальным данным углубление коронки или проходка (перемещение штанги в породе) в пересчете на один удар поршня составляет приблизительно $x \approx 10^{-4}...10^{-3}$ м в зависимости от свойств породы. Таким образом, приведенные на рис. 10 зависимости позволяют косвенным образом определить коэффициент сопротивления k на уровне $10^4...10^5$ Н·с/м ($m_1 = 2$ кг; $m = 0,1$ кг; $m_2 = 5$ кг). Как видно, эта функция мало связана с коэффициентом восстановления.

В рассматриваемой виброударной системе движения бойка представляют собой высокочастотный колебательный процесс (рис. 11). Эти колебания порождают соответствующие высокочастотные волновые процессы в штанге с возможным возбуждением резонансов. Вследствие наличия сложных граничных условий на конце штанги в ней возбуждаются не только продольные волны, но и поперечные, которые, по-видимому, и приводят к более активному разрушению породы при "дребезге".

Необходимо отметить, что в данных условиях соударяющиеся тела существенно различаются по массе и коэффициент восстановления может отличаться от часто принимаемого для сталей $R = 0,6$.

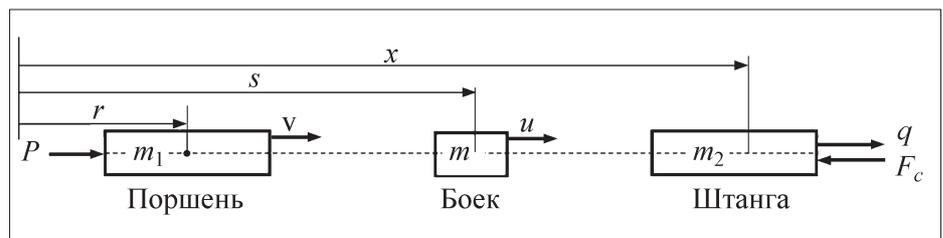


Рис. 9. Расчетная модель перфоратора

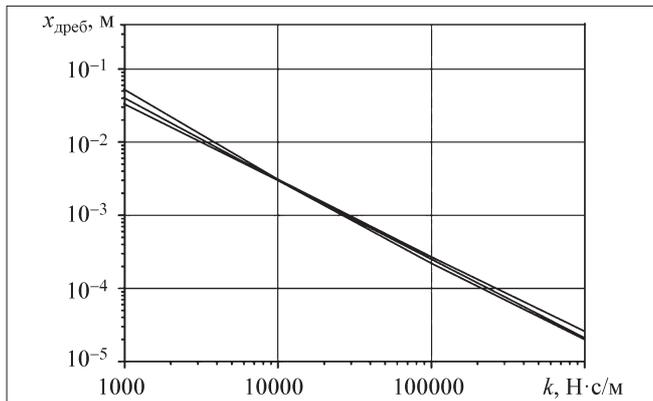


Рис. 10. Зависимости смещения штанги $x_{дроб}$ от коэффициента сопротивления породы k при различных значениях коэффициента восстановления:

1 – $R = 0,8$; 2 – $R = 0,7$; 3 – $R = 0,6$

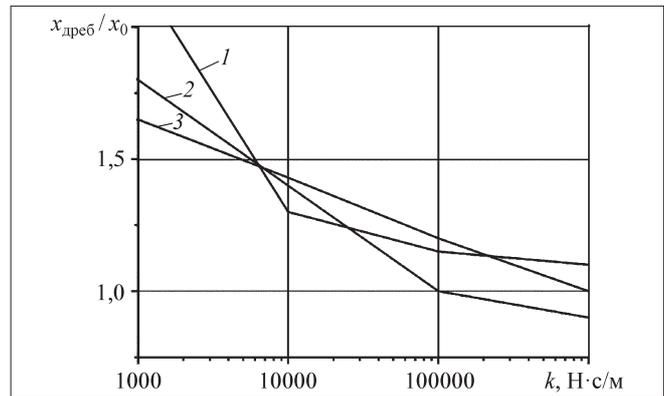


Рис. 12. Графики зависимостей роста проходки $x_{дроб}/x_0$ (x_0 – перемещение штанги в отсутствие бойка) от коэффициента сопротивления породы k при различных коэффициентах восстановления R в системе поршень–боек–штанга:

1 – $R = 0,8$; 2 – $R = 0,7$; 3 – $R = 0,6$

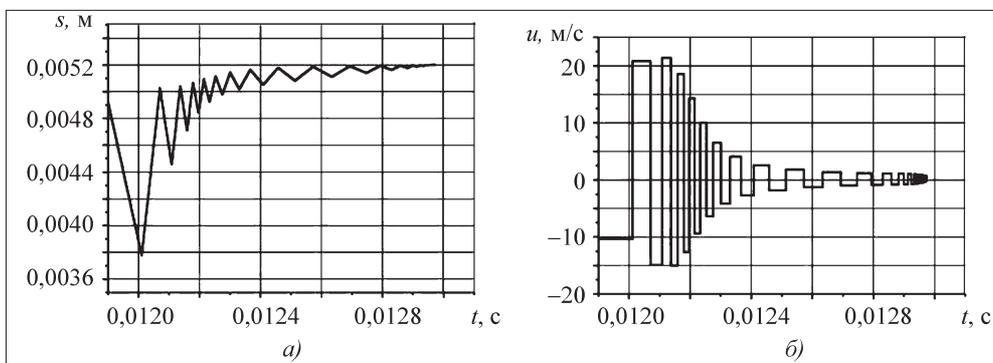


Рис. 11. Графики зависимостей перемещения (а) и скорости (б) бойка от времени ($m_1 = 2$ кг; $m = 0,1$ кг; $m_2 = 5$ кг; $R = 0,6$; $k = 10^4$ Н·с/м)

На рис. 12 видно, что в среднем при коэффициентах восстановления $R = 0,6...0,8$ и коэффициентах сопротивления породы $k = 10^4...10^5$ Н·с/м эффективность "дрезбза" составляет 30...50 %.

Таким образом, в рассматриваемой трехмассовой виброударной модели перфоратора движения бойка представляют собой высокочастотный колебательный процесс, при котором происходит более эффективная передача импульса от поршня штанге за счет снижения импульса отскочившего от штанги поршня, что фактически приводит к тому, что за каждый цикл этих колебаний происходит передача дополнительного импульса от поршня штанге. Суммарный импульс (и соответственно перемещение штанги в породе) при этом оказывается большим, чем передаваемый в конструкции перфоратора без бойка.

Целесообразно продолжение исследований по определению рациональной конструкции перфоратора с удлиненным стволом и стандартной штангой и бойком с центрированием его по внутренней поверхности с фигурным отверстием и воздушной трубкой специальной конструкции с возможностью регулирования величины предва-

рительного зазора между бойком и штангой. Необходимо изготовление опытных образцов перфораторов ПП-54М и проведение ресурсных рудничных испытаний при различных условиях бурения.

Список литературы

1. Юнгмейстер Д.А., Бурак А.Я., Соколова Г.В., Судьенков Ю.В. Исследование ударных систем на стенде с баллистическим маятником // Горное оборудование и электромеханика. 2006. № 7. С. 39–42.
2. Юнгмейстер Д.А., Пивнев В.А., Бурак А.Я., Судьенков Ю.В. Основные результаты исследований перфоратора со сдвоенной ударной системой "поршень–боек–штанга" // Горное оборудование и электромеханика. 2006. № 3. С. 17–19.
3. Нагаев Р.Ф. Механические процессы с повторными затухающими соударениями. М.: Наука, 1985.
4. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. М.: Высш. шк., 1972.

УДК 622.619

Г.Ш. Хазанович, д-р техн. наук, проф., Э.Ю. Воронова, канд. техн. наук, доц., ШИ(ф)ЮРГТУ (НПИ), г. Шахты

E-mail: gmo@itsinpi.ru

К вопросу об оценке эффективности горно-проходческих систем^{НГ}

Обоснована необходимость разработки методики оценки эффективности функционирования горно-проходческих систем при выборе и проектировании проходческой техники. Приведены общие подходы, принципы и структура методики выбора эффективных проходческих систем. Изложены общие подходы к формированию критериев их эффективности.

Ключевые слова: горно-проходческая система, оценка эффективности, критерий эффективности, методика выбора.

G.Sh. Khazanovitch, E.Yu. Voronova

To the Problem of Evaluation of Mining Cutting Systems Efficiency

The necessity of working out the methods of mining cutting systems efficiency at choice and projecting cutting technique is based. General approaches, principles and structure of the methods of efficient cutting systems choice are given. General approaches to forming criteria of their efficiency are set forth.

Keywords: mining cutting system, efficiency evaluation, efficiency criterion, methods of choice.

Объект исследования и актуальность проблемы

Статья посвящена проблеме оценки эффективности проходческих систем при решении различных вопросов комплексной механизации проведения протяженных горизонтальных и слабонаклонных выработок различного технологического назначения – вскрывающих и подготавливающих на горных предприятиях, тоннелей, транспортных коммуникаций и т.д., в частности, при выборе горно-проходческого оборудования и проектировании новых машин и комплексов.

Как известно, в настоящее время основными способами проведения таких выработок являются буровзрывной и комбайновый.

Современный парк горно-проходческой техники отличается большим разнообразием. На мировом рынке постоянно появляются новые модернизированные образцы: комбайны различных типов, бурильные установки, погрузочные машины, конвейеры, крепевозводящие механизмы, анкероустановщики и т.д. Следует отметить тот факт, что появляются образцы оборудова-

ния, которое принято называть агрегатированным: буропогрузочные и поддирочно-бурильные, поддирочно-погрузочные, бурильно-анкероустановочные машины, комплексы типа "Сибирь", "Трахедер" и др. Интенсивно развиваются комбайновые комплексы, в которых проходческий комбайн сопрягается с прицепным перегружателем, оснащается навесным бурильным и анкероустановочным оборудованием, предохранительной крепью и т.п.

В этих условиях, когда количество однотипного оборудования, имеющего аналогичные области применения, измеряется десятками различных марок и моделей, задача выбора техники выдвигается на первый план. Очевидно, что выбор эффективного оборудования позволяет существенно повысить производительность труда, значительно сократить себестоимость и увеличить темпы проведения выработки. При этом эффективность оборудования оценивается комплексом эксплуатационных показателей и является многофакторной задачей, в которой любой неучтенный фактор может привести к негативным последствиям. Например, сочета-

ние машин непрерывного и периодического действия, в частности, на шахте "Садкинская", где в комплексе с комбайном ГПКС в качестве транспортного средства используется самоходный вагон 5BC15M без промежуточной бункеризации. В результате комбайн значительное время простаивает в ожидании порожнего вагона. Существует много примеров несоответствия характеристик выработки и применяемого оборудования, что приводит к неполному использованию его ресурсов.

Другим примером неудачного сочетания выбора оборудования и организации обслуживания может служить также опыт компании "Южкузбассуголь", которая приобрела пять импортных комбайнов AM50 с более высокими техническими характеристиками, чем эксплуатировавшиеся в компании ГПКС. Однако не была налажена своевременная поставка запасных частей, потребность в которых возрастала по мере старения комбайнов. В результате значительное время нахождения их в неработоспособном состоянии и высокая стоимость запасных частей привели к тому, что через 5 лет эксплуатации все AM50 были списаны, так и не окупив своей первоначальной стоимости.

Эти примеры свидетельствуют о сложности, многогранности и актуальности вопроса выбора эффективного оборудования.

Не менее важной является задача по оценке вновь создаваемого оборудования, которая возникает уже на стадии предварительной проработки технического решения. Адекватная оценка эффективности проектируемой техники является одним из основных способов привлечения инвестиций для ее выпуска и в конечном итоге – мотивации потребителя к приобретению новой продукции. Другой стороной этого вопроса является разработка техники под конкретного заказчика с учетом условий ее дальнейшего функционирования. Эффективность такого подхода подтверждается деятельностью торгово-промышленной компании "Укруглемаш", объединившей российских и украинских машиностроителей. Ею охвачен полный цикл работ от изучения особенностей конкретного угольного предприятия, разработки техники под конкретного потребителя, изготовления оборудования на заводе до постгарантийного обслуживания. Совместно с "Донгипроуглемашем" разработано более 40 видов нового угледобывающего оборудования, по производительности и ресурсу соответствующего мировым образцам. За четыре года

"под ключ" оборудовано более 120 лав Украины и России.

Важность выбора оборудования, наиболее эффективного в конкретных условиях эксплуатации, в увязке с технологией его использования подтверждается анализом стратегических мер, которые предпринимались при выведении из кризисного состояния угольных отраслей Великобритании, Германии и Польши. Этот анализ свидетельствует, что в основу процесса концентрации работ и интенсификации подземного производства был положен принцип эффективного выбора и использования современной техники и технологии.

Существующие методики и их анализ

Проблема эффективности технических систем изучается на протяжении длительного времени. Учеными Академии наук СССР в 80-х гг. XX столетия сформулированы основы исследования эффективности операций в технике [1], базирующиеся на методологии системного анализа. В соответствии с этой методологией процесс исследования эффективности может быть представлен в виде трех этапов: постановка задачи, получение результатов (оценивание эффективности операции) и анализ результатов (выбор решения из множества допустимых). В общем случае задача оценки эффективности включает следующие основные процедуры: построение математической модели, оценка качества модели и вычисление показателя эффективности, который трактуется теорией как мера соответствия реального результата требуемому. При этом основной формой изучения сложных систем является исследование, основанное на имитационном моделировании. Ключевым моментом рассматриваемой теории является взаимосвязь проблем эффективности и надежности, поскольку ненадежная система не может быть эффективным средством достижения цели.

Следует отметить, что предложенные в теории подходы разработаны принципиально для любых технических систем. Однако каждая отрасль техники имеет свои особенности. Для конкретного приложения общей теории к решению задач выбора и создания новых технических устройств требуется проработка многих специфических вопросов. Кроме показателей надежности системы необходимо учитывать ряд других показателей, оказывающих существенное влияние на конечную эффективность.

Вопросом оценки эффективности горно-проходческих систем занимался ряд известных ученых [2–5]. Одним из важнейших вопросов, поднимавшихся всеми исследователями, является вопрос о критерии оценки эффективности. Очевидно, что оценить эффективность машины или комплекса каким-то одним критерием невозможно. Это многофакторная задача, которая разными исследователями решалась по-разному.

В частности, методики ИГД им. А.А. Скочинского [2] рекомендуют оценивать эффективность по техническому уровню интегральным показателем $K_{\text{ТУ}}$.

Коэффициент технического уровня $K_{\text{ТУ}}$ определяется по формуле:

$$K_{\text{ТУ}} = 1 - \sqrt{\frac{T_i^2 + T_6^2}{2(T_{p,6}^2 + T_{p,i}^2)} + \frac{\tau_i^2}{2\tau_6^2}},$$

где T_i , T_6 – трудоемкость работ соответственно по i -й и базовой технологическим схемам; $T_{p,i}$, $T_{p,6}$ – затраты ручного труда соответственно по i -й и базовой технологическим схемам; τ_i , τ_6 – затраты времени на единицу продукции соответственно по i -й и базовой технологическим схемам.

Увеличение коэффициента $K_{\text{ТУ}}$ может быть достигнуто путем снижения трудоемкости работ, уменьшения доли ручного труда и увеличения скорости проведения горной выработки (уменьшения значения τ) в сравнении с базовой проходческой системой.

Другой метод – оценка технологичности горных машин [3]. За основу расчета в данной методике берется средняя суммарная оперативная трудоемкость процессов на стадии соответственно эксплуатации машины и капитального ремонта. Однако, обладая лучшими абсолютными частными показателями технологичности, машина может иметь другие худшие потребительские свойства (производительность, длину транспортирования и т.д.). Для учета этих и других свойств вводятся удельные показатели технологичности – отношение трудоемкости какой-либо операции машины к функциональному критерию. Уровень технологичности конструкции определяется относительно значения некоторого базового показателя технологичности.

Если сравнить между собой два образца горно-проходческой техники (например, две погрузочные машины или две бурильные установки), то в общем случае они будут иметь различные значения однотипных показателей. При этом по

ряду одних показателей может быть лучше первая машина, а по ряду других – вторая.

Для обоснования выбора в подобных случаях используют показатель качества – это интегральное свойство, значение которого увеличивается при увеличении положительных и уменьшении отрицательных показателей [4]. Показатель качества представлен в виде функциональной зависимости:

$$K = f(\overset{+}{P}_a, \dots, \overset{+}{P}_{a+n}, \overset{-}{P}_b, \dots, \overset{-}{P}_{b+m}),$$

где f – функция качества; $\overset{+}{P}_a, \dots, \overset{+}{P}_{a+n}$ – положительные показатели; $\overset{-}{P}_b, \dots, \overset{-}{P}_{b+m}$ – отрицательные показатели.

На основании показателей качества отдельных машин определяется обобщенный уровень качества проходческой системы.

Оценка по уровню агрегатирования разработана для оценки рациональности структурных схем на стадии проектирования комплексов типа "Сибирь" [5]. Уровень агрегатирования Y_a определяется по формуле:

$$Y_a = \Pi_{c,c} / \Pi_{t,c},$$

где $\Pi_{c,c}$ – цена структурной схемы; $\Pi_{t,c}$ – цена технологической схемы.

Величина $\Pi_{c,c}$ зависит от количества N и характера связей (технологических T , кинематических K_n , конструктивных K_c) в проходческой системе между функциональными машинами и базовым элементом (ходовым устройством). Показатель $\Pi_{t,c}$ зависит от количества операций N_0 , требующих механизированного их выполнения, практически $\Pi_{t,c} = N_0$. В агрегатированной проходческой системе, включающей функциональные элементы, обеспечивающие выполнение всех операций проходческого цикла (имеются в виду те операции, которые могут быть в принципе механизированы), $Y_a = 1$, т.е. к этому показателю уровня агрегатирования следует стремиться при создании новых комплексов для указанных условий.

Кроме вышеприведенных, существует еще ряд критериев, по которым различными исследователями предлагается оценивать работу горно-проходческой техники, например, производительность за чистое время работы машины [6] при минимизации силовых, энергетических и других видов ресурсов, удельная трудоемкость проведения выработки, удельная себестоимость проведения выработки и др.

В качестве известного подхода для определения многих критериев эффективности нередко применяется метод экспертных оценок.

Недостатком рассмотренных выше методик оценки технического уровня и технологичности машин является невозможность дать адекватную оценку новому оборудованию, находящемуся только на стадии проектирования. Кроме того, результаты оценки в предлагаемых методиках в значительной степени обусловлены уровнем базового варианта. В оценках по показателям качества сами показатели формируются на основании технической характеристики машины, характеризуют только ее конструкцию и не учитывают эксплуатационные показатели. При определении показателя качества системы учитывается в основном функциональная способность машин выполнять производственные операции при работе в условиях взаимозависимости с другими машинами. Все вышеперечисленные методики (за исключением оценки по уровню агрегатирования) рассчитаны на проведение выработок комплектами машин и не учитывают особенностей агрегатированного оборудования. Оценка по уровню агрегатирования позволяет сравнить между собой проходческие системы только по степени механизации процессов проходческого цикла, не давая информации о таких показателях, как производительность системы, стоимость проведения выработки и т.д.

Во всех рассмотренных методиках используется детерминированная входная информация, не учитывающая случайного характера многих воздействий. Кроме этого, работа системы машин должна рассматриваться применительно к конкретным условиям эксплуатации с учетом возможного изменения этих условий в процессе работы.

В связи с вышеизложенным целью нашего исследования является разработка общих подходов, принципов и структуры методики выбора эффективной проходческой системы для проведения горизонтальных и слабонаклонных горных выработок в конкретных условиях эксплуатации на основании требований заказчика с учетом структуры объемов работ.

Основные принципы предлагаемой методики выбора — ее структура и задачи разработки. Общая структура предлагаемой методики выбора представлена на рисунке в виде блок-схемы. Во втором блоке вводятся условия проведения выработки или группы выработок. К этим условиям относятся горно-геологические и горно-техни-

ческие, дополнительные условия заказчика, а также требуемые значения целевой функции $Ц_{\phi}$.

Целевые функции могут быть следующих видов:

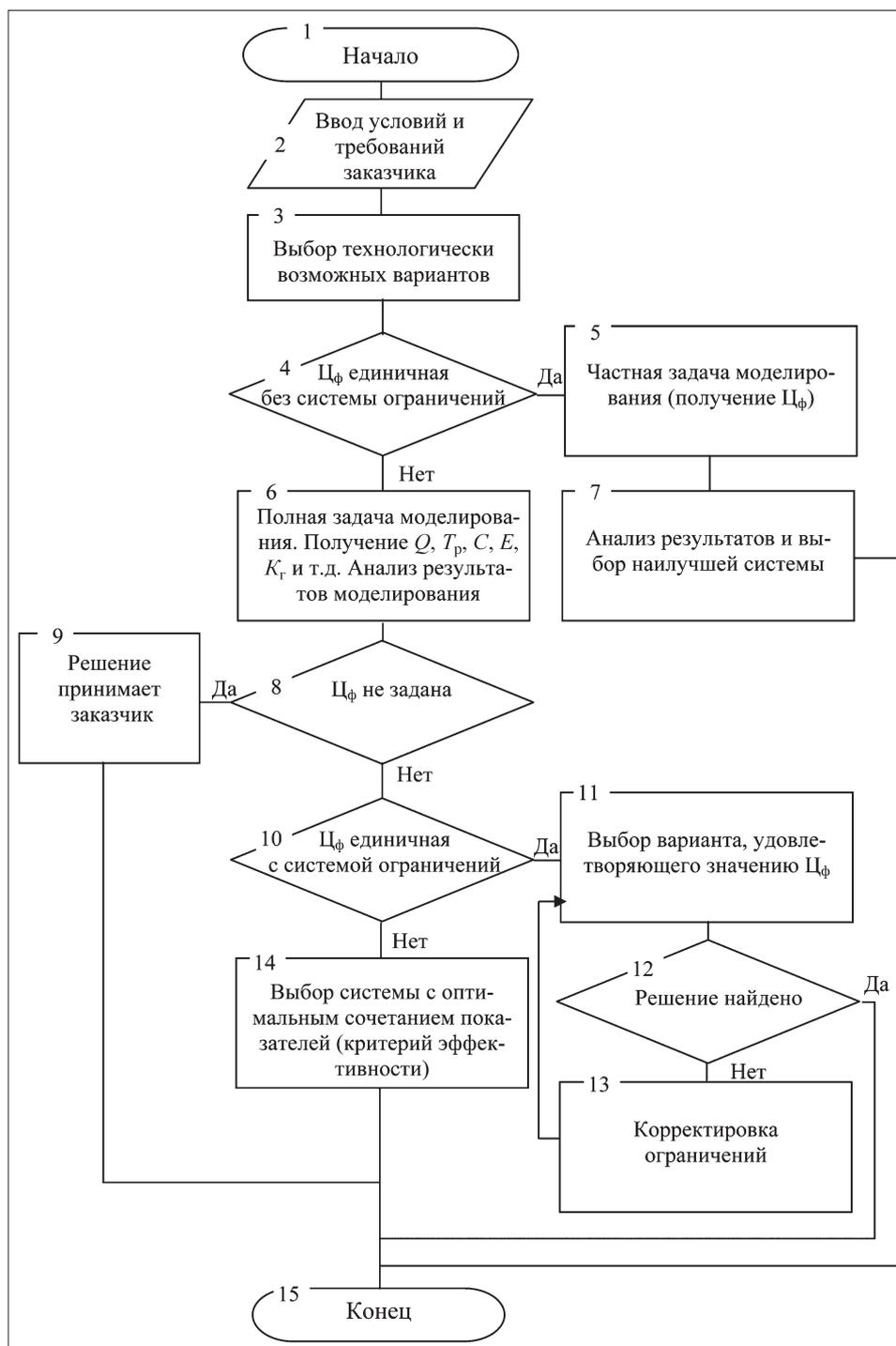
- единичные без системы ограничений (например, скорость проходки вне зависимости от стоимости оборудования);

- единичные с системой ограничений (например, максимальная производительность при затратах, не превышающих определенного значения);

- комбинированные (с оптимальным сочетанием показателей).

Возможные варианты целевых функций предлагаются заказчику и он выбирает одну из них. Целевая функция может быть не задана в случае, если заказчик желает самостоятельно произвести выбор оборудования и требуется только оценка последнего. Тогда определяется перечень показателей, которые интересуют заказчика и могут быть получены в результате моделирования. В блоке 3 производится выбор технологически возможных вариантов оборудования, которые принципиально могут работать в заданных условиях. Блок 4 определяет вид целевой функции. Если целевая функция единичная без системы ограничений, то переходим к блоку 5, в остальных случаях — к блоку 6. В блоке 5 решается частная задача моделирования функционирования вариантов проходческих систем, сформированных в блоке 3 в целях определения значения целевой функции по каждому варианту. Затем в блоке 7 проводится анализ результатов моделирования и выбор варианта с максимальным значением целевой функции.

В блоке 6 решается задача полного моделирования работы рассматриваемых вариантов проходческих систем для определения показателей их работы, таких как эксплуатационная производительность Q , стоимость единицы объема готовой выработки C , трудоемкость T_p и энергоемкость E проведения выработки, коэффициент готовности оборудования K_r и/или другие, перечень которых определен в блоке 2. В блоке 8 определяется, задана ли целевая функция. Если не задана, то решение о выборе варианта принимается заказчиком (блок 9) на основе анализа результатов моделирования по блоку 6. Если же целевая функция задана, то в блоке 10 уточняется ее вид. В случае когда целевая функция единичная с системой ограничений, переходят к блоку 11, в котором определяется наилучший вариант, удовлетворяющий ограничениям. Если решение не найдено (блок



Блок-схема структуры методики выбора эффективных горно-проходческих систем

12), то в блоке 13 производится корректировка ограничений (если таковая возможна). Далее идет возврат к блоку 11. Этот цикл повторяется до тех пор, пока не будет найдено удовлетворительное решение.

В случае когда целевая функция комбинированная и нужно найти оптимальное решение,

переходят к блоку 14, в котором проводится вычисление показателя (критерия) эффективности и выбор наиболее эффективной проходческой системы.

Разработанная структура свидетельствует о том, что для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

1) уточнить (скорректировать) структурную систематизацию проходческих систем с учетом особенностей агрегатированного оборудования;

2) разработать алгоритм выбора технологически возможных вариантов для решения задачи выбора оборудования и задачи синтеза новых систем;

3) разработать модели функционирования проходческих систем, учитывающих вероятностный характер внешних и внутренних воздействий, особенности агрегатированного оборудования, факторы надежности, изменение условий работы в период эксплуатации;

4) выбрать критерий эффективности для сравнительной оценки вариантов.

Выбор критерия эффективности проходческих систем

Эта задача представляется наиболее важной. Из вышеприведенного анализа существующих методик и критериев оценки эффективности следует, что большинство исследователей при попытке выбрать или разработать такой критерий для горно-проходческих машин и систем приходили к выводу, что этот критерий не может быть единичным, он должен быть интегральным, комбинированным. Исходя из теории [1] эффективность технических систем (ТС) определяется множеством различных по своей природе факторов, которые условно делят на три группы: качество ТС, условия функционирования ТС и способы использования ТС. По отношению к системе факторы могут быть внешними, отражающими влияние внешней среды, и внутренними, характеризующими взаимовлияние движущих сил внутри системы на ход и исход операции. В отдельную группу выделяют результирующие факторы, т.е. факторы, непосредственно формирующие результат операции. К результирующим факторам относят полезный эффект, достигнутый в операции, затраченные ресурсы и сроки проведения операции. Применительно к проходческим системам (ПС) результирующими факторами являются объем пройденной выработки, материальные, трудовые, энергетические и другие виды ресурсов и темпы проходки. Как правило, их выражают такими показателями, как производительность системы ($\text{м}^3/\text{ч}$), удельная трудоемкость (чел.-ч/ м^3) и удельная стоимость проведения выработки (руб./ м^3 или руб./пог.м).

Под проходческой системой в настоящей работе понимается совокупность горной выработ-

ки, проекта ее проведения (паспорт проведения и крепления, паспорт буровзрывных работ и т.д.) и применяемого оборудования. Несмотря на то, что общие вопросы оценки эффективности описаны в теории эффективности ТС, практическое их применение в области горно-проходческой техники требует осмысления, дополнительного анализа, выявления взаимосвязей и закономерностей ее функционирования, разработки методических подходов к формированию комплексного критерия, который в отличие от существующей практики оценки набором большого числа разнородных характеристик позволит дать объективную и полную оценку эффективности проходческой системы в конкретных условиях функционирования на протяжении всего требуемого периода ее эксплуатации. Причина в том, что основные факторы противоречивы и взаимосвязаны, изменение одного приводит к изменению остальных. Иногда улучшение одного показателя влечет за собой ухудшение других настолько, что снижается общая эффективность. Поэтому так важна задача разработки интегрального критерия оценки для выбора наиболее эффективной ПС.

Проведение горной выработки состоит из выполнения многих операций, которые условно можно разделить на забойные (основные – разрушение массива, погрузка и транспортировка горной массы, крепление обнажений и вспомогательные) и внезабойные (техническое обслуживание и ремонт, монтаж-демонтаж оборудования, перемещение из одного забоя в другой и др.). При оценке эффективности ПС, как правило, учитывают показатели забойных операций, каждая из которых имеет различную степень влияния на конечный результат. Однако внезабойные операции также существенно влияют на эффективность проходки и в ряде случаев это влияние может стать определяющим.

Например, на данном этапе исследований для оценки ПС предлагается использовать условный коэффициент эффективности забойных операций $K_{эф} = Q_{\Sigma} / \tau_{ц\Sigma}$, который интегрирует показатели производительности системы Q_{Σ} и удельной суммарной трудоемкости проходки $\tau_{ц\Sigma}$. При росте $K_{эф}$ производительность системы возрастает быстрее, чем удельная трудоемкость. Такой показатель может быть принят на первом этапе в качестве универсальной технико-технологической оценки эффективности. Значения $K_{эф}$ для различных вариантов ПС приведены в таблице. Расчет показателей Q_{Σ} и $\tau_{ц\Sigma}$ выполнен

Значения $K_{эф}$ для различных вариантов ПС

№ варианта	Состав оборудования: погрузочная машина; буровая установка; призабойный транспорт; средства крепления	Производительность системы Q_{Σ} , м ³ /ч	Удельная трудоемкость τ_{Σ} , чел.-ч/м ³	Коэффициент эффективности
1	2ПНБ-2Б; 5ВС-15М ¹	2,17	1,93	1,14
2	2ПНБ-2Б; 5ВС-15М + 1Л-80 ¹	2,61	2,13	1,20
3	МПК-3; УБШ-308; ППЛ-1К + состав вагонеток ¹	2,95	1,82	1,62
4	2ПНБ-2, УБШ-313, СП-202, КППМ-8	3,81	2,34	1,62
5	МПК-3; УБШ-308; СП-202 + 1Л100К ¹	4,36	1,58	2,76
6	Агрегатированный комплекс ² : клиновой погрузочный орган; 2×УБШ-313; клиновой конвейер; КППМ-8, призабойная мехкрепь	5,04	1,74	2,88
7	Агрегатированный комплекс ² : клиновой погрузочный орган; 2×УБШ-313; клиновой конвейер; крепь-установщик (типа КППМ-8)	5,65	1,56	3,6

¹ Крепление вручную.
² Погрузочные и транспортирующие машины с клиновыми элементами описаны в [6].

по известным методикам [2, 6] для следующих условий проведения выработки: сечение в свету/в проходке, м² – 13,8/15,7; крепость пород $f = 9$; угол наклона выработки – 0°; количество арочных рам на 1 м – 1,1 шт.; подвигание за цикл – 2 м. Как видно из таблицы, эффективность системы зависит не только от того, насколько мощные и производительные операционные машины входят в ее состав, но и как они сочетаются между собой (см. варианты 3 и 5; 1 и 2). Вариант 4 имеет более высокую производительность, чем вариант 3, но обладает большей трудоемкостью, которая в итоге уравнивает эффективность применения этих вариантов.

Предложенное определение коэффициента эффективности $K_{эф}$ требует дальнейшей доработки в целях учета экономических аспектов формирования показателей. Вместе с тем чисто экономический критерий, например, удельные затраты на проведение выработки, обладает рядом недостатков, обусловленных нестабильностью экономической ситуации, изменением рыночной конъюнктуры и цен на товары и услуги. Данный вопрос, как и вопрос определения значений других показателей проходческих систем (производительности, удельной трудоемкости, надежности и т.д.), требует выбора адекватного математического метода. Это обусловлено тем, что на всех этапах формирования оценки эффективности ПС присутствуют различного рода неопределенности: исходных данных, внешней среды, функционирования оборудования, требований, предъявляемых к эффективности ПС. Проведенный анализ свидетельствует о том, что подавляющее большинство методик формализу-

ет неопределенности лишь в качестве распределений вероятностей, построенных на субъективных оценках, т.е. неопределенность отождествляется со случайностью, что в большинстве случаев является идеализированным.

Более объективным представляется применение методов, базирующихся на теории нечетких множеств [7–9], которые относятся к методам оценки и принятия решений в условиях неопределенности. Это дает возможность формализовать в единой форме и использовать всю доступную неоднородную информацию (детерминированную, интервальную, статистическую, лингвистическую), что повышает достоверность и качество принимаемых решений.

Применение метода оценки и формирование $K_{эф}$ на основе теории нечетких множеств позволит ввести условную интервальную шкалу эффективности ПС.

Интегральный показатель эффективности проходческой системы $K_{эфПС}$ должен учитывать локальные коэффициенты эффективности:

применяемого оборудования, так как каждая машина характеризуется своими оценками эффективности ($K_{эф.маш}$);

объединения машин в ПС ($K_{эф.ОМ}$);

выполнения системой забойных ($K_{эф.ЗО}$) и внезабойных ($K_{эф.ВЗО}$) операций.

Тогда $K_{эфПС} = f(K_{эф.маш}, K_{эф.ОМ}, K_{эф.ЗО}, K_{эф.ВЗО})$. Методы определения перечисленных коэффициентов и перечень показателей, интегрируемых ими, в настоящее время находятся в стадии проработки.

В общем случае для различных систем вышеприведенные коэффициенты будут иметь разные

значения. В результате для каждого коэффициента возможно введение собственной шкалы эффективности, которая, при использовании для ее формирования теории нечетких множеств, может быть представлена в виде вектора интервальных значений (нечеткого интервала). Путем осуществления операций с такими нечеткими интервалами по правилам нечеткой математики можно получить результирующий нечеткий интервал для $K_{эфПС}$. Интеграция $K_{эф.маш}$, $K_{эф.ОМ}$, $K_{эф.ЗО}$ и $K_{эф.ВЗО}$ позволит сформировать обобщенную шкалу для оценки ПС по $K_{эфПС}$ и таким образом получить инструмент для осуществления выбора наиболее эффективных ПС.

Список литературы

1. **Надежность** и эффективность в технике: Справочник: В 10 т./ Ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1988. (В пер.). Т. 3. Эффективность технических систем / под общ. ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. 328 с.
2. **Техника** и технология горно-подготовительных работ в угольной промышленности / под ред. Э.Э. Нильвы. М.: Недра, 1991. 315 с.

3. **Временная** методика оценки фактической эксплуатационной и ремонтной технологичности очистных механизированных комплексов. М.: Минуглепром, 1978.

4. **Горбунов В.Ф., Эллер А.Ф., Скоморохов В.М.** Основы проектирования буровзрывных проходческих систем. Новосибирск: Наука, 1985. 185 с.

5. **Бунин В.И.** Создание комплексов для проведения наклонных горных выработок. Кемерово: Кузбассвуиздат, 1998. 156 с.

6. **Хазанович Г.Ш., Ленченко В.В.** Буровзрывные проходческие системы: учеб. пособие / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2000. 504 с.

7. **Алтунин А.Е., Семухин М.В.** Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. Тюмень: Изд-во ТГУ, 2000. 352 с.

8. **Дюбуа Д., Прад А.** Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике: пер. с фр. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.

9. **Деревянко П.М.** Сравнение нечеткого и имитационного подхода к моделированию деятельности предприятия в условиях неопределенности // Современные проблемы экономики и управления народным хозяйством: Сб. науч. статей. Вып. 14. СПб.: СПбГИЭУ, 2005. С. 289–292.

межрегиональная специализированная выставка

НЕФТЬ. ГАЗ ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГО-2011

9-11 ноября 2011 г.

г. Якутск
СК «МОДУН»,
ул. Кирова, 20/1



ОРГАНИЗАТОРЫ:

Правительство Республики Саха (Якутия)
Торгово-промышленная палата Республики Саха (Якутия),
Министерство промышленности Республики Саха (Якутия),
Выставочная компания СибЭкспоСервис-Н г. Новосибирск

СИБЭКСПО SERVICE

ООО «СибЭкспоСервис-Н»
630090, Новосибирск, пр. Коптюга 4, оф. 113
Тел./факс: (383) 335-63-50 (многоканальный)
E-mail: ses@avmail.ru

Проблемы взаимодействия системы "колесо—рельс" карьерного железнодорожного транспорта*

Рассмотрен процесс контакта колес подвижного состава железнодорожного транспорта с рельсами в условиях карьеров и, в частности, на криволинейных участках пути. Выявлены особенности взаимодействия колес локомотива с рельсами в условиях конформного гребневого контакта и установлен характер изменения нагрузки в зоне пятна контакта.

Ключевые слова: карьерный железнодорожный транспорт, конформно-изношенный профиль колеса, криволинейный участок пути, конформный гребневый контакт, пятно контакта, пробуксовка колесных пар локомотива.

А.М. Керопян

The Problems of the Interaction of the System "Wheel a Rail" Career of Railways Transport

The considered process of the contact travell about rolling stock of the rail-freight traffic with rail in condition quarry and on curvilinear area of the way in particular. The revealed particularities of the interaction travell about locomotive with rail in condition conformalitik comb of the contact and are installed nature of the change the load in zone heel contact.

Keywords: quarry railway, conformally worn profile wheels, curved section of track, comb conformal contact, the contact patch, slip of the locomotive wheelsets.

В мировой практике организации грузовых железнодорожных перевозок для составов, имеющих большую осевую нагрузку (более 250 кН), принят термин – тяжеловесное движение, при этом объем ежегодных перевозок таким составом должен составлять не менее 20 млн т брутто или же общая масса поезда превышать 5000 т. В этих условиях рекомендуется избегать криволинейных участков пути радиусом менее 500 м и уклонов крутизной более 10 ‰. Наряду с повышенными требованиями, предъявляемыми к качеству рельсового пути (термоупрочненная низколегированная рельсовая сталь с очень мелкой перлитной структурой твердостью HRC \geq 42), для тяжеловесного движения желательна применение бесстыкового пути, обеспечивающего экономичность технического обслуживания и ремонта. Кроме того, высокие требования при тяжеловесном движении должны обеспечиваться при обустройстве верхнего строения рельсового пути. В частности, щебеночный балласт должен быть определенно-

го гранулометрического состава с соответствующей формой зерна и прочностью [1].

В зоне пятна контакта между колесом и рельсом воспринимается вертикальная нагрузка и передаются тормозная и тяговая тангенциальные силы. Рассмотрение геометрии рельса, колеса и зоны их контакта в качестве самостоятельных элементов общей системы, а также управление взаимодействием колес и рельсов как системой позволяют оптимизировать их работу в условиях тяжеловесного движения. Опыт показывает, что в процессе эксплуатации рельсы работают неодинаково и степень их износа зависит от радиуса кривых, режима смазки и даже от вида подрельсового основания.

Рельсовый транспорт горных предприятий имеет свои специфические особенности: большое количество кривых малого радиуса, обычно 100...200 м (на некоторых горных предприятиях протяженность кривых участков радиусом менее 350 м составляет более половины всей длины карьерных путей); возможны минимальные радиусы величиной даже 40...60 м; большое количество стрелочных переводов, в среднем на 1 км пути – около двух; значительные (до 60...80 ‰)

*Статья публикуется в редакции автора.

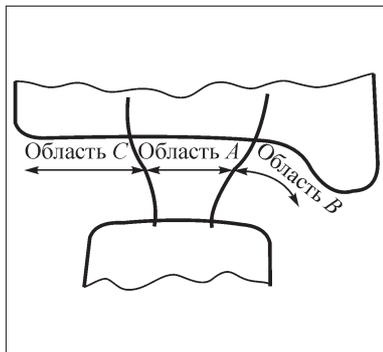


Рис. 1. Функциональные области контакта рельса и колеса:

область *A* – контакт между средней частью головки рельса и обода колеса; область *B* – контакт между выкружкой* головки рельса и галтелью в основании гребня; область *C* – контакт между наружными зонами рельса и колеса

уклоны рельсового пути; большие осевые нагрузки, которые достигают 350 кН; применение старогодных рельсов, снятых с магистральных путей РЖД; наличие передвижных рельсовых путей и т.д. [2].

В сложных физико-механических условиях контактного взаимодействия при наличии высоких статических и динамических нагрузок, температурного воздействия и присутствия абразива происходит интенсивный износ рабочих поверхностей колес и бандажей, что снижает их долговечность, уменьшает межремонтный срок, приводит к большим экономическим затратам на их восстановление или ремонт. Поэтому в целях повышения эффективности использования карьерного железнодорожного транспорта и сокращения затрат на его ремонт и техническое обслуживание необходимо исследовать взаимодействие колес подвижного состава с рельсами, в частности на криволинейных участках рельсового пути. Этому будет способствовать организация непрерывного мониторинга технического состояния рельсового пути и колесных пар подвижного состава карьеров. В процессе мониторинга, до начала профилировочных работ рельсового пути, с помощью профилографа ПРП-1 (профилограф рельсовый переносного типа) необходимо провести поикетное (по одному замеру на каждой рельсовой нити) снятие поперечных профилей головок рельсов, измерение величины волнообразного и бокового износа согласно рекомендациям [4]. Восстановление изношенного профиля колесных пар необходимо проводить по соответствующим шаблонам, установленным инструкцией [5].

Для рационального распределения нагрузок в пятне контакта пары колесо–рельс особое внимание должно уделяться выбору профиля их поверхностей взаимодействия. В результате многочисленных исследований установлено, что в

*Выкружка – закругление в верхней части головки рельса.

процессе приработки колесо и рельс получают примерно идентичный профиль, так называемый конформно-изношенный профиль [1, 3]. При дальнейшем взаимодействии форма их контактирующих поверхностей изменяется мало.

Рабочую часть профилей колеса и рельса можно разделить на три области: *A*; *B*; *C* (рис. 1) [1].

В области *A* контакт возникает наиболее часто при движении подвижного состава в прямых и кривых относительно большого радиуса, в результате чего:

- контактные напряжения в данном случае между рельсом и колесом самые низкие из всех возможных вариантов контакта;

- поперечное проскальзывание и сопутствующие ему силы крипа* низкие, особенно если ходовая часть подвижного состава не подвергается воздействию со стороны неровностей пути:

- продольное проскальзывание и сопутствующие ему силы крипа больше, чем поперечное, что создает благоприятные условия для устойчивости экипажа.

В области *B* реализуется так называемый гребневый контакт. Такой контакт непременно возникает в криволинейных участках пути малого радиуса и там, где не выдерживается положение пути в плане, а также там, где есть нарушения на рельсах непрерывности поверхности катания колес.

Существуют три возможных формы, которые должны учитываться при рассмотрении гребневого контакта. Это *двухточечный контакт*, *одноточечный контакт* и *конформный контакт*, показанные на рис. 2.

Двухточечному контакту (рис. 2, а) присущи интенсивное проскальзывание и изнашивание, если имеют место боковые силы на гребне и поперечное проскальзывание, что характерно для движения локомотива в кривых. В этих условиях износ гребня колеса ускоряется и продолжается до тех пор, пока очертания гребня не будут соответствовать очертаниям головки рельса. Контакт здесь зачастую настолько интенсивный, что происходит пластическое течение материала на гребне колеса. Как показывает практика эксплуатации, гребень часто подрезается при любом

*Крип – явление, связанное с тем, что вследствие упругого взаимодействия колеса и рельса при небольших значениях относительного проскальзывания площадка контакта разделяется на зоны сцепления и микропроскальзывания, что влечет за собой уменьшение тангенциальных сил на этой площадке по сравнению с максимальным значением [1].

слое лубрикационного (смазочного) материала, внесенного в зону контакта.

При двухточечном контакте, в условиях качения со скольжением, мгновенный центр скоростей (точка P) колеса находится в приконтактной зоне, в непосредственной близости от точки касания B поверхности катания колеса с рельсом (рис. 3, a), в то время как скорость скольжения второй точки касания на гребне колеса (точка D) создает условия для осуществления катастрофического износа в этой точке (см. рис. 3, b , $в$).

Качение колеса локомотива по рельсу сопровождается скольжением, при этом мгновенный центр скоростей находится выше точки касания колеса с рельсом на расстоянии BP . Предположим, что центр колеса A катится по кривой со скоростью 60 км/ч (16,7 м/с). При допустимой величине проскальзывания, принятой в пределах 0,1...10 % от скорости движения (в некоторых источниках приводятся цифры до 15...20 %, поэтому принимаем в среднем 10 %), максимальная скорость проскальзывания $v_{B \max}$ точки B касания колеса с рельсом будет равна 6 км/ч (1,7 м/с). Из подобия треугольников PAE и PBK (см. рис. 3, a) определим скорости проскальзывания в точках C и D гребня колеса. Для этого предварительно определим расстояния BP . Из подобия треугольников PAE и PBK имеем

$$\frac{v_A}{v_{B \max}} = \frac{AP}{BP}. \quad (1)$$

Но $AP = 0,625 - BP$, тогда $\frac{v_A}{v_{B \max}} = \frac{0,625 - BP}{BP}$;

$$BP = \frac{v_{B \max} \cdot 0,625}{v_A + v_{B \max}} = \frac{1,7 \cdot 0,625}{16,7 + 1,7} = 0,058 \text{ м.}$$

Скорость проскальзывания точки C определяем из подобия треугольников PBK и PCM : $\frac{v_B}{v_C} = \frac{PB}{PC}$; $CP = BP + CB = 0,078 \text{ м.}$

Тогда $v_C = \frac{v_B \cdot PC}{PB} = \frac{1,7 \cdot 0,078}{0,058} = 2,286 \text{ м/с.}$

Скорость проскальзывания в точке D находим из подобия треугольников PBK и PDN : $\frac{v_B}{v_D} = \frac{PB}{PD}$; $PD = PB + BD = 0,058 + 0,032 = 0,09 \text{ м.}$

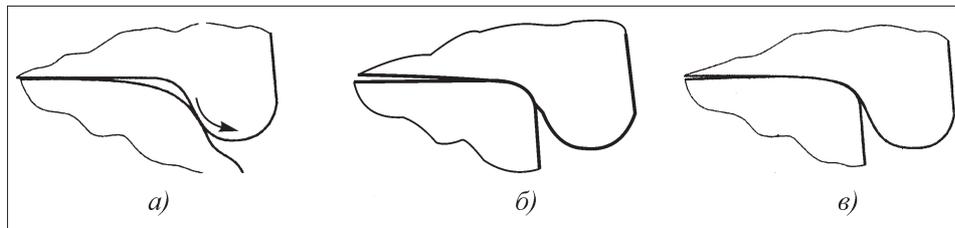


Рис. 2. Три основных формы гребневого контакта: a – двухточечный; b – одноточечный; v – конформный

Тогда $v_D = \frac{v_B \cdot DP}{BP} = \frac{1,7 \cdot 0,09}{0,058} = 2,638 \text{ м/с.}$

Выполненные расчеты показали, что на гребне колеса, при износе боковой поверхности рельса до величины критического значения (см. рис. 3, $в$), скорость скольжения крайней точки D существенно возрастет и составит 2,638 м/с (9,5 км/ч). Это составляет 15,83 % от номинальной скорости движения локомотива, т.е. более чем в 1,5 раза превышает допустимый уровень пробуксовки (1,7 м/с).

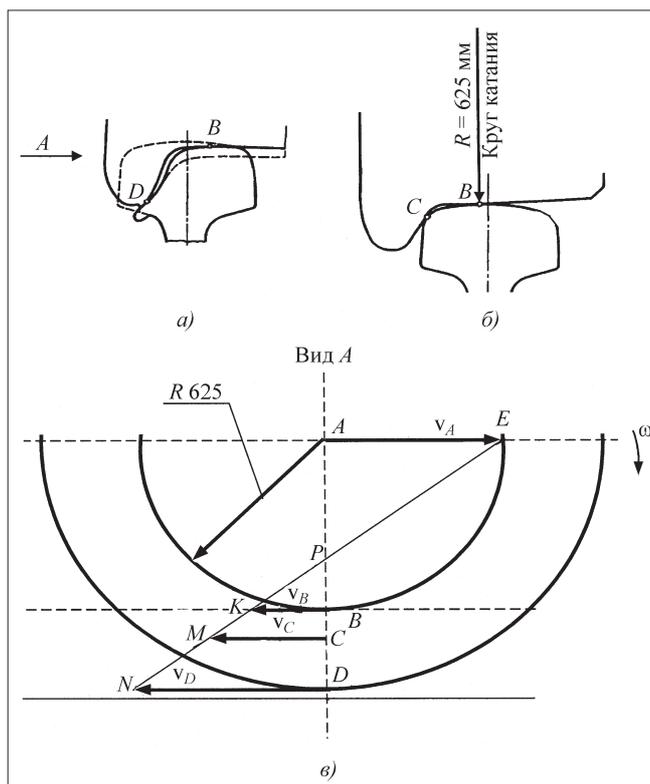


Рис. 3. Схема определения положения мгновенного центра скоростей колеса при двухточечном гребневом контакте в зависимости от износа системы колесо–рельс: a – вид сбоку (со стороны гребня) системы колесо–рельс ($BC = 20 \text{ мм}$; $BD = 320 \text{ мм}$); b – схема взаимодействия нового колеса с новым рельсом; v – схема взаимодействия нового колеса с максимально изношенным рельсом

Учитывая изложенное, целесообразно ограничить допускаемую пробуксовку колесных пар локомотива в пределах 5...8 % от номинальной скорости движения.

Одноточечный контакт (рис. 2, б), возможно, наносит наибольшие повреждения колесам подвижного состава и пути, особенно при движении на криволинейных участках железнодорожных путей карьеров при минимальных радиусах закругления. Высокие контактные напряжения, имеющие место в условиях интенсивного проскальзывания, вызывают усталостные повреждения на рабочей выкружке головки рельса.

Все же одноточечный контакт рассматривается как приемлемый для прямых участков пути, поскольку трудно представить, что имеющие место малые углы набегания приведут к чрезмерному износу и изменению исходного профиля колеса. Такие условия способствуют уменьшению конусности и, следовательно, повышению устойчивости движения подвижного состава в прямых.

Конформный гребневой контакт (см. рис. 2, в) возникает по мере износа рабочей выкружки рельса и гребня колеса до общего профиля вследствие интенсивного гребневого контакта в кривых. Отмечено, что этот профиль примерно одинаков при различных условиях гребневого контакта как на отечественных, так и на зарубежных железных дорогах [1].

О сложных условиях контакта, при которых формы контактирующих поверхностей становятся и остаются подобными, известно немного, однако можно отметить следующее:

- относительное проскальзывание увеличивает зону контакта (рис. 4);
- удельное давление уменьшается;
- по всей вероятности, имеет место некоторое течение материалов в направлениях, показанных на рис. 4.

Как было отмечено выше, каков бы ни был механизм образования конформного контакта, профили рельса и колеса, изношенные до соответствующих им конфигураций, успешно ее сохраняют и показывают хорошую работоспособность с точки зрения усталостной долговечности [1, 3].



Рис. 4. Модель образования конформного гребневого контакта

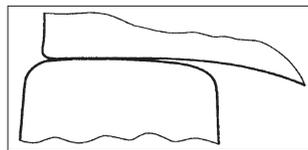


Рис. 5. Условия образования высоких контактных напряжений на внешней стороне колеса, контактирующего с внутренним рельсом кривой

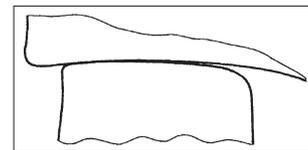


Рис. 6. Условия образования высоких контактных напряжений на наружной стороне внутреннего рельса

Учитывая изложенное, колесам и рельсам профиль по рис. 4 можно придавать в процессе текущего содержания; рельсы могут профилироваться шлифованием сразу после укладки в путь (согласно [4]), а колесам нужно придавать конформный профиль (согласно рекомендациям [5]).

Область С, вероятно, наиболее трудна для оптимизации, потому что контакт между рельсом и колесом в этой области заканчивается, и в конечном счете, несмотря на усилия разработчика, либо возникают высокие контактные напряжения при опирании наружной кромки профиля колеса на рельс (рис. 5), либо зона контакта не доходит до края колеса, что вызывает образование ложного гребня с наружной стороны поверхности катания (рис. 6).

Анализ возможных в процессе эксплуатации вариантов контактов колеса и рельса показал, что наиболее благоприятными, с точки зрения минимизации износа и контактных напряжений, являются контакт в зоне А и конформный гребневый контакт. Наибольший интерес представляет исследование гребневого контакта в зоне В.

Рассмотрим контакт профиля колеса локомотива, максимально приближенного к изношенному, представленного в виде профиля ДМетИ (Днепропетровский металлургический институт), и стандартного железнодорожного рельса Р65К по ГОСТ Р 51685–2000. Для исследования выбираем один из профилей, рекомендуемый к применению литературой [5] и показанный на рис. 7.

Данный профиль в интервале точек № 3...9 (наиболее вероятный диапазон касания колеса и рельса) можно аппроксимировать полиномом пятой степени в виде уравнения

$$y = 5,87 \cdot 10^{-8} \cdot x^5 - 2,32 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 + 0,0036 \cdot x^3 - 0,2739 \cdot x^2 + 10,309x - 128,1. \quad (2)$$

Коэффициент аппроксимации равен 1, т.е. сходимость практически 100 %.

Радиус кривизны профиля ДМетИ $R_{крив}$, соответствующего изношенному, а точнее, приработанному колесу, определяется формулой

$$R_{крив} = \frac{(1 + y'^2)^{3/2}}{y''}.$$

Значения геометрических координат, радиусов кривизны и кругов катания $R_{кат}$ в соответствующих точках профиля приведены в табл. 1.

Анализ аппроксимированного уравнением (2) профиля локомотивного колеса ДМетИ показывает, что в наиболее вероятной зоне гребневого контакта этого профиля с рельсом Р 65 К (в точках № 3–5) есть условия для возникновения двухточечного контакта. В этих точках радиусы кривизны профиля колеса равны соответственно 29,8; 25,0; 34,0 мм, а радиус кривизны головки рельса Р 65К в зоне гребня – 60 мм [6]. Для сравнения можно привести данные кривизны в этой зоне аналогичного рельса, применяемого в США, – 31,8 мм. На основании изложенного можно сделать вывод, что следует детально исследовать

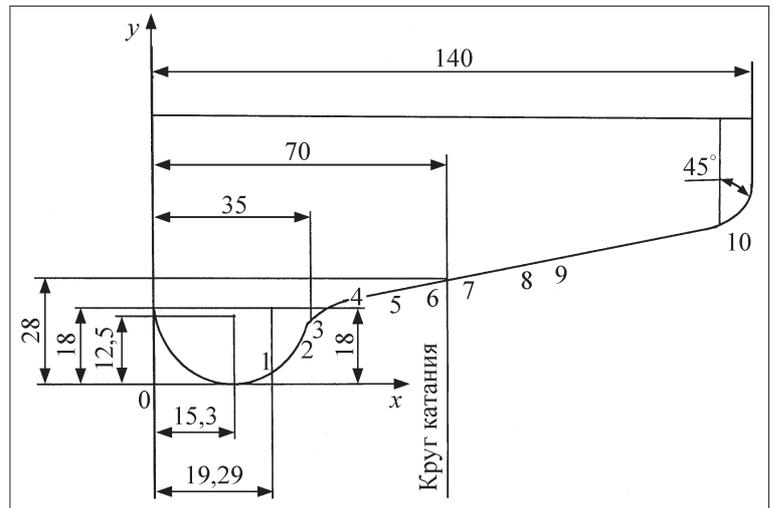


Рис. 7. Профиль бандажа ДМетИ ЛБ с гребнем толщиной 33 мм

профили колес, рекомендуемых [5], и стандартных рельсов [6] на предмет их взаимного соответствия. Следует также обратить внимание на такое обстоятельство, что, учитывая особенности взаимодействия системы колесо–рельс, срок службы рельсов значительно превышает соответствующий показатель колес. В зависимости от условий работы срок службы рельсов колеблется в пределах 8–25 лет (табл. 2) [2]. Поэтому

Таблица 1

Точка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x, мм	27	30	33	37	45	60	80	100	110	135
y, мм	8,06	14,06	18,0	21,35	24,94	27,02	28,85	30,27	31	35,36
$R_{крив}$	–	–	29,8	25,0	34,0	1475	960,0	903,0	49,0	–
$R_{кат}$	–	–	635,0	631,65	628,06	625,98	624,15	622,73	622,0	–

Таблица 2

Пути	Годовая грузонапряженность 1 км пути, млн ткм брутто	Нагрузка от оси на рельсы, кН	Рельсы	Срок службы рельсов, лет
Подъездные, внутренние и внешние	≤ 5	≤ 250	Р 38	20
			Р 43	25
			Р 50	30
	5...10	≤ 250	Р 43	15
			Р 50	20
			Р 50*	10
	10...15	≤ 250	Р 65	10
			Р 50*	15
> 5	> 250	Р 50*	15	
		Р 65*	20	
		–	–	
Передвижные	–	≤ 250	Р 50	10
			Р 50	8
			Р 65	10

*Новые рельсы.

часто в практике эксплуатации карьерного железнодорожного транспорта может встречаться форма контактирования новых колес с изношенными рельсами (см. рис. 3, в). В процессе износа рабочая поверхность рельса уплощается и, как следствие, ее радиус кривизны в зоне контакта увеличивается, тем самым создавая благоприятные условия для возникновения двухточечного гребневого контакта, рассмотренного выше.

Вследствие того что профиль головки рельса представляет собой цилиндрическую поверхность, состоящую из сопряжений дуг окружностей с разными радиусами, а профиль поверхности катания колеса, аппроксимирующийся уравнением (2), также имеет переменную кривизну, радиус круга катания колеса $R_{кат}$ в каждый момент времени принимает различные значения, т.е. является переменной величиной (см. табл. 1). Учитывая изменение радиусов взаимодействующих тел в зоне пятна контакта, можно предположить, что площадь пятна контакта также будет постоянно изменяться, так как радиус кривизны головки рельса и диаметр окружности катания колеса в зоне их контакта при этом также постоянно меняются и, следовательно, будут изменяться контактные и касательные напряжения. Следовательно, характер нагружения рельсов является стохастическим, при котором колеса подвижного состава воздействуют неравномерно в разное время на разные точки головки рельсового пути.

Таким образом, значения сил, действующих на головку рельса со стороны колес подвижного состава, носят вероятностный характер и зависят прежде всего, от позиции колес, вступающих в контакт с рельсом в данный момент времени, что определяется величиной пятна контакта и, как следствие, значением контактных и касательных напряжений в зоне контакта колеса с рельсом. Следовательно, для составления расчетной схемы нагружения колес локомотива необходимо установить влияние различных факторов на формирование пятна контакта в данный момент времени и установить характер измене-

ния радиальной составляющей нагрузки, действующей на рельсовый путь.

Выводы

1. Для повышения ресурса системы колесо–рельс необходимо ограничить допускаемую величину скорости пробуксовки колесных пар находящихся в эксплуатации локомотивов до 5...8 % от номинальной скорости движения состава.

2. При использовании на карьерах старогодных рельсов целесообразно проводить своевременное профилирование рельсов и колесных пар подвижного состава по поверочным шаблонам.

3. Для обеспечения конформного профиля колес карьерного железнодорожного транспорта необходим непрерывный мониторинг выкружки (боковой поверхности) головки рельсов железнодорожного полотна и колесных пар подвижного состава.

Список литературы

1. **Обобщение** передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / пер. с англ. У.Дж. Харрис, С.М. Захаров, Дж. Ландгрэн и др. Интертекст, 2002. 408 с.

2. **Евдокимов Б.А., Забелин Г.Д. и др.** Железнодорожный транспорт открытых разработок. М.: Недра, 1984. 181 с.

3. **Сошенко С.Н., Мезрин А.М.** Особенности моделирования больших износов в системе колесо–рельс / Тр. 50-й науч. конф. МФТИ "Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук". М.: МФТИ, 2007. 407 с.

4. **Альбрехт В.Г., Крысанов Л.Г., Абдурашитов А.Ю., Шмига Ю.Н.** Профильная обработка рельсов шлифовальными поездами с активными рабочими органами. М.: ВНИИЖТ, 1999.

5. **Инструкция** по формированию, ремонту и содержанию колесных пар тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм (с изменениями и дополнениями, утвержденными указанием МПС России от 23.08.2000 №К – 2273у).

6. **ГОСТ Р 51685–2000.** Рельсы железнодорожные.

УДК 621.311:629.1.014:621.391

С.А. Игнатьев, канд. техн. наук, Э.Х. Муратбаев, канд. техн. наук, СПГИ (ТУ), г. Санкт-Петербург
E-mail: isa@spmi.ru

Обеспечение непрерывности технологического процесса путем автоматического восстановления электроснабжения

Рассмотрены устройства быстродействующего автоматического ввода резервного электроснабжения для обеспечения непрерывности технологического процесса на горно-добывающем предприятии. Представлены результаты математического моделирования работы электромеханических комплексов с синхронными и асинхронными двигателями, системы электроснабжения и быстродействующего устройства.

Ключевые слова: системы электроснабжения, быстродействующие устройства, резерв, математическое моделирование, длительность перерыва, автоматика.

S.A. Ignatiev, E.H. Muratbaeev

Securing Processes Continuity by Automatic Recovery of Electric Power Supply

Quick-response devices for automatic supply of standby electrical power to secure process continuity at mining and processing plants are reviewed. The paper gives mathematical simulation results for operation of electromechanical complexes with synchronous and induction motors, a power supply system and a quick-response device.

Keywords: electric power supply systems, quick-response devices, standby, mathematical simulation, interruption duration, automation.

Система электроснабжения горно-добывающих предприятий является многоуровневой с напряжениями на отдельных уровнях 35, 6(10) и 0,4 кВ с ответвлениями 6(10) и 0,4 кВ к основным потребителям. Кратковременный перерыв электроснабжения потребителей на горном предприятии может привести к их отключению и, как следствие, к значительному экономическому ущербу. На восстановление технологического процесса после отключения основных потребителей требуются десятки минут. Поэтому чрезвычайно актуальным является ограничение длительности перерывов электроснабжения на уровне, при котором сохраняется устойчивость технологического процесса.

Снижение длительности перерывов электроснабжения может быть достигнуто путем введения в состав системы электроснабжения устройств быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР).

На сегодняшний день существует множество устройств данного типа, но наибольшее приме-

нение нашли следующие устройства быстродействующего ввода резерва:

- 1) аналоговый блок пускового устройства (ПУ) типа БЭ 8302;
- 2) автоматический переключатель секции шин (АПСШ);
- 3) устройство тиристорного автоматического ввода резерва (ТАВР);
- 4) устройство АВР типа SUE 3000;
- 5) микропроцессорный контроллер АВР М-4272;
- 6) микропроцессорное пусковое устройство БАВР.

Каждое из перечисленных устройств имеет свои достоинства и недостатки. Выбор того или иного из них обусловлен возможностью обеспечить непрерывность технологического процесса (надежность электроснабжения потребителей и устойчивость высоковольтной и низковольтной электродвигательной нагрузки).

В целях определения возможности обеспечения непрерывности технологического процесса

при кратковременных нарушениях электроснабжения, попадающих в зону действия автоматического ввода резерва (АВР), проверки условий самозапуска электродвигателей после восстановления электроснабжения потребителей разработана математическая модель, описывающая работу электромеханических комплексов с синхронными и асинхронными электродвигателями, системы электроснабжения и быстродействующего устройства АВР.

Модель разработана в среде MatLAB, пакет SimuLink. Она позволяет оценить успешность процесса секционирования посредством АВР при различных вариациях параметров системы электроснабжения и двигательной нагрузки.

Полученная модель позволяет определить допустимую длительность перерыва электроснабжения СД (синхронных двигателей) и АД (асинхронных двигателей). Допустимая длительность перерыва электроснабжения – это максимальное время, по истечении которого после восстановления напряжения агрегат возвращается в состояние, предшествующее потере напряжения.

СД очень широко используются в горной промышленности, в частности применяются на вентиляторных установках главного проветривания шахт, в качестве привода насосов, в качестве главного приводного агрегата (генератора) на карьерных экскаваторах и т.д.

Разработанная математическая модель является универсальной и справедлива для всех синхронных и асинхронных двигателей. Для получения данных по конкретной марке двигателя в

математическую модель необходимо ввести параметры интересующего двигателя. Для каждой марки двигателя эти параметры различны.

Для исследований были приняты параметры двигателей СТД-1250 и ПЭД-48 (как одни из наиболее широко используемых). Полученные результаты приведены на рис. 1 и 2.

Как видно из полученных зависимостей, допустимая длительность перерыва Δt электроснабжения зависит от электромеханической постоянной времени агрегата T_j , величины провала напряжения ΔU и, в случае синхронного двигателя, коэффициента форсировки k_f . Для $\Delta U = 0,75$ и $T_j = 1...3$ с в случае СД $\Delta t = 0,12...0,18$ с, для $\Delta U = 0,7$ и $T_j = 0,35$ с в случае АД $\Delta t = 0,11$ с.

Таким образом, можно утверждать, что непрерывность технологического процесса будет достигнута, если перерыв электроснабжения не превысит 0,11 с. Однако следует учитывать, что основными потребителями электроэнергии являются электродвигатели, и при потере питания шины поврежденной секции остаются под напряжением из-за перехода двигателей в генераторный режим работы. Происходит выбег электродвигателей, сопровождающийся увеличением угла фазового рассогласования между одноименными напряжениями на поврежденной секции U_d и на исправной U_c (рис. 3). Возможность подключения двигательной нагрузки на исправную секцию без возникновения сверхтоков существует, если угол фазового рассогласования не превышает 30 эл. градусов (см. рис. 3, а).

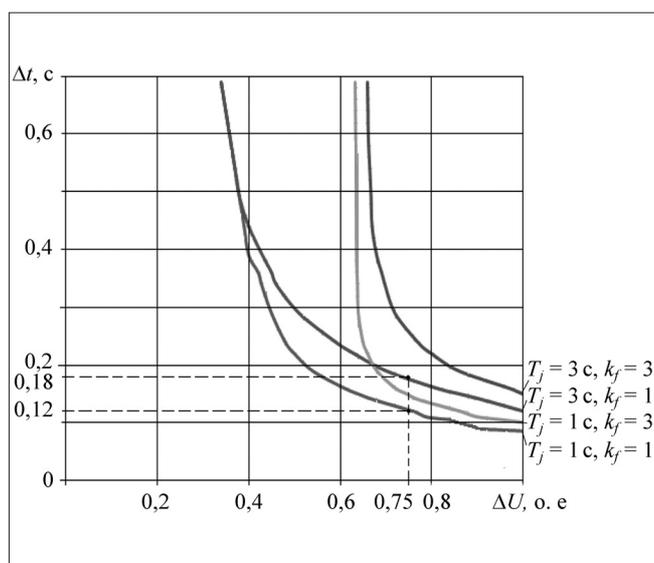


Рис. 1. Зависимости допустимой длительности перерыва электроснабжения синхронных двигателей от T_j , ΔU , k_f

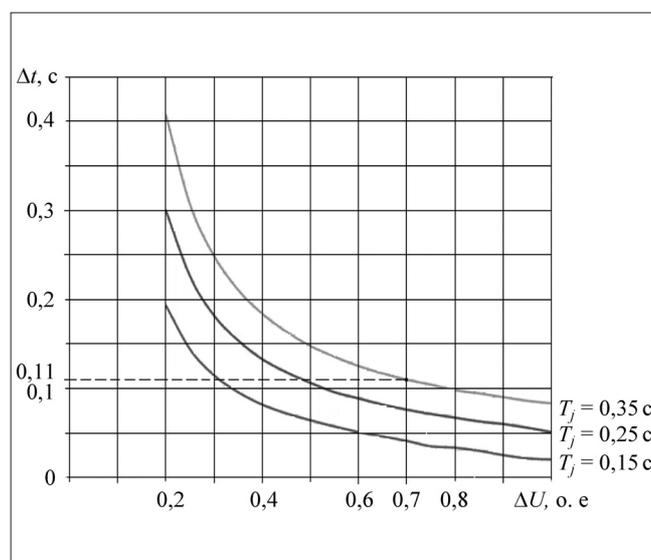


Рис. 2. Зависимости допустимой длительности перерыва электроснабжения асинхронных двигателей от T_j и ΔU

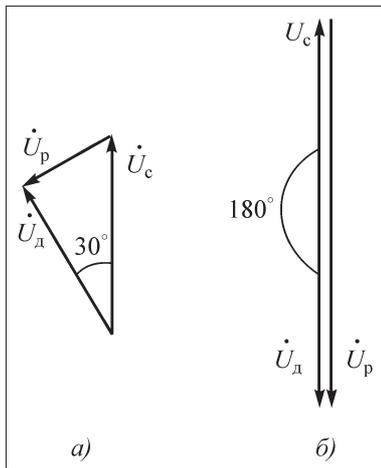


Рис. 3. Векторные диаграммы напряжений поврежденной и исправной секций шин

где $I_{п.н} = 5I_n$ – пусковой ток двигателя при номинальном напряжении;

U_p – результирующий вектор напряжений исправной и поврежденной секций шин.

При превышении данным углом указанного значения происходит рост пусковых токов вплоть до двухкратного пускового тока в случае подключения секций в момент нахождения фаз в противофазе (см. рис. 3, б). Это приведет к срабатыванию средств релейной защиты и автоматики, что вызовет возникновение перерыва электроснабжения, приводящего к нарушению технологического процесса.

Так как основным средством восстановления питания является автоматический ввод резерва, то время его срабатывания не должно превышать установленной величины 0,11 с. Время срабатывания автоматического ввода резерва суммируется из нескольких составляющих, определяющей из которых является время включения секционного выключателя, которое может дости-

При этом пусковой ток составит

$$I_{п} = \frac{U_p}{U_n} I_{п.н} = \frac{2 \sin \frac{30^\circ}{2}}{1} 5I_n = 2,6I_n,$$

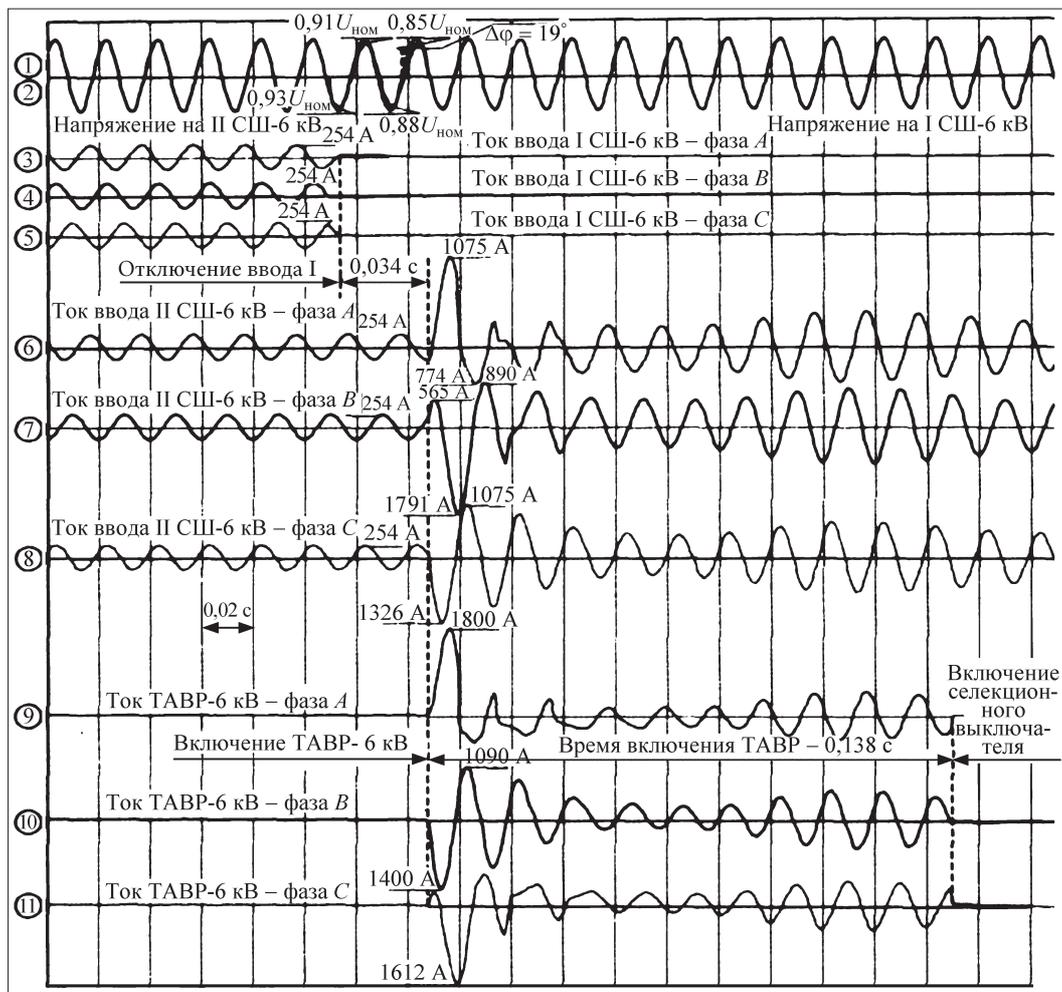


Рис. 4. Осциллограммы испытаний устройства ТАВР-6 кВ

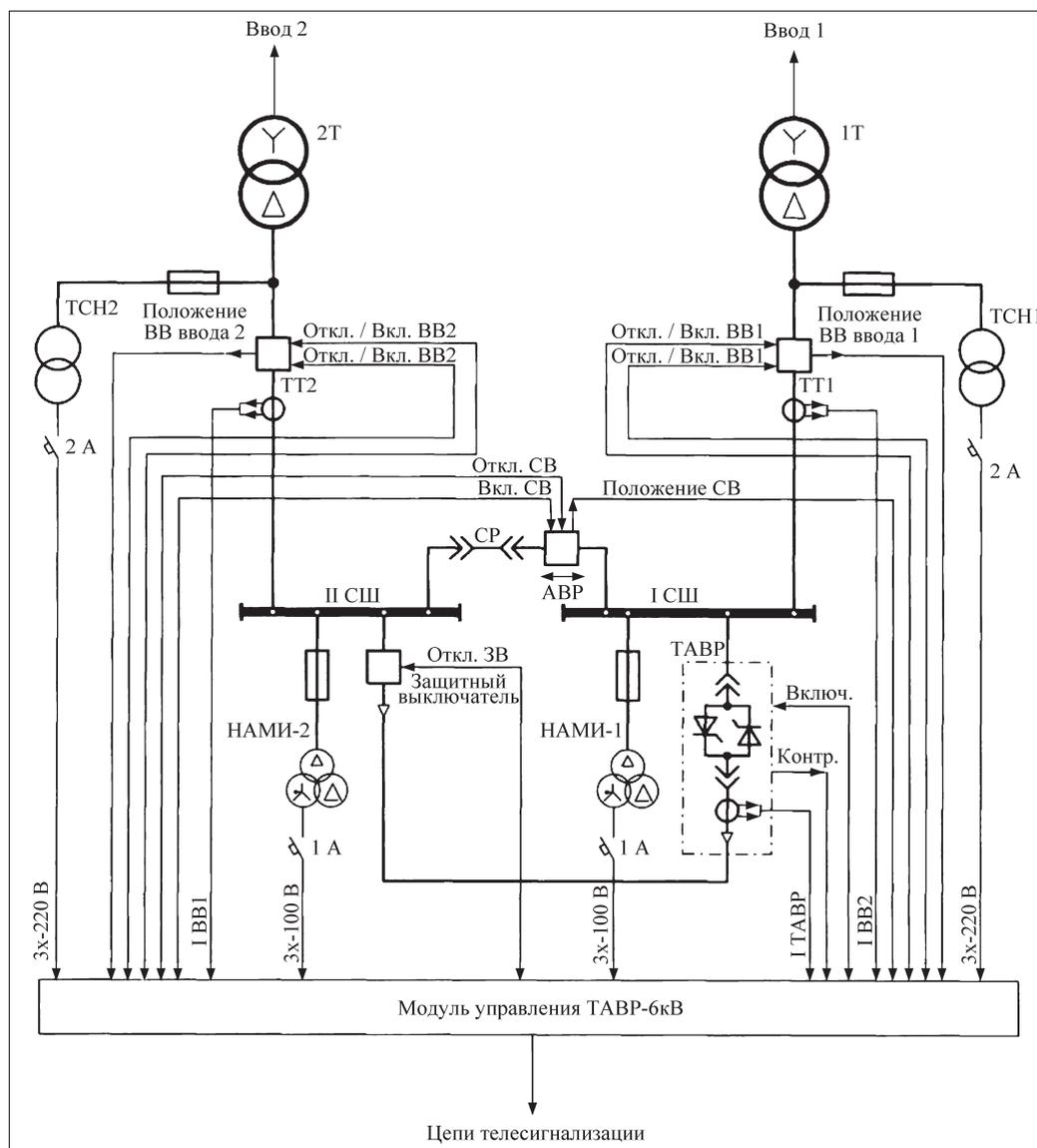


Рис. 5. Типовая структурная схема ТАВР

гать 0,15 с для широко применяемых электро-механических вакуумных и элегазовых выключателей. Такое быстродействие не обеспечивает непрерывности технологического процесса. Необходимо применять более быстродействующее электротехническое оборудование. Таким оборудованием является устройство, созданное на основе бесконтактных тиристорных коммутационных аппаратов, называемое тиристорным автоматическим вводом резерва (ТАВР). Время его срабатывания 0,02...0,04 с (0,034 с на приведенной осциллограмме, рис. 4). При этом ТАВР имеет модуль управления, который следит за углом фазового рассогласования и дает запрет на переключение в случае превышения углом значения 30 эл. градусов.

Осциллограммы испытаний устройства ТАВР (см. рис. 4) показывают, что при потере питания на первом вводе ток на его секциях сборных шин становится равным 0 (осциллограммы 3–5). Отключение напряжения на секции шин обуславливает выбег электродвигателей, потерявших питание, и, как следствие, снижение частоты, при этом в первое время напряжение на их зажимах изменяется мало. Снижение частоты характеризуется появлением отстающих углов фазового рассогласования между одноименными напряжениями поврежденной и исправной секций шин (осциллограммы 1, 2).

Если фазовое рассогласование больше 15 эл. градусов ($\Delta\varphi = 19$ эл. градусов на 1 и 2 осциллограмме, см. рис. 4), то выдается команда на

включение тиристорного коммутатора. Через 0,034 с тиристорный коммутатор включается и подключает поврежденную секцию сборных шин I к исправной секции II. При этом через него начинает протекать ток (осциллограммы 9–11).

Напряжение на обеих секциях синхронизируется (осциллограммы 1, 2). В этот момент на осциллограммах 6–8 наблюдается скачок пускового тока, так как к исправной секции шин подключается дополнительно нагрузка неисправной секции.

Через 0,138 с происходит отключение ТАВР и включение штатного секционного выключателя. При этом ток, протекающий через ТАВР, равен 0 (осциллограммы 9–11), а через исправную секцию шин увеличивается вследствие увеличения подключенной нагрузки (осциллограммы 6–8).

Основным силовым элементом устройства ТАВР (рис. 5) является тиристорный коммутатор, предназначенный для максимально быстрого объединения первой и второй секций сборных шин распределительного устройства в аварийных режимах до момента включения секционного выключателя. Тиристорный коммутатор представляет собой трехфазный управляе-

мый бесконтактный коммутационный аппарат, включаемый параллельно секционному выключателю.

Таким образом обосновано, что в качестве устройства автоматического ввода резерва в системах электроснабжения горно-добывающих предприятий целесообразно применение тиристорных АВР, обеспечивающих требуемое быстрое действие и объединение секций сборных шин с учетом угла фазового рассогласования, что позволяет сохранить устойчивость двигательной нагрузки и ограничение пусковых токов.

Список литературы

1. **Абрамович Б.Н., Иванов О.В., Коновалова С.А., Столяров И.И.** Переходные процессы в компенсированной сети с асинхронным двигателем при возмущениях входного напряжения // Промышленная энергетика. 1984. № 3.

2. **Абрамович Б.Н., Круглый А.А.** Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 128 с.

3. **Абрамович Б.Н., Жуковский Ю.Л., Круглый А.А., Устинов Д.А.** Моделирование электромеханических комплексов с синхронными двигателями. СПб.: Нестор, 2007. 59 с.

АНОНС

Октябрьский номер журнала будет посвящен деятельности ОАО "НИПИгормаш" в различных областях создания горной и смежных областей техники:

- ◆ вентиляторы главного проветривания;
- ◆ вентиляторное оборудование для метрополитенов;
- ◆ буровое оборудование;
- ◆ зарядное и забоечное оборудование;
- ◆ проходческое оборудование;
- ◆ погрузочно-доставочные машины;
- ◆ шахтный водоотлив.

И.В. Брейдо, д-р техн. наук, проф., **У.К. Исаков**, магистр, асс., **К.К. Смагулова**, канд. техн. наук, КарГТУ, г. Караганда, Казахстан

E-mail: jbreido@kstu.kz, Ualikhan88@mail.ru, Smagulovakk@mail.ru

Разработка алгоритмов работы адаптивной системы защиты от токов утечки методами нечеткой логики

Предложены новые принципы и технические решения по созданию адаптивных к колебаниям напряжения сети аппаратов защиты от токов утечки в сетях с изолированной нейтралью на основе методов нечеткой логики. Аппараты защиты могут применяться в сетях горно-рудной промышленности для защиты электрооборудования, содержащего частотно-регулируемые электроприводы переменного тока.

Ключевые слова: токи утечки, аппараты защиты, адаптация, алгоритм управления, нечеткая логика, уставки срабатывания.

I.V. Breido, U.K. Isakov, K.K. Smagulova

Development of Algorithms for the Adaptive System of Protection Against Leakage Current Methods of Fuzzy Logic

We propose new principles and technical solutions for creating adaptive to fluctuations in voltage units protect against leakage currents in networks with isolated neutral based on fuzzy logic methods. Protection devices can be used in networks of mines for the protection of electrical equipment containing variable frequency drives an alternating current.

Keywords: leakage currents, protection devices, adaptation, control algorithm, fuzzy logic, setting alarms.

Для обеспечения безопасности эксплуатации электрических сетей с изолированной нейтралью и электрооборудования в горно-добывающей промышленности применяются аппараты защиты от токов утечек [1]. В процессе эксплуатации в сетях электроснабжения переменного тока из-за ограниченной мощности карьерных сетей наблюдаются значительные колебания напряжения (-30 до $+20$ % от номинального), что существенно превышает допустимые стандартами нормы [2]. При этом колебания могут носить ступенчатый характер, связанный с подключением—отключением различного электрооборудования, монотонным характером при плавном изменении нагрузки, а также гармоническим характером при колебаниях нагрузки или при периодических процессах подключения—отключения оборудования. Применение частотно-регулируемых электроприводов на горных работах также сопровождается изменениями амплитуды напряжения защищаемой сети. Однако уставки срабатывания защит остаются неизменными, что приводит к снижению уровня безопасности при повышении напряжения и к ложным срабатываниям при его снижении. В кабель-

ных сетях напряжением 6 кВ, используемых для электроснабжения экскаваторов и прокладываемых непосредственно в карьерах и угольных разрезах, защита от токов утечки не применяется из-за недостаточно высокого быстродействия существующих приборов.

Вследствие сложности физических явлений, связанных с токами утечки, известные принципы, разработанные для аппаратов защиты, не в полной мере отвечают предъявляемым требованиям. В применяемых в промышленности аппаратах не осуществляется автоматическая подстройка уставки срабатывания, что приводит к увеличению максимально допустимого длительного тока при двухфазном замыкании и при колебаниях напряжения контролируемой сети. В подземных сетях электроснабжения в процессе эксплуатации периодически изменяется протяженность защищаемых линий. Неконтролируемые изменения параметров защищаемых сетей приводят к снижению эффективности средств защиты. В сущности, аппарат защиты должен обладать адаптивными свойствами к изменяющимся характеристикам сети.

В настоящей статье предложена адаптивная система защиты от токов утечки на основе методов нечеткой логики. В области управления техническими системами методы нечеткой логики позволяют получать более эффективные результаты по сравнению с результатами, которые основываются на использовании традиционных аналитических моделей и алгоритмов управления.

Для получения представления о процессах, протекающих в сети с изолированной нейтралью, а также получения данных, необходимых для формирования критериев алгоритма управления, разработана модель 3-фазной сети с изолированной нейтралью напряжением 380 В в среде MatLAB 7.01 (рис. 1) [3].

В модели предусмотрены ступенчатые, линейные и гармонические изменения напряжения. В ходе имитационных экспериментов получены данные об особенностях процессов, проходящих на выходе схемы 6V, обеспечивающей высокое быстродействие, при различных изменениях напряжения контролируемой сети.

Для адаптивной системы настройки уставки срабатывания при изменениях напряжения контролируемой сети необходимо установить критерии, по которым будет происходить автоматическая настройка.

Если в качестве критерия выбрать изменения амплитуды напряжений, то это существенно усложняет практическую реализацию системы и снижает ее помехоустойчивость, что приведет к ложным срабатываниям.

Из теории автоматического управления известно, что интегральные оценки качества дают комплексную характеристику, которая для многих технических систем прямо пропорциональна энергетическим затратам, что соответствует изменениям напряжения контролируемой сети. Так как линейные интегральные оценки применяются для монотонных динамических процессов, такие критерии эффективны при линейном и ступенчатом характере изменения напряже-

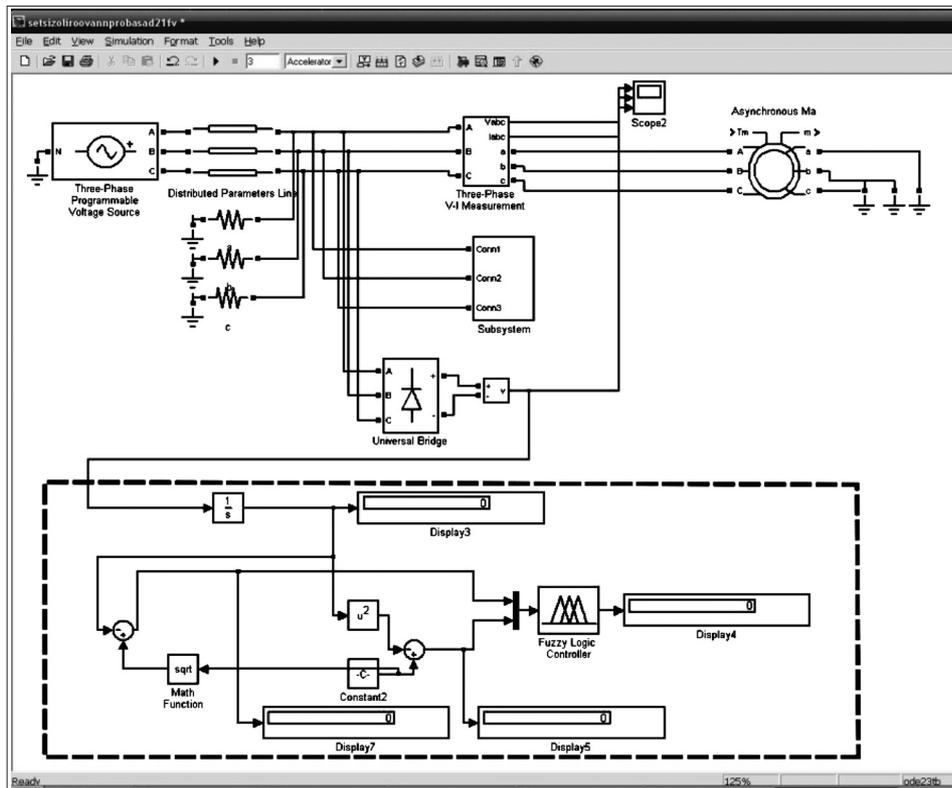


Рис. 1. Модель сети с изолированной нейтралью

ния. Квадратичные интегральные оценки применяются для колебательных процессов, эти критерии эффективны при гармоническом характере изменения напряжения.

Поэтому в качестве критериев адаптивной настройки системы использованы линейные интегральные и квадратичные интегральные критерии, совместное применение которых позволит реагировать на все виды изменения напряжения контролируемой сети и обеспечит высокую помехоустойчивость защиты.

Для формирования базы правил систем нечеткого вывода необходимо предварительно определить входные и выходные лингвистические переменные [4]. Очевидно, что в качестве одной из входных лингвистических переменных следует использовать β_1 – "линейный интегральный критерий", а в качестве второй входной лингвистической переменной β_2 – "квадратичный интегральный критерий". Выходной лингвистической переменной будет уставка срабатывания аппарата: γ – "уставка срабатывания".

В качестве термножества первой входной переменной будем использовать термножество $T_1 = \{N20, N15, N10-8, N7-5, AZ, P5-7, P8-10, P15, P20, P25, P30\}$. В качестве термножества второй входной переменной будем использовать

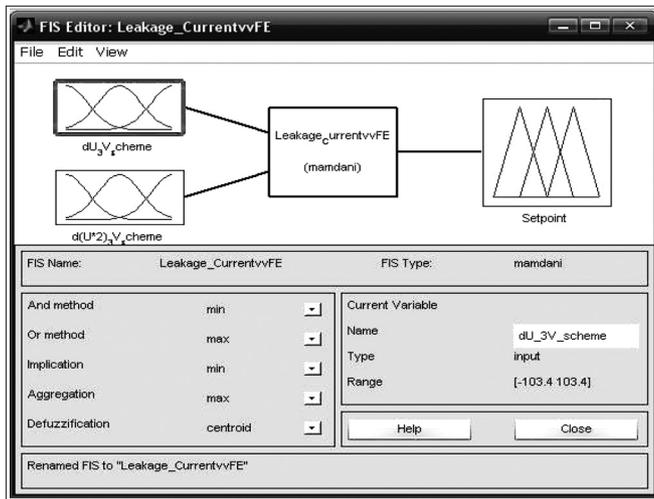


Рис. 2. Редактор систем нечеткого вывода

термножество $T_2 = \{AZ, P6-7, P8-9, P10, P(-15+15), P(-20+20), P(-25), P(-30)\}$. В качестве термножества выходной переменной будем использовать термножество $T_3 = \{N30, N25, N20, N15, N10-8, N7-6, AZ, P6-7, P8-10, P15, P20, P25, P30\}$.

С учетом сделанных уточнений рассмотренная информация о величине изменения уставки срабатывания средств защиты от токов утечки может быть представлена в форме 17 правил нечетких продукций следующего вида (система нечеткого вывода типа Мамдани):

- Правило_1: Если β_1 есть P30, то γ есть N30;
- Правило_2: Если β_1 есть P25, то γ есть N25;
- Правило_3: Если β_1 есть P20, то γ есть N20;
- Правило_4: Если β_1 есть P15, то γ есть N15;
- Правило_5: Если β_1 есть P8-10, то γ есть N10-8;
- Правило_6: Если β_1 есть N7-5, то γ есть P6-7;
- Правило_7: Если β_1 есть N10-8, то γ есть P8-10;

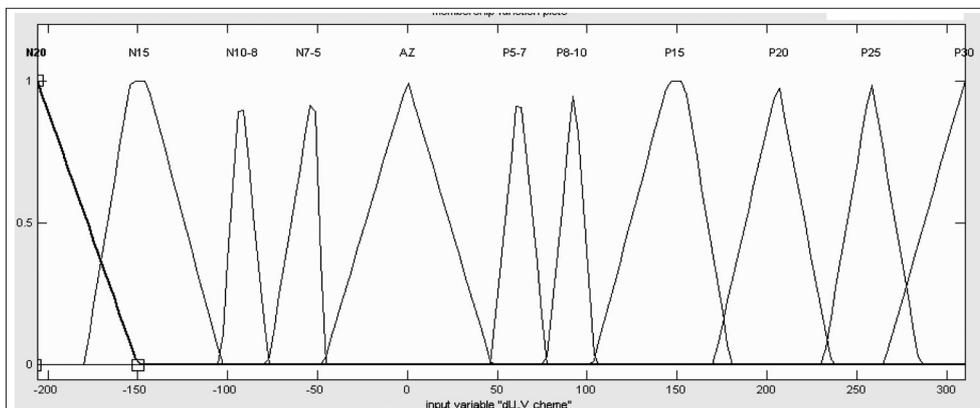


Рис. 3. Функция принадлежности "линейный интегральный критерий"

- Правило_8: Если β_1 есть N20, то γ есть P20;
- Правило_9: Если β_1 есть AZ и β_2 есть P6-7, то γ есть P6-7;
- Правило_10: Если β_1 есть AZ и β_2 есть P8-9, то γ есть P8-10;
- Правило_11: Если β_1 есть AZ и β_2 есть P(-15+15), то γ есть P15;
- Правило_12: Если β_1 есть AZ и β_2 есть P(-20+20), то γ есть P20;
- Правило_13: Если β_1 есть AZ и β_2 есть P(-25), то γ есть P25;
- Правило_14: Если β_1 есть AZ и β_2 есть P(-30), то γ есть P30;
- Правило_15: Если β_1 есть AZ и β_2 есть AZ, то γ есть AZ;

- Правило_16: Если β_1 есть P5-7, то γ есть N7-6;
- Правило_17: Если β_1 есть N15, то γ есть P15.

Весь процесс нечеткого моделирования реализован средствами Fuzzy Logic Toolbox программы MatLAB 7.0.1 [3].

Затем в редакторе систем нечеткого вывода FIS реализованы все необходимые этапы нечеткого моделирования (рис. 2). Заданы основные параметры нечеткого вывода такие, как: метод нечеткого логического И (And method) значение – "min", метод нечеткого логического ИЛИ (Or method) значение – "max", метод импликации (Implication) значение – "min", метод агрегирования (Aggregation) значение – "max" и метод дефаззификации (Defuzzification) значение – "centroid".

Следующим этапом нечеткого моделирования является определение функций принадлежности входных и выходных параметров [5]. Так, с учетом результатов, полученных при имитационном моделировании, известно, что значения первой лингвистической переменной β_1 – "линейный интегральный критерий" изменяются в пределах от –206 до 310, что соответствует колебаниям напряжения от –30 до +20 % от номинального значения.

Полученная функция принадлежности первой входной переменной показана на рис. 3, по оси ординат представлена функция принадлежности ФП, по оси абсцисс – линейный интегральный критерий [6].

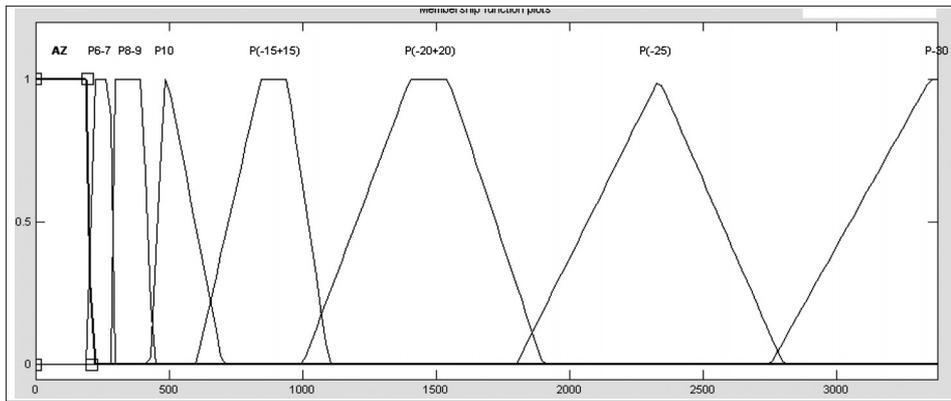


Рис. 4. Функция принадлежности "квадратичный интегральный критерий"

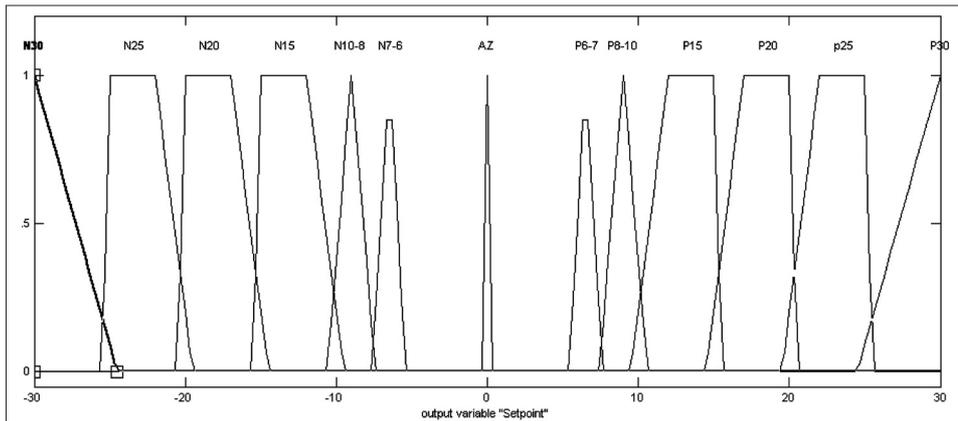


Рис. 5. Функция принадлежности "уставка срабатывания"

Значения второй лингвистической переменной β_2 – "квадратичный интегральный критерий" изменяются в пределах от 0 до 3376, что соответствует колебаниям напряжения от -30 до $+20$ % от номинального значения с частотой до 5 Гц. Соответствующая термам второй лингвистической переменной функция принадлежности представлена на рис. 4.

Выходная же переменная изменяется соответственно в пределах от -30 до $+20$ %. Соответствующая термам выходной лингвистической переменной функция принадлежности представлена на рис. 5.

Все функции принадлежности и термы получены с учетом заданной для нашего случая зоны нечувствительности в пределах от -5 до $+5$ % колебания напряжения от номинального значения [6]. Зона нечувствительности введена для того, чтобы при небольших колебаниях напряжения не вызывать дополнительных переходных процессов в системе без снижения уровня безопасности.

Следующим этапом является запись разработанных ранее правил нечетких продукций в редакторе нечеткого вывода с помощью программы Rule Editor.

Редактор нечеткого вывода обладает возможностями просмотра системы нечетких правил (рис. 6), а также поверхности системы нечеткого вывода (рис. 7, см. 3-ю стр. обложки). Так, на рис. 6 получен результат нечеткого вывода при конкретных значениях входных переменных. Для первой входной переменной значение, равное -181 (первый столбец), а для второй входной переменной значение, равное 379 (второй столбец). Таким значениям входных переменных соответствуют значения уставки срабатывания $17,7$ % от номинального значения. Соответствующие подусловия используются в правиле нечеткой продукции 8. Это правило считается активным и применяется в текущем процессе нечеткого вывода.

Полученный график зависимости выходной переменной от входных переменных (см. рис. 7 на 3-й стр. обложки) соответствует значениям

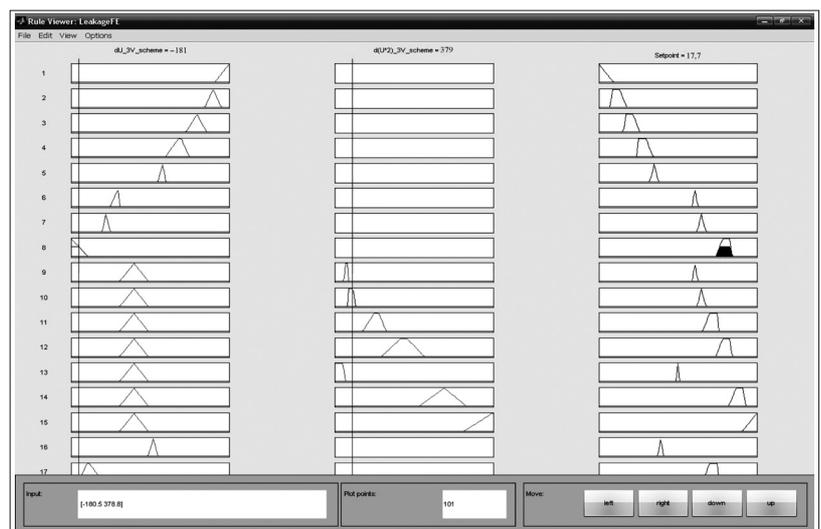


Рис. 6. Программа просмотра системы нечетких правил

Характер изменения напряжения	Амплитуда (в относительных единицах) и другие параметры колебания	Лингвистические переменные		
		Линейный интегральный критерий	Квадратичный интегральный критерий	Уставка срабатывания
Гармоническое	-0,3(-30%), 5 Гц	1,09	3376	29,8%
Гармоническое	-0,15(-15%), 5 Гц	0,305	941	16,1%
Гармоническое	-0,06(-6%), 5 Гц	0,069	213	6,54%
Гармоническое	0,06(6%), 5 Гц	0,056	215,97	6,3%
Гармоническое	0,1(10%), 5 Гц	0,14	482	10,2%
Гармоническое	0,2(20%) 5 Гц	0,45	1403	19,9%
Ступенчатое	-0,3(-30%)	310,024	860667,8	-29,7%
Ступенчатое	-0,15(-15%)	154,97	454255,6	-16,7%
Ступенчатое	-0,06(-6%)	62,02	187580,45	-6,54%
Ступенчатое	0,06(6%)	-61,95	-187061,56	6,46%
Ступенчатое	0,1(10%)	-103,24	-329341,73	9,5%
Ступенчатое	0,2(20%)	-206,46	-679812,57	18,9%
Линейное	-0,3(-30%)	310,24	861253,9	-28,25%
Линейное	-0,15(-15%)	155,01	454472,2	12,34%
Линейное	-0,06(-6%)	61,01	187472,8	-6,2%
Линейное	0,06(6%)	-62,01	-194954,18	6,58%
Линейное	0,1(10%)	-103,2	-329197,89	9,4%
Линейное	0,2(20%)	-206,41	-679621,24	18,6%

первой входной переменной и второй входной переменной: 100 (колебания напряжения от -8 до -10 %, соответствующее правилу нечеткой продукции 5).

На основании системы нечеткого вывода создан специальный "fis" файл, являющийся основой работы нечеткого регулятора.

Используя разработанные ранее модели сети с изолированной нейтралью и системы формирования критериев работы, смоделирована модель системы защиты на основе нечеткого регулятора (на рис. 1 пунктиром выделены структура нечеткого регулятора и модели формирования критериев работы).

Имитационные эксперименты проводились с изменением режимов и параметров колебаний напряжения сети с изолированной нейтралью [7]. Характерные фрагменты результатов имитационного моделирования представлены в таблице.

Эксперименты проводились с имитацией различных режимов колебания напряжения контролируемой сети в пределах от -30 до +20 % от номинального.

Выводы

На основе методов нечеткой логики разработана система защиты от токов утечки, адаптивная к колебаниям напряжения защищаемой сети. В качестве комплексных критериев автоматического изменения уставки срабатывания при колебаниях напряжения предложены линейный интегральный и квадратичный критерии. Совместное использование этих критериев обеспечивает адаптацию уставок при

ступенчатых, линейных и гармонических колебаниях напряжения контролируемой сети. Разработана база нечетких лингвистических правил функционирования адаптивной системы. На основе этой базы создан нечеткий регулятор. Проведенные имитационные эксперименты и испытания макетного образца подтвердили возможность внедрения в горную промышленность новых высокоэффективных средств защиты от токов утечки. Аппараты защиты могут применяться в сетях горно-рудной промышленности для защиты электрооборудования, содержащего частотно-регулируемые электроприводы переменного тока, причем амплитуда изменения уставки может быть приведена в соответствие с диапазоном изменения напряжения преобразователя частоты.

Список литературы

1. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях. М.: Недра, 1982. 152 с.
2. Остриров В.И., Микитченко А.Н. Современное состояние и тенденции развития электроприводов горных машин для открытых разработок // Привод и управление. 2008. № 2. С. 22–27.
3. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде Matlab и Fuzzytech. 2005. БХВ, СПб., 183 с.
4. Лукас В.А. Основы фазы-управления. Екатеринбург: УГГГА, 2000. 62 с.
5. Смагулова К.К., Брейдо И.В. Разработка алгоритмов управления аппаратов защиты от токов утечки методами нечеткой логики / IX Междунар. науч.-техн. конф. "Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии на предприятиях машиностроения, авиастроения, транспорта и сельского хозяйства" "ИнЭРТ-2010", 2010. Ростов-на-Дону. С. 139–141.
6. Смагулова К.К., Исаков У.К., Брейдо И.В. Аппарат защиты от токов утечки в сетях постоянного тока / VI Междунар. науч.-практ. конф. "Образование и наука XXI века – 2010", 17–25 октября, 2010. София, Болгария "Бял ГРАД-БГ" ООД, 2010. Т. 19. Технологии. Физика. С. 80–84.
7. Смагулова К.К., Брейдо И.В., Исаков У.К. Выбор интегральных критериев работы системы защиты от токов утечек // Труды университета. 1 (42). 2010. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2011. С. 73–75.

В.Г. Ульянов, зав. лаб., **Б.И. Димант**, зам. гл. инж., **И.В. Зырянов**, зам. директора по научной работе, Институт "Якутнипроалмаз", **В.А. Пархоменко**, зам. гл. инж. по КИПиА, Нюрбинский ГОК, АК "АЛРОСА", г. Мирный, **И.Б. Табакман**, д-р техн. наук, проф., рег. менеджер "Wenco, Ltd", г. Ванкувер, Канада, **Д.П. Антоненко**, ген. директор, сервисный центр "Wenco International Mining Systems" по СНГ, г. Новосибирск

E-mail: latp@yna.alrosa-mir.ru

Автоматизация управления горно-транспортным комплексом на карьере "Нюрбинский" АК "АЛРОСА"

Внедрение в АК "АЛРОСА" на карьере "Нюрбинский" автоматизированной системы управления горно-транспортными работами повысило эффективность использования технологического транспорта. Возросла производительность горно-транспортного комплекса, снизились удельные эксплуатационные затраты, уменьшилась аварийность. Приведено описание отдельных компонентов технического обеспечения и функциональных модулей автоматизированной системы управления горно-транспортным комплексом. Отмечено, что внедрение системы позволило повысить оперативность принятия решений по управлению горным производством, а также эффективность использования техники, качество и безопасность горных работ.

Ключевые слова: автосамосвал, АСУ горно-транспортными работами, бортовые терминалы, система радиосвязи, режим реального времени, контроль, мониторинг, управление, загрузка, скорость движения, маршруты, динамические нагрузки, расход топлива, производительность, эффект. GPS, бортовой компьютер, информация, режим реального времени, диспетчеризация, мониторинг.

V.G. Ul'yanov, B.I. Dimant, I.V. Zyryanov, V.A. Parkhomenko, I.B. Tabakman, D.P. Antonenko

Automated Management System of Mining and Transport Complex of Nurbinsky Mine of "ALROSA Company"

Automated mine management system supplied by Wenco International was installed at Nurbinsky diamond mine. Article describes on-board computers, MESH communication system and mayor features such as real time data collection, automatic dispatching, equipment conditions and maintenance monitoring, speed and route control, reporting system and etc. The implementation of automated management system allowed increasing of shovels and trucks productivity on 8...12 %, decrease unit operating cost, improve safety of mining operations.

Keywords: dump truck, shovels, mine management system, on-board computer, Mesh radio communications system, real-time control, monitoring, dispatching, consumption, performance, effect, GPS, information.

Введение

В 2008 г. на карьере "Нюрбинский" (Нюрбинский ГОК) внедрена автоматизированная система управления горно-транспортными работами (АСУ ГТР), поставленная канадской компанией Wenco International Mining Systems. Карьер находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород в Республике Саха (Якутия). Горно-транспортный комплекс оснащен в основном высокопроизводительной техникой фирмы "Caterpillar". Парк погрузочной техники представлен гидравлическими экскаваторами САТ-5130В, САТ-375 и САТ-325, погрузчиками САТ-992/988/980, а автомобильный транспорт – автосамосвалами САТ-777D/777F грузоподъемностью 91 т и автосамосвалами БелАЗ 754813. вспомогательная техника включает бульдозеры D9R, грейдеры САТ-834С и ДЗ-98. На бурении взрывных сква-

жин используются станки ДМ-М2. В настоящее время АСУ ГТР на карьере "Нюрбинский" охватывает управление основным выемочно-погрузочным оборудованием и карьерными автосамосвалами. В сферу охвата АСУ включены Северный и Восточный отвалы, рудные склады и приемное отделение обогатительной фабрики № 16.

Принимая во внимание сложные горно-геологические и гидрогеологические условия алмазосодержащих трубок, холодный климат, удаленность от обжитых районов, масштаб и интенсивность, высокие темпы понижения горных работ, разнообразие применяемых моделей горного и транспортного оборудования с большими техническими возможностями – все это и предопределило необходимость повышения эффективности обработки кимберлитовых месторождений, в том числе и за счет внедрения АСУ ГТР.

АК "АЛРОСА" провела тендер и в результате предложила канадской компании Wenco International Mining Systems осуществить поставку и внедрение АСУ на карьере "Нюрбинский". При выборе системы был учтен положительный опыт использования с 2004 г. аналогичной системы на карьере "Юбилейный" Айхальского ГОКа. Система была изготовлена, поставлена фирмой и внедрена совместно со специалистами АК "АЛРОСА" в промышленную эксплуатацию в течение 6 месяцев*. В этот же период специалисты Wenco проводили обучение водителей автосамосвалов, машинистов экскаваторов и инженерно-технического персонала комбината. Специалисты фирмы Wenco также осуществляют сервисное сопровождение системы.

Структура и состав системы управления

Современные АСУ ГТР на открытых горных работах представляют собой программно-технический комплекс, который включает:

- бортовые технические средства, установленные на мобильном оборудовании;
- систему радиосвязи для передачи данных в режиме реального времени;
- компьютерное оборудование, включая серверы и рабочие станции пользователей;
- специальное программное обеспечение мониторинга и диспетчерского управления горно-транспортным оборудованием, ведения базы данных.

На борту каждой единицы мобильного оборудования установлен "Мобильный терминал данных" (МТД). Это комплект оборудования, включающий бортовой промышленный компьютер, монитор с сенсорным экраном, радиоприемник системы GPS для определения местоположения и перемещения мобильного оборудования, радиостанцию для приема и передачи технологической и распорядительной информации.

В АСУ ГТР карьера "Нюрбинский" компания Wenco реализовала новые технические решения (рис. 1, см. 3-ю стр. обложки) в инфраструктуре связи, бортовых компьютерах, системном и прикладном программном обеспечении. Ниже приводятся основные функционально-технические характеристики АСУ ГТР карьера "Нюрбинский".

Бортовое оборудование

На каждой единице мобильного оборудования установлен бортовой комплект (рис. 2), включающий бортовой компьютер Wenco—Ахон и монитор с сенсорным экраном. Такой комплект назван "Мобильным терминалом данных" (МТД). Комплект МТД является типовым оборудованием и один и тот же комплект установлен как на экскаваторах, так и на автосамосвалах, буровых станках, погрузчиках и т.д. Пе-

* Во внедрении системы принимали участие: В.Т. Мельник, С.С. Антикуз, А.В. Гришанович, С.А. Польшин, Д.Ю. Шуклин, Е.А. Удинцев, Н.М. Ханхасаева – от АК "АЛРОСА"; В.П. Беликов, А.А. Дунавин, К.С. Скибин, И.С. Якушев – от Wenco.



Рис. 2. Бортовой компьютер в кабине автосамосвала

резагружаемое из меню программное обеспечение настраивает комплект на конкретный тип горного или транспортного оборудования.

Бортовой компьютер Wenco нового поколения основан на стекowych модулях PC-104, что отражает современную тенденцию создания компьютеров в управлении технологическими процессами. Модули PC-104 обеспечивают высокую скорость работы и отлично приспособлены для работы в сильно загрязненной среде, в условиях частых ударов и вибраций. Имеется достаточное для АСУ ГТР количество последовательных портов для интерфейсов, а также портов для цифровых вводов/выводов, USB портов и портов Ethernet. В компьютер встроены 16-канальный приемник GPS, коммуникационная карта 2.4GHz для беспроводной связи Mesh, блок питания и др. Применена двойная изоляция от ударных нагрузок и виброизоляция, кроме того, конструкция является водо- и пылезащищенной.

В АСУ ГТР карьера "Нюрбинский" на мобильном оборудовании установлены особо прочные мониторы LCD TFT с цветным сенсорным экраном размером 8,4 дюйма.

Бортовое программное обеспечение включает встроенную операционную систему Embedded Windows XP и прикладное программное обеспечение Wenco, обрабатывающее всю бортовую информацию и осуществляющее обмен информацией между операторами оборудования и диспетчером. Оператор имеет возможность направлять текстовые сообщения диспетчеру и получать различные текстовые сообщения от диспетчера на бортовой монитор относительно горно-транспортного процесса, техники безопасности и пр. Это значительно поднимает на новый уровень организацию и управление горно-транспортным комплексом.

Инфраструктура беспроводной системы коммуникаций

В рамках поставки АСУ ГТР Wenco установила систему связи новейшей технологии – сеть MESH

Networks Enabled Architecture (MEA) (рис. 3, см. 4-ю стр. обложки). Беспроводная многоузловая ячеистая сеть MESH построена на широкополосной радиочастоте 2.4GHz. Мобильная сеть MESH легче решает вопросы изменения конфигурации, так как в других системах нужно большее количество стационарных точек доступа, а их перенос сопряжен с дополнительными затратами. Это самостоятельно адаптирующаяся беспроводная сеть для динамически изменяющихся горно-технических условий. Такая сеть наиболее полно обеспечивает надежную передачу информации с подвижных объектов при существенном увеличении их объема.

На Нюрбинском ГОКе установлено оборудование сети MESH компании Motorola: маршрутизаторы на Северном и Восточном отвалах и в карьере (всего 4), интеллектуальные точки доступа – на Восточном отвале и на борту карьера (всего 3), а вблизи обогатительной фабрики № 16 установлена коммуникационная мачта с оборудованием MESH и радиооборудованием Trango.

Функции АСУ ГТР

Функциональная схема АСУ ГТР представлена на рис. 4.

Структурные блоки АСУ обеспечивают выполнение следующих основных функций:

- автоматизация сбора и представления информации о местоположении и состоянии горного и транспортного оборудования для диспетчерского управления комплексом;
- автоматическая оптимальная диспетчеризация экскаваторно-автомобильного комплекса;
- управление полной загрузки автосамосвалов;
- контроль соблюдения маршрутов и скорости движения автосамосвалов;
- контроль отклонения технологического процесса от заданных параметров и режимов;

- мониторинг технического состояния и обслуживания оборудования;
- мониторинг эксплуатации шин;
- оперативный и накопительный учет работы оборудования и карьера в целом и др.

Автоматизация сбора и представления информации

Для получения информации в режиме реального времени о местоположении и состоянии горного и транспортного оборудования используются программные комплексы "Контроль оборудования" и "Отображение карьера", предназначенные для диспетчеров и сменных мастеров. Информация на экране выводится в виде графиков, диаграмм и таблиц. На экране монитора "Контроль оборудования" (рис. 5) отображаются состояние экскаваторов, погрузчиков и перемещение автосамосвалов, движущийся на погрузку либо к пунктам разгрузки. Оперативный персонал также может получить сводки по текущей и накопительной производительности оборудования, темпов выполнения плана, объемы и типы вывезенной горной массы.

Также для оперативного визуального контроля местоположения оборудования в режиме реального времени в системе реализована "Карта карьера" (рис. 6). На мониторе компьютера с помощью программы MineVision динамически отображаются схемы дорог, расположение пунктов разгрузки, расположение и состояние горного и транспортного оборудования. Система также осуществляет контроль и сигнализацию при отклонении режимов от заданных. На основе такого мониторинга всех событий в карьере выявляются ситуации, вызывающие потери времени из-за непроизводительных действий, и диспетчер или начальник смены оперативно принимают необходимые решения.

Автоматическая диспетчеризация экскаваторно-автомобильного комплекса

В системе управления реализован алгоритм оптимальной диспетчеризации, выполняющей автоматиче-



Рис. 4. Функциональная схема автоматизированной системы управления горно-транспортным комплексом

выхода из строя оборудования или образовании очередей на погрузку. При *открытом цикле* каждое новое распределение порожнему автосамосвалу определяет система. Для оптимизации решений в алгоритме управления прогнозируется ожидаемая ситуация для каждого экскаватора, а также просматриваются альтернативные варианты распределений с учетом прогнозируемого появления в рассматриваемой зоне карьера нескольких порожних автосамосвалов. *Комбинированный цикл* дает возможность диспетчеру сформировать "группы диспетчеризации" из конкретных автосамосвалов и экскаваторов, которые будут работать вместе. Внутри группы управление по распределению автосамосвалов осуществляется по открытому циклу.

Программный комплекс также рассчитывает, сколько автосамосвалов нужно иметь в каждой группе для достижения максимальной производительности с учетом текущей ситуации. На основе этой информации диспетчеры перераспределяют автосамосвалы из одной группы в другую. Использование автоматической диспетчеризации позволяет сократить время технологического цикла автосамосвалов и увеличить производительность комплекса в отдельные смены на 10...15 %, что достигается за счет снижения времени простоя в очереди и повышения скорости операций погрузки, повышения коэффициента загрузки самосвала, повышения среднетехнической скорости движения на маршруте.

Управление полной загрузки автосамосвалов

В целях контроля загрузки автосамосвалов в системе предусмотрены интерфейсы к системам измерения полезной нагрузки (TPMS) на автосамосвалах. В процессе погрузки информация о накопительном весе породы в загружаемом автосамосвале передается системой на дисплей МТД экскаватора. Таким образом, машинисты экскаваторов более быстро и оптимально грузят автосамосвалы. Повышается коэффициент загрузки, уменьшается вероятность перегруза или недогруза машины.

Контроль соблюдения маршрутов и скорости движения

В систему вводится таблица — характеристика участков дорог с указанием предельной скорости движения по типам автосамосвалов с учетом состояния дорог, погодных условий, времени суток и др. Система ведет непрерывный контроль назначений и заданной скорости движения каждого автосамосвала. В случае отклонения от задания выводится сигнализация на монитор водителя и диспетчера. Все случаи нарушений протоколируются. Жесткий контроль режимов движения позволил уменьшить количество случаев превышения установленной скорости, повысить коэффициент готовности машин, снизить удельный расход топлива, повысить среднетехническую скорость, повысить безопасность движения.

Мониторинг технического состояния и обслуживания оборудования

Бортовой компьютер (МТД) опрашивает значения параметров самосвалов Caterpillar через систему VIMS

и передает в систему. Система выявляет отклонения параметров от заданных и выдает сообщения о нарушениях режимов. Программный комплекс учета технического обслуживания ведет учет выполнения технического обслуживания с момента начала простоя до завершения ремонта с отражением сведений о ремонтном персонале, видах работ, марок деталей и узлов, установленных во время обслуживания. Отдельный программный модуль ведет *мониторинг эксплуатации шин* в режиме реального времени, определяя их нагрузку (износ) с учетом загрузки самосвала, расстояния, скорости движения и состояния дорог. Комплекс мониторинга технического состояния позволил более рационально планировать техническое обслуживание парка машин, а также обеспечил возможность более строго контролировать соответствие вида и времени ремонта технологическим нормативам.

Интеграция со смежными системами

В процессе эксплуатации АСУ ГТР постоянно проводятся работы по расширению функций системы и ее интеграции с другими технологическими и производственными системами, действующими на предприятиях.

В 2008 г. фирмой Mettler Toledo на карьере была установлена платформенная система взвешивания автосамосвалов с отдельной базой данных и автономной системой определения номера автосамосвала на основе RFID меток. Так как встроенные штатные бортовые весовые системы автосамосвалов имеют достаточно большую погрешность, было принято решение интегрировать систему взвешивания в АСУ ГТР. Интеграция обеспечила сбор информации в единую базу данных и объединила систему отчетности. Это также позволило отказаться от эксплуатации системы определения номеров автосамосвалов на основе RFID меток. В результате интеграции АСУ ГТР автоматически определяет номер автосамосвала при его нахождении на весовой платформе, обновляет данные о весе порожнего самосвала и фиксирует вес перевозимой руды.

Важным шагом стала интеграция интерфейса АСУ ГТР с корпоративной информационной системой управления производством АК "АЛРОСА" "Феномен-2". Все производственные показатели автоматически передаются в информационную систему "Феномен-2", из которой попадают в единый диспетчерский отчет по компании, в ERP системы SAP R/3 и др.

Учет технологических и производственных показателей

Для оперативного и накопительного учета параметров и режимов технологического процесса предусмотрена система формирования отчетности, которая постоянно развивается и совершенствуется. В системах учета для Нюрбинского ГОКа разработано несколько десятков отчетов (рапортов, сводок, всего более 50), созданных с учетом специфики предприятия. Использование оперативной, актуальной и достоверной ин-

формации позволяет специалистам всех уровней управления горно-обогатительных комбинатов повышать эффективность деятельности предприятия.

Отчеты могут быть получены в формате HTML и циркулировать по корпоративной сети Компании или на защищенных веб-страницах. В связи с удаленностью производственной площадки от Управления Нюрбинского ГОКа (более 300 км) в НГОКе активно используется возможность получения отчетов через сеть Интернет.

Экономическая эффективность

Внедренная на карьере АСУ ГТР является многофункциональной и охватывает все основные процессы организации и управления горным, транспортным оборудованием и в целом работой карьера и автобазы технологического транспорта. Внедрение системы подняло на более высокий уровень организацию производства и управление горно-транспортным комплексом за счет повышения качества и оперативности получения информации, выявления нарушений, автоматизировало управление распределением самосвалов, что позволило повысить своевременность и обоснованность принятия решений по управлению процессами, повысить скорость и точность выполнения технологических операций.

Внедрение системы расширило состав и качество средств (инструментов) контроля и управления горно-транспортными работами. Использование технических и программных средств систем обеспечило возможность осуществлять централизованный, более оперативный и более строгий контроль над технологическими процессами. Диспетчеры все чаще используют возможность автоматического управления распределением самосвалов.

Оперативный инструментальный контроль дал возможность повысить технологическую и производственную дисциплину, улучшить организацию и безопасность работ. Это повысило эффективность выполнения технологических операций и привело к улучшению технологических параметров ведения работ.

В результате за период с 2008 по 2010 г. повысилась эффективность использования горной и транспортной техники:

- на 20...30 % снизилось время простоя автосамосвала у погрузочной техники. Чем больше парк самосвалов, тем больше проявляется эффект уменьшения времени простоев;
- на 2...3 % повысилась средняя загрузка самосвалов, снизился разброс объема загрузки, уменьшились случаи недогрузов и перегрузов самосвалов;
- на 8...10 % повысилась среднетехническая скорость движения самосвалов, уменьшились случаи превышения скорости движения машины на маршруте;
- на 3...4 % снизился удельный расход дизельного топлива за счет уменьшения простоев и повышения

равномерности движения автосамосвалов на маршруте;

- на 5...10 % снизилась аварийность техники за счет снижения уровня динамических нагрузок (повышение равномерности загрузки автосамосвалов, скорости движения и правил дорожного движения), снизилась трудоемкость ремонтов;

- повысилась технологическая дисциплина (соблюдение скорости движения на маршруте, исполнения назначения маршрутов, соблюдения паспортов загрузки самосвалов, режима заправок и др.). Выросла и производственная дисциплина (исполнение заданий, режима труда, перерывов и окончания работы и др.);

- улучшилось планирование и организация производства, повысилась безопасность горных и транспортных работ;

- усилилась мотивация труда работников автобаз (повысился интерес к работе с более современной техникой, стремление к повышению квалификации и др.).

Улучшение технологических и производственных параметров управления привело к повышению производительности горно-транспортного комплекса, в том числе производительности технологического транспорта на 8...10 %. Повышение производительности, снижение затрат на ремонт и дизельное топливо снизили себестоимость добычи горной массы на 3...4 % и себестоимость ее транспортировки – на 4...6 %. Затраты на систему окупились менее чем за один год.

Широкий комплекс мер, проводившийся в течение двух лет на карьере "Нюрбинский" и автобазе технологического транспорта для повышения эффективности использования системы управления горно-транспортным комплексом, позволил оперативному и административному персоналу глубоко и всесторонне освоить богатые функциональные возможности системы.

Перспективы

В декабре 2010 г. АК "АЛРОСА" утвердила программу инновационного развития, которая предусматривает развитие систем управления, расширение объема и состава функций контроля, расширение охвата парка подвижной техники автоматизированным управлением. На следующей стадии расширения АСУ ГТР намечено внедрить высокоточное позиционирование экскаваторной выемки и высокоточную навигацию буровых станков, мониторинг параметров процесса бурения, комплекс контроля, управления проектированием и ведения буровзрывных работ, охват мониторингом работу вспомогательного оборудования, системы мониторинга устойчивости бортов, атмосферы карьера и другие программно-технические комплексы.

Новые фильтры симметричных составляющих для релейной защиты электроприводов горных машин и механизмов

Рассмотрена возможность модернизации эксплуатируемых в настоящее время релейных защитных устройств на горно-добывающих предприятиях. Вместо громоздких трансформаторов тока, работающих в режиме, близком к короткому замыканию, предлагается использовать миниатюрные дифференцирующие индукционные преобразователи тока, которые работают в режиме, близком к холостому ходу. Приведены схемы разработанных автором фильтров симметричных составляющих на основе дифференцирующих индукционных катушек, а также статистические данные, полученные на основе результата промышленного испытания предлагаемых устройств.

Ключевые слова: электропривод технологических комплексов, система защиты, фильтр напряжения обратной последовательности, фильтр тока обратной последовательности, трансформатор тока, дифференцирующие индукционные преобразователи тока.

D.B. Solovyov

New Filters of Symmetric Components for Relay Protection of Electric Drives of Mountain Cars and Mechanisms

Article is devoted a question of possible modernization of relay accident protection devices maintained now at the mining enterprises. Instead of the bulky transformers of a current working in modes, close to short circuit, it is offered to use tiny differentiating induction converters of a current which work in a mode close to idling. In article schemes of the filters of symmetric components developed by the author on the basis of differentiating induction coils, and also the statistical data received on the basis of result of industrial test of offered devices are resulted.

Keywords: the electric drive of technological complexes, protection system, the filter of pressure of return sequence, the filter of a current of return sequence, the current transformer, differentiating induction converters of a current.

На большинстве предприятий горно-добывающего сектора Дальнего Востока РФ наблюдается значительный рост отказов оборудования и механизмов, задействованных на добыче, транспортировании и переработке (обогащении) полезных ископаемых. Более половины из общего числа отказов связаны с повреждением электрооборудования горных машин, выходом из строя электродвигателей, систем управления главными приводами. Ежегодно на предприятиях горно-добывающей промышленности из строя выходят до 40 % электродвигателей, используемых на переработке и обогащении полезных ископаемых, и до 60 % электродвигателей, задействованных при добычных работах [1–3].

Особого внимания заслуживают аварии из-за неполнофазных режимов работы электропривода, поскольку на его долю в горной промышленности приходится до 50 % аварий по электрической части.

Электродвигатели, используемые в машинах и механизмах на горно-добывающих предприятиях, снабжены общепромышленными видами защит от перегрузки, коротких замыканий, однофазных замыка-

ний, которые не способны реагировать в ряде случаев на несимметричные (в частности, на неполнофазные) режимы работы. В то же время, промышленностью выпускаются защитные устройства от несимметричных режимов работы, одним из основных элементов таких устройств является чувствительный элемент — фильтр напряжения обратной последовательности (ФНОП). Препятствием расширенного применения защиты с использованием фильтров тока являются существенные недостатки трансформаторов тока (ТТ) — высокие масса, размеры и стоимость этих измерительных преобразователей тока.

Характеристики токовой защиты можно значительно улучшить путем повышения качества работы первичных измерительных преобразователей тока (ИПТ). В качестве альтернативы ТТ, в первую очередь для тяжелых условий эксплуатации горно-добывающих предприятий, необходимо рассматривать трансреакторы или, как их называют еще, дифференцирующие индукционные преобразователи тока (ДИПТ). В ДИПТ так же, как и в ТТ, используется трансформаторный эффект. Только ДИПТ

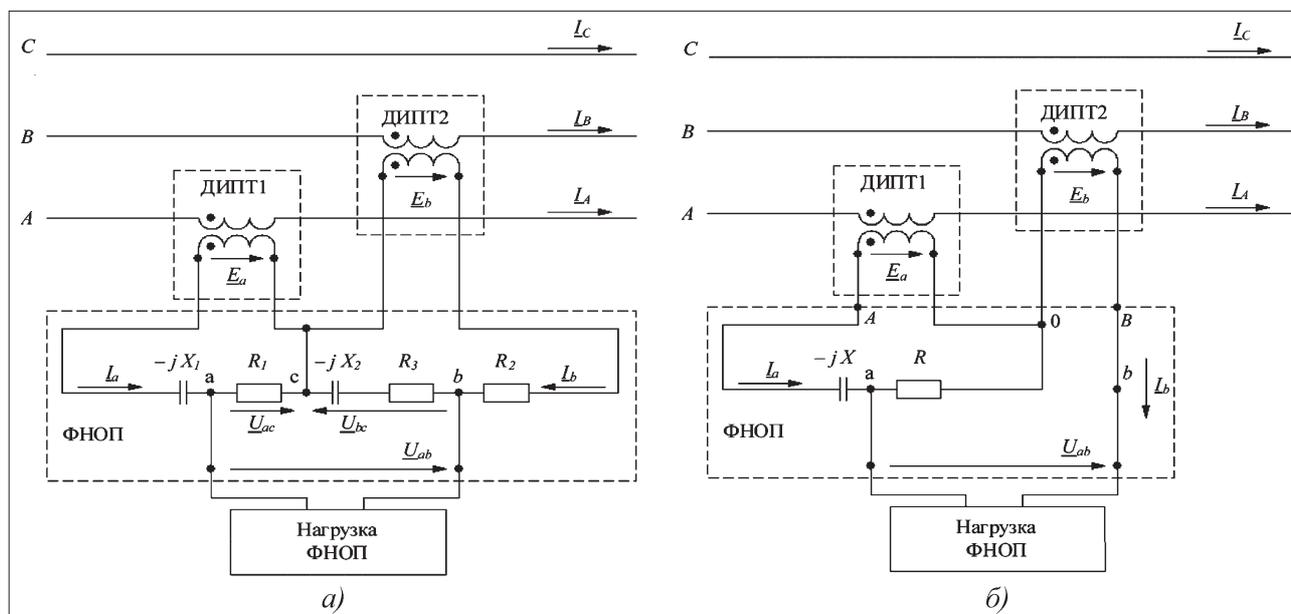


Рис. 1. Схемы ИПТОП с фильтрами симметричных составляющих и двумя трансреакторами (ДИПТ) для трехпроводных линий: а – с пятиэлементным фильтром; б – с двухэлементным фильтром

измеряют не сами токи, а их производные. Так как ДИПТ работают в режиме, близком к холостому ходу, то они имеют огромное преимущество по сравнению с ТТ – значительно меньшую массу. Наилучшие метрологические свойства присущи ДИПТ, у которых магнитный сердечник отсутствует. Они известны также под названием "катушки Роговского" [4, 5]. Такие ДИПТ обладают следующими положительными свойствами: не подвержены магнитному насыщению; пропускают большие токи перегрузки без повреждения; могут измерять очень большие токи без увеличения размеров; диапазон частот значительно шире, чем даже у специализированных высокочастотных ТТ; могут измерять производную тока до 40 кА/мкс; их обмотка не соединена с электрической цепью, в которой проводится измерение тока, и поэтому имеет потенциал земли, как у ТТ; они имеют низкое потребление мощности, небольшую массу и стоимость. В то же время всесторонне внедрение ДИПТ, вместо используемых ТТ, сдерживается трудностями, связанными с построением и согласованием параметров элементов фильтров симметричных составляющих при использовании их совместно с ДИПТ. В целях использования ДИПТ в релейной защите от неполнофазных режимов работы были разработаны фильтры симметричных составляющих для четырех- и трехпроводных электросетей предприятий горно-добывающего сектора. На рис. 1 приведены схемы новых конструкций измерительных преобразователей тока обратной последовательности (ИПТОП), получающих первичную информацию от ДИПТ для трехпроводных линий.

Источниками напряжения для обоих ИПТОП служат ЭДС \underline{E}_a и \underline{E}_b дифференцирующих индукцион-

ных преобразователей тока ДИПТ1 и ДИПТ2, катушки которых индуктивно связаны соответственно с токопроводами фаз А и В. Сочетание выбранных фаз может быть любым, важно лишь соблюдение следующего условия: составляющая прямой последовательности фазного тока, индуктивно связанного с катушкой ДИПТ1, должна на 120° опережать аналогичную составляющую фазного тока, индуктивно связанного с катушкой ДИПТ2.

Катушки ДИПТ в ИПТОП с пятиэлементным ФНОП (см. рис. 1, а) имеют равные сопротивления и взаимные индуктивности M с соответствующими токопроводами. В установившихся режимах, при синусоидальной форме токов системы, векторы токов \underline{I}_a и \underline{I}_b связаны с векторами соответствующих ЭДС соотношениями: $\underline{E}_a = j\omega M \underline{I}_a$ и $\underline{E}_b = j\omega M \underline{I}_b$, где j – мнимая единица; ω – угловая частота измеряемых токов.

Резисторно-конденсаторная цепь ФНОП состоит из двух конденсаторов: первого C_1 и второго C_2 , которые имеют сопротивления $(-jX_1)$ и $(-jX_2)$, и трех резисторов с сопротивлениями R_1 , R_2 и R_3 . Рассматриваемый ФНОП отличается от известных четырехэлементных ФНОП [6] наличием пятого элемента – третьего резистора. С помощью этого элемента компенсируется влияние индуктивного сопротивления jX_k катушки ДИПТ2. Соблюдением известных соотношений: $R_1 = X_2 = \sqrt{3} R_2$, а также предложенных условий [7]: $X_1 = R_2 + X_k$ и $R_3 = \sqrt{3} X_k$ – обеспечивается равенство нулю выходного напряжения ФНОП \underline{U}_{ab1} в установившемся режиме, когда токи \underline{I}_a , \underline{I}_b и \underline{I}_c образуют прямую последовательность.

Для получения оценки влияния сопротивлений катушки ДИПТ и нагрузки в общем виде вводятся

три параметра: $m = X_k/R_2$, $m_r = R_k/X_k$ и $m_{ng} = R_2/R_{ng}$, где R_{ng} – сопротивление нагрузки ФНОП (сопротивление защитного реле). При использовании этих параметров и приведенных выше соотношений и условий все сопротивления элементов ИПТОП могут быть выражены в относительных единицах. В качестве базисного сопротивления принято сопротивление R_{ng} .

Для ИПТОП с двухэлементным ФНОП (см. рис. 1, б) взаимная индуктивность катушки ДИПТ фазы A с токопроводом этой фазы в 2 раза больше, чем аналогичная взаимная индуктивность ДИПТ фазы B с токопроводом фазы B . Для упрощения технологии изготовления катушек ДИПТ параметры их желательно унифицировать в максимальной степени. Поэтому для ДИПТ, не имеющих магнитного сердечника, рекомендуется использовать катушки с одинаковыми размерами, в каждой фазе по одной, но у катушки фазы A число витков в 2 раза больше. Так как индуктивность торообразной катушки пропорциональна квадрату числа ее витков, а активное сопротивление ее пропорционально первой степени числа витков, то индуктивное X_{kB} и активное R_{kB} сопротивления у катушки ДИПТ2 меньше, чем у катушки ДИПТ1 (X_{kA} и R_{kA}), соответственно в 4 и 2 раза: $X_{kA} = \sqrt{3m}R$, $X_{kB} = (\sqrt{3m}R)/4$, $R_{kA} = \sqrt{3m}m_r R$, $R_{kB} = (\sqrt{3m}m_r R)/2$, где $m = X_{kA}/(\sqrt{3}R)$, $m_r = R_{kA}/X_{kA}$.

Влияние X_{kA} компенсируется выбором конденсатора с сопротивлением: $X = (1 + m)X_0$, где $X_0 = \sqrt{3}R$ – сопротивление конденсатора при пренебрежимо малом сопротивлении катушки. Следовательно, влияние индуктивного сопротивления катушки ДИПТ проявляется в необходимости уменьшения емкости конденсатора ФНОП в $(1 + m)$ раз. Сопротивление R связано с сопротивлением нагрузки соотношением: $R = R_{ng}m_{ng}$.

На обогатительных фабриках, как и на комплексах для открытых горных работ, используются разнообразные релейные защитные устройства электроустановок. Их системы электроснабжения могут быть выполнены как трех-, так и четырехпроводными.

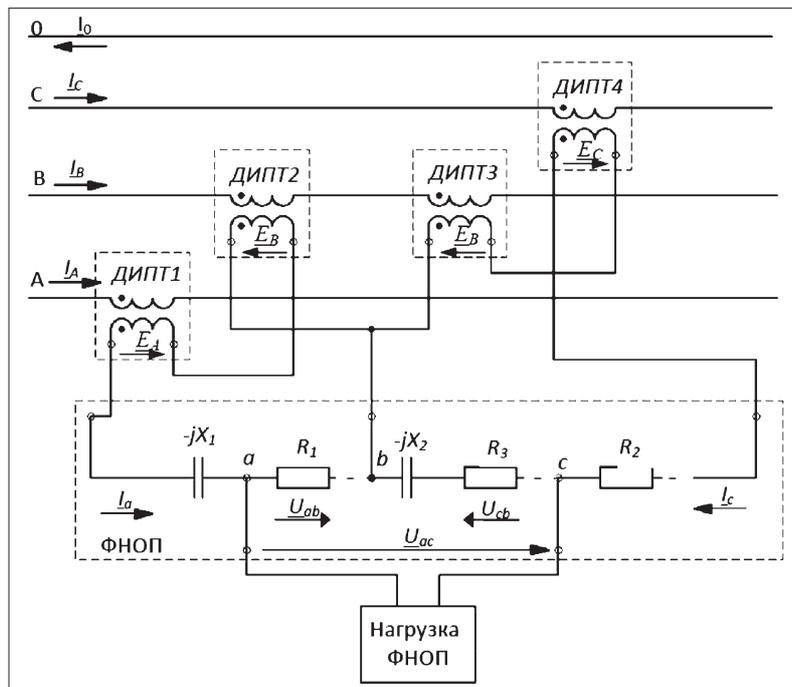


Рис. 2. Схемы ИПТОП с фильтрами симметричных составляющих и четырьмя ДИПТ для четырехпроводных линий

В целях повышения эффективности релейной защиты асинхронных двигателей (АД), установленных на обогатительных фабриках, был разработан фильтр для трехфазной четырехпроводной цепи, содержащий четыре одинаковых по конструктивному исполнению ДИПТ: по одному в фазах A и C и два в фазе B . Принципиальная схема такого измерительного преобразователя приведена на рис. 2.

К входным зажимам пятиэлементного ФНОП подводятся разности ЭДС фаз A, B и C, B , что позволяет исключить нулевую последовательность измеряемых токов. Основные зависимости между элементами находятся в следующих пропорциях: $X_1 = R_1/\sqrt{3} + X_k$; $X_2 = \sqrt{3}R_2$; $R_3 = \sqrt{3}X_k$; $m = X_k/R_2$; $X_k = 2X_{k0}$, где X_{k0} – индуктивное сопротивление, которое соизмеримо с сопротивлениями остальных элементов резисторно-конденсаторной цепи ФНОП.

Приведенные зависимости между элементами измерительного преобразователя позволяют осуществлять преобразователю правильное выделение последовательностей в четырехпроводной линии.

Число отказов электрооборудования из-за неполнофазных режимов работы для условий РУ "Новошахтинское" и РУ "Лучегорское"

Разновидность защиты	Годы			
	2007	2008	2009	2010
РП с релейной защитой, получающей первичную информацию от разработанных фильтров (38 электроприемников)	2	3	2	3
РП с релейной защитой, получающей первичную информацию от фильтров с трансформаторами тока (39 электроприемников)	7	8	5	6
РП без выполнения защиты от неполнофазных режимов работы (35 электроприемников)	17	25	20	18

В условиях рудоуправлений "Новошахтинское" и "Лучегорское" (Приморский край) испытания опытных образцов разработанных измерительных преобразователей проводились в период 2007–2010 гг. На каждом исследуемом распределительном пункте находилось примерно одинаковое число однотипных электроприемников, задействованных на схожих технологических процессах. Результаты испытаний представлены в таблице, анализируя данные которой, можно сказать, что использование в релейной защите фильтров симметричных составляющих, получающих первичную информацию от дифференцирующих индукционных преобразователей, приводит к уменьшению количества выходов электрооборудования из-за неполнофазных режимов работы в среднем на 50 % в год.

Необходимо отметить, что несрабатывание защитных реле первой группы, прежде всего, происходило из-за ошибочного отключения персоналом систем защиты. Как правило, возникают сложности, связанные с устоявшимися традициями и представлениями о релейной защите у персонала энергетических служб предприятия и необходимостью проведения их дополнительного обучения при эксплуатации новых видов оборудования и приборов. Во второй группе основной причиной несрабатывания релейных защитных устройств является искажение сигналов, получаемых от первичных преобразователей, приводящих к сбоям в работе или даже к поломкам блоков релейной защиты при обработке информации от защищаемых ими объектов.

Таким образом, можно сказать, что разработанные фильтры симметричных составляющих, получающие

первичную информацию от дифференцирующих индукционных преобразователей тока, обладают весьма высокой избирательностью. Они пригодны для непосредственного сопряжения с аналого-цифровым преобразователем и имеют значительно меньшую суммарную массу по сравнению с аналогами, а также отличаются надежностью и точностью работы по сравнению с фильтрами на основе трансформаторов тока.

Список литературы

1. **Дорошев Ю.С., Кувшинов Г.Е., Соловьев Д.Б.** Экономические аспекты применения энергосберегающих технологий // Материалы конф. "Инновация в электропромышленности". Благовещенск: Амур, 2008. С. 145–150.
2. **Технический** отчет по горно-добывающему предприятию "ЛуТЭК". 2010. 280 с.
3. **Технический** отчет по разрезуправлению "Новошахтинское". 2010. 158 с.
4. **Shepard D.W., Yuach D.W.** An overview of Rogowski coil current sensing technology. Report.pdf. 13 p.
5. **Ray W.F. и Hewson C.R.** Practical Aspects of Rogowski Current Transducer Performance. PEM_paper_PCIM 2001. pdf. 6 p.
6. **Андреев В.А.** Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. М.: Высш. шк., 1991. 496 с.
7. **Соловьёв Д.Б.** Переходные процессы в измерительном преобразователе тока обратной последовательности, основанном на использовании катушек Роговского // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 2. С. 23–28.



ООО "Издательство "Новые технологии", 107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Дизайнер *Т.Н. Погорелова*. Технический редактор *Т.И. Андреева*. Корректоры *Л.И. Сажина, Л.Е. Сонюшкина*

Сдано в набор 19.05.11 г. Подписано в печать 06.07.11 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,74. Заказ 463. Цена свободная.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-19854 от 15 апреля 2005 г.

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15.