

УДК 621.31

## РАСЧЕТ И ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ МЕХАНИЗМОВ ДОБЫЧНОГО КОМБАЙНА МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ УСИЛИЙ

**Заголило С.А., Семёнов А.С.**

*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,  
Политехнический институт (филиал), Мирный, e-mail: zagolilo93@gmail.com*

В статье выполнен расчет и произведен выбор электродвигателей отдельных механизмов добычного комбайна методом эквивалентных усилий и при помощи построения нагрузочных диаграмм. Показана актуальность ведения добычных работ подземным способом. Дана характеристика средства механизации подземных горных работ. Классифицированы проходческие и добычные комбайны. Рассчитаны производительности рудника и добычного комбайна. Исходя из рассчитанной производительности, выбрано количество и марка добычного комбайна. Приведены технические характеристики выбранного комбайна AM-75 производства фирмы Voest-Alpine Bergtechnik GesmbH. Для предварительного расчета мощности электродвигателей применен метод эквивалентных усилий. Для этого рассчитаны усилия работы механизмов на холостом ходу и под нагрузкой, определены интервалы времени работы на холостом ходу, под нагрузкой и полный рабочий цикл. Определена предварительная и установочная мощность электродвигателей. Построены нагрузочные диаграммы механизмов и спроектированы их кинематические схемы. На основании выполненных расчетов из справочника выбраны ближайшие по мощности и подходящие по напряжению и режиму работы асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Сделаны заключения о значимости полученных данных для дальнейших исследований систем электропривода добычного комбайна методом компьютерного моделирования.

**Ключевые слова:** рудник, добычной комбайн, электродвигатель, эквивалентное усилие, расчет мощности, нагрузочная диаграмма

## CALCULATION AND SELECTION OF ELECTRIC MOTORS OF THE MINING COMBINE MECHANISM BY THE EQUIVALENT FORCE METHOD

**Zagolilo S.A., Semenov A.S.**

*North-Eastern Federal University n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic institute (branch),  
Mirny, e-mail: zagolilo93@gmail.com*

The article calculates and selects the electric motors of individual mechanisms of a mining combine by the equivalent force method and by constructing load diagrams. The relevance of mining operations by the underground method is shown. The characteristic is given to means of mechanization of underground mining. Driving and mining combine are classified. The performance of the mine and mining combine are calculated. Based on the calculated productivity, the quantity and grade of the mining combine are selected. The technical characteristics of the selected AM-75 combine manufactured by Voest-Alpine Bergtechnik GesmbH are presented. For preliminary calculation of electric motor power, the equivalent force method is used. For this, the efforts of the mechanisms idling and under load were calculated, the intervals of idling, under load and the full cycle were determined. The preliminary and installation power of electric motors is determined. The load diagrams of the mechanisms are constructed and their kinematic schemes are designed. Based on the calculations performed, from the reference book, asynchronous motors with a squirrel-cage rotor are closest in power and suitable in voltage and operating mode. Conclusions are made about the significance of the data obtained for further research of electric drive systems of a mining combine by computer simulation.

**Keywords:** mine, mining combine, electric motor, equivalent force, power calculation, load diagram

В настоящее время в Западной Якутии ведется активная разработка подземных месторождений полезных ископаемых, а именно алмазосодержащих пород [1, 2]. Обосновывается это экономической целесообразностью, так как снижаются затраты на вскрышные работы, требуется меньше специального карьерного транспорта [3]. Вопросы механизации погрузки разрушенной горной массы на забойный конвейер или другие транспортные средства имеют весьма важное значение как с точки зрения обеспечения высокопроизводительной работы выемочной машины, так и с точки зрения облегчения условий труда шахтеров, так как ручная погрузка горной массы –

тяжелый физический труд, применяемый чаще всего в наиболее опасном, незакрепленном пространстве [4–6].

Добычные комбайны предназначены для проведения подготовительных горизонтальных выработок по рудным месторождениям полезных ископаемых с разными коэффициентами крепости породы  $f$  от 4 до 10 по шкале М.М. Протодьяконова. Основным направлением развития комплексной механизации проходческих и добычных работ в горной промышленности является внедрение комбайнового способа проведения выработок, уровень которого в 2018 г. достиг 80%. Используются в основном комбайны легкого и среднего

типов (массой от 20 до 100 т и энерговооруженностью исполнительного органа от 100 до 300 кВт), работающие по породе или с присечкой слабых пород. Добычные комбайны тяжелого типа составляют всего около 20% [7].

Для проведения выработок по породам с коэффициентом крепости  $f \geq 7$  и площадью сечения  $\leq 50 \text{ м}^2$  серийно выпускаются средние и тяжелые добычные комбайны фирмы Voest-Alpine Bergtechnik GesmbH (австрийский производитель горнопроходческой техники) серии AM, масса которых достигает 30–80 т с мощностью исполнительного органа 200–250 кВт. Добычные комбайны AM представляют собой самоходную гусеничную машину с исполнительным органом стреловидного типа и погрузочным устройством в виде спаренных нагребующих лап на наклонном поворотном столе с самостоятельным приводом (рис. 1) [8].

*Расчет производительности и выбор комбайна*

Производительность определяют по горным возможностям и по экономически целесообразному сроку существования рудника, а также по горным возможностям с учетом угла падения залежи. При угле падения рудного тела более  $30^\circ$  годовая производительность будет определяться:

$$A_{\Gamma} = U \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot S \cdot \gamma \cdot (1 - \Pi) / (1 - P),$$

где  $U$  – годовое понижение очистной выемки по всей рудной площади, м/год;

$K_1, K_2, K_3, K_4$  – поправочные коэффициенты учитывающие соответственно угол падения, мощность рудного тела, принимаемую систему разработки и число этажей, находящихся в одновременной отработке;  $\Pi$  и  $P$  – планируемые величины потерь и разубоживания руды, доли единиц;  $S$  – горизонтальная площадь рудного тела,  $\text{м}^2$ , определяемая из выражения

$$S = m \cdot L_{\text{пр}} / \sin \alpha = 30 \cdot 75 / \sin 90^\circ = 2,53 \text{ тыс. м}^2.$$

Тогда годовая производительность одного из алмазодобывающих рудников будет равна

$$A_{\Gamma} = 120 \cdot 1,1 \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 2,53 \cdot 2,44 \cdot (1 - 0,1) / (1 - 0,1) = 1019 \text{ тыс. т.}$$

Из рассчитанной годовой производительности определяем часовую производительность рудника:

$$A_{\text{ч}} = \frac{A_{\Gamma}}{312 \cdot 24} = \frac{1019000}{312 \cdot 24} = 136 \text{ т/час.}$$

Так как производительность комбайнов задана в  $\text{м}^3/\text{мин}$ , определим часовую производительность комбайна:

$$Q_{\text{КОМБ.Ч}} = Q_{\text{КОМБ.МИН}} \cdot 60 = 0,5 \cdot 60 = 30 \text{ м}^3/\text{час.}$$

При разработках породы с крепостью  $f > 6$  принимаем плотность  $\rho = 2,44 \text{ т/м}^3$ , откуда находим:

$$Q_{\text{КОМБ.Ч}} = Q_{\text{КОМБ.Ч}} \cdot \rho = 30 \cdot 2,44 = 80 \text{ т/час.}$$

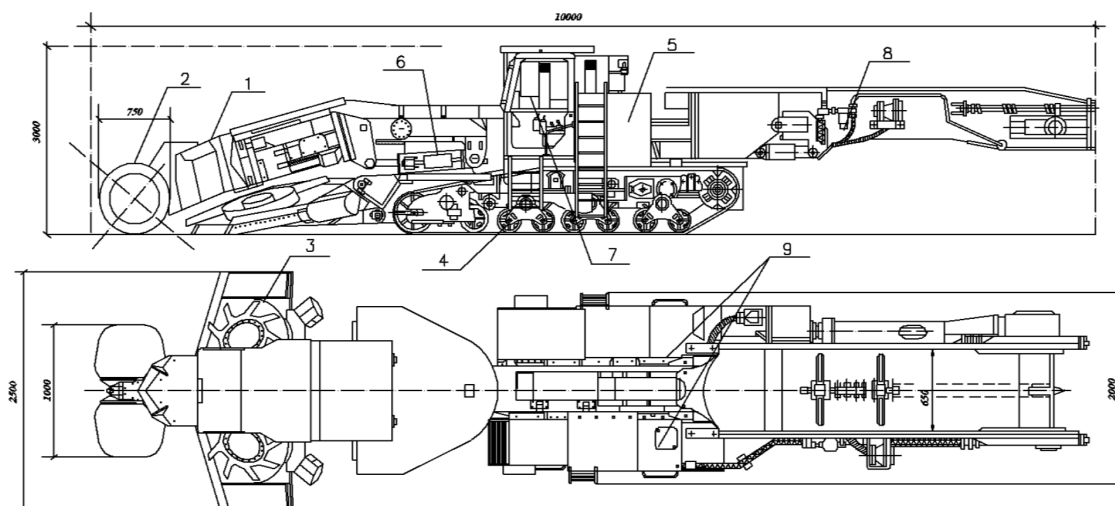


Рис. 1. Внешний вид добычного комбайна: 1 – система подвески стреловидного исполнительного органа, 2 – рабочий орган, 3 – погрузочный орган с нагребующими лапами, 4 – ходовая часть гусеничного типа, 5 – корпус комбайна, 6 – гидроцилиндры исполнительного органа, 7 – кабина оператора, 8 – конвейер скребоквого типа, 9 – блок гидро- и электрооборудования комбайна, включая маслостанцию и управление

Технические характеристики комбайна АМ-75

Наименование параметра	Значение
Расчетная часовая производительность рудника, $A_{\text{ч}}$	136 т/час
Часовая производительность комбайна, $Q_{\text{КОМБ}}$	80 т/час
Необходимое кол-во комбайнов для обеспечения часовой производительности рудника, шт.	2
Суммарная мощность электродвигателей комбайна, $P_{\Sigma}$	350 кВт
Мощность электродвигателя рабочего органа, $P_{\text{РО}}$	200 кВт
Мощность электродвигателей подборщика, $P_{\text{П}}$	2*36 кВт
Мощность электродвигателя конвейера, $P_{\text{К}}$	70 кВт
Режим работы основного электрооборудования	S1
Диаметр зарубной головки рабочего органа, $D$	750 мм
Ширина зарубного бара рабочего органа, $B$	1000 мм
Длина стрелы рабочего органа, $L$	2500 мм
Угол поворота и наклона стрелы, $\alpha$	30°
Масса комбайна, $M_{\text{КОМБ}}$	52 т

При найденных темпах добычи принимаем комбайн АМ-75 с заданной минутной производительностью  $Q_{\text{М.П}} = 0,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ . Составляем таблицу основных параметров комбайна и его механизмов, необходимых для дальнейшего расчёта. Исходными данными расчета являются физические и геометрические параметры, а также заданная производительность предприятия и комбайна (табл. 1).

#### Расчет и предварительный выбор электродвигателей

Для предварительного выбора электродвигателей построим нагрузочные диаграммы механизмов (графики статических нагрузок) [9, 10]. Расчет времени участков цикла на этапе предварительного выбора электродвигателя выполняем приближенно, так как пока нельзя определить время разгонов и замедлений (суммарный момент инерции привода до выбора двигателя неизвестен) [11, 12].

Приведем пример расчета параметров нагрузочной диаграммы для самого мощного механизма – рабочего органа комбайна. Результаты для остальных механизмов, рассчитанных подобным образом, сведем в таблицу для удобства построения нагрузочных диаграмм.

1. Усилие вращения рабочего органа комбайна на холостом ходу:

$$F_{\text{ХХ}} = m_{\text{РО-г-}\mu} = 5000 \cdot 9,8 \cdot 0,15 = 7350 \text{ Н,}$$

где  $\mu = 0,1 \div 0,15$  – коэффициент трения рабочего органа.

2. Усилие резания рабочего органа по породе:

$$F_{\text{Р}} = m_{\text{РО-г-р-}\mu} = 5000 \cdot 9,8 \cdot 2,44 \cdot 0,5 = 59780 \text{ Н,}$$

где  $\rho = 2,44 \text{ т/м}^3$  – плотность породы с крепостью  $f > 6$ ;  $\mu = 0,4 \div 0,6$  – коэффициент трения рабочего органа по породе.

3. Время работы на холостом ходу рассчитываем как время от включения электродвигателя до подъезда к месту работы и в конце работы обратно:

$$t_{\text{ХХ}} = \frac{L_{\text{п}}}{V_{\text{П}}} = \frac{16}{3,5} = 4,6 \text{ мин,}$$

где  $L_{\text{п}}$  – расстояние от места стоянки до забоя;  $V_{\text{П}}$  – средняя скорость передвижения комбайна, принимаем от 0 до 8,8 м/мин.

4. Время работы комбайна под нагрузкой равно

$$t_{\text{п}} = \frac{S_{\text{В}} \cdot Q_{\text{РО}} \cdot \rho \cdot 1000}{V_{\text{РО}} \cdot m_{\text{РО}}} = \frac{24 \cdot 0,5 \cdot 2,44 \cdot 1000}{138 \cdot 5} = 43,4 \text{ мин,}$$

где  $S_{\text{В}} = 24 \text{ м}^2$  – площадь выработки;  $V_{\text{РО}} = 2,3 \text{ м/с} = 138 \text{ м/мин}$  – скорость вращения рабочего органа комбайна.

5. Время цикла:

$$t_{\text{Ц}} = 2 \cdot t_{\text{ХХ}} + t_{\text{п}} = 2 \cdot 4,6 + 43,4 = 52,6 \text{ мин.}$$

6. Эквивалентное усилие рабочего органа при работе:

$$F_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (F_{\text{ХХ}}^2 \cdot t_{\text{ХХ}}) + F_{\text{Р}}^2 \cdot t_{\text{п}}}{t_{\text{Ц}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (7350^2 \cdot 4,6) + 59780^2 \cdot 43,4}{52,6}} = 54400 \text{ Н.}$$

7. Предварительная мощность электродвигателя вычисляется по формуле

$$N = \frac{F_{\text{ЭКВ}} \cdot Q_{\text{РО}}}{V_{\text{РО}} \cdot 100 \cdot \eta} = \frac{54400 \cdot 0,5 \cdot 10^3}{2,3 \cdot 100 \cdot 0,8} = 147800 \text{ Вт,}$$

где  $\eta = 0,8$  – КПД механизма.

8. Полученную мощность двигателя необходимо увеличить на 10–15% для обеспечения надежности работы и возможных перегрузок. Такую мощность называют установочной:

$$N_{\text{УСТ}} = 1,15 \cdot N = 1,15 \cdot 147800 = 169970 \text{ Вт.}$$

Из таблицы видно, что наибольшее соотношение между рабочим усилием и уси-

лием на холостом ходу наблюдается у самого мощного механизма – рабочего органа комбайна. Время цикла работы комбайна одинаково для всех его механизмов и показывает время очистки одной полосы породы (по ширине зарубного бара) в добычном забое. Установочная мощность показывает минимально необходимую мощность электродвигателей механизмов для создания требуемых усилий при работе. После выполнения расчетов построим нагрузочные диаграммы основных механизмов добычного комбайна (рис. 2).

Кинематические схемы рабочего органа комбайна (а), конвейера (б) и погрузочного устройства (в) показаны на рис. 3.

Таблица 2

Результаты расчета параметров механизмов комбайна

Параметр \ Механизм	Рабочий орган	Подборщик	Конвейер
Усилие на холостом ходу, $F_{\text{ХХ}}$ , Н	7350	2312	3372
Рабочее усилие, $F_{\text{р}}$ , Н	59780	5685	12704
Эквивалентное усилие, $F_{\text{ЭКВ}}$ , Н	54400	5209	11625
Время холостого хода, $t_{\text{ХХ}}$ , мин	4,6	4,6	4,6
Время работы, $t_{\text{р}}$ , мин	43,4	43,4	43,4
Время цикла, $t_{\text{Ц}}$ , мин	52,6	52,6	52,6
Предварительная мощность, N, Вт	147800	29597	60549
Установочная мощность, N, кВт	170	34	70

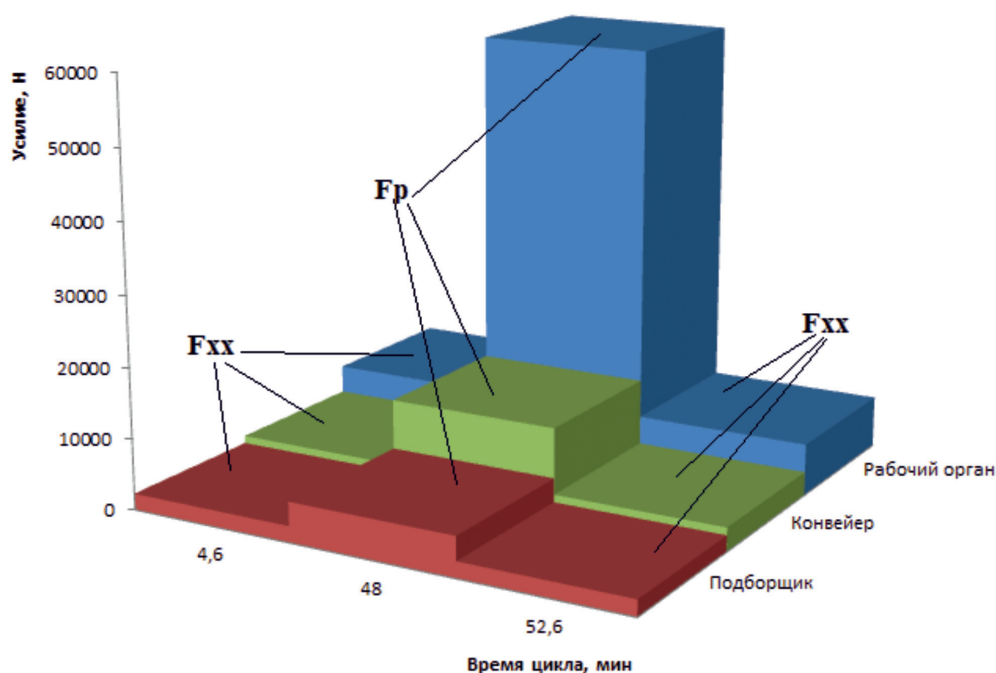


Рис. 2. Нагрузочные диаграммы механизмов комбайна

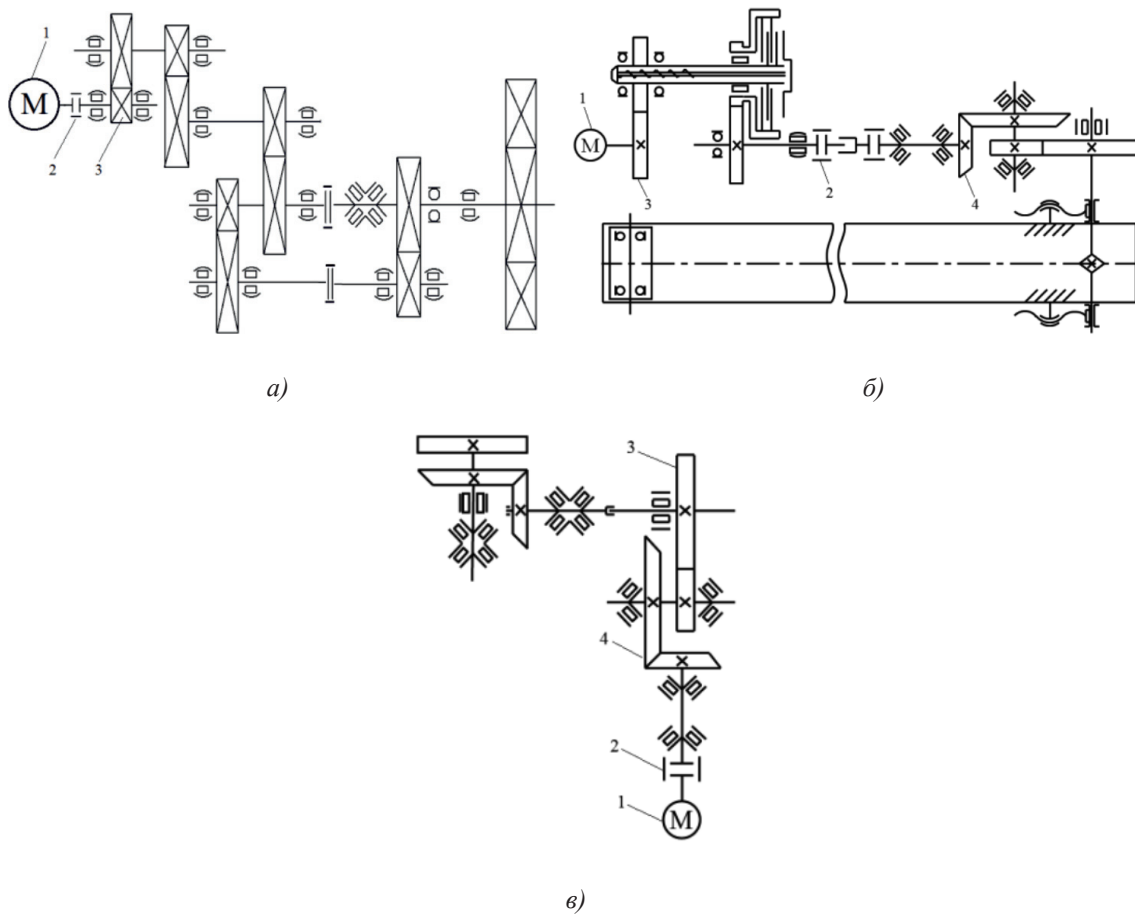


Рис. 3. Кинематические схемы систем электропривода комбайна:  
 а) рабочий орган; б) конвейер; в) подборщик: 1 – электродвигатель,  
 2 – муфта, 3 – цилиндрическая передача, 4 – коническая передача

Таблица 3

Результаты выбора электродвигателей механизмов комбайна

Параметр	Механизм	Рабочий орган	Подборщик	Конвейер
Марка электродвигателя		4A315M4УЗ	АИР200М4	АИР250S4
Высота оси вращения вала, $h$		315 мм	200 мм	250 мм
Мощность, $P_H$		200 кВт	37 кВт	75 кВт
Синхронная частота вращения, $n_1$		1500 об/мин	1500 об/мин	1500 об/мин
Номинальная частота вращения, $n_H$		1480 об/мин	1470 об/мин	1478 об/мин
Номинальное скольжение, $S_H$		1,3%	2%	1,5%
КПД, $\eta$		0,94	0,925	0,94
Коэффициент мощности, $\cos\phi$		0,92	0,89	0,88
Номинальное напряжение, $U_H$		1140 В	660 В	660 В
Отношение пускового тока к номинальному, $I_{II}/I_H$		6,0	7,5	7,5
Отношение пускового момента к номинальному, $M_{II}/M_H$		1,3	1,7	1,7
Отношение максимального момента к номинальному, $M_{max}/M_H$		2,2	2,7	2,5
Момент инерции, $J$		3,63 кг $\times$ м <sup>2</sup>	0,28 кг $\times$ м <sup>2</sup>	0,89 кг $\times$ м <sup>2</sup>
Число пар полюсов, $2p$		2	2	2

Исходя из вышеизложенного расчета, построенных нагрузочных диаграмм и приведенных кинематических схем, выбираем из справочника ближайшие по мощности и подходящие по напряжению и режиму работы асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Марки и технические параметры электродвигателей приведем в табл. 3.

### Заключение

В результате выполненных расчетов был произведен выбор электродвигателей механизмов добычного комбайна АМ-75. По рассчитанным эквивалентным усилиям были определены предварительная и установочная мощности электродвигателей и в последующем выбраны по справочному каталогу трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Метод эквивалентных усилий хорошо подходит для механизмов вращательного действия и показывает низкую абсолютную погрешность между расчетными и справочными данными. Выполненные расчеты послужат для дальнейшего моделирования работы систем электропривода и электроснабжения добычного комбайна [13–15].

### Список литературы

1. Чантурия В.А., Бондарь С.С., Годун К.В., Горячев Б.Е. Современное состояние алмазодобывающей отрасли России и основных алмазодобывающих стран мира // Горный журнал. 2015. № 2. С. 55–58. DOI: 10.17580/gzh.2015.02.10.
2. Чантурия В.А., Годун К.В., Желябовский Ю.Г., Горячев Б.Е. Современное состояние алмазодобывающей отрасли России и основных алмазодобывающих стран мира (часть 2) // Горный журнал. 2015. № 3. С. 67–75. DOI: 10.17580/gzh.2015.03.11.
3. Чаадаев А.С., Зырянов И.В., Кириллов Д.С., Бондаренко И.Ф. Создание и промышленное внедрение систем подземной разработки алмазных месторождений АК «АЛРОСА» (ПАО) // Горный журнал. 2015. № 11. С. 48–52. DOI: 10.17580/gzh.2015.11.10.
4. Махно Д.Е. Проблемы комплексной механизации горных работ при подземной технологии выемки. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. 135 с.
5. Махно Д.Е. К вопросу совершенствования средств комплексной механизации на угольных шахтах // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 10. С. 2–6.
6. Махно Д.Е., Федорко В.П. Проблемы комплексной механизации очистных работ на угольных шахтах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 12 (71). С. 110–113.
7. Однокопылов Г.И., Дементьев Ю.Н., Шевчук В.А. Применение системного анализа для обеспечения эксплуатационной надёжности электрических машин в алмазодобывающей промышленности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 5. С. 131–140. DOI: 10.18799/24131830/2019/5/271.
8. Инструкция по эксплуатации АМ 75/162. VOEST-ALPINE Bergtechnik Ges.m.b.H. A-8740 Zeltweg, AUSTRIA. 01-09-05.
9. Ещин Е.К. Расчеты динамических режимов работы электроприводов самоходных горных машин // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 534–538. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.534.
10. Качурин Н.М., Сарычева И.В. Разработка оптимизационной модели расчета режимных параметров очистных комбайнов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 4. С. 166–177.
11. Хубиева В.М., Петрова М.Н., Семёнов А.С. Проектирование электропривода подборщика путем моделирования. – Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2015. 96 с.
12. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Закоршменный И.М., Решетняк С.Н. Резервы повышения эффективности работы выемочных участков угольных шахт // Уголь. 2019. № 3 (1116). С. 46–49. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-3-46-49.
13. Bebikhov Yu.V., Semenov A.S., Yakushev I.A., Kugusheva N.N., Pavlova S.N., Glazun M.A. The application of mathematical simulation for solution of linear algebraic and ordinary differential equations in electrical engineering. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 643. No. 012067. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012067.
14. Бебихов Ю.В., Семёнов А.С., Семёнова М.Н., Якушев И.А. Анализ методов моделирования технических систем в среде MATLAB // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7. № 3 (26). С. 12. DOI: 10.26102/2310-6018/2019.26.3.037.
15. Якушев И.А., Семёнова М.Н., Бебихов Ю.В., Семёнов А.С. Математическое моделирование сложных технических систем в среде MATLAB. М.: Издательство «Спутник+», 2019. 126 с.