

УДК 621.31

ББК 31.2

А.С. СЕМЁНОВ, Ю.В. БЕБИХОВ, П.Ф. ВАСИЛЬЕВ, Я.С. ХАРИТОНОВ

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Ключевые слова: рудник, главная вентиляторная установка, система электропривода, энергоэффективность, математическое моделирование, измерение мощности, экономия электроэнергии.

Для горнодобывающей отрасли ключевым остается проблема обеспечения максимальной энергоэффективности на каждом технологическом переделе горного производства, поэтому данная статья посвящена оценке результатов моделирования двух различных систем электропривода главной вентиляторной установки рудника с точки зрения обеспечения энергоэффективности наиболее энергоемкого единичного оборудования. В 2017 г. на одном из рудников по добыче алмазосодержащего сырья произведена замена главных вентиляторных установок. Основной причиной замены была выработка их ресурса, а также увеличение сопротивления шахтной сети, что требовало повышения депрессии создаваемой вентилятором. Сопоставление реальных параметров работы существовавшей системы электропривода и вновь установленной может дать представление о реальных масштабах и направлениях развития технологий в области электропривода. Сбор, обработка, анализ и сопоставление реальных данных по двум вентиляторам и системам электропривода отечественного и зарубежного производства может способствовать раскрытию и решению проблем импортозамещения такого оборудования. Для анализа энергоэффективности были применены методики, предполагающие создание математических моделей двух систем в пакете программ MatLab/Simulink, а также технико-экономическое сравнение двух вариантов с точки зрения энергопотребления. По полученным в результате моделирования данным для вентиляторов ТАФ-36/21,5-1 и ВОД-50 построены графические зависимости статического давления, подачи и мощности от угловой скорости, а также для каждого варианта рассчитано годовое потребление электроэнергии.

Введение. Одной из наиболее энергоемких сфер промышленности является горнодобывающее производство. Увеличение электропотребления горной промышленностью вызывается не только ростом производства, но и качественными изменениями технологии, усложнением горно-геологических условий добычи руды, внедрением природоохранных мероприятий [4]. Отличительными особенностями электропотребления на горных предприятиях являются: неравномерность графика производства и потребления электроэнергии; необходимость покрытия потребляемой мощности электроприемников для обеспечения их бесперебойного электроснабжения; обеспечение качества электроэнергии; обеспечение учета электроэнергии для расчета с энергоснабжающей организацией [7, 8].

В качестве объекта исследования выбран подземный рудник по добыче алмазосодержащей руды. Установленная мощность современных рудников в зависимости от их условий производства, глубины залегания рудных тел, размеров шахтного поля, водообильности, уровня механизации, автоматизации и других факторов достигает десятков, а иногда и сотен МВт. Самое энергоемкое оборудование находится на поверхности рудника. В состав таких потребителей, как правило, входят шахтные подъемные установки, компрессорные установки и главные вентиляторные установки.

Особую роль в жизнедеятельности шахты играют главные вентиляторные установки (ГВУ), обеспечивающие проветривание рудника, которые могут достигать мощности десятков МВт [1]. ГВУ работают в продолжительном режиме с малым числом пусков и торможений. Это обуславливает большое электропотребление и максимальную производительность и, как следствие, быстрый износ оборудования. В связи с этим актуальной проблемой является выбор наиболее энергоэффективной и надежной системы электропривода для главных вентиляторных установок рудника.

Таким образом, цель исследования в настоящей работе – технико-экономическая оценка эффективности применения различных систем электропривода на технологической установке горного предприятия методом математического моделирования в пакете программ MatLab. Рассмотрены модели двух систем электропривода: с синхронным и асинхронным двигателем; произведены расчеты потребляемой мощности; построены графические зависимости статического давления, подачи и мощности от угловой скорости вращения; определен экономический эффект при использовании системы частотно-регулируемого электропривода на базе асинхронного двигателя.

Методы исследования. В качестве основного метода применено математическое моделирование в среде MatLab/Simulink. MatLab предназначен для моделирования и исследования статических и динамических систем в широком понимании этого термина, включая дискретные, непрерывные и гибридные модели [2]. Приложение Simulink, входящее в состав среды MatLab и представляющее собой библиотеку блоков, является в настоящее время одним из наиболее популярных инструментов численных расчетов и применяется в различных областях знаний [6, 9].

В качестве исходных данных моделирования задавались следующие параметры: номинальная угловая скорость двигателя, номинальная подача, номинальное давление, номинальный КПД вентилятора, суммарный КПД двигателя и преобразователя. Выходными данными при анализе являлись: угловая скорость вентилятора, подача и статическое давление вентилятора, потребляемая мощность и момент статического сопротивления. Основными же параметрами исследования были выбраны статическое давление, подача и мощность вентиляторной установки.

В табл. 1 приведены паспортные данные по двум рассматриваемым системам ГВУ.

Таблица 1

Паспортные данные главных вентиляторных установок

№	Данные системы	Система ГВУ 1	Система ГВУ 2
1	Тип вентилятора	<i>TAF-36/21,5-1</i>	<i>ВОД-50</i>
2	Частота вращения	570-670 мин ⁻¹	300 мин ⁻¹
3	Номинальная подача	360 м ³ /с	315 м ³ /с
4	Статическое давление	440 даПа	245 даПа
5	Средневзвешенный КПД	0,89	0,78
6	Тип двигателя	<i>A5L710P44-08KBExpz</i>	<i>СДСЗ-18-39-20ПУХЛ4</i>
7	Номинальная мощность	2000 кВт	2000 кВт
8	Частота вращения	750 мин ⁻¹	300 мин ⁻¹
9	Номинальное напряжение	6000 В	6000 В
10	Номинальный ток	233	226

Окончание табл. 1

№	Данные системы	Система ГВУ 1	Система ГВУ 2
11	КПД	-	95,3%
12	Тип преобразователя	<i>Power Flex 7000</i>	<i>ПЧВС</i>
13	Номинальное напряжение	6300 В	6000 В
14	Номинальный ток	375 А	400 А
15	Мощность	до 3700 кВт	до 3150 кВт

Поскольку обе системы электропривода ГВУ оснащены преобразователями частоты, их математические модели, внешний вид которых представлен на рис. 1, отличаются лишь исходными параметрами и коэффициентами передаточных функций и усилителей, рассчитанных по методике, изложенной в [5].

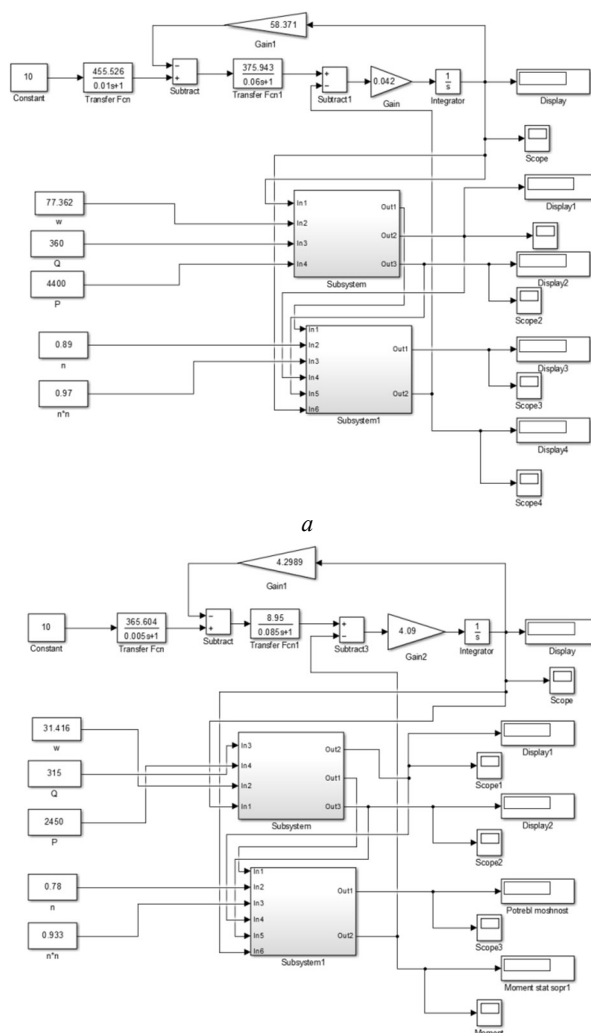


Рис. 1. Модели систем электропривода ГВУ в пакете программ MatLab/Simulink: а – на базе асинхронного двигателя; б – на базе синхронного двигателя

Модели состоят из следующих основных блоков: Constant – постоянная, имитирующая задание входного значения скорости и других исходных данных; Transfer Fcn – передаточные функции, относящиеся к силовой и механической частям двигателя и преобразователя частоты; Subtract – сумматоры сигналов и обратных связей; Gain – усилители механической части двигателя и обратной связи по скорости; Integrator – интегрирующее звено механической части двигателя; блоки Display и Scope – дисплей и осциллограф для численного и графического отображения выходных данных.

Модели, представленные на рис. 1, позволяют получить параметры вентилятора при разных скоростях двигателя (рабочего колеса), но при этом модели не учитывают автоматическое изменение угла установки лопаток, которое предусмотрено в одной из систем ГВУ с более современным вентилятором ТАФ-36/21,5-1. Это сделано специально, чтобы учитывались только параметры, относящиеся к системе электропривода (двигатель–преобразователь) [10].

Ещё одним методом исследования являлось технико-экономическое сравнение вариантов двух систем ГВУ. Оценке подлежали величины электропотребления для выявления более экономичной системы [3].

Результаты исследования. Для получения результатов моделирования двух наших систем электропривода ГВУ запишем выражения для определения КПД, мощности, статического момента и потребляемой энергии вентиляторами.

1. КПД вентилятора определяется с помощью формулы Муди

$$\eta_B = 1 - \frac{1 - \eta_{B,НОМ}}{(\omega/\omega_{НОМ})^{0,36}}, \quad (1)$$

где $\eta_{B,НОМ}$ – номинальный (паспортный) КПД вентилятора; ω – угловая скорость вентилятора, рад/с; $\omega_{НОМ}$ – номинальная угловая скорость двигателя, рад/с.

2. Мощность, потребляемая вентилятором, определяется выражением

$$N = \frac{Q \cdot \rho}{1000 \cdot \eta_B}, \text{ кВт}, \quad (2)$$

где Q – секундная подача вентилятора, м³/с; ρ – полное статическое давление, создаваемое вентилятором, Па.

3. Момент статического сопротивления вентилятора определяется выражением

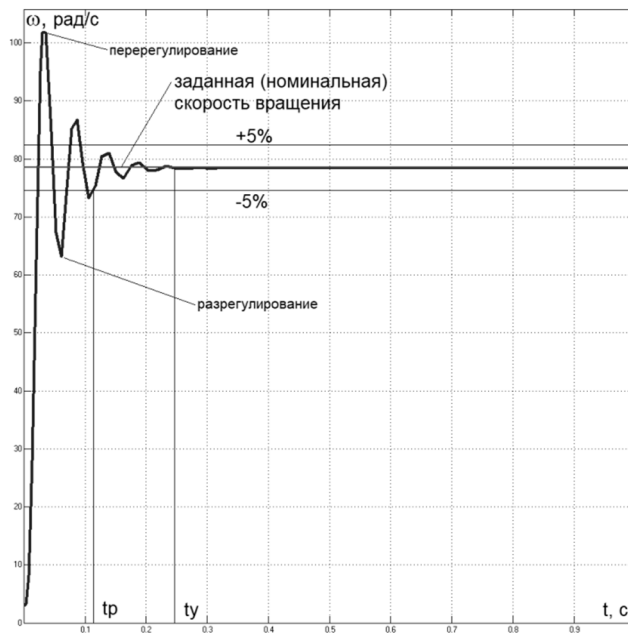
$$M_C = \frac{Q \cdot \rho}{\omega \cdot \eta_B}, \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3)$$

4. Потребляемая мощность вентиляторной установкой определяется как

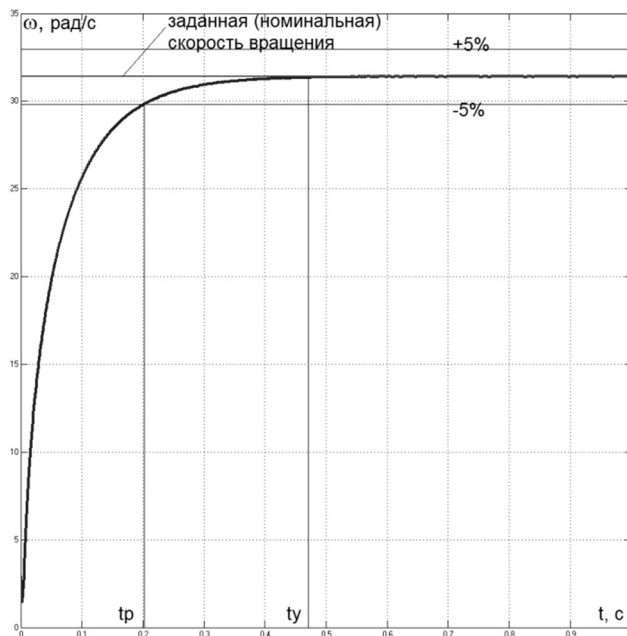
$$P_B = \frac{N}{\eta_{ДВ} \cdot \eta_{ПЧ}}, \text{ кВт}, \quad (4)$$

где $\eta_{ДВ}$ – КПД электродвигателя; $\eta_{ПЧ}$ – КПД преобразователя частоты.

Далее проанализируем результаты моделирования угловой скорости вращения для двух систем электропривода ГВУ. Для этого переведем частоту вращения n , указанную в паспортных данных, в ω и сопоставим с результатами моделирования на графиках (рис. 2).



a



б

Рис. 2. Результаты моделирования угловой скорости вращения ГВУ:
a – для асинхронного двигателя; *б* – для синхронного двигателя

Суммарное время моделирования составило 1 с. Из графиков видно, что переходной процесс угловой скорости вращения асинхронного двигателя

имеет пики перерегулирования и разрегулирования, которые не превышают 25%. Однако время разгона (t_p) и время установления (t_y) переходного процесса для асинхронного двигателя выглядят намного предпочтительнее и, соответственно, составляют 0,11 и 0,245 с, что почти в два раза быстрее чем у синхронного двигателя. Отклонение от заданной скорости вращения для двух систем электропривода имеет минимальные значения и, соответственно, для АД и СД составляет 0,07% и 0,06%.

Теперь снимем показатели с остальных осциллографов и дисплеев двух моделей, изменяя сигнал задания скорости (блок Constant), и приведем их в виде табл. 2 и 3.

Таблица 2

Результаты моделирования системы с вентилятором ТАФ-36/21,5-1

$U_{3,с}, В$	1,5	3	6	8	10	11	12
$\omega, с^{-1}$	11,68	23,31	46,44	61,76	78,44	84,6	92,17
$Q, м^3/с$	54,34	108,4	216,1	287,4	365	393,7	428,9
$\rho, Па$	100,3	393,3	1585	2804	4524	5261	6246
$P, кВт$	7,176	53,75	407	943,2	1911	2490	3180
ω^*	0,151	0,301	0,600	0,798	0,999	1,094	1,191
Q^*	0,151	0,301	0,600	0,798	1,014	1,094	1,191
ρ^*	0,023	0,089	0,360	0,637	1,028	1,196	1,420
P^*	0,004	0,027	0,204	0,472	1,041	1,245	1,590

Таблица 3

Результаты моделирования системы с вентилятором ВОД-50

$U_{3,с}, В$	1,5	3	6	8	10	11	12
$\omega, с^{-1}$	11,06	16,32	23,86	27,87	31,42	33,06	34,64
$Q, м^3/с$	110,9	163,6	239,2	279,5	315,1	331,5	347,4
$\rho, Па$	303,08	661	1413	1929	2451	2714	2979
$P, кВт$	53,13	160,7	478,4	749,9	1061	1230	1408
ω^*	0,352	0,520	0,760	0,888	1,001	1,053	1,103
Q^*	0,352	0,519	0,759	0,887	1,000	1,052	1,103
ρ^*	0,124	0,270	0,577	0,787	1,000	1,108	1,216
P^*	0,051	0,153	0,456	0,714	0,981	1,171	1,341

Базовые величины потребляемой мощности для рассматриваемых вентиляторов:

$$P_{Б.ТАФ} = \frac{Q_{НОМ} \cdot \rho_{НОМ}}{1000 \cdot \eta_{В} \cdot \eta_{ДВ/ПЧ}} = \frac{360 \cdot 4400}{1000 \cdot 0,89 \cdot 0,97} = 1834,8 \text{ кВт.} \quad (5)$$

$$P_{Б.ВОД} = \frac{Q_{НОМ} \cdot \rho_{НОМ}}{1000 \cdot \eta_{В} \cdot \eta_{ДВ} \cdot \eta_{ПЧ}} = \frac{315 \cdot 2450}{1000 \cdot 0,78 \cdot 0,953 \cdot 0,96} = 1081,5 \text{ кВт.} \quad (6)$$

Отклонения расчетной мощности от смоделированных параметров при $U_{3,с} = 10В$ для двух систем, соответственно, для АД и СД составляют 4,1% и 1,9%. Особенностью частотно-регулируемого электропривода является возможность обеспечения параметров регулирования сверхноминимальных значений. Это видно в табл. 2 и 3 по результатам моделирования, где параметры регулирования в относительных единицах превышают единицу.

По полученным в результате моделирования данным для двух вентиляторных установок построены графические зависимости статического давления, подачи и мощности от угловой скорости, которые представлены на рис. 3. На графиках видно, что при обеспечении требуемого статического давления 2105 Па, которое соответствует полной депрессии рудника, потребляемая мощность вентилятора ТАФ-36/21,5-1 составила $P_{ТАФ} = 620$ кВт, а ВОД-50 – $P_{ВОД} = 830$ кВт.

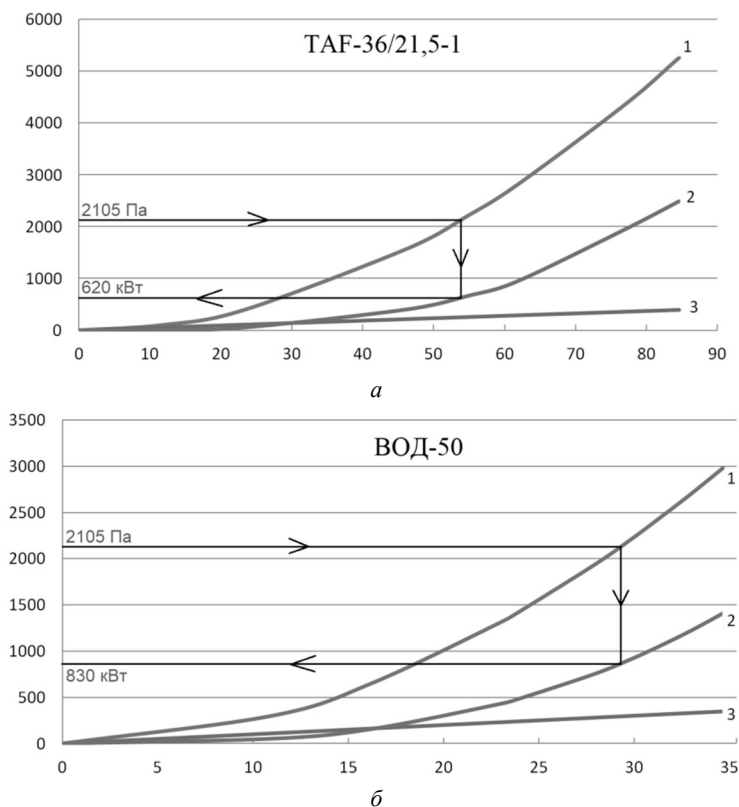


Рис. 3. Графические зависимости статического давления (1), мощности (2) и подачи (3) от угловой скорости вращения: а – для вентилятора ТАФ-36/21,5-1 с асинхронным двигателем; б – для вентилятора ВОД-50 с синхронным двигателем

Оценим энергопотребление двух систем электропривода. С учетом того, что время работы ГВУ 8760 ч/год, ориентировочное годовое потребление электроэнергии по обоим вентиляторам

$$W_{ТАФ} = P_{ТАФ} \cdot T_P = 620 \cdot 8760 = 5\,431\,200 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{год}}; \quad (7)$$

$$W_{ВОД} = P_{ВОД} \cdot T_P = 830 \cdot 8760 = 7\,270\,800 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{год}}. \quad (8)$$

Исходя из (7) и (8) экономия электроэнергии при применении вентилятора ТАФ-36/21,5-1 с ЧРП на базе асинхронного двигателя составит $\Delta W = W_{\text{вод}} - W_{\text{ТАФ}} = 1\,839\,600$ кВт·ч/год. При переводе в денежный эквивалент с учетом стоимости тарифа на электроэнергию экономия от использования новой системы

$$C_{\text{э,год}} = \Delta W \cdot w = 1\,839\,600 \cdot 4,95 = 9\,106\,020 \text{ руб.} \sim 9,1 \text{ млн руб.} \quad (9)$$

где $w = 4,95$ руб. – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии по тарифу ЗЭС ПАО «Якутскэнерго» для рудника «Интернациональный» на 2020 г.

Выводы. В результате проведенного исследования согласно цели работы была произведена оценка эффективности применения различных систем электропривода на технологической установке горного предприятия методом математического моделирования. В результате полученных при помощи пакета программ математического моделирования MatLab данных наблюдается существенное улучшение энергоэффективности при использовании вентилятора ТАФ-36/21,5-1 с системой частотно-регулируемого электропривода на базе асинхронного двигателя, связанное с экономией электроэнергии для обеспечения требуемого давления в шахте, которая в денежном эквиваленте составила более 9 млн руб. в год. По надежности асинхронные двигатели также имеют преимущества над синхронными, что связано с упрощенной конструкцией и техническим обслуживанием. К сожалению, в настоящий момент зарубежные преобразователи частоты по своим характеристикам и надежности превосходят отечественные аналоги, в то же время они имеют и большую стоимость, поэтому не каждое горнодобывающее предприятие может позволить себе их применение.

Литература

1. *Абрамов Б.И., Дацковский Л.Х., Кузьмин И.К., Шевыр'ев Ю.В.* Электропривод вентиляторов шахтных установок // *Электротехника*. 2017. № 3. С. 67–74.
2. *Бибихов 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.
3. *Кугушева Н.Н., Семёнов А.С., Якушев И.А., Павлова С.Н.* Техничко-экономические особенности выбора частотно-регулируемых электроприводов для технологических установок алмазодобывающих предприятий // *Инновации и инвестиции*. 2021. № 1. С. 145–149.
4. *Петров М.Б., Серков Л.А., Кожов К.Б.* Анализ пространственных особенностей регионального электропотребления в РФ // *Прикладная эконометрика*. 2021. № 1(61). С. 5–27.
5. *Фащленко В.Н.* Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий. М.: Горная книга, 2011. 260 с.
6. *Шпиганович А.А., Федоров О.В., Пушница К.А., Чуркина Е.В.* Моделирование коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения металлургических производств // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 9. С. 726–731.
7. *Шпрехер Д.М., Шаров Д.О., Пичуев А.В.* Анализ качества прогноза электропотребления на горных предприятиях с помощью искусственной нейросетевой модели // *Наукофера*. 2020. № 6. С. 260–265.
8. *Шпрехер Д.М., Шаров Д.О., Пичуев А.В.* Методика синтеза и обоснование параметров искусственной нейросетевой модели прогнозирования электропотребления на горных предприятиях // *Наукофера*. 2020. № 6. С. 253–259.

9. Kirillov I.E., Morozov I.N., Kuznetsov N.M., Federov O.V., Dolomanyuk L.V. Development of customized simulation models for high voltage generators. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2021, vol. 141, pp. 190–196.

10. Semenov A., Yakushev I., Kharitonov Y., Shevchuk V., Gracheva E., Ilyashenko S. Calculation of load diagrams and static characteristics of multimotor electric drive systems using the methods of equivalent forces and reduced moments. *International Journal of Technology*, 2020, vol. 11, no. 8, pp. 1537–1546.

СЕМЁНОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики и автоматизации промышленного производства, Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, Россия, Мирный (sash-alex@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9940-3915>).

БЕБИХОВ ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроэнергетики и автоматизации промышленного производства, Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, Россия, Мирный (bebikhov.yura@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8366-4819>).

ВАСИЛЬЕВ ПАВЕЛ ФИЛИППОВИЧ – кандидат технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения, Физико-технический институт Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, Россия, Якутск (kb-8@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4108-176X>).

ХАРИТОНОВ ЯКОВ СТАНИСЛАВОВИЧ – аспирант кафедры электроснабжения, Физико-технический институт Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова; начальник участка силовой преобразовательной техники, СТ «Алмазавтоматика» АК «АЛРОСА» (ПАО), Россия, Мирный (kharitonovyakov@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4151-7650>).

Alexander S. SEMENOV, Yuriy V. BEBIKHOV,
Pavel F. VASILYEV, Yakov S. KHARITONOV

**EVALUATION OF THE SIMULATION RESULTS
OF VARIOUS ELECTRIC DRIVE SYSTEMS
OF A MINING ENTERPRISE**

Key words: mine, main fan unit, electric drive system, energy efficiency, mathematical modeling, power measurement, energy saving.

For the mining industry, the key problem is to ensure maximum energy efficiency at each technological stage of mining production, therefore this article is devoted to assessing the results of modeling two different electric drive systems of the main fan unit of the mine from the point of view of ensuring the energy efficiency of the most energy-intensive unit equipment. In 2017, the main fan units were replaced at one of the mines for the extraction of diamond-bearing raw materials. The main reason for the replacement was the depletion of their resource, as well as an increase in the resistance of the mine network, which required an increase in the depression created by the fan. Comparison of the actual operating parameters of the existing electric drive system and the newly installed one can give an idea of the real scale and directions of development of technologies in the field of electric drive. Collection, processing, analysis and comparison of real data on two fans and electric drive systems of domestic and foreign production can contribute to the disclosure and solution of the problems of import substitution of such equipment. To analyze energy efficiency, methods were applied that involve the creation of mathematical models of two systems in the MatLab/Simulink software package, as well as a technical and economic comparison of the two options in terms of energy consumption. Based on the data obtained as a result of modeling for the TAF-36/21.5-1 and VOD-50 fans, graphical dependencies of static pressure, supply and power on the angular speed were built, and the annual electricity consumption was calculated for each option.

References

1. Abramov B.I., Datskovskii L.K., Kuz'min I.K., Shevyrev Y.V. Electric drives of mining installations. *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol. 88, no. 3, pp. 159–165.
2. Bebikhov Iu.V., Semenov A.S., Semenova M.N., Iakushev I.A. *Analiz metodov modelirovaniia tekhnicheskikh sistem v srede MATLAB* [Analysis of methods for modeling technical systems in the MATLAB environment]. *Modelirovanie, optimizatsiia i informatsionnye tekhnologii*, 2019, vol. 7, no. 3 (26), p. 12.
3. Kugusheva N.N., Semenov A.S., Iakushev I.A., Pavlova S.N. *Tekhniko-ekonomicheskie osobennosti vybora chastotno-reguliruemyykh elektropriivodov dlia tekhnologicheskikh ustanovok almazodobyvayushchikh predpriatii* [Technical and economic features of the choice of frequency-controlled electric drives for technological installations of diamond mining enterprises]. *Innovatsii i investitsii*, 2021, no. 1, pp. 145–149.
4. Petrov M.B., Serkov L.A., Kozhov K.B. *Analiz prostranstvennykh osobennostei regional'nogo elektropotrebleniia v RF* [Analysis of the spatial features of regional power consumption in the Russian Federation]. *Prikladnaia ekonometrika*, 2021, no. 1(61), pp. 5–27.
5. Fashchilenko V.N. *Reguliruemyy elektropriivod nasosnykh i ventilatornykh ustanovok gornyykh predpriatii* [Adjustable electric drive of pumping and ventilating installations of mining enterprises]. Moscow, Gornaia kniga Publ., 2011, 260 p.
6. Shpiganovich A.A., Fedorov O.V., Pushnitsa K.A., Churkina E.V. Simulation of switching overvoltages in power supply systems of metallurgical plants. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 726–731.
7. Shprekher D.M., Sharov D.O., Pichuev A.V. *Analiz kachestva prognoza elektropotrebleniia na gornyykh predpriatiiakh s pomoshch'yu iskusstvennoi neirosetevoi modeli* [Analysis of the quality of forecasting power consumption at mining enterprises using an artificial neural network model]. *Naukosfera*, 2020, no. 6, pp. 260–265.
8. Shprekher D.M., Sharov D.O., Pichuev A.V. *Metodika sinteza i obosnovanie parametrov iskusstvennoi neirosetevoi modeli prognozirovaniia elektropotrebleniia na gornyykh predpriatiiakh* [Methods of synthesis and substantiation of the parameters of an artificial neural network model for predicting power consumption at mining enterprises]. *Naukosfera*, 2020, no. 6, pp. 253–259.
9. Kirillov I.E., Morozov I.N., Kuznetsov N.M., Fedorov O.V., Dolomanyuk L.V. Development of customized simulation models for high voltage generators. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2021, vol. 141, pp. 190–196.
10. Semenov A., Yakushev I., Kharitonov Y., Shevchuk V., Gracheva E., Ilyashenko S. Calculation of load diagrams and static characteristics of multimotor electric drive systems using the methods of equivalent forces and reduced moments. *International Journal of Technology*, 2020, vol. 11, no. 8, pp. 1537–1546.

ALEXANDER S. SEMENOV – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Head of the Department of Electric Power Industry and Industrial Automation, Polytechnic Institute (Branch) of M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Russia, Mirny (sash-alex@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9940-3915>).

YURIY V. BEBIKHOV – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of the Department of Electric Power Industry and Industrial Automation, Polytechnic Institute (branch) of M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Russia, Mirny (bebikhov.yura@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8366-4819>).

PAVEL F. VASILYEV – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Power Supply, Institute of Physics and Technology of M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Russia, Yakutsk (kb-8@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4108-176X>).

YAKOV S. KHARITONOV – Post-Graduate Student, Department of Power Supply, Institute of Physics and Technology of M.K. Ammosov North-Eastern Federal University; Head of the Section of Power Converting Equipment, ST “Almazavtomatika”, PJSC “ALROSA”, Russia, Mirny (kharitonov.yakov@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4151-7650>).

Формат цитирования: Семёнов А.С., Бебихов Ю.В., Васильев П.Ф., Харитонов Я.С. Оценка результатов моделирования различных систем электропривода технологической установки горного предприятия // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 3. – С. 113–122. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-113-122.