

УДК 519.6, 621.3

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.29.2.012](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.29.2.012)

## Компьютерное моделирование многодвигательной системы электропривода в пакете программ MatLab

С.А. Заголило, А.С. Семёнов, М.Н. Семёнова, И.А. Якушев

*Политехнический институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия*

**Резюме:** Рассмотрена многодвигательная система электропривода добычного комбайна. Произведено компьютерное моделирование в пакете программ MatLab при помощи библиотеки блоков Simulink и приложения SimPowerSystems. Для исследования выбран добычной комбайн АМ-75. Приведено описание силовой схемы основного электрооборудования комбайна, к которому относятся двигатели стреловидного рабочего органа, поворотного скребкового конвейера, подборщика с двумя нагребующими лапами. Для проведения моделирования в программе Mathcad были рассчитаны дополнительные параметры асинхронных двигателей, к которым относятся активные сопротивления и индуктивности обмоток статора и ротора, взаимоиндукция, приведенная мощность, номинальный ток, конструктивный и обмоточный коэффициенты двигателей. Разработана компьютерная модель прямого пуска всех асинхронных двигателей с взаимосвязью по технологическому процессу. Получены результаты моделирования в виде графиков временных зависимостей основных параметров двигателей: угловой частоты вращения и электромагнитного момента. Были получены графики напряжения и тока питающей сети, а также график потребления активной мощности. Произведена качественная оценка полученных результатов путем определения относительной погрешности смоделированных параметров и рассчитанных данных. В ходе оценки и анализа результатов моделирования выявлены незначительные погрешности в параметрах двигателей, что свидетельствует о точной реализации компьютерной модели и возможность её использования для инженерных расчетов.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, MatLab, Simulink, асинхронный двигатель, многодвигательный электропривод, добычной комбайн, угловая скорость вращения, электромагнитный момент, погрешность.

**Для цитирования:** Заголило С.А., Семёнов А.С., Семёнова М.Н., Якушев И.А. Компьютерное моделирование многодвигательной системы электропривода в пакете программ MatLab. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(2). Доступно по: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/05/ZagoliloSoavtors\\_2\\_20\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/05/ZagoliloSoavtors_2_20_1.pdf) DOI: 10.26102/2310-6018/2020.29.2.012

## Computer modeling of multi-motor electric drive system in MatLab software

S.A. Zagolilo, A.S. Semenov, M.N. Semenova, I.A. Yakushev

*North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Polytechnic Institute (branch) in Mirny, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia*

**Abstract:** A multi-motor electric drive system of a mining combine is considered. Computer simulation was performed in the MatLab software package using the Simulink block library and the SimPowerSystems application. For research, a mining combine AM-75 was selected. The description

of the power circuit of the main electrical equipment of the combine is given, which includes the engines of the swept working body, the rotary scraper conveyor, and the pick-up with two pick-up legs. To carry out the simulation, the Mathcad program calculated additional parameters of induction motors, which include the active resistances and inductances of the stator and rotor windings, mutual induction, reduced power, rated current, design and winding coefficients of the motors. A computer model of direct start of all asynchronous motors with a process relationship has been developed. The simulation results are obtained in the form of graphs of the time dependences of the main engine parameters: angular rotation frequency and electromagnetic moment. Plots of voltage and current of the supply network were obtained, as well as a graph of active power consumption. A qualitative assessment of the obtained results was made by determining the relative error of the simulated parameters and calculated data. During the assessment and analysis of the simulation results, minor errors in the engine parameters were revealed, which indicates the exact implementation of the computer model and the possibility of its use for engineering calculations.

**Keywords:** computer simulation, MatLab, Simulink, asynchronous motor, multi-motor electric drive, mining combine, angular rotation speed, electromagnetic moment, error.

**For citation:** Zagolilo S.A., Semenov A.S., Semenova M.N., Yakushev I.A. Computer modeling of multi-motor electric drive system in MatLab software. *Modeling, optimization and information technology*. 2020;8(1). Available from [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/05/ZagoliloSoavtors\\_2\\_20\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/05/ZagoliloSoavtors_2_20_1.pdf) DOI: 10.26102/2310-6018/2020.29.2.012 (In Russ).

## Введение

Применение многодвигательных систем электропривода является распространенным явлением в горнопромышленном оборудовании. Наибольшее распространение получили многоприводные магистральные ленточные конвейеры с исполнением кинематических схем: с двумя разнесенными от приводного барабана электродвигателями; с двумя электродвигателями по одну сторону от приводного барабана; с четырьмя электродвигателями [1]. В конвейере жесткая кинематическая связь электродвигателей друг с другом в структуре одного привода приводит к полной синхронизации частот вращения их роторов [2]. Есть другие типы производственного оборудования и установок, в которых взаимосвязь осуществляется, например, через механизм или технологический процесс [3-5]. К последним можно отнести многодвигательную систему электропривода добычного комбайна, “завязанную” на едином технологическом процессе – добыче полезного ископаемого [6, 7].

В настоящее время в Западной Якутии ведется активная разработка подземных месторождений полезных ископаемых, а именно алмазосодержащих пород. На руднике «Интернациональный» начался этап отработки подкарьерных запасов через вспомогательный вентиляционный ствол, габариты которого не позволяют доставить к очистному забою добычной комбайн АМ-105, хорошо зарекомендовавший себя ранее. Для продолжения добычи на рудник «Интернациональный» из рудника «Айхал» был доставлен добычной комбайн АМ-75. Авторы заинтересовались многодвигательной системой электропривода этого очистного комплекса и её энергетическими показателями. Поскольку рудник «Интернациональный» является объектом, опасным по газу и нефтепроявлениям, то просто “прийти” туда и измерить эти показатели не представляется возможным. Тогда было принято решение собрать все необходимые данные об этом добычном комбайне [8] и провести компьютерное моделирование его многодвигательной системы электропривода.

На первый взгляд компьютерному моделированию различных видов многоприводных систем в пакете программ MatLab посвящено много работ, как научных, так и учебно-методических, как в российских, так и в зарубежных изданиях [9-16]. Но среди них

авторы не нашли работ, затрагивающих моделирование сразу всех двигателей одной многодвигательной системы, связанной единым технологическим процессом. Проанализируем ряд наиболее интересных (с точки зрения авторов) работ, посвященных моделированию многоприводных систем.

В работе [17] дается описание оригинальных силовых схем для согласования скоростей взаимосвязанных через механическое оборудование электромеханических систем постоянного и переменного тока. Приводятся результаты моделирования таких систем в среде MatLab/Simulink. Интерес вызывает разработанная автором компьютерная модель взаимосвязанной электромеханической системы средней мощности с токопараметрическим принципом согласования скоростей через механическое оборудование. К сожалению, автором не представлены все блоки входящих в состав модели подсистем, а также используется ранняя версия пакета программ MatLab, в которой силовой канал и цепи управления промаркированы одинаково, что затрудняет анализ работы модели.

Авторы в своей работе [18] излагают дальнейшее развитие матричного метода [19] для анализа электромеханических устройств в составе транспортных систем. Полученная ими система уравнений, представляющая собой матричную модель электромеханической цепи, позволяет формализовать описание процессов в многодвигательных системах и эффективно проводить их исследование.

В теоретической работе [20] автором проведено вероятностное моделирование системы приводов, включающей в свою структуру многодвигательные приводы случайной конфигурации. Согласно выведенным зависимостям определено количество расчетных сочетаний для вероятностного моделирования, а также полное число сочетаний. Автор утверждает, что проведенный в его работе теоретический анализ учета отклонений скольжения электродвигателей для различных структур многодвигательных приводов и рекомендации, полученные на его основе, позволяют в среднем в  $1,5 \div 3$  раза снизить трудоемкость построения вероятностной математической модели.

В работе [21] авторами проведено математическое описание многодвигательного электропривода колесного транспортного средства в виде системы нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений [22]. В результате обоснована методика управления с целью стабилизации скорости, приведены уравнения динамики колесного транспортного средства, предложено осуществление изменения вращающего момента двигателя.

Авторами в серии работ [23, 24] сформирована динамическая модель многодвигательного гидропривода холодильников шагающего типа, позволяющая оценить возникающие в гидроприводе низкочастотные динамические процессы. Получена модель связи между отдельными блоками. Проведено сопоставление надежности элементов привода с коэффициентами динамичности. Авторы рекомендуют полученную модель к использованию в инженерных расчетах.

В работе [25] авторами проанализирована схема подключения многодвигательного электропривода кордной линии. Предложен способ повышения энергоэффективности многодвигательного электропривода линии, заключающийся в разработке алгоритма управления электроприводов каландров и натяжных роликов линии, основанного на отслеживании режимов торможения в процессе обрезаживания ткани. Для этого разработана модель системы из двух взаимосвязанных электроприводов в программе MatLab/Simulink. Результаты, полученные при моделировании, подтверждают возможность рекуперации при разгоне и торможении линии и тем самым повышение энергоэффективности. К недостаткам модели можно отнести не полное соответствие с экспериментальной схемой исследования и неоднозначность полученных результатов.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что компьютерное моделирование многодвигательной системы является актуальной и интересной темой для научного исследования.

Целью настоящего исследования будет являться анализ и сопоставление результатов компьютерного моделирования многодвигательной системы электропривода на примере добычного комбайна в пакете программ MatLab с расчетными параметрами. Для достижения поставленной цели будут решены следующие задачи: описана многодвигательная система электропривода добычного комбайна; спроектирована силовая схема основного электрооборудования добычного комбайна; рассчитаны основные параметры системы электропривода, на основании которых произведен выбор электродвигателей; разработана компьютерная модель прямого пуска многодвигательной системы электропривода добычного комбайна в пакете программ MatLab; произведен анализ полученных результатов, вычислены погрешности между расчетными и смоделированными параметрами.

### Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран добычной комбайн марки AM-75 фирмы Voest-Alpine Bergtechnik GesmbH (австрийский производитель горнопроходческой техники), предназначенный для проведения выработок по породам с коэффициентом крепости  $f \geq 7$  и площадью сечения  $\leq 50 \text{ м}^2$ , имеющий технические характеристики, представленные в Таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики комбайна AM-75  
 Table 1 – Specifications of the mining harvester AM-75

Наименование параметра	Значение
Часовая производительность комбайна, $Q_{КОМБ}$	80 т/час
Суммарная мощность электрооборудования комбайна, $P_{\Sigma}$	365 кВт
Мощность электродвигателя рабочего органа, $P_{РО}$	200 кВт
Мощность электродвигателей подборщика, $P_{П}$	2*36 кВт
Мощность электродвигателя конвейера, $P_{К}$	70 кВт
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, $M_{КОМБ}$	52 тонны

Добычной комбайн AM-75 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. Внешний вид добычной комбайн AM-75 приведен на Рисунке 1. На нем позициями обозначены следующие элементы: 1 – кабина; 2,3 – консоль кабины; 4 – лестница; 5 – пост управления; 6 – поворотный конвейер; 7 – рабочий орган; 8 – подборщик; 9 – гусеничный ход.

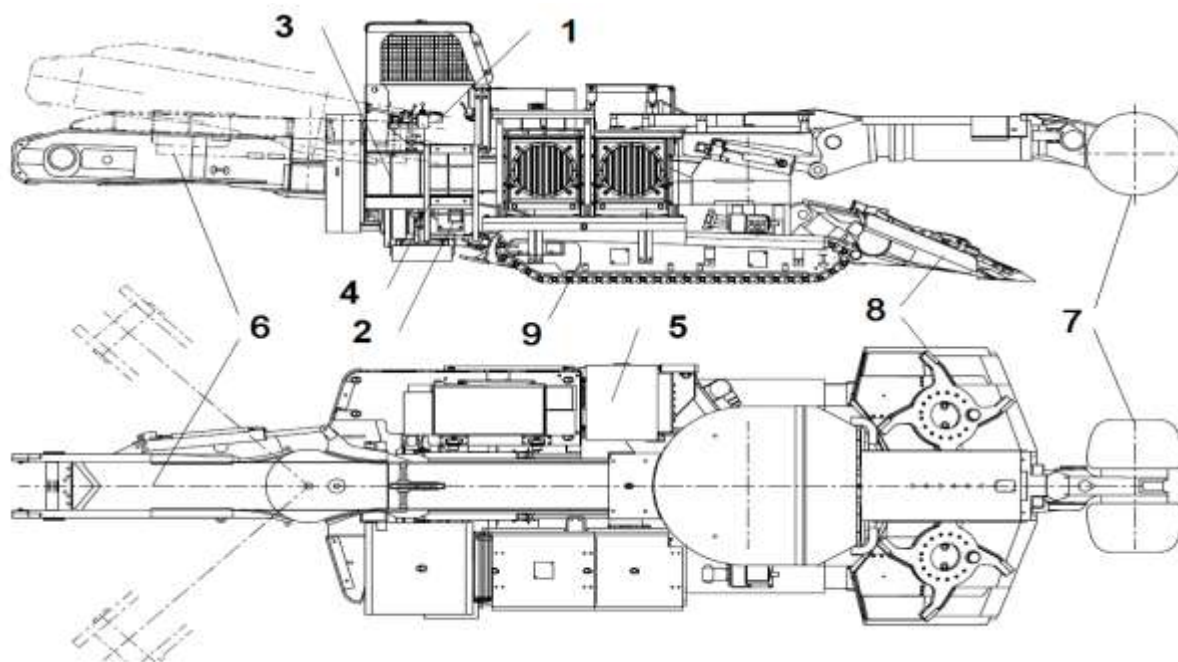


Рисунок 1 – Внешний вид добычного комбайна AM-75  
 Figure 1 – Appearance of the mining harvester AM-75

Детально рассмотрена многодвигательная система электропривода добычного комбайна, состоящая из асинхронных электродвигателей рабочего органа, поворотного конвейера и двух нагребующих лап, которые составляют более 90 % мощности всего электрооборудования комбайна.

Как уже отмечалось ранее, в качестве методики исследования выбран метод компьютерного моделирования в пакете программ MatLab, который отличается достаточной точностью моделирования технических систем с погрешностью не более 10 %. Для многочисленных расчетов параметров электродвигателей применен пакет Mathcad, позволяющий оптимизировать и ускорить этот процесс.

### Результаты

**Описание и проектирование силовой схемы.** Силовые схемы служат для детального представления принципа работы установки и определяют полный состав ее элементов и связей между ними. На силовых схемах изображают в виде условных обозначений все элементы, необходимые для осуществления и контроля заданных электрических процессов, все электрические связи между ними и элементы (разъемы, зажимы и т. п.), которыми заканчиваются входные и выходные цепи [26].

Силовую схему основного электрооборудования комбайна составляем исходя из его технических характеристик. Электропитание комбайна происходит от трансформаторной подстанции, установленной в подземной части рудника имеющей выходное напряжение 1140 В (1,2 кВ). Пуск двигателей небольшой мощности производится магнитным пускателем, состоящим из контактора переменного тока и двух тепловых реле. Для пуска двигателя сначала замыкают рубильник, подающий напряжение сети в схему электропривода. Он также служит для снятия напряжения с элементов схемы при остановке привода на длительное время и при осмотре или ремонте пускателя и двигателя. В схеме предусмотрена защита двигателя и цепей управления от коротких замыканий (плавкими предохранителями) и от перегрузки двигателя (тепловыми реле). В случае снижения напряжения сети до величины 60 % от

номинального его значения или полного его исчезновения происходит размыкание главных и блокировочных контактов и отключение двигателя от сети [27]. Для двигателей средней и большой мощности применяют магнитные станции, в состав которых входят контакторы, максимальные реле, тепловые реле и рубильники (или автоматические выключатели) [28]. При необходимости реверсирования электропривода (в нашем случае только для подборщика) применяют схему управления с реверсирующими контакторами или магнитными пускателями. Направление вращения двигателя определяется порядком чередования фаз в обмотке статора, который изменяется с помощью реверсирующих контактов.

Исходя из вышеизложенного, для добычного комбайна построим силовую схему основного электрооборудования, которая изображена на Рисунке 2.

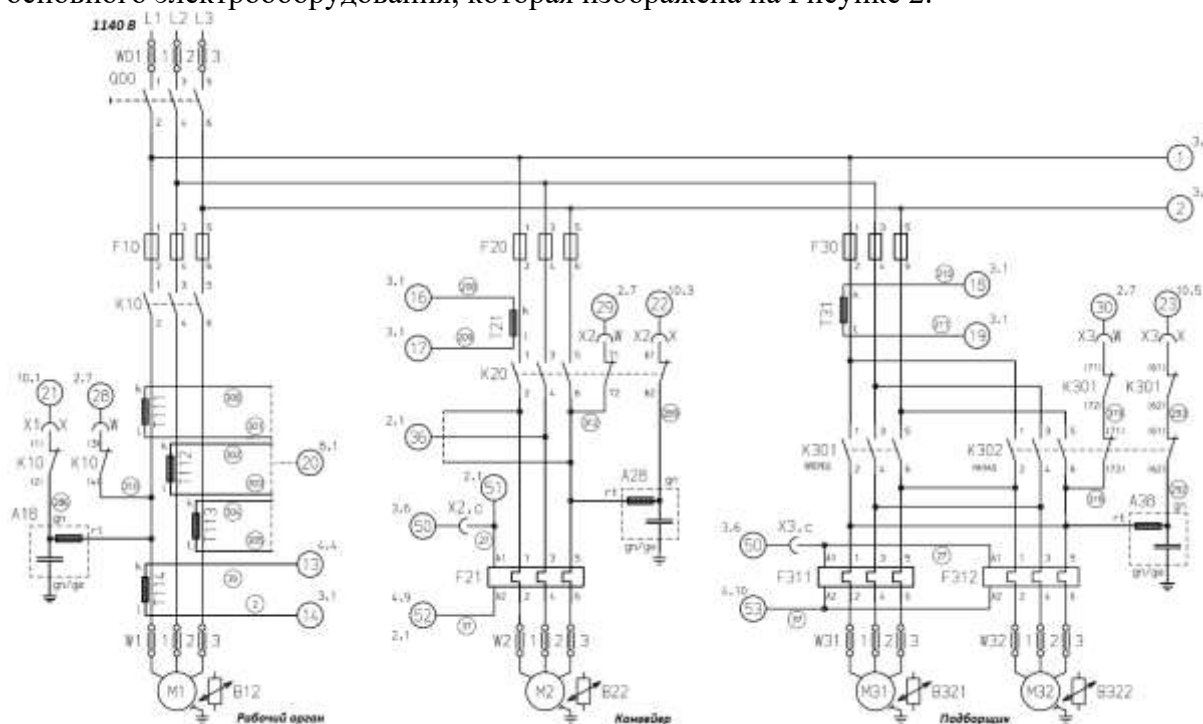


Рисунок 2 – Силовая схема основного электрооборудования добычного комбайна  
 Figure 2 – Power circuit of the main electrical equipment of a mining harvester

На схеме отходящими контактами, заключенными в круги, обозначено следующее вспомогательное оборудование добычного комбайна: 1, 2, 13-19 – к блоку измерителей (вольтметры, амперметры); 20 – контроль напряжения; 21, 22, 23 – замыкание на землю; 28, 29 30 – проверка реле утечки; 36 – к насосам циркуляции, водо- и маслоохладителя; 50-53 – к тепловым реле.

После описания и проектирования силовой схемы электропривода добычного комбайна, произведем выбор электродвигателей и расчет их параметров, требующихся для компьютерного моделирования.

**Расчет и выбор электродвигателей.** Детальный расчет и предварительный выбор электродвигателей методом эквивалентного момента подробно описан авторами в [29]. Из справочника [30] выбрали ближайшие по мощности и подходящие по напряжению и режиму работы асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Здесь приведем методику расчета дополнительных параметров асинхронных двигателей, необходимых для дальнейшего проведения компьютерного моделирования [31], и составим сводную таблицу полученных результатов.

Приведенная мощность асинхронного двигателя определяется по формуле (1):

$$P' = \frac{P_H \cdot k}{\eta \cdot \cos\phi} \text{ [ВА]}, \quad (1)$$

где  $P_H$  – номинальная мощность, Вт,  $\eta$  – коэффициент полезного действия (КПД),  $\cos\phi$  – коэффициент мощности,  $k$  – конструктивный коэффициент, принимаемый  $0,9 \div 0,95$  в зависимости от мощности двигателя.

Номинальный ток определяется из выражения (2):

$$I_H = \frac{P' \cdot \eta}{m_1 \cdot U_H / \sqrt{3} \cdot \cos\phi} \text{ [А]}, \quad (2)$$

где  $m_1 = 3$  – количество фаз,  $U_H$  – номинальное напряжение питающей сети, В.

Активное сопротивление обмотки ротора определим как (3):

$$R_r = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_H + P_{\text{мех}}}{I_H^2 \frac{1-s_H}{s_H}} \text{ [Ом]}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{мех}} = (0,01 \div 0,05) \cdot P_H$  – механические потери на валу двигателя, Вт,  $s_H$  – номинальное скольжение.

Активное сопротивление обмотки статора найдем по формуле (4):

$$R_s = \frac{U_H \cdot \cos\phi \cdot (1-\eta)}{I_H} - C^2 \cdot R_r - \frac{P_{\text{мех}}}{3 \cdot I_H^2} \text{ [Ом]}, \quad (4)$$

где  $C$  – обмоточный коэффициент, принимаемый  $1,01 \div 1,05$  в зависимости от мощности двигателя.

Индуктивности обмоток статора и ротора приблизительно равны и определяются как (5):

$$L_s \approx L_r = \frac{U_H}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot (1+C^2) \cdot k_I \cdot I_H} \text{ [Гн]}, \quad (5)$$

где  $f_1$  – частота питающей сети (в РФ  $f_1 = 50$  Гц),  $k_I$  – отношение пускового тока к номинальному (для асинхронных двигателей принимается  $5 \div 7$ , если не указано в паспортных данных).

Приведенные индуктивности обмоток статора и ротора приблизительно равны и вычисляются по формуле (6):

$$L_{sp} \approx L_{rp} = \frac{U_H}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot I_H \cdot \sqrt{1 - \cos^2(\phi) - \frac{2}{3} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot k_M \cdot s_H}{2p \cdot U_H \cdot s_{\text{кр}}}}} \text{ [Гн]}, \quad (6)$$

где  $k_M$  – отношение максимального момента к номинальному (для асинхронных двигателей принимается  $1,8 \div 2,5$ , если не указано в паспортных данных),  $2p$  – число пар полюсов,  $s_{\text{кр}}$  – критическое скольжение, определяемое по выражению (7):

$$s_{\text{кр}} = s_H \cdot (k_M + \sqrt{k_M^2 - 1}). \quad (7)$$

Взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора асинхронного двигателя определяется по следующей формуле как разница между истинными и приведенными индуктивностями (8):

$$L_m = L - L_p \text{ [Гн]}. \quad (8)$$

В заключение расчетов необходимо произвести проверку корректности выбора обмоточного коэффициента по формуле (9):

$$C = 1 + \frac{L}{L_m}. \quad (9)$$

Если отклонение рассчитанного коэффициента от принятого ранее составит более  $0,01$ , то необходимо скорректировать обмоточный коэффициент и произвести расчеты заново [32].

Результаты расчета дополнительных параметров асинхронных двигателей системы электропривода добычного комбайна, выполненных с помощью написанной авторами программы в Mathcad, приведены в Таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета электродвигателей комбайна АМ-75  
Table 2 – The results calculation of electric motors of the mining harvester АМ-75

Параметр	Рабочий орган	Подборщик	Конвейер
Марка электродвигателя	4А315М4У3	АИР200М4	АИР250S4
Мощность, $P_H$	200 кВт	37 кВт	75 кВт
Скорость вращения, $\omega_H$	154,9 рад/с	153,86 рад/с	154,7 рад/с
Номинальный момент, $M_H$	1291,1 Н·м	240,5 Н·м	484,8 Н·м
Отношение пускового/максимального момента к номинальному, $k_{II} / k_M$	1,3 / 2,2	1,7 / 2,7	1,7 / 2,5
КПД, $\eta$	0,94	0,925	0,94
Коэффициент мощности, $\cos\phi$	0,92	0,89	0,88
Номинальное напряжение, $U_H$	1140 В	1140 В	1140 В
Номинальный ток, $I_H$	111,6 А	38,7 А	80,4 А
Отношение пускового тока к номинальному, $k_I$	6,0	7,5	7,5
Сопротивление статора, $R_s$	0,216 Ом	0,533 Ом	0,174 Ом
Сопротивление ротора, $R_r$	0,073 Ом	0,176 Ом	0,06 Ом
Индуктивность обмоток, $L_s \approx L_r$	0,001 Гн	0,001 Гн	0,0008 Гн
Взаимоиндукция, $L_m$	0,079 Гн	0,119 Гн	0,0492 Гн
Момент инерции, $J$	3,63 кг·м <sup>2</sup>	0,28 кг·м <sup>2</sup>	0,89 кг·м <sup>2</sup>
Число пар полюсов, $2p$	2	2	2

Из Таблицы 2 видно, что для двигателей подборщика и конвейера имеется небольшое отклонение в мощности по сравнению с техническими характеристиками комбайна. Это связано с отсутствием в параметрическом ряду российских асинхронных двигателей серий 4А, АИР и РА мощностей 36 и 70 кВт. Произведенное изменение, составляющее менее 2 % от суммарной установленной мощности электрооборудования комбайна, никак не повлияет на работу системы в целом.

После выполнения всех требуемых расчетов и получения расчетных данных, необходимых для реализации компьютерной модели и дальнейшего сопоставления, перейдем к моделированию.

**Разработка компьютерной модели и анализ результатов.** Для разработки и реализации компьютерной модели многодвигательной системы электропривода в пакете программ MatLab воспользуемся приложением Simulink, а именно подкаталогом библиотеки блоков SimPowerSystems [33].



Для создания модели будут использованы следующие блоки: Asynchronous Machine SI Units – блок асинхронного двигателя (с физическими параметрами); AC Voltage Source – источник переменного напряжения; Three-Phase V-I Measurement – измеритель трехфазного тока и напряжения; Three-Phase Series RLC Load – трехфазная последовательная нагрузка (активно-индуктивно-емкостного характера); Three-Phase Breaker – трехфазный коммутационный аппарат; Ground – заземлитель; Step – источник шагового сигнала (имитирует резкопеременную нагрузку на валу двигателя); Gain – усилитель; Mux – мультиплексор (для объединения нескольких сигналов в один); Bus selector – шина-селектор (обеспечивает выбор необходимых параметров для измерения); Scope – осциллограф (используется для отображения результатов в функции времени); Powergui – блок графического интерфейса (обеспечивает хранения эквивалентной Simulink-модели в пространстве состояний). После того как все блоки добавлены в модель, соединяем их между собой в необходимой последовательности и получаем готовую компьютерную модель, представленную на Рисунке 3.

Для обеспечения корректной работы модели в главные блоки двигателей Asynchronous Machine SI Units подставляем рассчитанные ранее параметры и паспортные данные всех двигателей. В блоках AC Voltage Source задаем значение напряжения и частоты питающей сети. В блоках Step вносим значения номинальных моментов двигателей и моменты статического сопротивления при рабочем усилии.

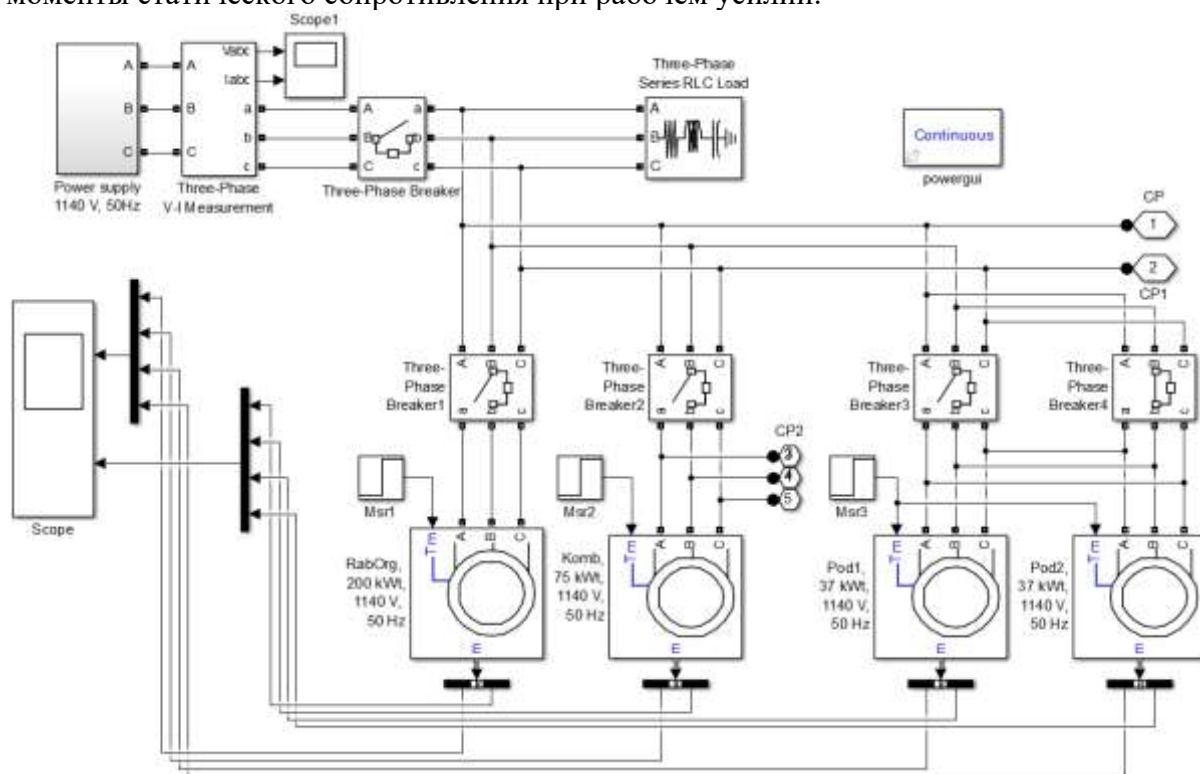


Рисунок 3 – Компьютерная модель многодвигательной системы электропривода добычного комбайна

Figure 3 – Computer model of a multi-engine electric drive system for a mining harvester

Когда все манипуляции с блоками модели завершены, запускаем процесс моделирования, в результате чего получаем на блоке Scope временные зависимости угловой скорости вращения и электромагнитного момента всех двигателей добычного комбайна (Рисунки 4 и 5).

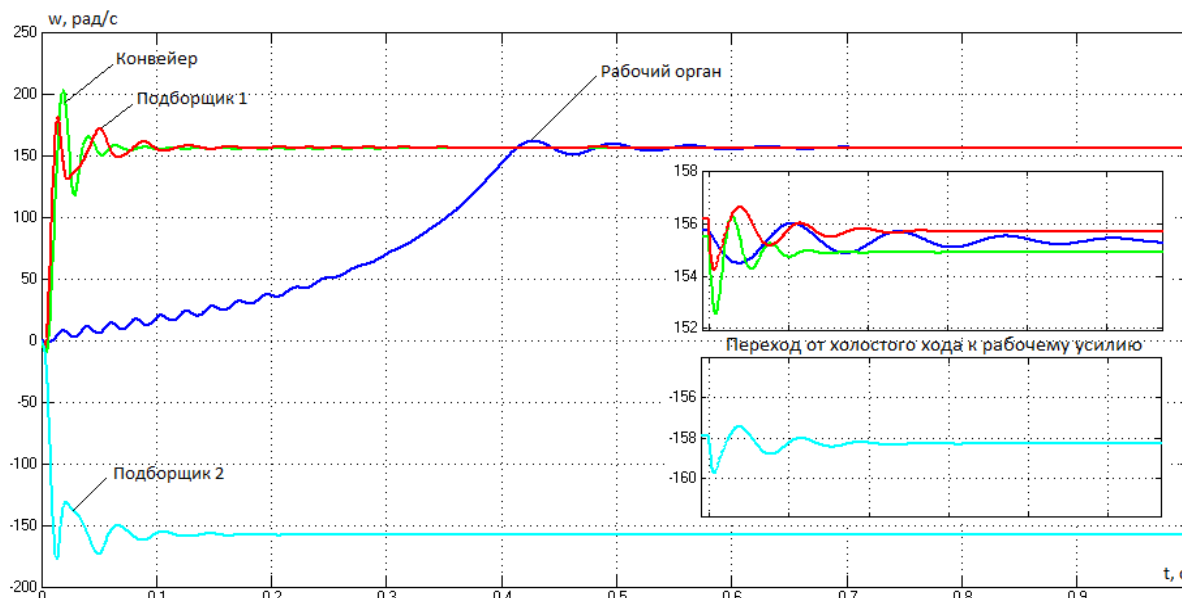


Рисунок 4 – Угловая скорость вращения двигателей механизмов системы электропривода добычного комбайна

Figure 4 – The angular speed of rotation of the engines of the mechanisms of the electric drive system of a mining harvester

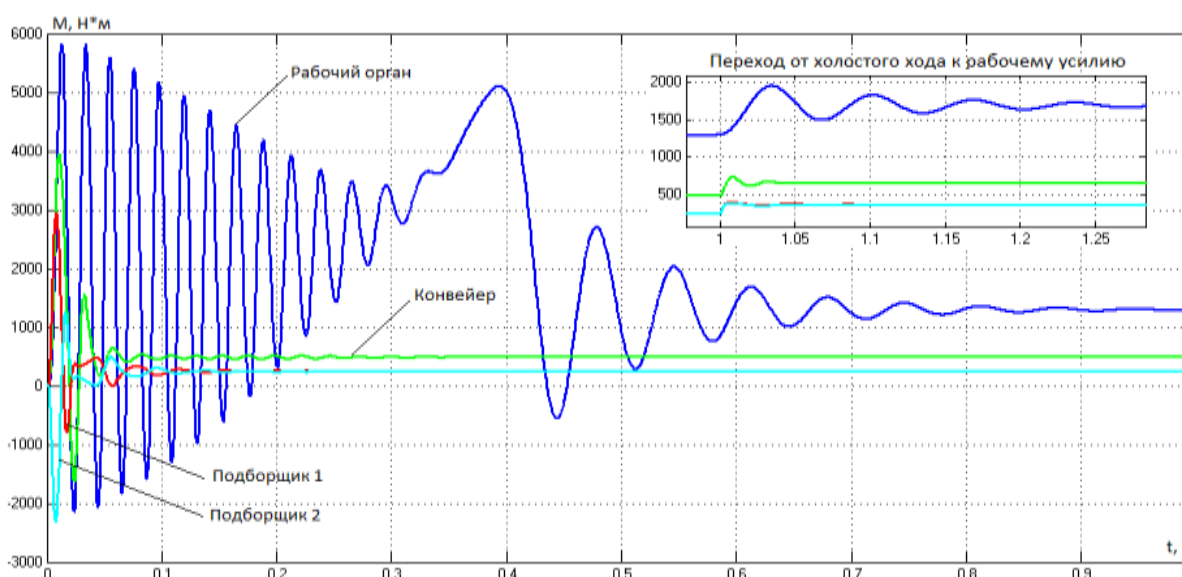


Рисунок 5 – Электромагнитный момент двигателей механизмов системы электропривода добычного комбайна

Figure 5 – The electromagnetic moment of the engines of the mechanisms of the electric drive system of a mining harvester

Проведем анализ полученных данных. На верхнем графике видим угловую скорость вращения двигателей. Самый мощный электродвигатель рабочего органа запускается за 0,5 с, в то время как остальные менее мощные двигатели выходят на номинальную скорость вращения уже к 0,1 с. На нижнем графике видим электромагнитный момент двигателей. Отношение пускового момента к номинальному превышает допустимые значения в несколько раз. Этот процесс негативно сказывается на пусковом токе и как следствие на потребляемой мощности. Проанализируем переход с режима работы двигателей на холостом ходу к режиму работы с рабочим усилием. Этот режим в нашем

случае соответствует работе комбайна по породе при добыче. В результате появления дополнительного момента статического сопротивления двигателя развивают дополнительный электромагнитный момент, в свою очередь угловая скорость вращения незначительно снижается.

На осциллографе Scope1 отображаются питающее напряжение и ток, потребляемый из сети. Напряжение полностью соответствует уровню 1140 В (его график нас не интересует). Ток в начальные моменты времени, при запуске двигателей, достигает значения близкого к 1500 А. Со временем он устанавливается на уровне 300 А, что практически соответствует расчетным данным (Рисунок 6).

Добавив в исходную модель блок Power (3ph, Phasor) – измеритель трехфазной активной и реактивной мощности, определим потребляемую мощность системой электропривода добычного комбайна. На осциллографе Scope2 (Рисунок 7) наблюдаем график изменения активной мощности при пуске двигателей, при работе на холостом ходу и выход на установившийся уровень электропотребления при работе под нагрузкой.

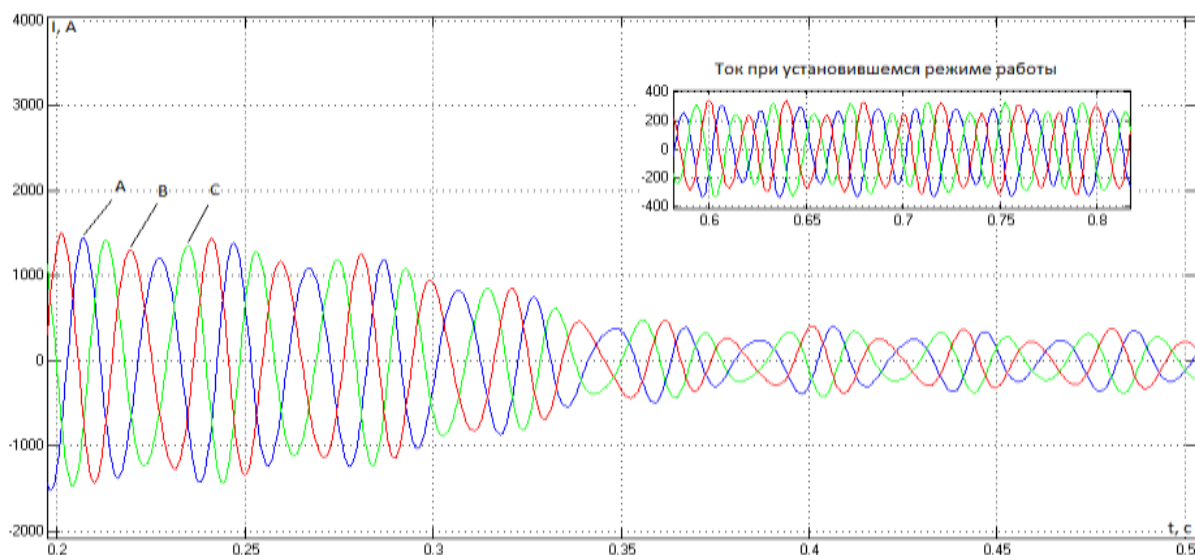


Рисунок 6 – Осциллограмма тока питающей сети добычного комбайна  
 Figure 6 – Oscillogram of the current supply network of the mining harvester

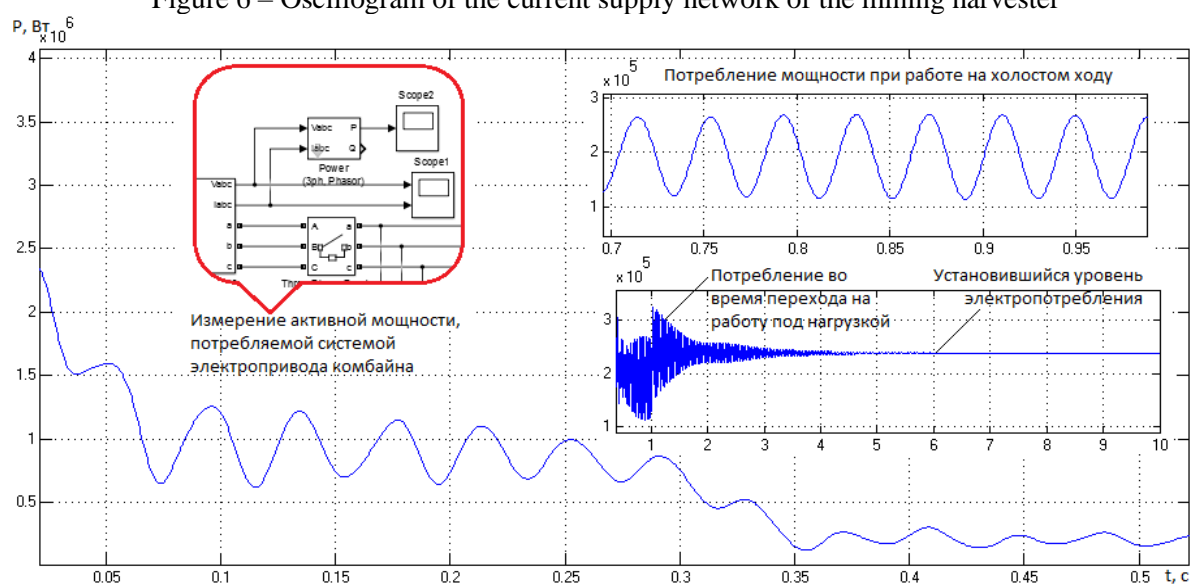


Рисунок 7 – Осциллограммы потребления активной мощности добычным комбайном  
 Figure 7 – Oscillograms of active power consumption by a mining harvester

Из графика видно, что в начальный момент времени электропотребление превышает значение в 2 МВт, затем по мере разгона двигателей снижается до уровня 300 кВт. Впоследствии, по завершению всех переходных процессов (через 5-6 с) электропотребление устанавливается на уровне 238 кВт. Такое значительное превышение активной мощности связано с протекающими переходными процессами в начальные моменты времени, как в электродвигателях, так и в коммутационных аппаратах.

### Обсуждение

Сопоставим результаты моделирования с расчетными данными, полученными ранее. Сопоставлению будет подлежать угловая скорость вращения двигателей механизмов комбайна, их электромагнитный момент, ток и потребляемая мощность комбайна в целом. Во время сопоставления вычислим относительную погрешность результатов произведенного моделирования. Результаты сопоставления и определения погрешности представлены в Таблице 3.

Таблица 3 – Сопоставление результатов моделирования с расчетными данными  
 Table 3 – Comparison of simulation results with calculated data

№	Параметр	Расчетные данные	Результаты моделирования	Погрешность, %
1	Угловая скорость вращения двигателя рабочего органа, $\omega$ (рад/с)	154,9	154,2	0,45
2	Угловая скорость вращения двигателя конвейера, $\omega$ (рад/с)	154,7	156,3	1,02
3	Угловая скорость вращения двигателей подборщика, $\omega$ (рад/с)	153,86	155,8	1,24
4	Электромагнитный момент двигателя рабочего органа, $M$ (Н · м)	1291,1	1292	0,07
5	Электромагнитный момент двигателя конвейера, $M$ (Н · м)	484,8	480,2	0,95
6	Электромагнитный момент двигателей подборщика, $M$ (Н · м)	240,5	243,5	1,23
7	Номинальный ток комбайна, $I$ (А)	288,5	296,1	2,56
8	Потребляемая активная мощность, $P$ (кВт)	253,1	237,5	6,16

Из таблицы видно, что в результате компьютерного моделирования наблюдаются незначительные отклонения величин угловой скорости вращения и электромагнитного момента двигателей механизмов добычного комбайна. Чуть значительнее на их фоне выглядят отклонения номинального тока и потребляемой активной мощности, но их погрешности не превышают 3 и 7 % соответственно, что является хорошим показателем для такой сложной многодвигательной системы электропривода.

### Заключение

В результате проведенного исследования выполнено компьютерное моделирование многодвигательной системы электропривода применительно к добычному комбайну при помощи пакета программ MatLab. Взаимосвязь приводов осуществляется за счет единого технологического процесса, поэтому нет жесткой привязки по мощности, скорости и другим параметрам. В этом заключалась особенность разработки компьютерной модели. Был смоделирован прямой пуск четырех асинхронных двигателей, одновременно

работающих на холостом ходу и под нагрузкой. Для реализации этого были решены следующие задачи: описана многодвигательная система электропривода добычного комбайна; спроектирована силовая схема основного электрооборудования добычного комбайна; рассчитаны основные параметры системы электропривода; разработана компьютерная модель прямого пуска многодвигательной системы электропривода добычного комбайна в пакете программ MatLab; произведен анализ полученных результатов, вычислены погрешности между расчетными и смоделированными параметрами.

Следует отметить, что полученные относительные погрешности являются незначительными. Можно утверждать, что разработанная компьютерная модель может быть использована в инженерных задачах для исследования режимов работы многодвигательных систем горнопромышленного оборудования, когда нет возможности провести реальные физические измерения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Sagitov P.I., Almuratova N.K., Toygozhinova Z.Z., Akpanbetov D.B. Mathematical modeling and optimization of the control system for multi-motor electric drive of conveyor belt. *Int. J of Engineering Research and Technology*. 2019;12(6): 899-911.
2. Chu L., Jia Y.-F., Chen D.-S., Xu N., Wang Y.-W., Tang X., et al. Research on control strategies of an open-end winding permanent magnet synchronous driving motor (OW-PMSM)-equipped dual inverter with a switchable winding mode for electric vehicles. *Energies*. 2017;10(5): 616. Доступно по: doi:10.3390/en10050616.
3. Савельев А.Н., Козлов С.В., Винокуров Н.Е. Динамические нагрузки, воздействующие на элементы многодвигательного гидропривода холодильника МНЛЗ. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2018;61(2): 149-155. Доступно по: doi:10.17073/0368-0797-2018-2-149-155.
4. Соловьев В.А., Дерюжкова Н.Е., Чжо А. К вопросу разработки математической модели объекта взаимосвязанной системы объемного формования. *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2017;1(2): 54-57.
5. Шохин В.В., Храмшин В.Р., Пермякова О.В. Моделирование процесса намотки полосы на моталку стана холодной прокатки. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2019;19(1): 85-92. Доступно по: doi:10.14529/power190110.
6. Копылов К.Н., Решетняк С.Н., Кубрин С.С. Имитационное моделирование системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2016;(12): 40-50.
7. Кубрин С.С., Решетняк С.Н., Бондаренко А.М. Математическое моделирование параметров удельных норм электропотребления выемочных участков угольных шахт. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2019;15(2): 50-56.
8. *Инструкция по эксплуатации АМ 75/162*. Austria, Zeltweg: Voest-Alpine Bergtechnik Ges.m.b.H., 2005.
9. Анучин А.С., Демидова Г.Л., Стжелецки Р., Яковенко М.С. Моделирование переходных процессов в силовых преобразователях, питающихся от общего звена постоянного тока. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2020;20(1): 125-131. Доступно по: doi:10.17586/2226-1494-2020-20-1-125-131.

10. Довгиленко С.В. Применение преобразователей частоты Altivar Process ATV900 и Altivar Machine ATV340 компании Schneider-Electric в многодвигательных промышленных машинах. *Автоматизация и ИТ в энергетике*. 2019;(2): 40-44.
11. Доманов В.И., Доманов А.В., Гаврилова С.В. Исследование идентификации элементов системы многодвигательного электропривода слипа судостроительного завода. *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2019;(9): 18-24. Доступно по: doi:10.25791/asu.09.2019.855.
12. Подзоров Н.Н., Бычков М.Г. Модернизация системы многодвигательных электроприводов технологической установки. *Автоматизация в промышленности*. 2019;(5): 48-52.
13. Bolvashenkov I., Kammermann J., Herzog H.-G., Frenkel I. Operational availability and performance analysis of the multi-drive multi-motor electric propulsion system of an icebreaker gas tanker for arctic. *14th Int. Conf. on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2019, 8-10 May 2019, Monte-Carlo, Monaco*. New York: Curran Associates; 2019. Доступно по: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8813641> (дата обращения: 29.08.2019).
14. Cherniy S.P., Gudim A.S., Buzikayeva A.V. Fuzzy multi-cascade ac drive control system. *Int. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, 3-4 Oct. 2018, Vladivostok, Russia*. New York: Curran Associates; 2019. Доступно по: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602930> (дата обращения: 07.01.2019).
15. Morozov A.V., Dobroskok N.A., Lavrinovsiy V.S., Mohova O.V. Interrelated control of the multi-motor electrical drive. *Proceed. of the 2019 IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019, 28-31 Jan. 2019, Moscow, Russia*. New York: Curran Associates; 2019. Доступно по: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8657156> (дата обращения: 04.03.2019).
16. Vasilev B.U., Mardashov D.V. Automatic control in multidrive electrotechnical complexes with semiconductor converters. *JOP: Conf. Series*. 2017;803(1): 012170. Доступно по: doi:10.1088/1742-6596/803/1/012170.
17. Калюжный С.В. Токопараметрическое согласование скоростей взаимосвязанных многодвигательных электромеханических систем. *Электричество*. 2017;(6): 59-64. Доступно по: doi:10.24160/0013-5380-2017-6-59-64.
18. Юдин В.В., Семенова Ю.В., Юдин А.В. Матричная модель транспортной многодвигательной системы электропривода. *Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева*. 2018;(2): 178-183.
19. 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 Conf. Series: MSE*. 2019;643: 012067. Доступно по: doi:10.1088/1757-899X/643/1/012067.
20. Гончаров К.А. Система сочетаний отклонений скольжения электродвигателей при вероятностном моделировании распределения тяговых усилий в многодвигательных приводах ленточных конвейеров. *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2019;(3):288-295. Доступно по: doi:10.22281/2413-9920-2019-05-03-288-295.
21. Канов Л.Н., Солодкий А.В. Математическое моделирование распределенного электропривода транспортных средств. *Энергетические установки и технологии*. 2017;3(2):48-53.

22. Бебихов Ю.В., Семёнов А.С., Семёнова М.Н., Якушев И.А. Применение математического моделирования для решения линейных алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2019;(4):29-36.
23. Савельев А.Н., Козлов С.В., Анисимов Д.О. Особенности формирования динамических моделей многодвигательных гидроприводов холодильников МНЛЗ. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2016;(2): 28-31.
24. Savel'ev A.N., Kozlov S.V., Vinokurov N.E. Dynamic loads influencing on elements of multi-motor hydraulic drive of CCM cooler. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*. 2018;61(2): 149-155. Доступно по: doi:10.17073/0368-0797-2018-2-149-155.
25. Ганиев Р.Н., Шатунов С.Н. Частотно-регулируемый электропривод с рекуперацией в составе кордной линии производства грузовых автошин. *Вестник Чувашского университета*. 2018;(3):44-52.
26. Ещин Е.К. Вариант снижения сложности системы управления асинхронным электроприводом. *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2019;62(2): 53-60. Доступно по: doi:10.17213/0136-3360-2019-2-53-60.
27. Шабо К.Я. Оптимизация системы комбинированного управления электроприводом при изменении нагрузки в функции положения рабочего органа. *Электротехнические системы и комплексы*. 2018;(4):17-21. Доступно по: doi:10.18503/2311-8318-2018-4(41)-17-21.
28. Беспалов В.Я., Каржавов Б.Н., Сидоров А.О. Некоторые вопросы повышения плавности вращения электрических приводов. *Электричество*. 2018;(8): 42-51. Доступно по: doi:10.24160/0013-5380-2018-8-42-51.
29. Заголило С.А., Семёнов А.С. Расчет и выбор электродвигателей механизмов добычного комбайна методом эквивалентных усилий. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2020;(2):104-109. Доступно по: doi:10.17513/mjpf.13019.
30. Алиев И.И. *Электротехнический справочник*. М.: Издательство РадиоСофт; 2006.
31. Семёнов А.С. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя в пакете программ MatLab. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2014;11(1):51-59.
32. 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;330(5):131-140. Доступно по: doi:10.18799/24131830/2019/5/271.
33. 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;7(3). Доступно по: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/09/BebihovSoavtori\\_3\\_19\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/09/BebihovSoavtori_3_19_1.pdf)  
doi:10.26102/2310-6018/2019.26.3.037 (дата обращения: 10.04.2020).

## REFERENCES

1. Sagitov P.I., Almuratova N.K., Toygozhinova Z.Z., Akpanbetov D.B. Mathematical modeling and optimization of the control system for multi-motor electric drive of conveyor belt. *Int. J of Engineering Research and Technology*. 2019;12(6): 899-911.

2. Chu L., Jia Y.-F., Chen D.-S., Xu N., Wang Y.-W., Tang X., et al. Research on control strategies of an open-end winding permanent magnet synchronous driving motor (OW-PMSM)-equipped dual inverter with a switchable winding mode for electric vehicles. *Energies*. 2017;10(5): 616. Available from: doi:10.3390/en10050616.
3. Savelyev A.N., Kozlov S.V., Vinokurov N.E. Dynamic loads acting on the elements of a multi-engine hydraulic drive of the CCM refrigerator. *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*. 2018;61(2): 149-155. Available from: doi:10.17073/0368-0797-2018-2-149-155.
4. Soloviev V.A., Deryuzhkova N.E., Zhuo A. On the issue of developing a mathematical model of an object of an interconnected volume molding system. *Scientific notes Komsomolsk-on-Amur State Technical University*. 2017;1(2):54-57.
5. Shokhin V.V., Khrumshin V.R., Permyakova O.V. Modeling the process of winding strips on a coiler of a cold rolling mill. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*. 2019;19(1):85-92. Available from: doi:10.14529/power190110.
6. Kopylov K.N., Reshetnyak S.N., Kubrin S.S. Simulation modeling of the power supply system of a mining section of a coal mine. *Mountain Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2016;(12):40-50.
7. Kubrin S.S., Reshetnyak S.N., Bondarenko A.M. Mathematical modeling of parameters of specific norms of power consumption in mining sections of coal mines. *Electrical and information systems and systems*. 2019;15(2):50-56.
8. *Instruction manual AM 75/162*. Austria, Zeltweg: Voest-Alpine Bergtechnik Ges.m.b.H., 2005.
9. Anuchin A.S., Demidova G.L., Stzheletski R., Yakovenko M.S. Simulation of transients in power converters powered by a common DC link. *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*. 2020;20(1):125-131. Available from: doi:10.17586/2226-1494-2020-20-1-125-131.
10. Dovgilenko S.V. Application of Schneider-Electric Altivar Process ATV900 and Altivar Machine ATV340 frequency converters in multi-engine industrial machines. *Automation and IT in the energy sector*. 2019;(2):40-44.
11. Domanov V.I., Domanov A.V., Gavrilova S.V. Study of the identification of elements of a multi-engine electric slip system of a shipyard. *Industrial ACS and controllers*. 2019;(9): 18-24. Available from: doi:10.25791/asu.09.09.2019.855.
12. Podzorov N.N., Bychkov M.G. Modernization of the multi-engine electric drive system of the technological installation. *Automation in industry*. 2019;(5):48-52.
13. Bolvashenkov I., Kammermann J., Herzog H.-G., Frenkel I. Operational availability and performance analysis of the multi-drive multi-motor electric propulsion system of an icebreaker gas tanker for arctic. *14th Int. Conf. on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2019, 8-10 May 2019, Monte-Carlo, Monaco*. New York: Curran Associates; 2019. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8813641> (accessed 29 August 2019).
14. Cherniy S.P., Gudim A.S., Buzikayeva A.V. Fuzzy multi-cascade ac drive control system. *Int. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, 3-4 Oct. 2018, Vladivostok, Russia*. New York: Curran Associates; 2019. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602930> (accessed 07 January 2019).
15. Morozov A.V., Dobroskok N.A., Lavrinovsiy V.S., Mohova O.V. Interrelated control of the multi-motor electrical drive. *Proceed. of the 2019 IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019, 28-31 Jan. 2019, Moscow, Russia*. New York: Curran Associates; 2019. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8657156> (accessed 04 March 2019).



16. Vasilev B.U., Mardashov D.V. Automatic control in multidrive electrotechnical complexes with semiconductor converters. *JOP: Conf. Series.* 2017;803(1): 012170. Available from: doi:10.1088/1742-6596/803/1/012170.
17. Kalyuzhny S.V. Current-parametric coordination of speeds of interconnected multi-engine electromechanical systems. *Electricity.* 2017;(6):59-64. Available from: doi:10.24160/0013-5380-2017-6-59-64.
18. Yudin V.V., Semenova Yu.V., Yudin A.V. The matrix model of a transport multi-engine electric drive system. *Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solovyov.* 2018;(2):178-183.
19. 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 Conf. Series: MSE.* 2019;643: 012067. Available from: doi:10.1088/1757-899X/643/1/012067.
20. Goncharov K.A. A system of combinations of slip deviations of electric motors in probabilistic modeling of the distribution of traction in multi-drive drives of belt conveyors. *Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University.* 2019;(3): 288-295. Available from: doi:10.22281/2413-9920-2019-05-03-288-295.
21. Kanov L.N., Solodky A.V. Mathematical modeling of a distributed electric drive of vehicles. *Power plants and technologies.* 2017;3(2):48-53.
22. Bebikhov Yu.V., Semenov A.S., Semenova M.N., Yakushev I.A. The use of mathematical modeling to solve linear algebraic and ordinary differential equations. *Modern science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and Technical Sciences.* 2019;(4):29-36.
23. Savelyev A.N., Kozlov S.V., Anisimov D.O. Features of the formation of dynamic models of multi-engine hydraulic drives of CCM refrigerators. *Bulletin of the Siberian State Industrial University.* 2016;(2):28-31.
24. Savel'ev A.N., Kozlov S.V., Vinokurov N.E. Dynamic loads influencing on elements of multi-motor hydraulic drive of CCM cooler. *Izvestiya Ferrous Metallurgy.* 2018;61(2): 149-155. Available from: doi:10.17073/0368-0797-2018-2-149-155.
25. Ganiev R.N., Shatunov S.N. Variable frequency drive with recovery as part of the cord line for the production of truck tires. *Bulletin of the Chuvash University.* 2018;(3): 44-52.
26. Yeschin E.K. Option to reduce the complexity of the control system of an asynchronous electric drive. *News of higher educational institutions. Electromechanics.* 2019;62(2): 53-60. Available from: doi:10.17213/0136-3360-2019-2-53-60.
27. Shabo K.Ya. Optimization of the system of combined control of the electric drive when the load changes as a function of the position of the working body. *Electrical systems and complexes.* 2018;(4): 17-21. Available from: doi:10.18503/2311-8318-2018-4(41)-17-21.
28. Bepalov V.Ya., Karzhavov B.N., Sidorov A.O. Some issues of increasing the smoothness of rotation of electric drives. *Electricity.* 2018;(8):42-51. Available from: doi:10.24160/0013-5380-2018-8-42-51.
29. Zagolilo S.A., Semenov A.S. Calculation and selection of electric motors of the mining combine mechanism by the equivalent force method. *International Journal of Applied and Basic Research.* 2020;(2):104-109. Available from: doi:10.17513/mjpf.13019.
30. Aliev I.I. *Electrical reference book.* Moscow: Publisher RadioSoft; 2006.
31. Semenov A.S. Modeling the asynchronous motor operating modes in the MatLab software package. *Bulletin of the Northeast Federal University n.a. M.K. Ammosov.* 2014;11(1):51-59.
32. Odnokopylov G.I., Dementiev Yu.N., Shevchuk V.A. The use of system analysis to ensure the operational reliability of electric machines in the diamond mining industry.

- News of Tomsk Polytechnic University. Geo-Resource Engineering.* 2019;330(5): 131-140. Available from: doi:10.18799/24131830/2019/5/271.
33. Bebikhov Yu.V., Semenov A.S., Semenova M.N., Yakushev I.A. Analysis of methods for modeling technical systems in MATLAB. *Modeling, optimization and information technology.* 2019;7(3). Available from: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/09/BebihovSoavtori\\_3\\_19\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/09/BebihovSoavtori_3_19_1.pdf) doi:10.26102/2310-6018/2019.26.3.037 (accessed: 10 April 2020).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Заголило Сергей Анатольевич**, инженер лаборатории Электромагнитной совместимости кафедры Электроэнергетики и автоматизации промышленного производства, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Политехнический институт (филиал) в г. Мирном, Мирный, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация.

*e-mail:* [exside93@mail.ru](mailto:exside93@mail.ru)

**Семёнов Александр Сергеевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой Электроэнергетики и автоматизации промышленного производства, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Политехнический институт (филиал) в г. Мирном, Мирный, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация.

*e-mail:* [sash-alex@yandex.ru](mailto:sash-alex@yandex.ru)

ORCID: 0000-0001-9940-3915

**Семёнова Мария Николаевна**, старший преподаватель кафедры Фундаментальной и прикладной математики, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Политехнический институт (филиал) в г. Мирном, Мирный, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация.

*e-mail:* [mariya\\_semyonova86@mail.ru](mailto:mariya_semyonova86@mail.ru)

ORCID: 0000-0002-7298-0226

**Якушев Илья Анатольевич**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Фундаментальной и прикладной математики, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Политехнический институт (филиал) в г. Мирном, Мирный, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация.

*e-mail:* [yakushevilya@mail.ru](mailto:yakushevilya@mail.ru)

**Sergey A. Zagolilo**, Engineer Of The Laboratory Of Electromagnetic Compatibility And Quality Of Electric Energy, Department Of Electric Power And Industrial Automation, North-Eastern Federal University N.A. M.K. Ammosov, Polytechnic Institute (Branch) In Mirny, Republic Of Sakha (Yakutia), Mirny, Russian Federation.

**Alexander S. Semenov**, Ph.D., Associate Professor, Head Of The Department Of Electric Power And Industrial Automation, North-Eastern Federal University N.A. M.K. Ammosov, Polytechnic Institute (Branch) In Mirny, Republic Of Sakha (Yakutia), Mirny, Russian Federation.

**Mariya N. Semenova**, Senior Lecturer, Department Of Fundamental And Applied Mathematics, North-Eastern Federal University N.A. M.K. Ammosov, Polytechnic Institute (Branch) In Mirny, Republic Of Sakha (Yakutia), Mirny, Russian Federation.

**Ilya A. Yakushev**, Ph.D., Associate Professor, Department of Fundamental and Applied Mathematics, North-Eastern Federal University n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic Institute (branch) in Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Mirny, Russian Federation.