

# УНИВЕРСАЛЬНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УДАРНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА ДВОЙНОГО ДЕЙСТВИЯ

Л. А. Нейман<sup>1</sup>, В. Ю. Нейман<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** Применение машин и механизмов ударного действия в горной и строительной отрасли выявили их высокую эффективность при импульсном воздействии на обрабатываемую ими среду. На основе установленных обобщений приводятся результаты исследований по реализации универсальной динамической модели электромагнитного привода двойного действия, применяемого для повышения интенсификации ударных процессов. Основу динамической модели составляют дифференциальные уравнения, отражающие механическое и электрическое равновесие ударного электропривода, выполненного по двухкатушечной схеме с управлением по положению бойка. Особенностью модели является расчет рабочих процессов электропривода в переходных и установившихся режимах. В модели учитывается нелинейность характеристик намагничивания стали, потоки рассеяния и потери энергии в магнитной и механической системе электропривода. Приведено описание обобщенной конструкции электромагнитного привода, получающего питание от промышленного источника электроэнергии с управлением по координате положения ударной массы бойка, работающего в автоколебательном режиме. Рассмотрен алгоритм схемной реализации динамической модели методами структурного моделирования в Matlab Simulink, основанный на применении численных методов. Приведены варианты режимов работы электропривода, различающиеся способами реализации возвратно-поступательного движения бойка. Рассмотрены примеры компьютерного моделирования созданной модели в виде осциллограмм рабочего процесса. Даны рекомендации по дальнейшему усовершенствованию модели и повышению качества расчетов при исследовании динамических режимов.

**Ключевые слова:** машины ударного действия; электромагнитный привод; электропривод двойного действия; динамическая модель; алгоритм реализации модели; методы структурного моделирования; математическое моделирование; ударная нагрузка; режимы работы; рабочие процессы.

**Для цитирования:** Нейман Л. А., Нейман В. Ю. Универсальная динамическая модель ударного электромагнитного привода двойного действия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10-1. – С. 22–37. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_101\_0\_22.

## Universal dynamic model of a double-acting impact electromagnetic drive

L. A. Neyman<sup>1</sup>, V.Yu. Neyman<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

**Abstract:** The use of machines and mechanisms of impact action in the mining and construction

industries revealed their high efficiency in their pulsed impact on the surface to be treated. Based on the established generality of electromagnetic drives, the results of research on the implementation of a universal dynamic model of a double-acting electromagnetic drive used to increase the intensification of impact processes are presented. The dynamic model is based on differential equations of mechanical and electrical balance of an impact electric drive made according to a two-coil circuit and controlled by the striker position. A feature of the model is the calculation of the operation processes of the electric drive in transient and steady modes. The model takes into account the nonlinearity of steel magnetization characteristics, leakage fluxes and energy losses in the magnetic and mechanical systems of the electric drive. A description of the generalized design of an electromagnetic drive powered by an industrial power source with control over the position coordinate of the impact mass of the striker operating in a self-oscillating mode is given. The algorithm for the circuit implementation of the dynamic model by structural modeling methods in Matlab Simulink based on the use of numerical methods is presented. Variants of operating modes of the electric drive are given for various ways of implementing the reciprocating motion of the striker. Examples of computer simulation of the created model in the form of oscillograms of the operation process are considered. Recommendations for further improvement of the model and improvement of the quality of calculations in the study of dynamic modes are given.

**Key words:** impact machines; electromagnetic drive; double-acting electric drive; dynamic model; model implementation algorithm; methods of structural modeling; math modeling; impact load; operating modes; operating processes.

**For citation:** Neyman L. A., Neyman V. Yu. Universal dynamic model of a double-acting impact electromagnetic drive. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):22–37. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_101\_0\_22.

---

## 1. Введение

Применение машин ударного действия в различных отраслях промышленности выявило их высокую эффективность для интенсификации целого ряда технологических процессов и производств при импульсном воздействии на обрабатываемую среду [1 – 3].

Актуальность их применения и дальнейшего совершенствования обусловлена возможностью дискретного генерирования механической энергии с помощью формирования на выходе больших по величине и кратковременных по времени импульсов сил в виде ударных нагрузок [4, 5].

Особенно актуально их применение для интенсификации и механизации процессов в горнодобывающей и строительной отрасли, где требуются мощ-

ные и концентрированные воздействия, имеющие сравнительно высокую энергию удара [6, 7].

В зависимости от вида энергоносителя для осуществления безвзрывных технологий и генерирования ударных нагрузок основное распространение получили гидравлические [8 – 10], пневматические [11, 12], электромеханические [13 – 15] и электромагнитные [16, 17] машины ударного действия, реализующие принцип возвратно-поступательного движения ударной массы – ударника.

Наиболее перспективными, обеспечивающими упрощение кинематической схемы машины, улучшающими массогабаритные показатели и экологическую обстановку, являются ударные машины, созданные на основе силовых

электромагнитных импульсных систем, в которых генераторами ударных нагрузок выступают линейные электромагнитные двигатели [18, 19].

Имеется положительный опыт эксплуатации таких систем в виде молотков и перфораторов в строительстве и горном деле [20, 21], переносных ударных комплексов для зондирования грунтов и воздействия на пласты, повышающих их нефтеотдачу [22], молотов для погружения свай и дробления негабаритов горных выработок [23], и т.д.

В концептуальном отношении для создания ударных нагрузок развитие получили электромагнитные приводы простого (с одной катушкой) и двойного (с двумя катушками) действия. В электроприводе простого действия холостой ход ударной массы бойка осуществляется под действием электромагнитных сил одной либо системы поочередно включаемых соленоидных катушек, а рабочий ход — под действием силы тяжести бойка. К данной категории также можно отнести электроприводы, в которых рабочий ход бойка выполняется только электромагнитными силами катушки, а холостой ход, например, упругими силами возвратной пружины [24].

К основным недостаткам эксплуатации подобных импульсных систем следует отнести неустойчивые режимы работы, ограниченную частоту ударов, определяемую более длительным временем возврата бойка, и дополнительный отбор мощности, запасаемой в виде потенциальной энергии при упругом возврате.

Наибольшее развитие получил вариант электромагнитного привода двойного действия. В таком электроприводе холостой и рабочий ход ударной массы бойка осуществляется под действием электромагнитных сил, что обеспечивает более устойчивые режимы работы

и повышенную, за счет использования активного возврата, частоту и энергию ударов [25].

В настоящих исследованиях на основе установленных обобщений приводятся результаты по разработке универсальной динамической модели электромагнитного привода двойного действия, управляемого по положению ударной массы бойка, полученной методами компьютерного моделирования с применением имитационной среды Matlab Simulink.

## **2. Материалы и методы исследования**

Конструкция электромагнитного привода двойного действия (рис. 1) включает в себя соленоидные катушки рабочего 1 и холостого 2 хода. Катушки заключены в разделенные корпуса магнитопроводов 3, 4, зафиксированные относительно друг друга на определенном расстоянии при помощи соединительного фланца 5. Магнитопроводы содержат полюсы 6, 7 катушки рабочего хода 1 и полюсы 8, 9 катушки холостого хода 2.

Во внутренней полости катушек 1, 2 установлена направляющая 10, выполненная из немагнитного материала с высоким удельным сопротивлением. Внутри направляющей с возможностью возвратно-поступательного движения помещена ударная масса бойка 11. Для управления переключением катушек в крайних полюсах 6, 9 установлены датчики 12, 13. Подача напряжения на катушки 1, 2 осуществляется по координате положения бойка 11 с помощью датчиков положения 12, 13.

При управлении подачей напряжения на систему катушек и протекании по ним тока образуется электромагнитное поле, приводящее к созданию со стороны катушек электромагнитного усилия, ведущего к возвратно-посту-

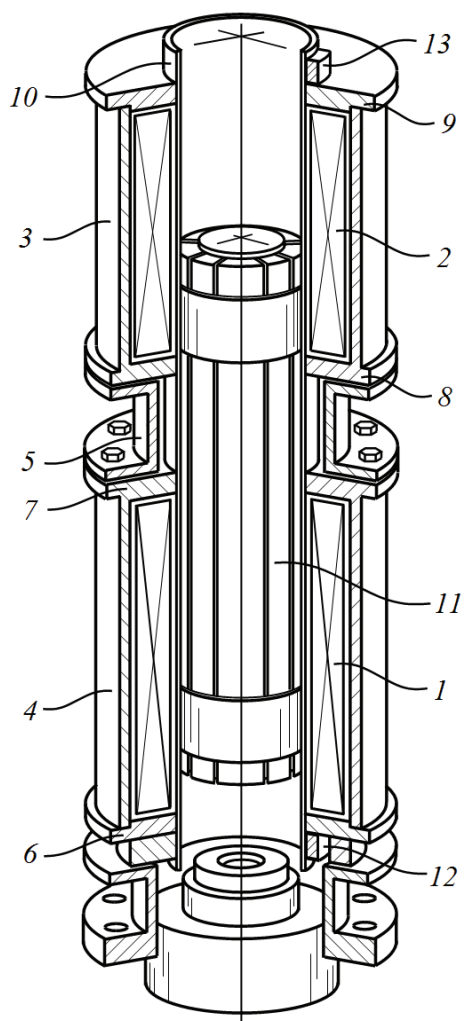


Рис. 1. Электромагнитный привод двойного действия: 1 – катушка рабочего хода; 2 – катушка холостого хода; 3, 4 – корпуса магнитопроводов; 5 – соединительный фланец; 6, 7 – полюсы катушки рабочего хода; 8, 9 – полюсы катушки холостого хода; 10 – немагнитная направляющая; 11 – ударная масса бойка; 12, 13 – датчики положения бойка

Fig. 1. Electromagnetic drive of double action: 1 – working coils; 2 – idle coil; 3, 4 – cases of magnetic circuits; 5 – connecting flange; 6, 7 – poles of the working stroke coil; 8, 9 – poles of the idle coil; 10 – non-magnetic guide; 11 – shock mass of the striker; 12, 13 – striker position sensors

пательному движению ударной массы бойка. Работа электропривода выполняется в автоколебательном режиме.

Регулируя подачу импульсов напряжения на катушки электропривода в зависимости от координаты положения бойка, можно управлять рабочими параметрами – энергией и частотой ударов.

Основными режимами работы электромагнитного привода (см. рис. 1) следует считать режимы обратного (холостого) и прямого (рабочего) хода.

Режим обратного хода осуществляется электромагнитными силами катушки холостого хода (хх). Кинетическая энергия при подъеме бойка преобразуется в потенциальную энергию.

Режим прямого хода выполняется электромагнитными силами катушки рабочего хода (рх), а также за счет запасенной ранее потенциальной энергии бойка, переходящей в кинетическую энергию.

При этом в зависимости от момента подачи импульса напряжения на катушки и протекания по ним тока возможны следующие варианты реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка (рис. 2):

- напряжение на катушку холостого хода (хх) подается до момента времени завершения прямого хода, что приводит к затормаживанию бойка (рис. 2, а). Использование данного варианта управления позволяет сократить время обратного хода бойка и повысить частоту ударов;

- напряжение на катушку холостого хода (хх) подается по завершении времени прямого хода (рис. 2, б). Данный режим характеризуется повышенной энергией удара за счет отсутствия тормозного эффекта и увеличением времени обратного хода, что снижает частоту ударов;

- напряжение на катушку холостого хода (хх) подается с выдержкой

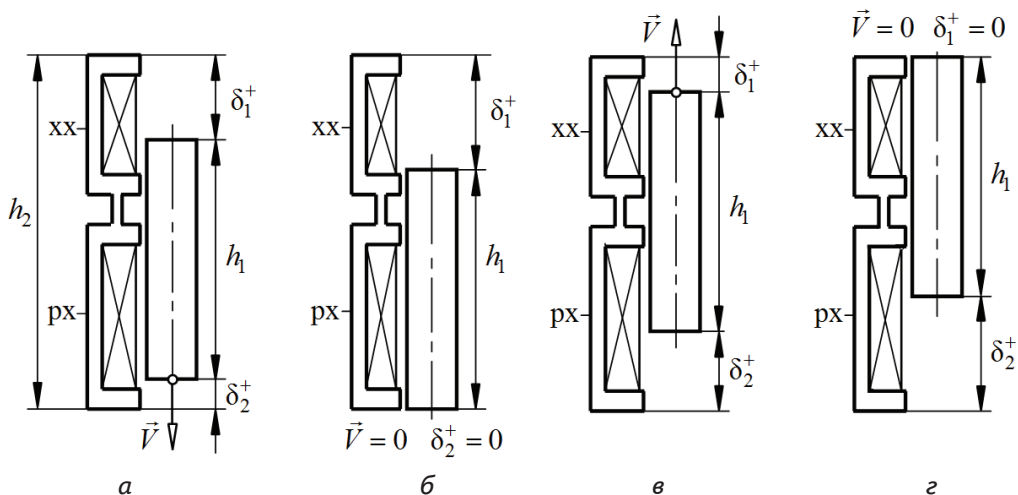


Рис. 2. Режимы работы электромагнитного привода  
 Fig. 2. Modes of operation of the electromagnetic drive

паузы после завершения прямого хода (рис. 2, б), что позволяет искусственно сократить частоту ударов, однако приводит к нарушению автоколебательного режима работы электропривода и повышает величину потребляемой им мощности в рабочем цикле.

– напряжение на катушку рабочего хода (рх) подается до момента времени завершения обратного хода, что приводит к затормаживанию бойка при его возврате (рис. 2, в);

– момент подачи напряжения на катушку рабочего хода (рх) совпадает с моментом времени завершения обратного хода, что исключает электромагнитное торможение бойка при его возврате (рис. 2, г);

– напряжение на катушку рабочего хода (рх) подается с выдержкой паузы после начала прямого хода.

Полный рабочий цикл электромагнитного привода может сочетать различные комбинации вариантов обратного и прямого хода, что определяет эффективность его работы.

### 3. Реализация динамической модели

Динамика работы электромагнитного привода (см. рис. 1), согласно установленным связям, может быть описана следующими дифференциальными уравнениями, отражающими электрическое и механическое равновесие динамической системы [26]:

$$\begin{cases} u_q(t) - i_1 r_s = i_1 r_1 + \frac{d\psi_1(i_1, \delta_1)}{dt}; \\ u_q(t) - i_2 r_s = i_2 r_2 + \frac{d\psi_2(i_2, \delta_2)}{dt}; \\ m \frac{d^2 x}{dt^2} = f_{эм1}(i_1, \delta_1) + f_{эм2}(i_2, \delta_2) - mg - f_{тр} \operatorname{sign} \frac{dx}{dt}, \end{cases}$$

где  $u_q(t)$  — напряжение на выходе моста при отключенной нагрузке, В;  $r_s$  — внутреннее сопротивление вторичных цепей питающего источника электроэнергии, Ом;  $r_1, r_2$  — активное сопротивление в цепи катушек холостого и обратного хода, Ом;  $i_1, i_2$  — мгновенный ток в цепи питания катушки холостого хода, А;  $i_2$  — мгновенный ток в цепи питания катушки рабочего хода, А;  $\delta_1$  — воздушный рабочий зазор катушки холостого хода, м;  $\delta_2$  — воздушный рабочий зазор катушки рабочего хода, м;  $\psi_1(i_1, \delta_1), \psi_2(i_2, \delta_2)$  — потокосцепление катушек холостого и рабочего хода, Вб;  $x$  — координата положения бойка, м;  $m$  — масса бойка, кг;  $f_{эм1}(i_1, \delta_1), f_{эм2}(i_2, \delta_2)$  — электромагнитные силы катушек холостого и рабочего хода, Н;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с;  $f_{тр}$  — сила сухого трения скольжения бойка, Н.

Полученная система дифференциальных уравнений составляет обобщенную математическую модель динамического состояния электропривода, выполненного по конструктивной схеме (см. рис. 1) электромагнитного привода двойного действия.

На этапе реализации модели предварительно производился расчет набора статических параметров в виде потокосцепления  $\psi_1 = f(i_1, \delta_1), \psi_2 = f(i_2, \delta_2)$  и электромагнитного усилия  $f_{эм1} = f(i_1, \delta_1), f_{эм2} = f(i_2, \delta_2)$ . Расчеты выполнялись для фиксированных величин протекающего в катушках холостого и рабочего хода тока  $i_1, i_2$  при различных значениях фиксированных рабочих зазоров  $\delta_1, \delta_2$ , которые затем представлялись в виде двумерных таблиц.

Для нахождения статических параметров выполнялся расчет магнитного поля активной зоны электромагнитного привода в программе FEMM (Finite Element Method Magnetics) [27, 28].

Реализация динамической модели выполнялась средствами структурного

моделирования с применением стандартных численных методов, используемых в Matlab Simulink [29, 30].

Вариант созданной универсальной динамической модели в виде структурной схемы в программе Matlab Simulink, реализованный в соответствии с дифференциальными уравнениями, отражающими электрическое и механическое равновесие динамической системы электропривода, представлен на рис. 3.

Электрическая подсистема включает в себя трехфазный источник электроэнергии (Three-Phase Voltage Source), мостовой трехфазный выпрямитель (Universal Bridge) и блоки управления катушками холостого хода (Control block\_1) и, соответственно, рабочего хода (Control block\_2). На выходе блоков управления формируется постоянное напряжение источника по сигналам датчика положения бойка.

Магнитная подсистема (Magnetic Subsystem) реализована в соответствии с первыми двумя уравнениями системы, отражающими электрическое равновесие модели и ее нелинейные свойства. Детализированная структурная схема Magnetic Subsystem приведена на рис. 4. Интерполяции статических параметров потокосцепления  $\psi_1(i_1, \delta_1), \psi_2(i_2, \delta_2)$  и электромагнитного усилия  $f_{эм1}(i_1, \delta_1), f_{эм2}(i_2, \delta_2)$  в подсистеме выполняется с помощью блоков двумерных таблиц. Для катушки холостого хода это блоки Linkage\_1, Electromagnetic Force\_1, а для катушки рабочего хода — соответственно Linkage\_2, Electromagnetic Force\_2 (рис. 4).

Принудительная коммутация силовых ключей реализуется в схеме при помощи блоков Key Switching\_1 и Key Switching\_2. Запирание ключей происходит по сигналам с блоков управления катушками, входящих в электрическую подсистему.

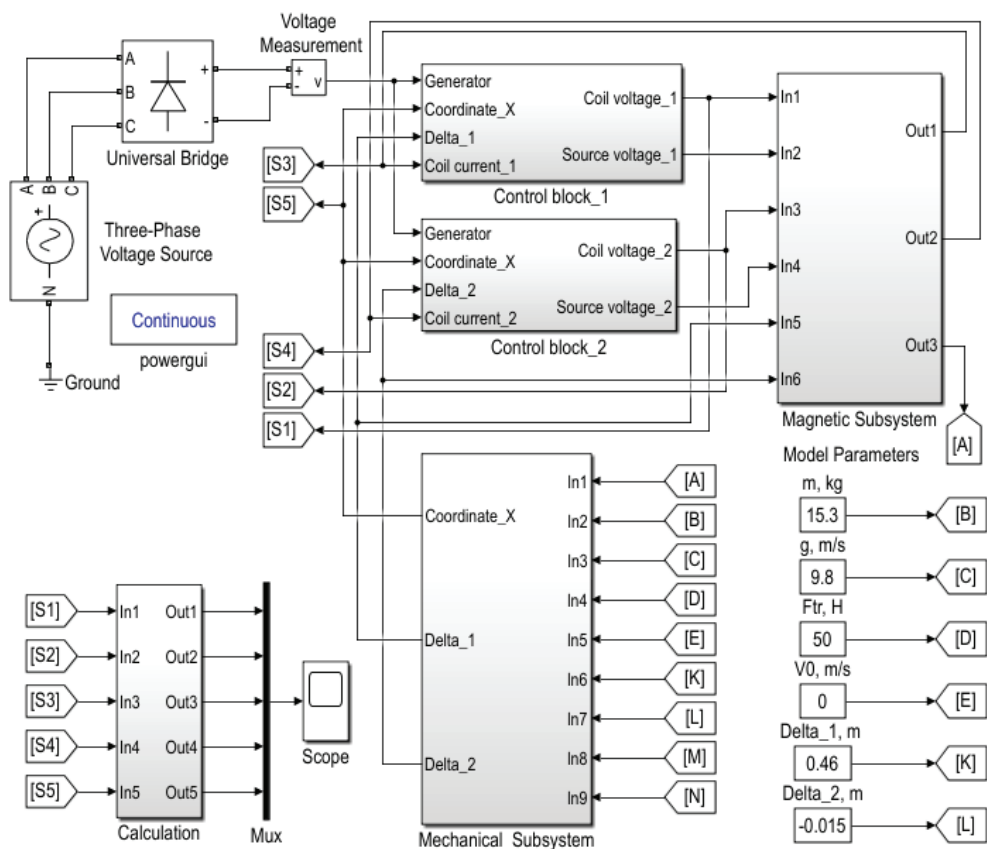


Рис. 3. Структурная схема универсальной динамической модели электромагнитного привода двойного действия в Matlab Simulink

Fig. 3. Structural diagram of the universal dynamic model of a double-acting electromagnetic drive in Matlab Simulink

Механическая подсистема (Mechanical Subsystem) реализована в соответствии с третьим уравнением системы и представлена на рис. 5.

В качестве входной переменной здесь выступает электромагнитное усилие, в качестве выходных переменных — координата положения бойка (Coordinate\_X) и величины воздушных зазоров (Delta\_1, Delta\_2).

Для фиксации выходных переменных при выполнении моделирования используется специальный блок Calculation с виртуальным осциллографом Scope (см. рис. 3).

Система управления модели реализована при помощи блоков управления (см. рис. 3) катушкой холостого хода (Control block\_1) и катушкой рабочего хода (Control block\_2). Развернутые структурные схемы блоков управления представлены на рис. 6 и рис. 7.

Выходными сигналами блока управления катушкой холостого хода (см. рис. 6) являются напряжение, поступающее на катушку (Coil voltage\_1), и управляющие импульсы принудительной коммутации силовых ключей (Source voltage\_1).

Одним из входных сигналов блока управления (см. рис. 3) является координата

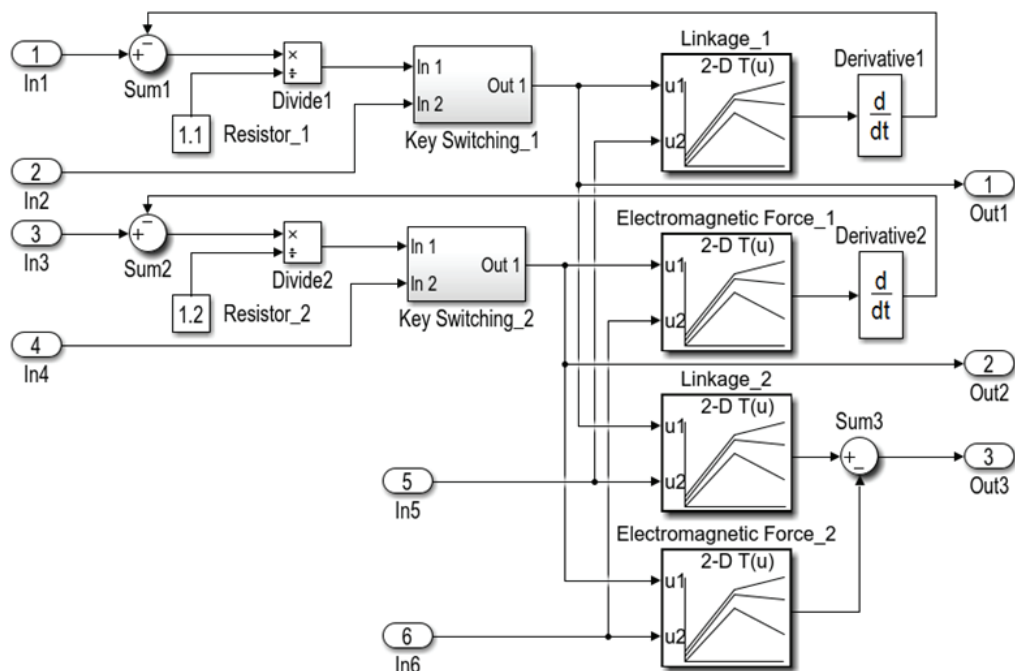


Рис. 4. Структурная схема подсистемы «Magnetic Subsystem»  
 Fig. 4. Structural diagram of the subsystem «Magnetic Subsystem»

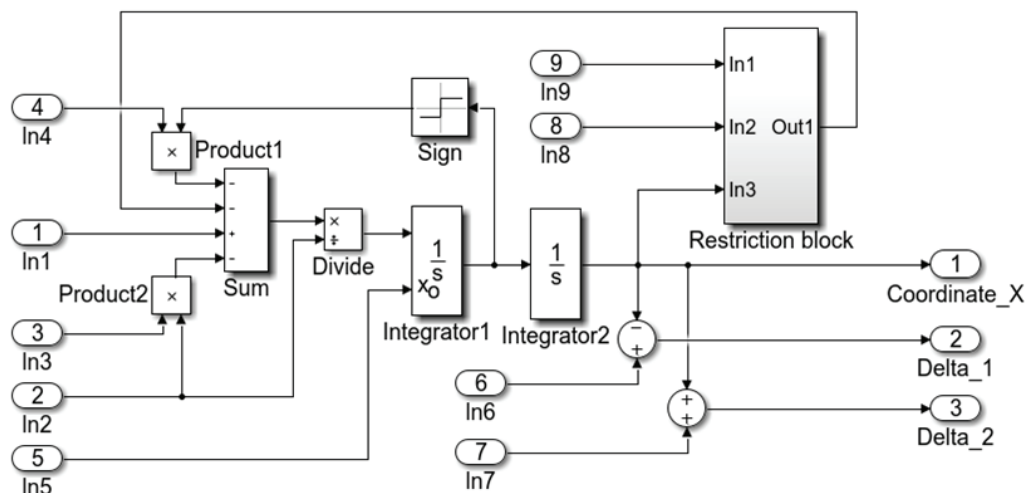


Рис. 5. Структурная схема подсистемы «Mechanical Subsystem»  
 Fig. 5. Structural diagram of the subsystem «Mechanical Subsystem»

ната положения бойка (Coordinate\_X). Сигнал подается на дифференцирующее звено (см. рис. 6), что позволяет определять скорость бойка на выходе

звена, а по знаку производной – направление его движения.

Управление напряжением, поступающим на катушку, выполняется



по положению бойка. В качестве управляющего сигнала здесь рассматривается величина рабочего воздушного зазора ( $\Delta_1$ ) на входе блока управления ( $\text{Control block}_1$ ) (см. рис. 6). Система управления позволяет автоматически отслеживать координату положения бойка. Наиболее просто система управления может быть реализована с помощью блоков переключателей ( $\text{Switch}$ ).

Для переключателей ( $\text{Switch}_1$ ) и ( $\text{Switch}_3$ ) общим управляющим сигналом определен знак скорости бойка. Для переключателей ( $\text{Switch}_2$ ) и ( $\text{Switch}_4$ ) – величина воздушного зазора электромагнитной катушки холостого хода.

Аналогичный принцип управления с использованием только двух переключателей ( $\text{Switch}_1$ ) и ( $\text{Switch}_2$ ) применен для катушки рабочего хода ( $\text{Control block}_2$ ) (см. рис. 7).

### 3. Результаты анализа

Для верификации динамической модели использовались исходные данные электромагнитного привода, приведенные в [30], где было установлено качественное и количественное совпадение результатов.

В качестве примера динамического расчета на рис. 8 и рис. 9 приведены осциллограммы рабочего процесса электромагнитного привода двойного действия для различных вариантов

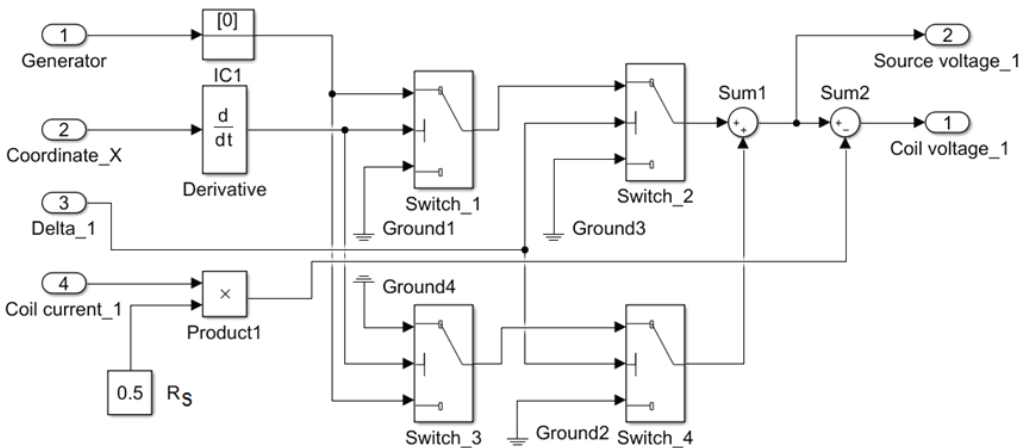


Рис. 6. Блок управления ( $\text{Control block}_1$ ) катушкой холостого хода

Fig. 6. Control block ( $\text{Control block}_1$ ) idle coil

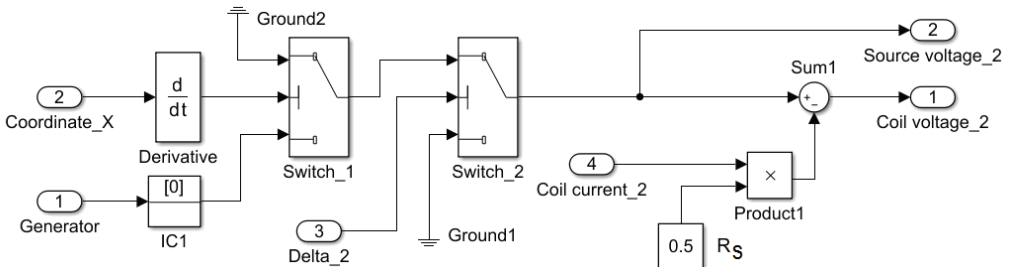


Рис. 7. Блок управления ( $\text{Control block}_2$ ) катушкой рабочего хода

Fig. 7. Control block ( $\text{Control block}_2$ ) coil working stroke

реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка.

Катушки холостого и рабочего хода получают питание от выпрямленного по мостовой схеме трехфазного источника напряжения  $U_q = 65\text{В}$ . Управление катушками выполняется с помощью тиристорных ключей, функции которых в блоках управления на рис. 6

и рис. 7 выполняют переключатели (Switch), управляемые координатой положения бойка. Длина и диаметр бойка соответственно равны  $h_2 = 1\text{ м}$ ;  $d_6 = 50\text{ мм}$ , масса бойка  $m = 15,3\text{ кг}$ . Максимальная величина рабочего воздушного зазора, без учета выбега бойка за пределы полюсной системы катушек,  $\delta_{\text{max}1}^+ = \delta_{\text{max}2}^+ = 460\text{ мм}$ .

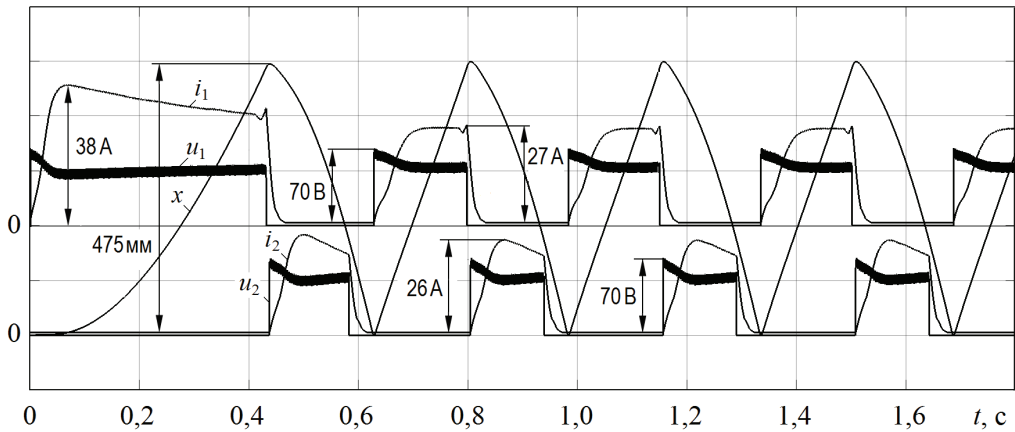


Рис. 8. Осциллограмма рабочего процесса при подаче напряжения на катушку холостого хода на момент времени завершения прямого хода бойка

Fig. 8. Oscillogram of the working process when voltage is applied to the idle coil at the time of completion of the direct stroke of the striker

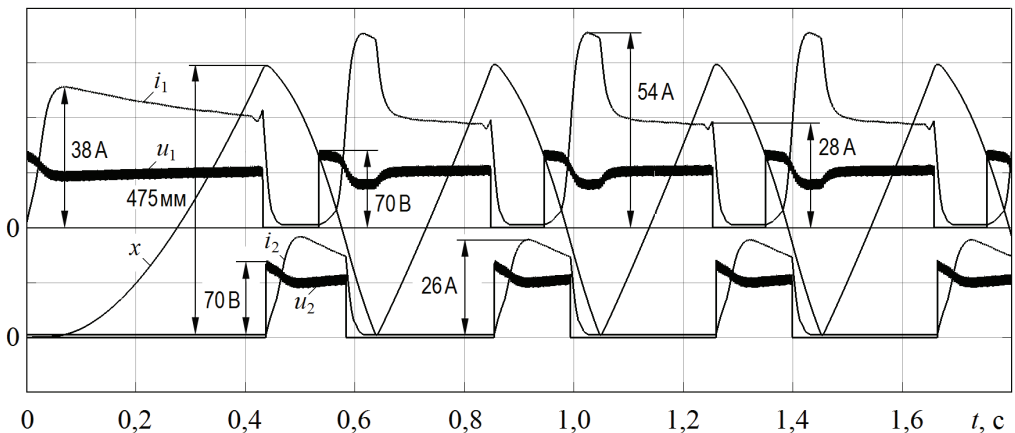


Рис. 9. Осциллограмма рабочего процесса при подаче напряжения на катушку холостого хода до момента времени завершения прямого хода бойка

Fig. 9. Oscillogram of the working process when voltage is applied to the idle coil until the end of the forward stroke of the striker

На рис. 8 приведена осциллограмма рабочего процесса, реализующего вариант возвратно-поступательного движения бойка для случая подачи напряжения на катушку холостого хода на момент времени завершения прямого хода.

Осциллограмма рабочего процесса на рис. 9 отражает вариант реализации возвратно-поступательного движения бойка с подачей напряжения на катушку холостого хода до завершения времени прямого хода, что приводит к затормаживанию электромагнитными силами катушки холостого хода.

Таким образом, в зависимости от момента подачи импульса напряжения на катушки и протекания по ним тока можно получить осциллограммы рабочих процессов, представляющих различные варианты реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка. Принимая во внимание приведенные результаты построения и реализации динамической модели, можно судить об универсальности ее применения для анализа режимов работы электромагнитных приводов двойного действия, управляемых по положению бойка.

#### Выводы

Созданная динамическая модель электромагнитного привода двойного действия может быть широко использована для анализа рабочих процессов.

Приведенный алгоритм реализации модели средствами структурного моделирования в Matlab Simulink обладает

значительными возможностями варьирования входными и выходными параметрами при исследовании режимов работы электропривода и представляется перспективным для создания имитационных моделей и повышения качества динамического расчета.

Рассмотренные результаты и предложения по реализации динамической модели могут найти широкое применение для решения комплексных задач анализа и синтеза электромагнитных приводов двойного действия, управляемых по положению бойка и используемых для создания ударных нагрузок.

Созданная модель является универсальной, поскольку позволяет проводить динамические расчеты для различных вариантов реализации возвратно-поступательного движения ударной массы бойка, установочных размеров электропривода, магнитных свойств конструкционных материалов и т.д. при внесении в модель соответствующих изменений, не нарушающих рассмотренную общую структуру и алгоритм расчета модели.

Перспективным направлением дальнейшего совершенствования модели и повышения точности динамического расчета является учет инерционных свойств бойка, совершающего возвратно-поступательные движения, и связанных с ним подвижных элементов электропривода, амплитуды колебаний которых в рамках проведенных исследований считались незначительными в сравнении с амплитудой бойка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Galdin N. S., Semenova I. A., Galdin V. N.* Analysis of the striker stroke impact on the hydropneumatic impact devices energy performance // *Journal of Physics. Conference Series.* 2019, vol. 1260, no. 11, article 112010. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/11/112010.
2. *Ураимов М. У., Еремьянц В. Э.* Гидравлический перфоратор с совмещенным ударным механизмом и механизмом поворота инструмента // *Транспортное, горное и стро-*

ительное машиностроение: наука и производство. — 2021. — № 10. — С. 56–62. DOI: 10.26160/2658-3305-2021-10-56-62.

3. Бочков В. С., Дягилев С. Д. Анализ одностадийного и двухстадийного дробления сланца в щековой дробилке ШД 10М для изготовления бетонно-мозаичной плитки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 7. — С. 78–84. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-78-84.

4. Ямпольский Д. З. Некоторые особенности ударных импульсов машин ударного действия // Вестник научно-технического развития. — 2020. — № 4 (152). — С. 26–42. DOI: 10.18411/vntr2020-152-4.

5. Abramenkov D. E., Popov N. A., Abramenkov E. A. Methodology for evaluating energysaving technical solutions of impact machines and equipment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. VIII International Scientific Conference Transport of Siberia. 2020, art. 012134. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012134.

6. Чещин Д. О., Плохих В. В., Ткачук А. К. О возможности применения накопителей энергии в ударных машинах // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2021. — Т. 2. — № 4. — С. 181–189. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-4-181-189.

7. Aldannawy H., Rouabhi A., Gerbaud L. Percussive drilling: Experimental and numerical investigations // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2022, vol. 55, no. 3, pp. 1555–1570. DOI: 10.1007/s00603-021-02707-5.

8. Волков Н. Н., Ределин Р. А., Кравченко В. А., Каманин Ю. Н., Андреев А. В. Оценка взаимосвязи параметров гидравлического ударного устройства и его привода // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. — 2020. — № 2. — С. 211–218. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-211-217.

9. Gorodilov L. V., Pershin A. I. Simulation model of a hydro-impact system with two limiters of striker movement // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 2022, vol. 991, no. 1, article 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/991/1/012037.

10. Redelin R. A., Kamanin Y. N., Panichkin A. V. Designing hydraulic impact devices for low-temperature operation // Journal of Physics. Conference Series. 2021, vol. 2096, no. 1, article 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012005.

11. Плохих В. В. Создание пневматической ударной машины для реализации адаптивных технологических процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 7. — С. 91–103. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_7\_0\_91.

12. Червов В. В., Тищенко И. В., Червов А. В. Создание физической модели генератора ударных импульсов и высокочастотного пневматического молота // Горный журнал. — 2022. — № 2. — С. 57–62. DOI: 10.17580/gzh.2022.02.09.

13. Gumenyuk V., Dobrobovsky B., Gumenyuk O., Krupyshev M. Providing high speed drilling of boreholes with portable pneumatic rock drills in emergency situations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 666, art. 012094. DOI: 10.1088/1757-899X/666/1/012094.

14. Немков С. А., Дроздов А. Н., Степанов В. В. Модель работы компрессионно-вакуумного ударного механизма электрического перфоратора SDSPLUS // Механизация строительства. — 2016. — Т. 77. — № 11. — С. 46–49.

15. Абидов А. О., Исманов О. М. Математическая модель электромеханического перфоратора с ударно-поворотным механизмом // Бюллетень науки и практики. — 2019. — Т. 5. — № 5. — С. 233–240. DOI: 10.33619/2414-2948/42/31.

16. Neiman L. A., Neiman V. Yu., Shabanov A. S. A simplified calculation of the intermittent periodic operating regime of an electromagnetic impact drive // Russian Electrical Engineering. 2014, vol. 85, no. 12, pp. 757–760. DOI: 10.3103/S1068371214120104.

17. Ефимова Ю. Б. Выбор рациональных геометрических параметров линейного электромагнитного пресса с малым ходом плунжера // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12-2. — С. 115–128. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_115.

18. Neyman L. A., Neyman V. Yu. Complex analysis of electromagnetic machines for vibro-impact technologies // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, vol. 87, art. 032026. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032026.

19. Neyman L. A., Neyman V. Yu. Simulation of dynamic processes in electromagnetic energy converters for force effects and lowfrequency vibrations generation systems // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162.

20. Ижбулдин Е. А., Абрамов А. Д. Ручной электрический ударный инструмент для реализации виброударных технологий в транспортном машиностроении и строительстве // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2017. — Т. 21. — № 1 (120). — С. 32–39. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-1-32-41.

21. Нейман Л. А., Нейман В. Ю. Динамическая модель работы электромагнитного ударного механизма электрического перфоратора // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12-2. — С. 190–202. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_190.

22. Ануфриев А. С., Певчев В. П. Моделирование процесса соударения якоря с индуктором в импульсном электромагнитном сейсмоисточнике // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2018. — № 2 (58). — С. 101–109.

23. Едыгенов Е. К., Васин К. А. Результаты испытаний электромагнитного молота для безвзрывного разрушения горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 5. — С. 80–90. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-80-90.

24. Каргин В. А., Волгин А. В., Моисеев А. П., Чурляева К. Д., Белов В. В. Использование электромагнитной ударной машины для погружения в грунт металлических стержневых элементов // Известия Международной академии аграрного образования. — 2019. — № 44. — С. 11–17.

25. Павлов В. Е. Исследование режимов работы длинноходового электромагнитного молота методом компьютерного моделирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2019. — Т. 23. — № 2 (145). — С. 260–270. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-260-270.

26. Симонов Б. Ф., Нейман В. Ю., Нейман Л. А., Кордубайло А. О. Имитационное моделирование рабочего процесса электромагнитного привода скважинного виброисточника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — № 3. — С. 120–130. DOI: 10.15372/FTPRPI20200312.

27. Nazaruddin N., Siallagan R. Software Engineering Development of Finite Element Method Programming Applications in 2D Frame Structures Using Python Programs // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 2049, art. 012031. DOI: 10.1088/1742-6596/2049/1/012031.

28. Shevchenko V. P., Babiychuk O. B., Boltenkov V. O. Study of current transformers magnetic field by method final elements using the FEMM software complex // Applied aspects of information technology. 2019, vol. 2(4), pp. 317–327.

29. Затонский А. В., Долгополов И. С. Моделирование трехобмоточного силового трансформатора в MATLAB SIMULINK // Вестник Ивановского государственного

энергетического университета. — 2022. — № 4. — С. 64–72. DOI: 10.17588/2072–267 2.2022.4.064–072.

30. Shneen S. W., Aziz G. A. Simulation model of 3-phase pwm rectifier by using MATLAB/SIMULINK // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2021, vol. 11, no. 5, pp. 3736–3746. DOI: 10.11591/ijece.v11i5.pp3736–3746. **MIAB**

## REFERENCES

1. Galdin N. S., Semenova I. A., Galdin V. N. Analysis of the striker stroke impact on the hydropneumatic impact devices energy performance. *Journal of Physics. Conference Series*. 2019, vol. 1260, no. 11, article 112010. DOI: 10.1088/1742–6596/1260/11/112010.

2. Uraimov M. U., Erem'yanc V. E. Hydraulic hammer drill with combined impact mechanism and tool rotation mechanism. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo*. 2021, no. 10, pp. 56–62. [In Russ]. DOI: 10.26160/2658-3305-2021-10-56–62.

3. Bochkov V. S., Dyagilev S. D. Analysis of one-stage and two-stage crushing of shale in jaw crusher ShchD 10M for manufacture of terrazzo tiles. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 7, pp. 78–84. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0–78–84.

4. Yampol'skij D. Z. Some features of shock impulses of impact machines. *Vestnik nauchno-tekhnikeskogo razvitiya*. 2020, no. 4 (152), pp. 26–42. [In Russ]. DOI: 10.18411/vntr2020–152–4.

5. Abramenkov D. E., Popov N. A., Abramenkov E. A. Methodology for evaluating energy-saving technical solutions of impact machines and equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. VIII International Scientific Conference Transport of Siberia*. 2020, art. 012134. DOI: 10.1088/1757–899X/918/1/012134.

6. Cheshchin D. O., Plohih V. V., Tkachuk A. K. On the possibility of using energy storage devices in impact machines. *Interekspo Geo-Sibir'*. 2021, vol. 2, no. 4, pp. 181–189. [In Russ]. DOI: 10.33764/2618–981X-2021–2-4–181–189.

7. Aldannawy H., Rouabhi A., Gerbaud L. Percussive drilling: Experimental and numerical investigations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022, vol. 55, no. 3, pp. 1555–1570. DOI: 10.1007/s00603-021-02707-5.

8. Volkov N. N., Redelin R. A., Kravchenko V. A., Kamanin Yu. N., Andreev A. V. Evaluation of the relationship between the parameters of the hydraulic percussion device and its drive. *Nauchno-tekhnikeskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2020, no. 2, pp. 211–218. [In Russ]. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06–02–211–217.

9. Gorodilov L. V., Pershin A. I. Simulation model of a hydro-impact system with two limiters of striker movement. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 991, no. 1, article 012037. DOI: 10.1088/1755–1315/991/1/012037.

10. Redelin R. A., Kamanin Y. N., Panichkin A. V. Designing hydraulic impact devices for low-temperature operation. *Journal of Physics. Conference Series*. 2021, vol. 2096, no. 1, article 012005. DOI: 10.1088/1742–6596/2096/1/012005.

11. Plokhikh V. V. Pneumatic percussion tool to implement adaptive technologies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 7, pp. 91–103. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_7\_0\_91.

12. Chervov V. V., Tishchenko I. V., Chervov A. V. Creation of a physical model of a shock pulse generator and a high-frequency pneumatic hammer. *Gornyj zhurnal*. 2022, no. 2, pp. 57–62. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.02.09.

13. Gumenyuk V., Dobroborsky B., Gumenyuk O., Krupyshev M. Providing high speed drilling of boreholes with portable pneumatic rock drills in emergency situations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 666, art. 012094. DOI: 10.1088/1757-899X/666/1/012094.
14. Nemkov S. A., Drozdov A. N., Stepanov V. V. Model of the operation of the compression-vacuum percussion mechanism of the SDSPLUS electric rock drill. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2016, vol. 77, no. 11. pp. 46–49. [In Russ].
15. Abidov A. O., Ismanov O. M. Mathematical model of an electromechanical rotary hammer drill. *Byulleten' nauki i praktiki*. 2019, vol. 5. no. 5, pp. 233–240. [In Russ]. DOI: 10.33619/2414-2948/42/31.
16. Neiman L. A., Neiman V. Yu., Shabanov A. S. A simplified calculation of the intermittent periodic operating regime of an electromagnetic impact drive. *Russian Electrical Engineering*. 2014, vol. 85, no. 12, pp. 757–760. DOI: 10.3103/S1068371214120104.
17. Efimova Yu. B. Rational geometric parameters selection of a linear electromagnetic press with low plunger stroke. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12–2, pp. 115–128. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_115.
18. Neyman L. A., Neyman V. Yu. Complex analysis of electromagnetic machines for vibro-impact technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 87, art. 032026. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032026.
19. Neyman L. A., Neyman V. Yu. Simulation of dynamic processes in electromagnetic energy converters for force effects and lowfrequency vibrations generation systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162.
20. Izhbuldin E. A., Abramov A. D. Hand-held electric percussion tool for the implementation of vibration shock technologies in transport engineering and construction. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017, vol. 21, no. 1 (120), pp. 32–39. [In Russ]. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-1-32-41.
21. Neyman L. A., Neyman V. Yu. Dynamic model of the electromagnetic impact mechanism of the electric rock drill. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12–2, pp. 190–202. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_190.
22. Anufriev A. S., Pevchev V. P. Modeling the Process of Collision of an Armature with an Inductor in a Pulsed Electromagnetic Seismic Source. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2018, no. 2 (58), pp. 101–109. [In Russ].
23. Yedygenov Ye. K., Vasin K. A. Test data of electromagnetic hammer for non-explosive rock fracturing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 5, pp. 80–90. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-80-90.
24. Kargin V. A., Volgin A. V., Moiseev A. P., CHurlyayeva K. D., Belov V. V. The use of an electromagnetic impact machine for immersing metal rod elements into the ground. *Izvestiya Mezhdunarodnoj akademii agrarnogo obrazovaniya*. 2019, no. 44, pp. 11–17. [In Russ].
25. Pavlov V. E. Investigation of the operating modes of a long-stroke electromagnetic hammer by computer simulation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019, vol. 23, no. 2 (145), pp. 260–270. [In Russ]. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-260-270.
26. Simonov B. F., Kordubailo A. O., Neiman V. Y., Neiman L. A. Simulation modeling of operation of downhole vibration exciter em drive. *Journal of Mining Science*. 2020, vol. 56, no. 3, pp. 435–444. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20200312.
27. Nazaruddin N., Siallagan R. Software Engineering Development of Finite Element Method Programming Applications in 2D Frame Structures Using Python Programs. *Journal*

*of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 2049, art. 012031. DOI:10.1088/1742-6596/2049/1/012031.

28. Shevchenko V. P., Babiychuk O. B., Boltenkov V. O. Study of current transformers magnetic field by method final elements using the FEMM software complex. *Applied aspects of information technology*. 2019, vol. 2(4), pp. 317–327.

29. Zatonskij A. V., Dolgopolov I. S. Modeling a three-winding power transformer in MATLAB SIMULINK. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2022, no. 4, pp. 64–72. [In Russ]. DOI: 10.17588/2072-2672.2022.4.064-072.

30. Shneen S. W., Aziz G. A. Simulation model of 3-phase pwm rectifier by using MATLAB/SIMULINK. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2021, vol. 11, no. 5, pp. 3736–3746. DOI: 10.11591/ijece.v11i5.pp3736-3746.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Нейман Людмила Андреевна* — д-р техн. наук, профессор, <http://orcid.org/0000-0002-3442-6531>, Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20, Россия, e-mail: [neyman31@gmail.com](mailto:neyman31@gmail.com);

*Нейман Владимир Юрьевич* — д-р техн. наук, заведующий кафедрой, <http://orcid.org/0000-0002-8433-1610>, Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20, Россия, E-mail: [nv.nstu@ngs.ru](mailto:nv.nstu@ngs.ru).

Для контактов: *Нейман Владимир Юрьевич*, e-mail: [nv.nstu@ngs.ru](mailto:nv.nstu@ngs.ru).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Neyman L. A.*, Dr. Sci. (Eng.), Professor, <http://orcid.org/0000-0002-3442-6531>, Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Karl Marx Avenue, 20, Russia, e-mail: [neyman31@gmail.com](mailto:neyman31@gmail.com);

*Neyman V. Yu.*, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department, <http://orcid.org/0000-0002-8433-1610>, Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Karl Marx Avenue, 20, Russia, e-mail: [nv.nstu@ngs.ru](mailto:nv.nstu@ngs.ru).

**For contacts:** *Neyman V. Yu.*, e-mail: [nv.nstu@ngs.ru](mailto:nv.nstu@ngs.ru).

Получена редакцией 18.04.2023; получена после рецензии 04.07.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 18.04.2023; received after the review 04.07.2023; accepted for printing 10.10.2023.

