

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОЛОТА ДЛЯ ДРОБЛЕНИЯ НЕГАБАРИТОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Л.А. Нейман¹, В.Ю. Нейман¹

¹ Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия, e-mail: nv_nstu@mail.ru

Аннотация: Одним из направлений развития машин ударного действия для дробления негабаритов горных пород является применение в качестве навесного оборудования электромагнитных молотов. Достоинством оборудования, использующего в качестве источника движущей силы энергию магнитного поля, является конструктивная простота и надежность работы в различных климатических условиях, включая районы Крайнего Севера, а также относительно высокий КПД передачи энергии ударом. Особенностью электромагнитных молотов является работа в переходных режимах, что осложняет решение задачи рационального выбора основных конструктивных параметров. Существующие сегодня методы проектирования являются приближенными и в своем большинстве основанными на статических подходах. Актуальность проводимых исследований обусловлена перспективностью практического использования электромагнитных молотов при дроблении негабаритов горной породы, а также необходимостью совершенствования методов их рационального проектирования. Статья посвящена разработке имитационной динамической модели электромагнитного молота с управлением по координате положения бойка. Создана динамическая модель электромагнитного молота, реализованная методами структурного моделирования в Matlab Simulink с использованием численных методов. Использование модели для расчета сложных электромеханических процессов позволяет одновременно анализировать работу всех подсистем молота во времени и пространстве, а также своевременно вносить корректировки при выборе основных параметров конструкции, что повышает качество проектирования. Приведена количественная оценка результатов имитационного моделирования. Отмечено, что управление кинетической энергией по координате положения бойка целесообразно выполнять в период его рабочего хода.

Ключевые слова: горная порода; дробление негабаритов, электромагнитный молот, рациональное проектирование, методы структурного моделирования, численный метод, магнитное поле, имитационная динамическая модель, кинетическая энергия.

Для цитирования: Нейман Л. А., Нейман В. Ю. Динамическая модель электромагнитного молота для дробления негабаритов горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 2. – С. 145–156. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_145.

Dynamic model of electromagnetic hammer for crushing oversized rocks

L.A. Neyman¹, V.Yu. Neyman¹

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, e-mail: nv_nstu@mail.ru

Abstract: One of the trends in advancement of percussive machines for crushing oversized rocks is the use of electromagnetic hammers as attached implements. The benefit of equipment powered by energy of magnetic field is the structural simplicity and operational reliability in different climatic conditions, including the Far North, as well as the comparatively high efficiency of impact energy transmission. A feature of electromagnetic hammers is the transient behavior, which complicates the rational selection of their basic design parameters. The recent design methods are approximate and mostly use static approaches. The relevance of the present research is defined by the promising application of the electromagnetic hammers in crushing oversized rocks, and by the required improvement of their rational design methods. This article describes development of a dynamic simulation model of an electromagnetic hammer with the piston position coordinate control. The dynamic model of the electromagnetic hammer is created using the structural modeling techniques in Matlab Simulink, with some numerical methods involved. In calculation of complex electromechanical processes, the model enables simultaneous analysis of operation of all hammer subsystems in time and in space, and allows just-in-time adjustment of the main structural parameters of the hammer, which improves the design quality. The quantification of the simulation modeling results is presented. It is emphasized that it is expedient to implement adjustment of the kinetic energy of the hammer by its piston position during the power stroke.

Key words: rock, oversize crushing, electromagnetic hammer, rational design, structural modeling methods, numerical method, magnetic field, dynamic simulation model, kinetic energy.

For citation: Neyman L. A., Neyman V. Yu. Dynamic model of electromagnetic hammer for crushing oversized rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(2):145-156. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_145.

Введение

В настоящее время горнодобывающая отрасль характеризуется активным развитием альтернативных методов и технологий безвзрывного метода разрушения горных пород [1, 2].

Главными преимуществами безвзрывного метода являются сокращение сроков подготовки, безопасность проведения работ, минимальное негативное воздействие на окружающую среду [3].

Сравнение эффективности различных методов безвзрывного разрушения горных пород, включая вторичное разрушение, указывает на перспективность механического ударного способа, область применения которого распространяется на горные породы средней и выше средней крепости [4, 5].

Процесс разрушения горной породы является энергоемким и основан на сход-

ных технологических принципах импульсного силового воздействия при помощи удара [6, 7]. Общее представление о механизме процесса разрушения горной породы при силовом ударном воздействии рассмотрено в работе авторов [8].

Наибольшее распространение получили механические безвзрывные методы разрушения горных пород. Достоинством этих методов является возможность концентрации воздействия на обрабатываемую среду непосредственно в зоне разрушения. Это позволяет снизить уровень потерь механического воздействия и повысить энергоэффективность применяемого оборудования. Для реализации механического метода используются пневматические и гидравлические ударные устройства [9, 10].

При вторичном разрушении горной породы на карьерах в качестве навесного

ударного оборудования широко используются гидромолоты [11, 12]. Для транспортировки и придания им мобильности применяют общепромышленные колесные или гусеничные автотранспортные средства.

Также имеется положительный опыт вторичного разрушения горной породы механическим методом с использованием электромагнитных молотов [13]. Источником движущей силы здесь выступает энергия магнитного поля. Для осуществления питания такого оборудования преимущественно применяются автотранспортные средства, содержащие в своей конструкции генератор постоянного тока, либо используется силовой кабель, получающий питание от промышленного трехфазного источника напряжения 380 В.

Особенности технологии открытой разработки месторождений определяют требования к навесному оборудованию с электромагнитным молотом для вторичного разрушения горных пород. Наиболее важными являются: относительно невысокая масса навесного оборудования, обеспечивающая мобильность установки; высокая надежность и возможность работы в различных климатических условиях, включая районы Крайнего Севера; возможность использования бортового источника питания автотранспортного средства либо специального встраиваемого генератора постоянного тока.

Определяющим при выборе передвижного транспортного средства является наличие в его конструкции бортового генератора постоянного тока требуемой мощности.

Особое значение при использовании электромагнитного молота приобретает необходимость повышения эффективности исполнительного приводного устройства, предназначенного для создания импульсного силового воздействия, с энергией удара до 5000 Дж и частотой ударов

до $n_{уд} = 200$ уд/мин. Исполнительные приводы таких молотов имеют относительно высокий (до 40%) КПД передачи энергии ударом [14, 15].

Принципиальной особенностью электромагнитного молота является работа в переходных режимах, что осложняет решение задачи рационального выбора его основных параметров [16].

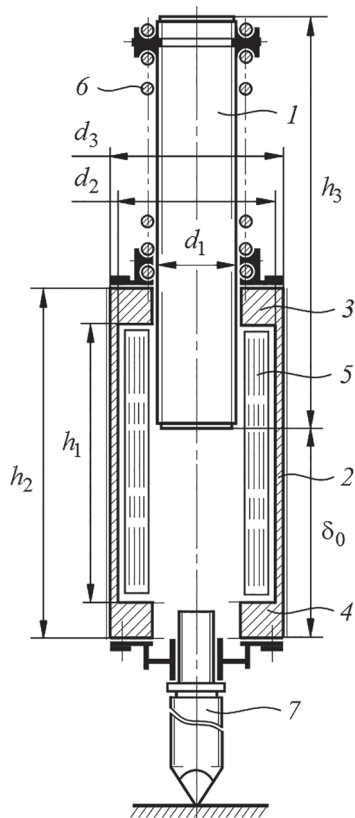
Используемые сегодня экспериментальные методы исследования электромагнитных молотов, требующие на каждом этапе внесения изменений в конструкцию, существенно увеличивают материальные затраты на их проектирование. Существующие в настоящее время приближенные методы проектирования в своем большинстве основаны на статических подходах и результатах ранее полученных экспериментальных данных. Данное обстоятельство принуждает к необходимости совместного решения задачи проектирования и имитационного динамического моделирования. Такой подход позволяет одновременно анализировать работу всех подсистем электромагнитного молота, включая электропитание и управление, и производить своевременную корректировку его параметров при выборе основных элементов конструкции.

Цель работы заключается в разработке имитационной динамической модели электромагнитного молота с управлением его кинетической энергией по координате положения бойка.

Наличие обратной связи по координате положения бойка позволяет изменять структуру импульсного силового воздействия рабочего инструмента в процессе работы электромагнитного молота в зависимости от физических свойств горной породы.

Методы и материалы

Применение имитационного моделирования в исследовании работы электро-



- 1 – боек; 2 – магнитопровод; 3 – верхний полюс;
 4 – нижний полюс; 5 – катушка возбуждения;
 6 – пружина растяжения-сжатия;
 7 – рабочий инструмент

Рис. 1. Электромагнитный молот
 Fig. 1. Pulse electromagnetic seismic source

магнитного молота позволяет получить максимально полное представление о всех интересующих процессах во времени и в пространстве. Кроме того, несмотря на простую конструкцию электромагнитного молота, происходящие в нем электромеханические процессы достаточно сложны и содержат многосторонние связи, определяющие эффективность преобразования электрической энергии, поступающей на входе от источника, в кинетическую энергию на выходе.

В основе существующего подхода при реализации имитационной динамической модели электромагнитного молота при-

меняются методы компьютерного моделирования в приложении Simulink пакета Matlab, основанного на использовании численных методов [17–19].

Одним из главных достоинств метода является возможность наблюдения быстродействующих процессов в пространстве и во времени, что особенно важно для исследования объектов, для которых переходный режим считается основным рабочим режимом.

Несомненным достоинством электромагнитных молотов является их конструктивная простота, сочетающаяся с безопасностью и высокой надежностью эксплуатации при неблагоприятных условиях, в том числе при низких температурах.

Конструкция электромагнитного молота в разрезе представлена на рис. 1. Основными элементами конструкции молота являются порождающие силовое взаимодействие ферро-магнитный массивный боек 1 и магнитопровод 2 с установленными с ним на одной оси верхним 3 и нижним 4 полюсами, выполненными в виде колец из массивной стали. Внутренняя полость магнитопровода занята катушкой возбуждения 5. Верхняя часть бойка через опорную проточку жестко связана с пружиной растяжения-сжатия 6. Другой конец пружины закреплен на неподвижном полюсе. Передача кинетической энергии массивного бойка осуществляется посредством рабочего инструмента 7, контактирующего с горной породой.

Включение электромагнитного молота приводит к подаче напряжения на катушку и протекания по ней тока. Вследствие роста тока возбуждается магнитное поле, создающее электромагнитную силу, которая увеличивается при перемещении бойка под действием этой силы в направлении рабочего инструмента. По мере продвижения бойка увеличивается его кинетическая энергия. Часть

этой энергии запасается пружиной растяжения-сжатия в виде потенциальной энергии. После нанесения удара кинетическая энергия бойка передается через рабочий инструмент в деформируемую им среду.

В период бестоковой паузы потенциальная энергия пружины растяжения-сжатия расходуется для возврата бойка в начальное положение. Данное положение бойка (см. рис. 1) соответствует статическому равновесию механической системы молота. Далее цикл повторяется. В результате циклических поступательных движений боек периодически взаимодействует с торцевой поверхностью инструмента и генерирует импульс силы, передаваемый в деформируемую среду, совершая работу.

Управление электромагнитным молотом выполняется по координате положения бойка, что позволяет регулировать силу удара. Работа молота при заданной частоте и силе удара может осуществляться в автоколебательном режиме.

Система управления содержит датчики положения бойка, сигналы с которых подаются на блок формирования импульсов напряжения, питающих катушку возбуждения.

Реализация модели

При описании процессов в электро-механической системе молота приняты следующие допущения:

- магнитная система молота представляет осесимметричную конструкцию, поэтому считаем, что силы одностороннего притяжения бойка здесь отсутствуют;
- упругие свойства горной породы зависят от свойств и величины введенных упругих связей;
- потерями энергии на деформацию и нагрев при ударе пренебрегаем ввиду их малости в сравнении с кинетической энергией бойка.

Динамическое состояние электромагнитного молота (см. рис. 1) описывается уравнениями электрического и механического равновесия в следующем виде:

$$U_q - ir_s = ir + \frac{d\psi(i_\mu, \delta)}{dt}; \quad (1)$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -b \frac{dx}{dt} - kx + mg - f_{mp} \operatorname{sign} \frac{dx}{dt} + f_{эм}(i_\mu, \delta) \quad (2)$$

где U_q — напряжение на выходе трехфазного выпрямительного моста, В; r_s — сопротивление источника, Ом; r — сопротивление катушки возбуждения, Ом; $i = i_\mu + i_n$ — полный ток катушки, А; i_μ — составляющая намагничивающего тока катушки, А; i_n — составляющая тока потерь, вызванная вихревыми токами и гистерезисом, А; $\psi(i_\mu, \delta)$ — потокосцепление, Вб; $f_{эм}(i_\mu, \delta)$ — электромагнитная сила, Н; δ — величина переменного воздушного рабочего зазора, м; m — масса бойка, кг; k — коэффициент жесткости пружины растяжения-сжатия, Н/м; b — коэффициент вязкого трения пружины, Н·с/м; $f_{тр}$ — сила сухого трения скольжения бойка, Н; g — величина ускорения свободного падения, м/с.

Полезную энергию T_2 , передаваемую при нанесении удара, и энергию, приобретаемую при отскоке бойка T_3 , можно выразить через коэффициент отскока бойка:

$$T_2 = T_1(1 - k_{от}^2); \quad T_3 = T_1 k_{от}^2. \quad (3)$$

В выражении (3) величина $T_1 = mv^2/2$ определяет кинетическую энергию ударной массы бойка за время его ускорения электромагнитными силами, а коэффициент $k_{от} = \bar{v} / v$ учитывает отскок бойка от деформируемой им среды. Здесь v — конечная скорость бойка в момент нанесения удара, м/с; \bar{v} — скорость бойка при отскоке от рабочего инструмента, м/с.

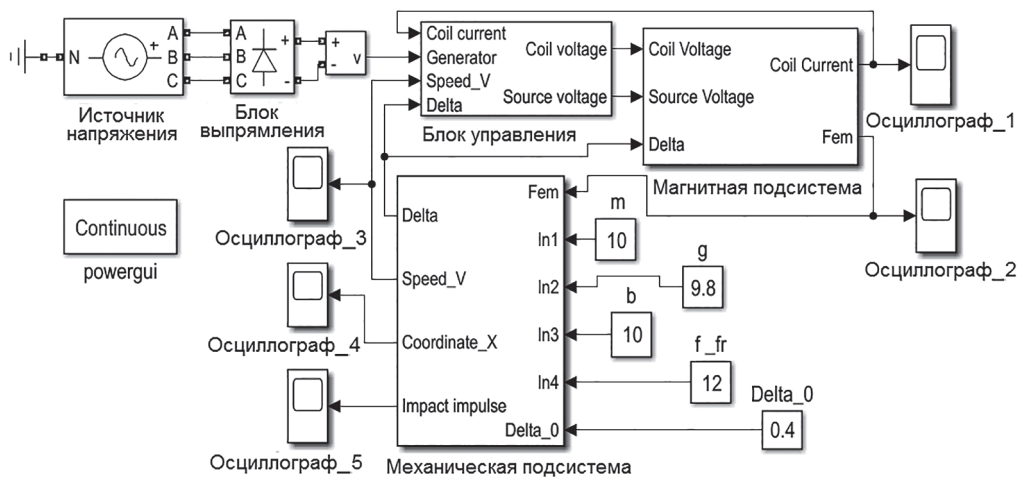


Рис. 2. Имитационная динамическая модель электромагнитного молота в Matlab Simulink
 Fig. 2. Simulation dynamic model of an electromagnetic hammer in Matlab Simulink

Совместное решение уравнений (1) – (3), составляющих математическую модель молота, работающего в переходных режимах, осложняется их нелинейностью. Алгоритм расчета уравнений был получен средствами структурного моделирования в приложении Simulink программного пакета Matlab [20 – 22].

Результаты реализации динамической модели в виде блочной структурной схемы в приложении Simulink представлены на рис. 2. Имитационная модель (рис. 2) состоит из трех основных подсистемных

блоков, реализованных в соответствии с уравнениями (1) – (3).

Электрическая подсистема включает в себя источник напряжения и блок управления подачей напряжения по координате положения бойка.

В магнитной подсистеме учтены все возникающие при расчете нелинейности модели. Детализированная структурная схема магнитного блока представлена на рис. 3. Основными входными переменными данной подсистемы являются напряжение источника (Source Voltage) и ве-

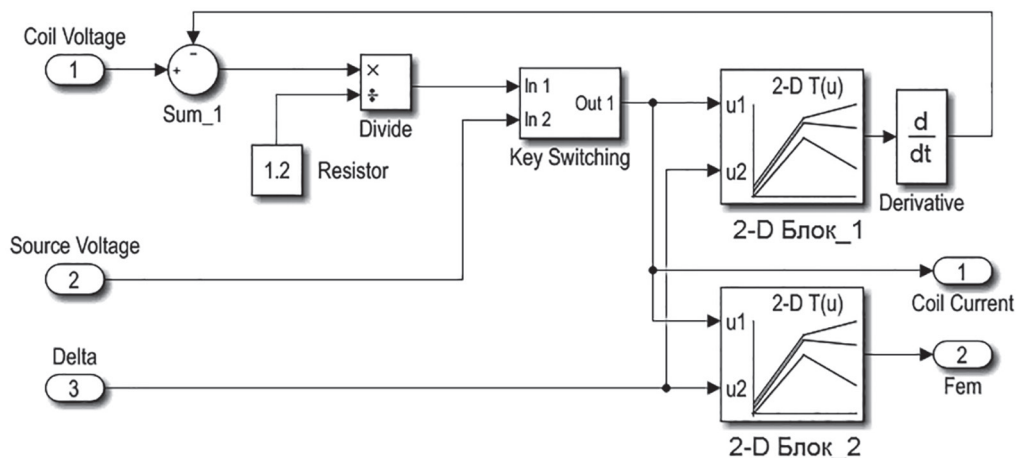


Рис. 3. Структурная схема магнитного блока «Магнитная подсистема»
 Fig. 3. Block diagram of the magnetic block Magnetic Subsystem

личина переменного воздушного зазора (Delta). Данное напряжение (Coil Voltage) подается на катушку возбуждения молота и учитывает падение напряжения во вторичных цепях источника питания. Следует отметить, что при работе молота напряжение на катушке возбуждения всегда меньше на величину падения напряжения во вторичных цепях питающего источника. Выходными переменными подсистемы являются электромагнитное усилие, действующее на боек (Fem), и ток (Coil Current) катушки возбуждения.

Нелинейные свойства модели, определяемые в основном нелинейными свойствами используемых конструктивных сталей, учитываются с помощью встраиваемых блоков двумерных таблиц (2-D Блок_1) и (2-D Блок_2) (см. рис. 3).

Для построения таблиц в программе FEMM [23, 24] выполнялся статический расчет магнитного поля. По результатам этого расчета через интегральные характеристики поля определялись опорные точки потокоцепления $\psi = (i, \delta)$ и электромагнитного усилия $f_{эм} = (i, \delta)$.

Зависимости потокоцепления $\psi(i, \delta)$ и электромагнитного усилия $f_{эм}(i, \delta)$ учитывают геометрию магнитной системы

электромагнитного молота (см. рис. 1), магнитные характеристики применяемых марок конструкционных сталей и потоки рассеяния, зависящие от характера распределения магнитного поля.

Структурная схема механического блока («Механическая подсистема») представлена на рис. 4.

Единственной входной переменной здесь выступает величина электромагнитного усилия (Fem) с выхода блока «Магнитной подсистемы» (см. рис. 2).

В качестве выходных переменных используется координата положения ударной массы бойка (Coordinate_X), величина скорости бойка (Speed_V), переменный воздушный зазор (Delta) и ударный импульс механической силы (Impact Impulse), передаваемый в деформируемую среду. Для фиксации выходных переменных в процессе динамического расчета применяются виртуальные приемники сигналов (Осциллограф_1...5) (рис. 2).

Управление напряжением выполняется по положению бойка. Управляющим сигналом является величина переменного воздушного рабочего зазора (Delta), подаваемого на устройство управления, реализованного с помощью переключателя

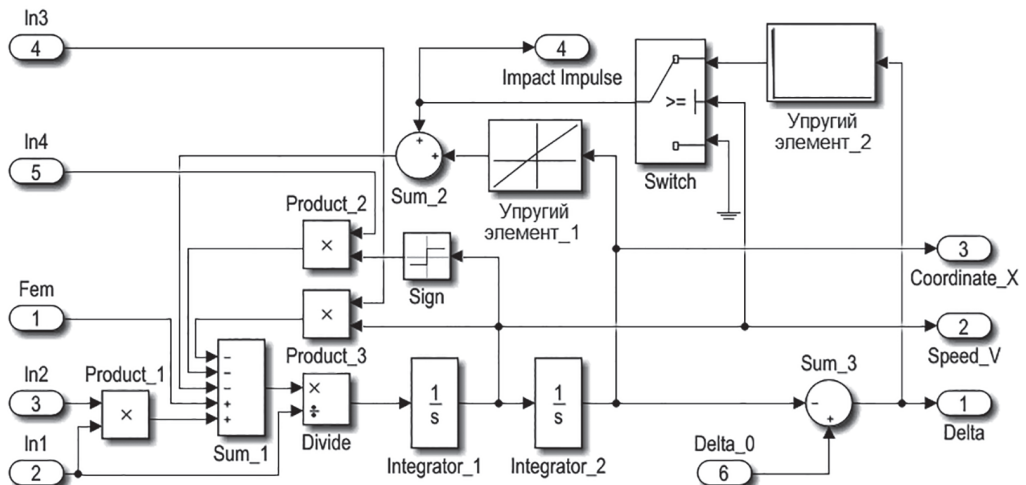


Рис. 4. Структурная схема механического блока «Механическая подсистема»

Fig. 4. Block diagram of a mechanical block Mechanical Subsystem

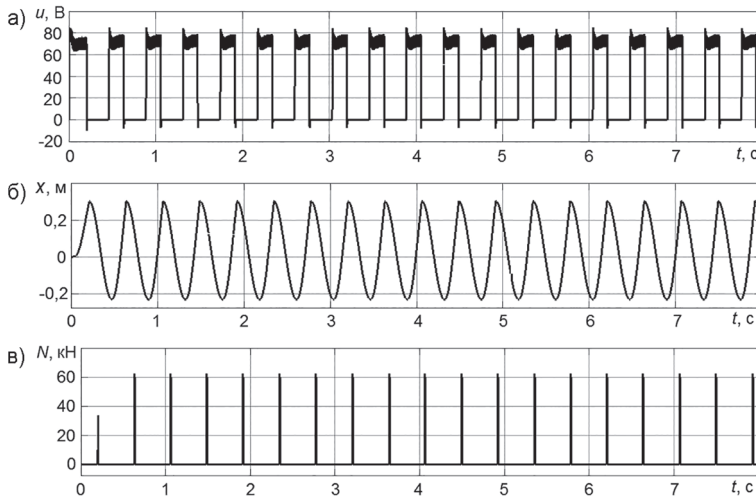


Рис. 5. Временные диаграммы рабочего процесса электромагнитного молота: напряжение на выходе блока управления (а); координата положения ударной массы бойка (б); средняя величина ударной силы (в)
 Fig. 5. Electromagnetic Hammer Working Process Timing Charts: voltage at the output of the control unit (a); coordinate of the position of the impact mass of the striker (b); average impact force (v)

телей (Switch) установленных в блоке (Блок управления). Процесс управления сводится к установке порогового значения сигнала переключателя, при достижении которого происходит переключение.

По результатам созданной динамической модели было выполнено имитационное моделирование электромагнитного молота, имеющего следующие геометрические размеры и параметры (согласно с рис. 1): диаметр бойка $d_1 = 48$ мм; внутренний диаметр магнитопровода $d_2 = 84$ мм; внешний диаметр магнитопровода $d_3 = 90$ мм; длина катушки возбуждения $h_1 = 605$ мм; длина магнитопровода $h_2 = 645$ мм; длина бойка $h_3 = 850$ мм; количество витков катушки $w = 1360$; сопротивление катушки $r = 1,2$ Ом; сопротивление вторичных цепей питания $r_s = 0,2$ Ом; масса бойка $m = 12$ кг; трение скольжения бойка $f_{тр} = 12$ Н; коэффициент жесткости возвратной пружины растяжения-сжатия $k = 700$ Н/м; коэффициент вязкого трения пружины $b = 10$ Н·с/м; постоянное напряжение на выходе выпрямительного моста $U_q = 80$ В.

По результатам имитационного моделирования на рис. 5 приведены временные диаграммы рабочего процесса молота, отражающие напряжение на выходе блока управления (рис. 5, а), циклические перемещения $x(t)$ ударной массы бойка (рис. 5, б) и среднюю величину ударной силы N , действующую на породу через рабочий инструмент (рис. 5, в).

Кинетическая энергия бойка определялась по его скорости в конце удара и составляла $A_{уд} = 120$ Дж. Работа электромагнитного молота осуществлялась в автоколебательном режиме с частотой воздействия $n_{уд} = 150$ уд/мин. Диаграммы характеризуются, что очень важно, стабильной частотой воздействия ударной массы бойка и стабильной средней величиной ударной силы, передаваемой через рабочий инструмент в разрушаемую им породу. По результатам имитационного моделирования установлена регулировочная характеристика молота, управляемого по положению бойка с величиной начального воздушного зазора $\delta_0 = 0,3$ м в положении равновесия механической системы (см. рис. 1).

Установлено, что для повышения эффективности использования процесса управления кинетической энергией бойка следует использовать область регулировочной характеристики, соответствующую положительной скорости бойка, т.е. в период его рабочего хода. Управление на данном участке регулировочной характеристики позволяет снизить амплитуду тока и его длительность, уменьшив этим потери электрической энергии.

Характерным для данной области регулирования является то, что энергия, поступающая от источника питания, необходима только для поддержания режима вынужденных колебаний в механической системе.

Из сравнения областей регулирования следует, что процесс управления кинетической энергией бойка подачей напряжения на катушку возбуждения в период возврата бойка является менее эффективной мерой управления, так как приводит к значительным потерям энергии в активных сопротивлениях катушки и вторичных цепях питания за счет увеличения амплитуды тока и его длительности.

В процессе моделирования установлена зависимость максимальной кинетической энергии бойка $T_{1\max}$ от величины начального воздушного зазора δ_0 (рис. 6), оказывающая влияние на энергию удара.

Следует также отметить, что максимальная кинетическая энергия достигается подачей напряжения на катушку возбуждения в точке, соответствующей максимальной амплитуде колебаний бойка. Данная точка на регулировочной характеристике соответствует смене знака скорости ударной массы бойка.

Заключение

Существующие приближенные методы проектирования электромагнитных молотов целесообразно совмещать с за-

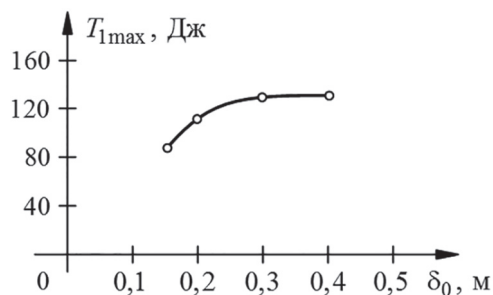


Рис. 6. Зависимость максимальной кинетической энергии бойка $T_{1\max}$ от величины начального воздушного зазора δ_0

Fig. 6. Dependence of the maximum kinetic energy of the striker $T_{1\max}$ on the value of the initial air gap d_0

дачей имитационного моделирования, что позволяет дополнительно анализировать режимы работы и производить своевременную корректировку по изменению параметров, оказывающих влияние на выходные показатели молота, что повышает качество его проектирования.

Создана имитационная динамическая модель электромагнитного молота, обладающая широкими возможностями варьирования конструктивными параметрами. Модель учитывает магнитные свойства применяемых конструкционных сталей, потоки рассеяния и потери энергии в электромеханической системе.

Применение программы Matlab Simulink позволяет средствами структурного моделирования наиболее просто реализовать имитационную динамическую модель электромагнитного молота и обеспечить качественное наблюдение быстродействующих процессов.

Использование канала управления по координате положения бойка позволяет наиболее просто управлять кинетической энергией в процессе удара. Установлено, что процесс управления кинетической энергией целесообразно осуществлять в период рабочего хода бойка, что снижает потери энергии, потребляемой от источника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жабин А. Б., Керимов З. Э. Анализ результатов исследований машин ударного действия // Горное оборудование и электромеханика. — 2020. — № 3(149). — С. 49–54. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-3-49-54.
2. Юнгмейстер Д. А., Бричкин В. Н., Исаев А. И. Конструктивные и технологические параметры пневмоударника для разделки негабарита // Обогащение руд. — 2019. — № 2. — С. 3–7. DOI: 10.17580/or.2019.02.01.
3. Rempel D., Antonucci A., Barr A., Cooper M. R., Martin B., Neitzel R. L. Pneumatic rock drill vs. electric rotary hammer drill: Productivity, vibration, dust, and noise when drilling 199 into concrete // Applied Ergonomics. 2019, vol. 74, pp. 31–36. DOI: 10.1016/j.apergo.2018.08.005.
4. 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.
5. Едыгенов Е. К. Перспективы развития механических методов безвзрывного разрушения горных пород // Комплексное использование минерального сырья. — 2018. — № 4(307). — С. 6–10. DOI: 10.31643/2018/6445.24.
6. Дмитрак Ю. В., Атрушкевич В. А., Кубрин С. С., Адамова Л. С. Определение энергии ударных импульсов в процессе измельчения горных пород для мельниц различных типов // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 3(53). — С. 468–478. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-468-478.
7. Жабин А. Б., Лавит И. М., Керимов З. Э. Результаты исследований взаимодействия бойка и инструмента при ударном разрушении горных пород // Горное оборудование и электромеханика. — 2021. — № 3(155). — С. 48–53. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-48-53.
8. Щербаков И. П., Веттегрень В. И., Мамалимов Р. И. Механизм разрушения горных пород под действием ударных волн // Физика Земли. — 2020. — № 5. — С. 23–35. DOI: 10.31857/S0002333720050099.
9. 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, no. 1, article 012094. DOI: 10.1088/1757-899X/666/1/012094.
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. Lupa S. I., Gagnon M., Muntean S., Abdul-Nour G. The impact of water hammer on hydraulic power units // Energies. 2022, vol. 15, no. 4, article 1526. DOI: 10.3390/en15041526.
12. Иванов С. Л., Шешукова Е. И., Недашковская Е. С. Классификация средств разрушения негабарита при ведении открытых горных работ // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. — 2023. — № 19. — С. 138–143. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-19-138-143.
13. 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.
14. Usanov K. M., Volgin A. V., Chetverikov E. A., Kargin V. A., Moiseev A. P., Ivanova Z. I. Strike action electromagnetic machine for immersion of rod elements into ground // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, vol. 87, no. 3, article 032050. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032050.
15. Neyman L. A., Neyman V. Y. Complex analysis of electromagnetic machines for vibroimpact technologies // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, vol. 87, no. 3, article 032026. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032026.
16. Neiman L. A., Neiman V. Y., 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. Caseiro L., Caires D., Mendes A. Prototyping power electronics systems with zynq-based boards using Matlab/Simulink a complete methodology // Electronics. 2022, vol. 11, no. 7, article 1130. DOI: 10.3390/electronics11071130.
18. Semenov A., Semenova M., Bebikhov Y., Egorov A., Vasilyev P., Kharitonov Y. Vibrating feeder electromagnetic drive model implemented in MatLab/Simulink / International Conference on

Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS 2021). 2021, pp. 88–92. DOI: 10.1109/ICOECS 52783.2021.9657343.

19. Eremochkin S. Y., Dorokhov D. V. Characteristics research of the semiconductor frequency converter in matlab simulink / XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE 2021). 2021, pp. 144–149. DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647561.

20. 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.

21. Le Roux P. F., Ngwenyama M. K. Static and dynamic simulation of an induction motor using Matlab/Simulink // Energies. 2022, vol. 15, no. 10, article 3564. DOI: 10.3390/en15103564.

22. Нейман Л. А., Нейман В. Ю. Линейные синхронные электромагнитные машины ударного действия. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. – 480 с.

23. 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, no. 1, article 012031. DOI: 10.1088/1742-6596/2049/1/012031.

24. Nikitenko G., Konoplev E., Salpagarov V., Konoplev P., Bobryshev A. Method of calculating magnetic system using finite difference method // Engineering for Rural Development. 2020, no. 19, pp. 1373–1380. DOI: 10.22616/ERDev.2020.19.TF339. **PLAS**

REFERENCES

1. Zhabin A. B., Kerimov Z. E. Analysis of research results on impact machines. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2020, no. 3(149), pp. 49–54. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-3-49-54.

2. Yungmejster D. A., Brichkin V. N., Isaev A. I. Design and technological parameters of an air hammer for cutting oversized items. *Obogashchenie Rud*. 2019, no. 2, pp. 3–7. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2019.02.01.

3. Rempel D., Antonucci A., Barr A., Cooper M. R., Martin B., Neitzel R. L. Pneumatic rock drill vs. electric rotary hammer drill: Productivity, vibration, dust, and noise when drilling 199 into concrete. *Applied Ergonomics*. 2019, vol. 74, pp. 31–36. DOI: 10.1016/j.apergo.2018.08.005.

4. 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.

5. Edygenov E. K. Prospects for the development of mechanical methods for non-explosive destruction of rocks. *Complex Use of Mineral Resources*. 2018, no. 4(307), pp. 6–10. [In Russ]. DOI: 10.31643/2018/6445.24.

6. Dmitrak Yu. V., Atrushkevich V. A., Kubrin S. S., Determination of the energy of shock pulses in the process of grinding rocks for mills of various types. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 3(53), pp. 468–478. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-468-478.

7. Zhabin A. B., Lavit I. M., Kerimov Z. E. Results of studies of the interaction of the striker and the tool during impact destruction of rocks. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2021, no. 3(155), pp. 48–53. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-48-53.

8. Shcherbakov I. P., Vettegren' V. I., Mamalimov R. I. Mechanism of rock destruction under the influence of shock waves. *Physics of the Earth*. 2020, no. 5, pp. 23–35. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0002333720050099.

9. 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, no. 1, article 012094. DOI: 10.1088/1757-899X/666/1/012094.

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. Lupa S. I., Gagnon M., Muntean S., Abdul-Nour G. The impact of water hammer on hydraulic power units. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 4, article 1526. DOI: 10.3390/en15041526.

12. Ivanov S. L., Sheshukova E. I., Nedashkovskaya E. S. Classification of means of destruction of oversized objects during open-pit mining. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2023, no. 19, pp. 138–143. [In Russ]. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-19-138-143.

13. Pavlov V. E. Investigation of the operating modes of a long-stroke electromagnetic hammer by computer simulation. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, no. 2 (145), pp. 260 – 270. [In Russ]. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-260-270.

14. Usanov K. M., Volgin A. V., Chetverikov E. A., Kargin V. A., Moiseev A. P., Ivanova Z. I. Strike action electromagnetic machine for immersion of rod elements into ground. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 87, no. 3, article 032050. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032050.

15. Neyman L. A., Neyman V. Y. Complex analysis of electromagnetic machines for vibroimpact technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 87, no. 3, article 032026. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032026.

16. Neiman L. A., Neiman V. Y., 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. Caseiro L., Caires D., Mendes A. Prototyping power electronics systems with zynq-based boards using Matlab/Simulink a complete methodology. *Electronics*. 2022, vol. 11, no. 7, article 1130. DOI: 10.3390/electronics11071130.

18. Semenov A., Semenova M., Bebikhov Y., Egorov A., Vasilyev P., Kharitonov Y. Vibrating feeder electromagnetic drive model implemented in MatLab/Simulink. *International Conference on Electro-technical Complexes and Systems (ICOECS 2021)*. 2021, pp. 88 – 92. DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657343.

19. Eremochkin S. Y., Dorokhov D. V. Characteristics research of the semiconductor frequency converter in matlab simulink. *XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE 2021)*. 2021, pp. 144 – 149. DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647561.

20. 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.

21. Le Roux P. F., Ngwenyama M. K. Static and dynamic simulation of an induction motor using Matlab/Simulink. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 10, article 3564. DOI: 10.3390/en15103564.

22. Neyman L. A., Neyman V. Yu. *Lineynye sinkhronnye elektromagnitnye mashiny udarnogo deystviya* [Linear synchronous electromagnetic impact machines], Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2021, 480 p.

23. 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, no. 1, article 012031. DOI: 10.1088/1742-6596/2049/1/012031.

24. Nikitenko G., Konoplev E., Salpagarov V., Konoplev P., Bobryshev A. Method of calculating magnetic system using finite difference method. *Engineering for Rural Development*. 2020, no. 19, pp. 1373 – 1380. DOI: 10.22616/ERDev.2020.19.TF339.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нейман Людмила Андреевна¹ – д-р техн. наук, профессор,
e-mail: neyman31@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3442-6531,

Нейман Владимир Юрьевич¹ – д-р техн. наук, зав. кафедрой,
e-mail: nv_nstu@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-8433-1610,

¹ Новосибирский государственный технический университет.

Для контактов: Нейман В.Ю., e-mail: nv_nstu@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

L.A. Neyman¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: neyman31@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3442-6531,

V.Yu. Neyman¹, Dr. Sci. (Eng.), Head of Chair,
e-mail: nv_nstu@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-8433-1610,

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russia.

Corresponding author: V.Yu. Neyman, e-mail: nv_nstu@mail.ru.

Получена редакцией 01.07.2024; получена после рецензии 19.08.2024; принята к печати 10.01.2025.

Received by the editors 01.07.2024; received after the review 19.08.2024; accepted for printing 10.01.2025.