

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УДАРНОГО УЗЛА ПЕРФОРАТОРА

В. Ю. Нейман¹, Л. А. Нейман¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: Применение в горной и строительной отраслях регулируемых электромагнитных ударных узлов перфораторов обеспечивает высокую производительность при бурении шпуров и отверстий ударно-вращательным способом. В исследованиях рассмотрены вопросы рационального проектирования электромагнитных ударных узлов перфораторов и выбора его основных параметров по заданной энергии удара. Объектом исследования является ударный узел перфоратора, реализованный по схеме однокатушечного электромагнитного привода с упругим возвратом бойка, получающий питание от промышленной сети 50 Гц. На основе результатов обобщения существующего опыта теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в разное время, разработана усовершенствованная методика для расчета основных параметров электромагнитного ударного узла перфоратора. Первый этап предварительного расчета основан на определении геометрических параметров электромагнитного ударного узла и обмоточных данных катушки возбуждения. Второй этап поверочного расчета основан на оценке энергии удара и коэффициента полезного действия. В отличие от существующих подходов поверочный расчет выполняется с использованием созданной динамической модели ударного узла, позволяющей производить анализ рабочего процесса и его визуализацию. Использование подобного подхода позволяет осуществлять расчет основных параметров ударных узлов с приемлемой для практики точностью, уменьшает затраты времени и средств на их разработку, а также повышает качество проектирования.

Ключевые слова: электромагнитный ударный узел; перфоратор; электромагнитный привод; методика расчета; выбор параметров; динамическая модель; магнитное поле; рабочий процесс; энергия удара.

Для цитирования: Нейман В. Ю., Нейман Л. А. Выбор параметров электромагнитного ударного узла перфоратора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11-1. – С. 129–142. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_129.

Selection of parameters of the electromagnetic impact unit of a perforator

V.Yu. Neyman¹, L. A. Neyman¹

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: Application of impact electromagnetic drives in the mining engineering and building sector provides high effectiveness of mechanical destruction of a rock or a building material when a bore-hole or a usual hole are drilled by means of a rotary-percussion drill. An electromagnetic impact unit should be improved because it is necessary to make its construction more rational and efficient. The paper states the results of investigations of the approach to rational design of electromagnetic impact units of perforators and selection of their basic parameters with

respect to a given value of the impact energy. The object of studies is the perforator impact unit implemented as a single-coil electromagnetic drive with the elastic reverse of its striker powered from a 50 Hz single-phase AC grid. The improved technique of the design of basic parameters of an electromagnetic impact unit is proposed. It is based on the generalized past experience of theoretical and experimental research. The first step of the design is preliminary one which is based on the determination of geometrical parameters of an electromagnetic impact unit and winding parameters of excitation coil. The second step is verifying one which is based on the estimation of the impact energy and the efficiency from the results of the first step. In contrast to existing approaches, the verifying calculation is executed by means of the created dynamical model of an impact unit that helps to analyze the operating process and visualize it. The mentioned above approach gives possibility to design basic parameters of impact units with adequate accuracy, reduces time and money expense and improves the quality of design.

Key words: electromagnetic impact unit, perforator, electromagnetic drive, design technique, selection of parameters, dynamic model, magnetic field, operating process, impact energy.

For citation: Neyman V. Yu., Neyman L. A. Selection of parameters of the electromagnetic impact unit of a perforator. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(11-1):129–142. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_129.

1. Введение

Использование электромагнитных приводов возвратно-поступательного действия наиболее просто решает вопрос преобразования электрической энергии, поступающей от сети переменного тока в кинетическую энергию поступательно движущейся ударной массы бойка [1].

По сравнению с приводами вращательного движения в возвратно-поступательных приводах отсутствует необходимость в преобразователях вида движения. Это значительно упрощает конструкцию ударных узлов, выполненных на основе электромагнитных приводов, за счет наличия всего лишь одной подвижной детали — ударного бойка [2, 3]. Отсутствие промежуточных механизмов для преобразования электрической энергии в возвратно-поступательное движение бойка позволяет упростить кинематическую структуру, что обеспечивает их высокую надежность.

Независимое регулирование энергии и частоты ударов в широких пределах создает дополнительные условия

для повышения качества выполняемых работ [4].

Перспективность применения электромагнитных приводов в горной и строительной отрасли объясняется их высокой производительностью бурения отверстий и шпуров ударно-вращательным способом [5–7].

Несмотря на простую конструкцию электромагнитного ударного узла, методики по выбору его основных параметров, которые бы обеспечивали его эффективную работу, могут существенно различаться. Однако все они основаны на непосредственной связи конструктивных особенностей ударной системы с ее выходными параметрами (энергии удара, частоты и коэффициента полезного действия).

Основным показателем для расчета электромагнитного ударного узла является энергия удара. В качестве ограничительных факторов могут приниматься предельно-допустимые параметры, такие как масса и ход бойка, максимальная скорость бойка, внешние габариты конструкции ударного узла, продолжительность включения,

автономность питающего источника и т.д. [8].

При окончательном выборе параметров электромагнитного ударного узла и его практической реализации уточняются особенности и условия его работы, что может сопровождаться некоторыми изменениями параметров от их расчетных значений, не оказывающих существенного влияния на эффективность работы ударного узла.

Предлагаемая к рассмотрению методика расчета параметров ударного узла содержит два этапа расчета.

Первый этап предварительного расчета основных параметров основан на обобщении существующего опыта теоретических и экспериментальных исследований других авторов. С целью обоснования и выбора параметров электромагнитного ударного узла за основу была взята методика предварительного расчета, получившая широкое развитие в работах А. В. Фролова и П. С. Туровского, в которой используются результаты их экспериментальных исследований.

На первом этапе расчета устанавливаются основные геометрические размеры электромагнитного привода ударного узла. В качестве основного критерия выбора выступает величина энергии удара. Определяются обмоточные данные катушки возбуждения.

Второй этап поверочного расчета необходим для установления соответствия с первым этапом предварительного расчета. По результатам поверочного расчета выполняется необходимая коррекция основных геометрических размеров. Также проверяются обмоточные данные катушки возбуждения. Определяются параметры возвратного механизма бойка. Производится оценка величины энергии удара и КПД.

В отличие от существующих методик, поверочный расчет предлагается

выполнить с привлечением динамической модели электромагнитного ударного узла, использующей данные, полученные по результатам предварительного расчета.

Исходными данными при создании модели являются: действующее значение напряжения источника питания U , В; его частота f , Гц; энергия удара бойка $A_{уд}$, Дж; частота ударов бойка n , уд/мин; геометрические размеры ударного узла и обмоточные данные катушки.

На рис. 1 представлена схема конструкции ударного узла перфоратора, основой которой является однокатушечный электромагнитный привод с упругим возвратом бойка.

Электромагнитный привод содержит катушку возбуждения 1, установленную внутри неподвижного магнитопровода. Неподвижный магнитопровод содержит ярмо 2 и примыкающие к нему с торцов верхний 3 и нижний 4 полюс.

На одной оси с катушкой возбуждения 1 с возможностью возвратно-поступательного движения установлен ударный боек 5. С одного конца боек подпружинен с помощью цилиндрической пружины сжатия 6.

При протекании тока по виткам катушки возникает электромагнитная сила, втягивающая боек 5 в катушку до соударения с рабочим инструментом 7. После обесточивания катушки возврат бойка 5 осуществляется за счет запасенной потенциальной энергии пружины сжатия 6.

Для осуществления режима бурения в конструкции перфоратора используется отдельный двигатель 8 механизма вращения рабочего инструмента.

Катушка получает питание от устройства управления (на рис. 1 не показано), подключенного к источнику напряжения промышленной сети 50 Гц.

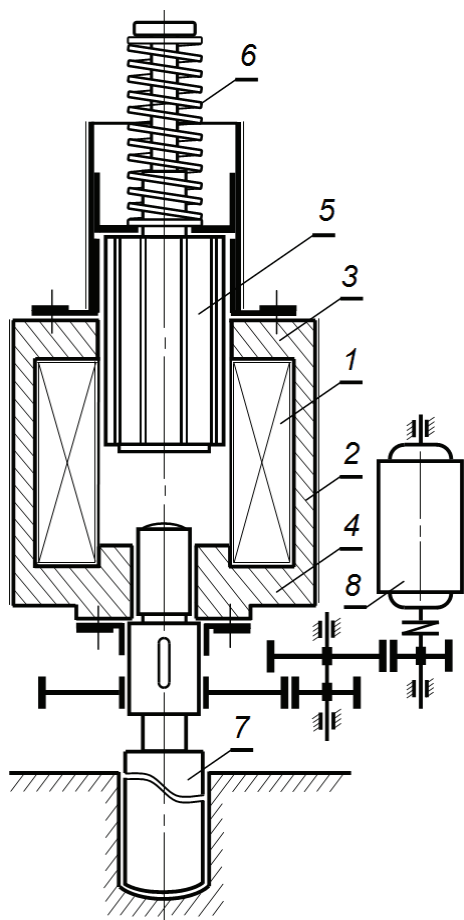


Рис. 1. Схема конструкции ударного узла перфоратора: 1 – катушка возбуждения; 2 – ярмо магнитопровода; 3 – верхний полюс; 4 – нижний полюс; 5 – ударный боек; 6 – пружина сжатия; 7 – рабочий инструмент; 8 – двигатель механизма вращения рабочего инструмента

Fig. 1. Scheme of the design of the impact unit of the hammer drill: 1 – excitation coil; 2 – magnetic circuit yoke; 3 – upper pole; 4 – lower pole; 5 – striker; 6 – compression spring; 7 – working tool; 8 – motor of the working tool rotation mechanism

2. Методика выбора параметров ударного узла

На предварительном этапе расчета определяются диаметр d_1 и длина l_6

бойка, внешний диаметр d_2 катушки возбуждения, диаметр ярма d_3 магнитопровода, длина l_k и высота h_k окна катушки, высота полюсов h_n (рис. 2), а также число витков w катушки возбуждения.

Ударная масса бойка выбирается исходя из выражения для кинетической энергии

$$m_6 = \frac{2A_{уд}}{v^2},$$

где $A_{уд}$ – энергия единичной энергии бойка, Дж; v – скорость бойка перед соударением с рабочим инструментом, м/с.

По результатам экспериментальных исследований оптимальная скорость бойка в среднем составляет $v_{опт} = 5...6$ м/с [9].

Диаметр бойка, определяющий оптимальную энергию удара, находим по экспериментальной зависимости между значением энергии удара $A_{уд}$

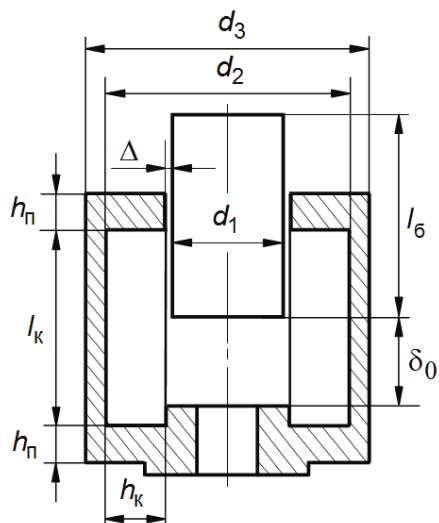


Рис. 2. Обозначение геометрических размеров электромагнитного привода

Fig. 2. Designation of geometric dimensions of the electromagnetic drive

и диаметром бойка d_1 , полученной А. В. Фроловым и представленной на рис. 3.

Длина бойка определяется исходя из найденной его массы m_6 и диаметра d_1 по формуле

$$l_6 = \frac{8A_{уд}}{\pi d_1^2 \gamma_{ст} v^2},$$

где $\gamma_{ст} = 8700 \text{ кг/м}^3$ — удельный вес стали.

$$S_{п} = 2\pi \left(\frac{d_1}{2} + \Delta \right) h_{п}$$

выбираются исходя из их равенства

$$S_6 = \frac{\pi d_1^2}{4}.$$

Следовательно, ширина одного полюса

$$h_{п} = \frac{0,125d_1^2}{0,5d_1 + \Delta},$$

где Δ — технологический зазор между бойком и полюсом, обеспечивающий свободное перемещение бойка и зависящий от конструкции электромагнитного привода.

По найденным значениям длины бойка и ширины полюса рассчитывается длина катушки возбуждения:

$$l_{к} = l_{\delta} - h_{п} = \frac{8A_{уд}}{\pi d_1^2 \gamma_{ст} v^2} - \frac{0,125d_1^2}{0,5d_1 + \Delta}.$$

Внешний диаметр d_2 катушки возбуждения следует определить через расчетные значения числа витков катушки возбуждения, необходимых для создания требуемой намагничивающей силы.

Исходя из среднего значения индукции, создаваемой магнитным потоком в рабочем воздушном зазоре, с учетом потоков рассеяния, среднее число вит-

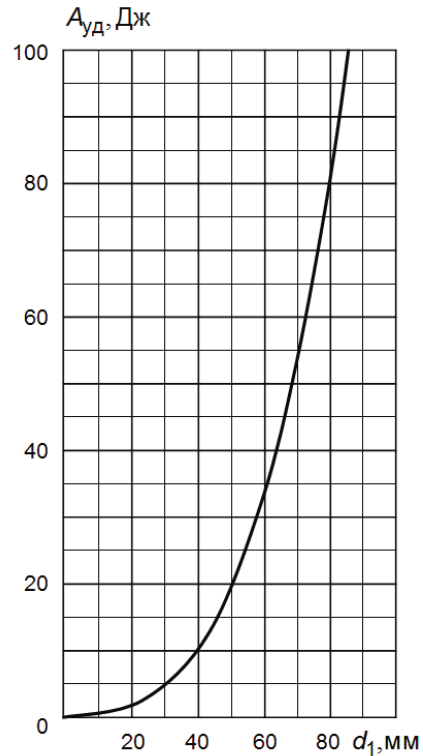


Рис. 3. Зависимость энергии удара от диаметра бойка

Fig. 3. Dependence of impact energy on the diameter of the striker

ков катушки возбуждения определяется по выражению

$$w = \frac{4\sqrt{2}Uk_U}{\omega B_{\delta} \pi d_1^2 \left(1 + \frac{l_{к} + h_{п} - 0,5\delta_0}{\sqrt{3}l_{к}} k_p \right)},$$

где U — действующее значение напряжения источника, В; ω — угловая частота источника, с^{-1} ; B_{δ} — средняя величина индукции в рабочем воздушном зазоре, Тл; δ_0 — начальный воздушный зазор, м; $k_p = 0,2 \dots 0,4$ — коэффициент рассеяния магнитного потока; $k_U = 0,8 \dots 0,9$ — коэффициент, учитывающий падение напряжения на активном сопротивлении катушки возбуждения.

По заданному среднему значению тока катушки возбуждения и допустимой плотности тока определяется сечение обмоточного провода:

$$q_s = \frac{I_{cp}}{j},$$

где I_{cp} — среднее значение тока катушки, А; $j = 2,5 \dots 12$ А/мм² — средняя плотность тока, определяемая исходя из условий охлаждения. В случае естественного способа охлаждения $j = 2,5 \dots 3$ А/мм² [10].

Среднее значение тока катушки выбирается исходя из допустимой амплитуды импульса тока применяемой однофазной сети переменного тока.

При использовании обмоточного провода круглого сечения высота окна катушки возбуждения, без учета изоляции,

$$h_k = \frac{q_{np} w}{l_k k_{зан}} = \frac{\pi d_{np}^2 w}{4 l_k k_{зан}},$$

где $q_{np} = \frac{\pi d_{np}^2}{4}$ — сечение обмоточного

провода без учета изоляции, м²; d_{np} — диаметр голого провода, м; $k_{зан} = 0,65 \dots 0,8$ — коэффициент заполнения для провода круглого сечения с учетом изоляции [11].

Внешний диаметр катушки

$$d_2 = d_1 + 2h_k + 2\Delta.$$

Внешний диаметр яра магнитопровода определяется исходя из равномерности распределения магнитного потока по сечению:

$$d_3 = \sqrt{d_1^2 + d_2^2}.$$

На этапе предварительного расчета устанавливаются основные геометрические размеры электромагнитного

ударного узла (см. рис. 2) и определяется в первом приближении среднее число витков катушки возбуждения.

В качестве примера такого расчета определим основные размеры и среднее число витков катушки возбуждения электромагнитного ударного узла, выполненного по схеме на рис. 1, с энергией удара 3 Дж и частотой ударов 3000 уд/мин. Ударный узел получает питание по однополупериодной схеме выпрямления от однофазного источника с действующим значением напряжения 220 В и частотой 50 Гц.

Принимая конечную скорость бойка $v = 5,8$ м/с, по заданной энергии единичного удара $A_{уд} = 3$ Дж расчетная масса бойка составит $m_1 = 0,18$ кг; по зависимости (см. рис. 3) диаметр бойка $d_1 = 25$ мм; длина бойка $l_6 = 45$ мм; для технологического зазора $\Delta = 1,5$ мм ширина полюса $h_n = 5$ мм; длина катушки возбуждения $l_k = 40$ мм; среднее число витков катушки возбуждения $w = 1020$; для провода круглого сечения высота окна катушки возбуждения $l_k = 20$ мм; внешний диаметр катушки $d_2 = 68$ мм; внешний диаметр яра магнитопровода $d_3 = 73$ мм (см. рис. 2).

Этап поверочного расчета сопряжен с созданием динамической модели электромагнитного ударного узла (см. рис. 1), представляющего собой многомассовую систему с тремя степенями свободы, в которой возникает необходимость учета поступательно движущихся инерционных масс, связанных упругими связями. Данные инерционные массы определяются следующими элементами конструкции ударного узла (см. рис. 1): ударный боек; рабочий инструмент; яро магнитопровода с примыкающими к нему полюсами и расположенной внутри катушкой возбуждения.

С целью упрощения модели, основываясь на том, что амплитуда колеба-

ний инерционной массы бойка более чем на порядок превышает амплитуды колебаний остальных инерционных масс, ограничимся в рассмотрении одномассовым характером модели.

В таком случае рабочий процесс ударного узла будет описываться системой дифференциальных уравнений, ограниченных одной степенью свободы механической системы, в виде

$$u(t) = ir + \frac{d\psi(i, \delta)}{dt};$$

$$m_1 \frac{d^2x}{dt^2} = -b \frac{dx}{dt} - kx - f_{\text{тр}} \operatorname{sign} \frac{dx}{dt} + f_{\text{эм}}(i, \delta),$$

где $u(t)$ — напряжение источника, В; i — ток катушки возбуждения, А; r — активное сопротивление катушки, Ом; $\psi(i, \delta)$ — потокосцепление, Вб, зависящее от тока i и величины воздушного рабочего зазора δ , м; $f_{\text{эм}}(i, \delta)$ — электромагнитная сила, Н, зависящая от тока i и величины воздушного рабочего зазора δ ; m_1 — масса бойка, кг; k — коэффициент жесткости пружины сжатия, Н/м; b — коэффициент вязкого трения пружины сжатия, Н·с/м; $f_{\text{тр}}$ — сила сухого трения скольжения бойка, Н; x — координата положения бойка, м.

Принимаем, что величина рабочего воздушного зазора $\delta(t)$ связана с координатой $x(t)$ положения бойка зависимостью $\delta(t) = \delta_0 - x(t)$, где δ_0 — начальное положение бойка при обесточенной катушке.

При нанесении бойком удара передается только часть его кинетической энергии рабочему инструменту. Вследствие отскока бойка от рабочего инструмента другая часть кинетической энергии возвращается в механическую систему ударного узла.

Количественно процессы передачи кинетической энергии могут быть

учтены с помощью коэффициента отскока бойка, зависящего от параметров ударной системы:

$$k_{\text{от}} = \frac{\bar{v}}{v},$$

где v — скорость ударной массы бойка до удара; \bar{v} — скорость ударной массы бойка по окончании удара.

Если обозначить массу рабочего инструмента через m_2 , то коэффициент отскока бойка следует рассматривать как зависимость от параметров ударной системы:

$$k_{\text{от}} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \left(k_{\text{в}} - \frac{m_1}{m_2} \right),$$

где $k_{\text{в}} \leq 1$ — коэффициент восстановления скорости.

Энергия, возвращаемая в механическую систему при отскоке бойка,

$$T_1 = \frac{m_2 v^2}{2} \left[\frac{m_2}{m_1 + m_2} \left(k_{\text{в}} - \frac{m_1}{m_2} \right) \right]^2,$$

и энергия, переходящая рабочему инструменту и далее в деформируемую им среду,

$$T_2 = \frac{m_2 v^2}{2} \left[\frac{m_1}{m_1 + m_2} (1 + k_{\text{в}}) \right]^2.$$

Решение дифференциальных уравнений выполнялось методами структурного моделирования в приложении Simulink программы Matlab [12–14].

Для решения уравнений необходимо располагать сведениями о зависимости изменения потокосцепления $\psi(i, \delta)$ и электромагнитного усилия $f_{\text{эм}}(i, \delta)$ от величины протекающего по катушке возбуждения тока и от положения ударной массы бойка. Расчет данных параметров выполняется по результатам моделирования магнитного поля с использованием программы FEEM

[15–17]. В качестве исходных данных для расчета используются геометрические параметры, установленные на этапе предварительного расчета.

На рис. 4 приведены результаты численного расчета магнитного поля магнитной системы электропривода. Результаты представлены в виде линий распределения магнитного потока для трех положений бойка. Для каждого положения бойка и различных значений тока в установленных пределах определялось электромагнитное усилие и потокосцепление в виде набора данных. По результатам такого расчета были дополнительно сформированы массивы значений статических параметров расчетных опорных точек.

Применение данного подхода позволяет максимально учесть нелинейные свойства применяемых магнитных конструкционных сталей, а также потоки рассеяния. При построении модели использовался массив значений статических параметров, содержащий 238 опорных точек. Для повышения точности расчета количества опорных точек может быть увеличено. Интерполяция функций $\psi(i, \delta)$ и $f_{эм}(i, \delta)$ в модели в случае недостающих точек осущест-

вляется с помощью встроенных кубических сплайнов.

С примерами построения и реализацией динамических моделей методами структурного моделирования можно подробно ознакомиться в [18, 19].

Расчет энергии удара осуществлялся через кинетическую энергию бойка, передаваемую в деформируемую среду в качестве полезной работы.

Коэффициент полезного действия определялся через отношение полезной мощности к потребляемой ударным узлом мощности:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1},$$

где P_1 — потребляемая активная мощность ударного узла, Вт; P_2 — полезная мощность ударного узла, Вт.

Величина активной мощности, потребляемой ударным узлом,

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt,$$

где T — период однофазного синусоидального тока, с⁻¹; $u(t)$ — мгновенная величина синусоидального напряжения

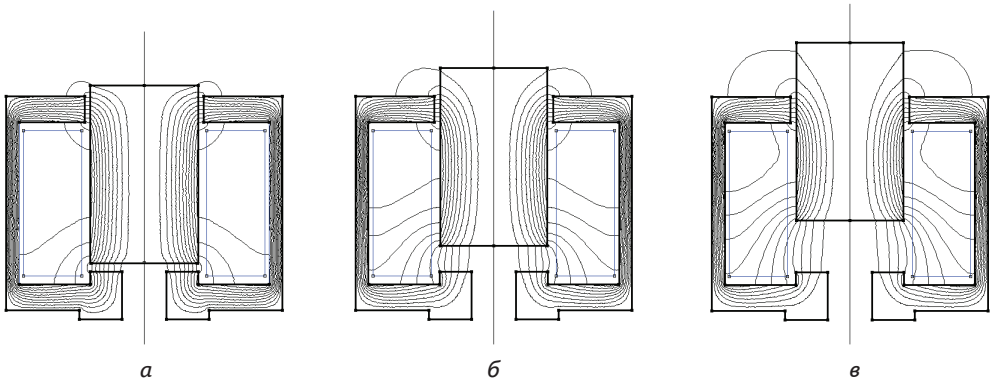


Рис. 4. Картина поля линий магнитного потока для положений бойка: $\delta_1 = 2$ мм (а); $\delta_2 = 6$ мм (б); $\delta_3 = 12$ мм (в)

Fig. 4. Picture of the field of magnetic flux lines for the striker positions: $\delta_1 = 2$ mm (a); $\delta_2 = 6$ mm (b); $\delta_3 = 12$ mm (c)

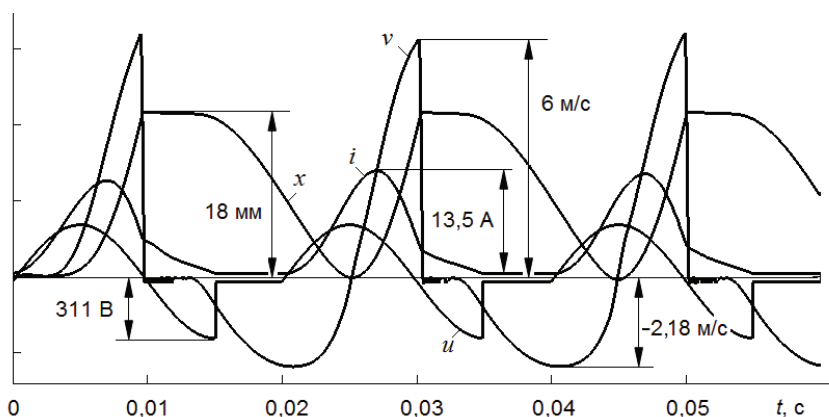


Рис. 5. Временная диаграмма рабочего процесса электромагнитного ударного узла с частотой ударов $n = 3000$ уд/мин: x — координата перемещения бойка; v — скорость бойка; u — напряжение источника; i — ток катушки возбуждения

Fig. 5. Time diagram of the working process of an electromagnetic impact unit with an impact frequency $n = 3000$ impacts /min: x — coordinate of the striker movement; v — striker speed; u — source voltage; i — excitation coil current

однофазного источника, B ; $i(t)$ — мгновенная величина тока катушки, А;

Величина полезной мощности определялась по выражению

$$P_2 = \frac{A_{\text{уд}} n}{60},$$

где n — частота ударов, уд/мин ($n = 3000$ уд/мин для случая однополупериодного выпрямления).

Жесткость пружины сжатия определяется из условия гарантированного возврата бойка в период бестоковой паузы.

3. Анализ результатов

В качестве примера динамического расчета созданной модели на рис. 5 приведена временная диаграмма рабочего процесса электромагнитного ударного узла перфоратора. При моделировании применялись исходные данные, полученные по результатам предварительного расчета.

Рабочий процесс ударного узла рассчитывается таким образом, чтобы при нанесении удара по рабочему инстру-

менту ток в катушке был минимальным или, в идеальном случае, равным нулю.

Также за время бестоковой паузы боек под действием упругих сил пружины сжатия должен успеть вернуться в исходное состояние до прихода следующей полуволны тока.

Для верификации методики выбора параметров электромагнитного ударного узла в таблице приведены данные по результатам предварительного и поверочного расчета и экспериментальные значения параметров близкого по выходным характеристикам ударного узла перфоратора ТТ-312Б, созданного предприятием ООО «ЭИТТ», г. Новосибирск, с энергией удара $A_{\text{уд}} = 3$ Дж и частотой ударов $n = 3000$ уд/мин [18].

Сравнение параметров расчетных величин с параметрами экспериментального ударного узла перфоратора указывают на удовлетворительную для инженерной практики точность проектирования. Расхождение по основным параметрам не превышает 10%.

Более высокие расчетные параметры для энергии удара $A_{\text{уд}} = 3,2$ Дж, полез-

Результаты сравнительного анализа
Results of comparative analysis

№ п/п	Параметр	Расчетная величина	Экспериментальная величина
1	Действующее значение напряжения – U , В	220	220
2	Частота источника напряжения – f , с ⁻¹	50	50
3	Энергия удара – $A_{уд}$, Дж	3,2	3
4	Частота ударов, уд/мин	3000	3000
5	Потребляемая мощность – P_1 , Вт	630	635
6	Полезная мощность – P_2 , Вт	192	180
7	Действующее значение тока – I , А	5,2	5,8
8	Коэффициент полезного действия – η	0,3	0,28
9	Диаметр бойка – d_1 , мм	25	25
10	Длина бойка – $l_б$, мм	45	45
11	Ширина полюса – $h_п$, мм	5	6,25
12	Длина катушки – $l_к$, мм	40	43
13	Высота катушки – $h_к$, мм	20	17,5
14	Число витков катушки – w	1020	1035
15	Сопrotивление катушки – r , Ом	12	12,8
16	Внешний диаметр катушки – d_2 , мм	68	60
17	Внешний диаметр ярма – d_3 , мм	73	–
18	Начальный ход бойка – δ_0 , мм	18	18
19	Коэффициент жесткости пружины – k , Н/м	6800	–

ной мощности $P_2 = 192$ Вт и коэффициента полезного действия $\eta = 0,3$ можно объяснить тем, что на этапе поверочного расчета, с целью упрощения динамической модели, потерями энергии в стальных элементах электропривода на гистерезис и вихревые токи пренебрегли. В среднем потери энергии в стали могут составлять до 10% от общих потерь [20].

Выводы

Усовершенствованная методика расчета основных параметров электромагнитного ударного узла перфоратора позволяет осуществлять их расчет с приемлемой для практики точностью, а также производить визуализацию рабочего процесса во времени.

Результаты моделирования выходных параметров и сравнение их с экспериментальной физической моделью

показывает эффективность рассматриваемого подхода при выборе и корректировке параметров электромагнитных ударных узлов, что повышает качество их проектирования.

Характер закономерностей рабочего процесса, полученных по результатам расчета созданной динамической модели, подтверждается характером экспериментальных закономерностей при исследовании физических моделей.

Полученные результаты планируется в дальнейшем использовать для совершенствования методик проектного расчета электромагнитных ударных устройств с различными способами возвратно-поступательного перемещения бойка.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *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, article 012134. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012134.
3. *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.
4. *Усанов К. М., Каргин В. А., Волгин А. В., Моисеев А. П.* Оценка режимов работы электромагнитных ударных машин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2020. — № 10(192). — С. 137–142.
5. *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, article 012094. DOI: 10.1088/1757-899X/666/1/012094.
6. *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.
7. *Neyman L. A., Neyman V. Y.* Calculation of the Vibration Activity of Design Elements of a Synchronous Impact Electromagnetic Machine with a Striker Inertial Reversal // Russian Electrical Engineering. 2021, vol. 92, no. 6, pp. 302–307. DOI: 10.3103/S1068371221060043.
8. *Usanov K. M., Volgin A. V., Kargin V. A., Moiseev A. P., Chetverikov E. A.* Electric converters of electromagnetic strike machine with battery power // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, vol. 327, article number 052031. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052031.
9. *Нейман В. Ю.* О максимальной скорости движения ферромагнитного якоря соленоидного электромагнита // Электротехника. — 2023. — № 5. — С. 13–17. DOI: 10.53891/00135860_2023_5_13.
10. *Иванов И. П., Самушлов Д. В., Свинцов Г. П., Федимиров А. А., Шпаков Е. В.* Усовершенствованная методика проектирования токопроводящих частей электромагнитных контакторов // Вестник Чувашского университета. — 2021. — № 3. — С. 73–82. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-73-82.
11. *Аполлонский С. М., Куклев Ю. В.* Электрические аппараты управления: Монография. — М.: Изд-во «Русайнс», 2016. — 318 с.
12. *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. <https://doi.org/10.3390/electronics11071130>.
13. *Semenov A., Semenova M., Bebikhov Y., Egorov A., Vasilyev P., Kharitonov Y.* Vibrating feeder electromagnetic drive model implemented in MatLab/Simulink // 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). IEEE, 2021, pp. 88–92. DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657343.

14. 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.pp.3736–3746.


15. 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, article 012031. DOI: 10.1088/1742–6596/2049/1/012031.

16. 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.

17. Krutikov K. K., Rozhkov V. V. Features of electrical and magnetic skin effect modeling from alternating electromagnetic fields in FEMM // Russian Electrical Engineering. 2020, vol. 91, no. 12, pp. 781 – 785. <https://doi.org/10.3103/S106837122012010X>.

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

19. Le Roux P. F., Ngwenyama M. K. Static and Dynamic simulation of an induction motor using Matlab/Simulink // Energies. 2022, vol. 15, no. 10, p. 3564. <https://www.mdpi.com/1996–1073/15/10/3564>.

20. Shao L., Karci A. E. H., Tavernini D., Sorniotti A., Cheng M. Design approaches and control strategies for energy-efficient electric machines for electric vehicles — A review // IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 116900–116913. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2993235. 

REFERENCES

1. 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.

2. Abramonkov D. E., Popov N. A., Abramonkov 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, article 012134. DOI: 10.1088/1757–899X/918/1/012134.

3. 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].

4. Usanov K. M., Kargin V. A., Volgin A. V., Moiseev A. P. Evaluation of operating modes of electromagnetic impact machines. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020, no. 10(192), pp. 137 – 142. [In Russ].

5. 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, article 012094. DOI: 10.1088/1757–899X/666/1/012094.

6. Abidov A. O., Ismanov O. M. Mathematical model of an electromechanical hammer drill with a rotary-impact mechanism. *Byulleten' nauki i praktiki*. 2019, vol. 5, no. 5, pp. 233 – 240. [In Russ]. DOI: 10.33619/2414–2948/42/31.

7. Neyman L. A., Neyman V. Y. Calculation of the vibration activity of design elements of a synchronous impact electromagnetic machine with a striker inertial reversal. *Russian Electrical Engineering*. 2021, vol. 92, no. 6, pp. 302–307. DOI: 10.3103/S1068371221060043.
8. Usanov K. M., Volgin A. V., Kargin V. A., Moiseev A. P., Chetverikov E. A. Electric converters of electromagnetic strike machine with battery power. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 327, article 052031. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052031.
9. Neiman V. Y. On the Top Motion Velocity of the Ferromagnetic Armature of a Solenoid Electromagnet. *Russian Electrical Engineering*. 2023, vol. 94, no. 5, pp. 306–309. [In Russ]. DOI: 10.3103/S1068371223050127.
10. Ivanov I. P., Samuilov D. V., Svincov G. P., Fedimirov A. A., Shpakov E. V. Improved methodology for designing current-carrying parts of electromagnetic contactors. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*. 2021, no. 3, pp. 73–82. [In Russ]. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-73-82.
11. Apollonskij S. M., Kuklev Yu. V. Electrical control devices: Monograf. Moscow, Publishing house “Rusajns”, 2016, 318 p. [In Russ].
12. 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. <https://doi.org/10.3390/electronics11071130>.
13. 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)*. IEEE, 2021, pp. 88–92. DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657343.
14. 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.
15. 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, article 012031. DOI: 10.1088/1742-6596/2049/1/012031.
16. Shevchenko V. P., Babiyshuk O. B., Boltentov 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.
17. Krutikov K. K., Rozhkov V. V. Features of electrical and magnetic skin effect modeling from alternating electromagnetic fields in FEMM. *Russian Electrical Engineering*. 2020, vol. 91, no. 12, pp. 781–785. <https://doi.org/10.3103/S106837122012010X>.
18. Neyman L. A., Neyman V. Yu. Linear synchronous electromagnetic impact machines. Stries: Monograph. Novosibirsk, Publishing house of NSTU, 2021, 480 p. [In Russ].
19. Le Roux P. F., Ngwenyama M. K. Static and Dynamic simulation of an induction motor using Matlab/Simulink. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 10, p. 3564. <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/10/3564>.
20. Shao L., Karci A. E. H., Tavernini D., Sorniotti A., Cheng M. Design approaches and control strategies for energy-efficient electric machines for electric vehicles – A review. *IEEE Access*. 2020, vol. 8, pp. 116900–116913. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2993235.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Нейман Владимир Юрьевич*¹ — докт. техн. наук, заведующий кафедрой, <http://orcid.org/0000-0002-8433-1610>, e-mail: nv_nstu@mail.ru;

*Нейман Людмила Андреевна*¹ — докт. техн. наук, профессор, <http://orcid.org/0000-0002-3442-6531>, e-mail: neyman31@gmail.com;

¹ Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20, Россия.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Neyman V. Yu.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department, <http://orcid.org/0000-0002-8433-1610>, e-mail: nv_nstu@mail.ru;

*Neyman L. A.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, <http://orcid.org/0000-0002-3442-6531>, e-mail: neyman31@gmail.com;

¹ Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Karl Marx Avenue, 20, Russia.

For contacts: *Neyman V. Yu.*, e-mail: nv_nstu@mail.ru.

Получена редакцией 26.06.2024; получена после рецензии 17.08.2024; принята к печати 10.10.2024.

Received by the editors 26.06.2024; received after the review 17.08.2024; accepted for printing 10.10.2024.

