

УДК 621.313.282

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА СЕЙСМОИСТОЧНИКА

В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман*Новосибирский государственный технический университет*

Актуальность исследования обусловлена перспективностью практического использования электромагнитных сейсмоисточников в малоглубинной сейсморазведке, а также необходимостью совершенствования методов их динамического расчета. Объектом исследования является регулируемый электромагнитный привод сейсмоисточника с упругим реверсом бойка. Основной задачей исследований является создание более точной математической модели электромагнитного привода сейсмоисточника. На основе уравнения электрического состояния системы и уравнений Лагранжа 2-го рода разработана уточненная математическая модель динамики электромагнитного привода в виде системы дифференциальных уравнений, учитывающих взаимодействие инерционных масс, связанных упругими связями. Модель учитывает нелинейные свойства применяемых конструкционных материалов, потоки рассеяния и различного рода потери энергии в электромеханической системе. Использование модели позволяет проанализировать динамическое состояние электромагнитного сейсмоисточника в широком диапазоне изменения входных параметров и повысить качество проектирования. Результаты выполненных исследований могут представлять определенный интерес для специалистов в области расчета и проектирования силовых электромагнитных импульсных систем ударного действия.

Ключевые слова: сейсморазведка, электромагнитный сейсмоисточник, электромагнитный привод ударного действия, математическая модель, уравнения Лагранжа 2-го рода, численный метод, методы структурного моделирования, магнитное поле, электромеханические процессы.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-38-53

Введение

При решении задач поисково-разведочных работ в инженерной геологии ведущее место занимает сейсмический метод с использованием малогабаритных невзрывных наземных сейсмоисточников [1, 2]. Данный метод основан на генерации упругих волн с помощью импульсных механических воздействий на поверхность грунта с помощью излучающей плиты [3].

Одним из перспективных решений для реализации малоглубинной сейсморазведки является применение импульсных сейсмоисточников, созданных на основе электромагнитных приводов с энергией механических воздействий до 1000 Дж [4–6]. Это обеспечивает сокращение сроков подготовки выполняемых полевых работ, их безопасность, минимальное воздействие на окружающую среду и экономическую эффективность [7].

Электромагнитный привод таких источников имеет достаточно высокий (до 40 %) КПД передачи энергии ударом и высокую идентичность сигналов при повторных воздействиях в процессе их накопления [8].

Основой многих силовых импульсных систем являются конструкции однокатушечных электромагнитных приводов с упругим реверсом ударной массы бойка [10, 11]. Подобные конструкции электроприводов просты в изготовлении, обладают высокой надежностью, а использование их в составе переносных или передвижных комплексов расширяет границы сейсмического метода [12, 13].

Следует отметить, что существующие модели, описывающие динамическое состояние электромагнитного ударного привода с упругим реверсом бойка, широко известны. Однако недостатками их описания является то, что движение взаимодействующих между собой инерционных масс и деформируемой среды характеризуется одной степенью свободы [14–16].

Всё это в разной степени оказывает влияние на точность динамических расчетов, так как в импульсе силы, генерируемой источником и передаваемой в деформируемую среду при ударе, не учитываются потери энергии в упругих связях механической системы и трение скольжения поступательно движущихся инерционных масс [17, 18].

Целью работы является создание более точной математической модели электромагнитного привода сейсмоисточника, учитывающей взаимодействие инерционных масс с упругими связями и потери энергии в электро-механической системе.

Особое внимание при создании модели следует обратить на точность воспроизведения основных нелинейностей электромеханической системы электропривода и потери энергии. Вызвано это тем, что точный анализ динамических процессов в таких системах во многом зависит от точности учтенных нелинейностей, а также различной природы потерь энергии, хотя и представляет значительные трудности в плане реализации процесса расчета созданных моделей.

1. Описание объекта исследований

Общая схема построения однокатушечного электромагнитного привода представлена на рис. 1. Основными элементами конструкции электропривода являются порождающие силовое взаимодействие ферромагнитный массивный боек 1 и статорная часть, включающая магнитопровод 2 с установленными с ним на одной оси верхним 3 и нижним 4 полюсами, выполненными в виде колец. 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 механической энергии в грунт осуществляется посредством штока 7, опирающегося на излучающую плиту 8.

При протекании тока по катушке возникает магнитное поле, взаимодействующее посредством электромагнитной силы с ферромагнитным бойком. Боек под действием этой силы ускоренно перемещается в направлении штока и наносит по нему удар.

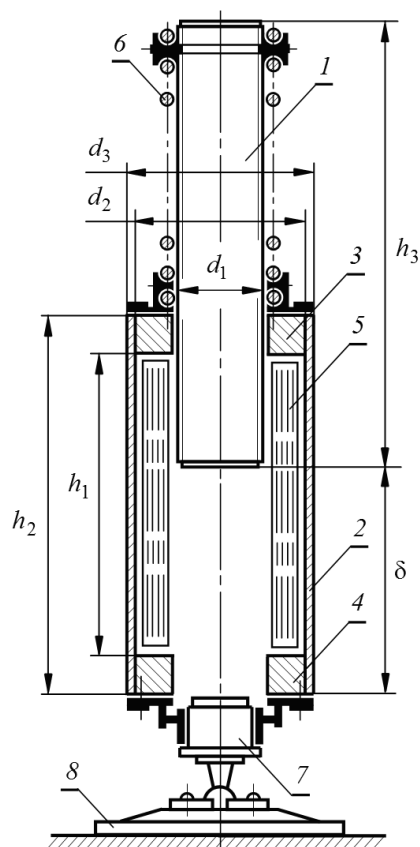


Рис. 1 – Импульсный электромагнитный сейсмоисточник

Fig. 1 – Pulse electromagnetic seismic source

В период бестоковой паузы боек под действием упругих сил пружины растяжения/сжатия стремится вернуться в исходное положение, соответствующее статическому равновесию механической системы. В результате поступательного движения боек периодически взаимодействует с торцевой поверхностью штока и генерирует импульс силы, передаваемый через излучающую плиту в грунт, совершая работу.

Управление электроприводом сейсмоисточника выполняется по положению бойка, что позволяет регулировать силу удара. Работа электропривода 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.

Электрическая подсистема электропривода получает питание от сети переменного тока либо питается автономно и представляет собой источник постоянного регулируемого напряжения.

Использование единственной катушки для управления движением ударной массы бойка с упругим реверсом и представленная компоновка конструкции электропривода больше всего отвечают требованиям минимизации габаритов сейсмоисточника

2. Математическая модель объекта

Создание математической модели сейсмоисточника связано с описанием электромеханических процессов с помощью уравнений электрического состояния и механического равновесия системы [19].

При описании процессов в электромеханической системе приняты следующие допущения:

- магнитная система электропривода представляет осесимметричную конструкцию, поэтому считаем, что силы одностороннего притяжения бойка здесь отсутствуют;
- потерями энергии на деформацию и нагрев при ударе пренебрегаем ввиду их малости в сравнении с кинетической энергией бойка;
- пренебрегаем присоединенной массой грунта и принимаем, что параметры модели грунта зависят только от свойств введенных упруго-вязких связей.

Динамическая расчетная модель механической колебательной системы сейсмоисточника представлена на рис. 2.

В расчетной модели (рис. 2) используются следующие обозначения: m_1 – масса бойка; m_2 – масса статорной части привода сейсмоисточника с катушкой возбуждения и элементами магнитопровода с полюсами; m_3 – общая масса штока и излучающей плиты; x_1 , x_2 и x_3 – координаты перемещений масс; k_1 , k_2 и k_3 – жесткости в опорах взаимодействующих масс; b_1 , b_2 и b_3 – линейные коэффициенты вязких потерь; $f_{эм}$ – сила электромагнитного взаимодействия в рабочем воздушном зазоре; $f_{тр12}$, $f_{тр32}$ – силы сопротивления движению (кулоновское трение); N_1 , N_2 – средняя величина импульсов сил в конце удара.

Связь электрической, магнитной и механической систем сейсмоисточника осуществляется через общее уравнение баланса напряжений электромеханической системы.

Исходя из уравнения электрического баланса напряжений электромеханической системы [20], учитывая необратимые потери энергии, запишем:

$$U_q - i r_s = i r + \frac{d\psi(i_\mu, \delta)}{dt}, \quad (1)$$

где U_q – напряжение сети; r_s – сопротивление токоподводящих цепей; r – активное сопротивление, зависящее от объема, занимаемого катушкой, и применяемых проводниковых материалов; $\psi = f(i_\mu, \delta)$ – потокосцепление; i , i_μ – общий ток в цепи питания и составляющая намагничивающего тока, идущая на создание магнитного поля, соответственно; δ – переменная величина рабочего воздушного зазора, зависящая от положения бойка.

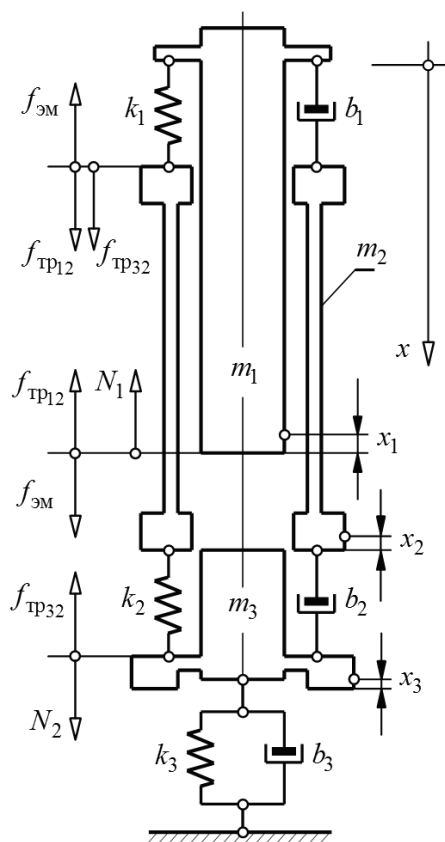


Рис. 2 – Динамическая расчетная модель колебательной системы сейсмоисточника

Fig. 2 – Dynamic calculation model of the oscillatory system of a seismic source

Уравнение (1) позволяет учесть дополнительные потери мощности от вихревых токов в стальных элементах конструкции привода, а также нелинейность характеристик применяемых конструкционных марок сталей.

Общий ток в цепи питания катушки определяется суммой тока потерь i_{π} на вихревые токи и тока намагничивания i_{μ} [21]:

$$i = i_{\pi} + i_{\mu}.$$

Величина переменного воздушного рабочего зазора обусловлена механическим движением бойка и определяется через обобщенные координаты положений поступательно движущихся относительно друг друга масс (рис. 2):

$$\delta(t) = \delta_0 - x_1(t) + x_2(t),$$

где δ_0 – начальный воздушный зазор при обесточенной катушке, обеспечивающий режим работы привода сейсмоисточника.

Начальное положение бойка соответствует его положению при обесточенной катушке возбуждения (см. рис. 1).

Выберем равновесие масс за начало отсчета (см. рис. 2). Согласно установленным связям система имеет три степени свободы.

Очевидно, что запас кинетической энергии определяется только линейными отклонениями поступательно движущихся масс от положения их равновесия при обесточенной катушке. Для учета данных отклонений принимаем независимые переменные величины x_1 , x_2 и x_3 в качестве обобщенных координат динамической системы.

Движение системы с учетом установленных обобщенных координат может быть получено с помощью уравнений Лагранжа [22, 23]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_j} - \frac{\partial T}{\partial x_j} = Q_j^{\Pi} + Q_j^{\Phi} + Q_j^B, \quad (2)$$

где T – кинетическая энергия находящихся в движении масс; Q_j^{Π} , Q_j^{Φ} , Q_j^B – обобщенные силы; $j = 3$ – число степеней свободы.

Входящие в уравнение (2) обобщенные силы Q_k^{Π} , Q_k^{Φ} и Q_k^B соответствуют потенциальной энергии, энергиям рассеяния и энергиям внешних воздействий. Силы Q_j^{Π} характеризуют жесткость опор в направлениях координат x_1 , x_2 и x_3 (см. рис. 2). Силы Q_j^{Φ} отражают их диссипативные свойства. Аналогичным образом силы Q_j^B в общем случае зависят от периодической возмущающей силы, которая является заданной функцией времени и сил трения.

Для формирования уравнений динамического состояния трехмассовой системы путем подстановки в уравнение (1) предварительно находим выражения для кинетической и потенциальной энергии, полных производных по времени и частных производных.

Выражение кинетической энергии системы складывается из трех слагаемых в виде

$$T = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{m=3} m_j \dot{x}_j^2 = \frac{m_1 \dot{x}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{x}_2^2}{2} + \frac{m_3 \dot{x}_3^2}{2}.$$

Обобщенные силы, характеризующие жесткость опор, представим в виде

$$Q_j^{\Pi} = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \sum_{j=1}^{m=3} \frac{1}{2} [k_1(x_1 - x_2)^2 + k_2(x_2 - x_3)^2 + k_3 x_3^2],$$

отсюда все три проекции по обобщенным координатам:

$$Q_1^{\Pi} = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} = -k_1(x_1 - x_2); \quad (3)$$

$$Q_2^{\Pi} = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_2} = k_1(x_1 - x_2) - k_2(x_2 - x_3); \quad (4)$$

$$Q_3^{\Pi} = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_3} = k_2(x_2 - x_3) - k_3x_3, \quad (5)$$

где Π – потенциальная энергия системы, определяемая жесткостью связей взаимодействующих масс.

Обобщенные силы, отражающие диссипативные свойства опор и их проекции по обобщенным координатам:

$$Q_j^{\Phi} = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_j} = -\frac{\partial}{\partial \dot{x}_j} \sum_{j=1}^{m=3} \frac{1}{2} \left[b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2 + b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3)^2 + b_3\dot{x}_3^2 \right];$$

$$Q_1^{\Phi} = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_1} = -b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2); \quad (6)$$

$$Q_2^{\Phi} = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_2} = b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3); \quad (7)$$

$$Q_3^{\Phi} = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_3} = b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - b_3\dot{x}_3, \quad (8)$$

где Φ – диссипативная функция (функция Рэлея).

Следует отметить, что данные производные характеризуют силы, связанные с необратимыми потерями энергии на вязкое трение.

Полные производные по времени от частных производных по кинетической энергии:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} = m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2}; \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} = m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2}; \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3} = m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2}. \quad (11)$$

Все частные производные от кинетической энергии по обобщенным координатам равны нулю $\frac{\partial T}{\partial x_j} = 0$.

Проекция обобщенных сил, вызванных только возмущающей периодической силой и силами сухого трения:

$$Q_{x_1}^B = f_{\text{эм}}(i_{\mu}, \delta) - f_{\text{тр}12} \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2); \quad (12)$$

$$Q_{x_2}^B = -f_{\text{эм}}(i_{\mu}, \delta) + f_{\text{тр}12} \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + f_{\text{тр}32} \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3); \quad (13)$$

$$Q_{x_3}^B = -f_{\text{тр}32} \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3), \quad (14)$$

где $f_{\text{эм}}(i_{\mu}, \delta)$ – возмущающая электромагнитная сила, зависящая от тока и положения бойка.

Электромагнитная сила $f_{\text{эм}}(i_{\mu}, \delta)$ в общем случае является функцией времени и зависит от тока намагничивания и положения бойка.

Энергия, передаваемая в деформируемую среду посредством излучающей плиты, и энергия, возвращаемая в систему при отскоке бойка в результате их взаимодействия, в конечном счете будет зависеть от начальной скорости излучающей плиты и начальной скорости бойка по окончании удара. Результаты этого энергообмена можно выразить через среднюю величину импульсов сил в конце удара:

$$N_1 = \frac{m_1 \bar{v}_1}{\tau_{\text{и}}}; \quad N_2 = \frac{m_3 \bar{v}_3}{\tau_{\text{и}}}, \quad (15)$$

где $\bar{v}_3$ – скорость излучающей плиты по окончании удара; $\bar{v}_1$ – скорость бойка по окончании удара (скорость при отскоке); $\tau_{\text{и}}$ – время действия ударного импульса.

С учетом ударных взаимодействий [формула (15)] для проекций обобщенных сил [формулы (12)–(14)] получим:

$$Q_{x_1}^B = f_{\text{эм}}(i_{\mu}, \delta) - f_{\text{тр}12} \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - N_1; \quad (16)$$

$$Q_{x_2}^B = -f_{\text{эм}}(i_{\mu}, \delta) + f_{\text{тр}12} \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + f_{\text{тр}32} \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3); \quad (17)$$

$$Q_{x_3}^B = -f_{\text{тр}32} \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + N_2. \quad (18)$$

Принимая во внимание выражения (1)–(18), систему связанных дифференциальных уравнений второго порядка, полученных на основе уравнений Лагранжа 2-го рода, представим в окончательном виде:

$$U_q - i r_s = i r + \frac{d\psi(i_{\mu}, \delta)}{dt}; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1 (d\dot{x}_1 - d\dot{x}_2) + k_1 (x_1 - x_2) = \\ = f_{\text{эм}}(i_{\mu}, \delta) - f_{\text{тр}12} \text{sign}(d\dot{x}_1 - d\dot{x}_2) - N_1; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
& m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} - b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - \\
& - k_1(x_1 - x_2) + k_2(x_2 - x_3) = -f_{\text{эм}}(i_{\mu}, \delta) + \\
& + f_{\text{тр}12} \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + f_{\text{тр}32} \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3); \quad (21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} - b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + b_3 \dot{x}_3 - k_2(x_2 - x_3) + \\
& + k_3 x_3 = -f_{\text{тр}32} \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + N_2. \quad (22)
\end{aligned}$$

Решение данной системы возможно с использованием численных методов.

Полезную энергию T_2 , передаваемую при нанесении удара, и энергию при отскоке бойка T_3 можно выразить как

$$T_2 = T_1 (1 - k_{\text{от}}^2); \quad T_3 = T_1 k_{\text{от}}^2, \quad (23)$$

где $T_1 = m v_1^2 / 2$ – энергия при ударе бойка; $k_{\text{от}} = \bar{v}_1 / v_1$ – коэффициент, отражающий отскок бойка после нанесения удара и характеризующий энергию, возвращаемую в механическую систему, и энергию, передаваемую в деформируемую среду; v_1 – скорость бойка перед ударом; $\bar{v}_1$ – начальная скорость бойка при отскоке.

Уравнения (19)–(23) составляют математическую модель электромагнитного сейсмоисточника. Решение нелинейных уравнений возможно с использованием численных методов.

Важным этапом такого расчета является получение нелинейных свойств модели с заданной геометрией магнитной цепи в виде зависимостей потокосцеплений $\psi(i_{\mu}, \delta)$ и электромагнитных усилий $f_{\text{эм}}(i_{\mu}, \delta)$ в функции тока и величины воздушного рабочего зазора. Точные их значения могут быть получены с помощью решения полевой задачи с использованием стандартных программ конечно-элементного моделирования магнитного поля [24–27]. Полученные на определенном шаге массивы статических параметров потокосцеплений и электромагнитных усилий могут использоваться при динамических расчетах в виде опорных точек для учета нелинейных свойств модели [28].

При наличии массива нелинейных статических параметров для дальнейшей реализации модели удобно воспользоваться методами структурного моделирования. В основе таких методов используется блочное имитационное моделирование с применением современной технологии визуально ориентированного программирования, основанного на применении численных методов [29, 30]. С методикой подобного моделирования можно более подробно ознакомиться в [31].

Заключение

Разработана уточненная математическая модель динамики электромагнитного ударного привода сейсмоисточника в виде связанных дифференциальных уравнений электрического состояния системы и механического равновесия многомассовой механической системы, полученных на основе уравнений Лагранжа 2-го рода, учитывающих взаимодействие инерционных масс и потери энергии в упругих связях.

Целенаправленное усложнение модели за счет увеличения степени свободы механической системы оправдывается повышением точности воспроизведения динамических характеристик при проведении расчетов и применяется с целью более точного определения рациональных параметров электропривода в задачах проектирования.

Для обеспечения более широких возможностей динамического расчета и качественного решения вопросов, связанных с анализом и синтезом созданной модели, рекомендуется воспользоваться средствами структурного моделирования с применением современных технологий визуально ориентированного программирования, основанного на применении численных методов.

Результаты работы могут представлять определенный интерес для специалистов в области расчета и проектирования силовых электромагнитных импульсных систем ударного действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория и практика наземной невзрывной сейсморазведки / под ред. М.Б. Шнеерсона. – М.: Недра, 1998. – 527 с.
2. **Шнеерсон М.Б.** Основные направления развития технологии полевых работ наземной сейсморазведки // Экспозиция Нефть Газ. – 2020. – № 1 (74). – С. 16–19. – DOI: 10.24411/2076-6785-2019-10065.
3. **Bakulin A., Silvestrov I., Pevzner R.** Surface seismics with DAS: An emerging alternative to modern point-sensor acquisition // The Leading Edge. – 2020. – Vol. 39 (11). – P. 808–818. – DOI: 10.1190/tle39110808.1.
4. **Ивашин В.В., Певчев В.П.** К вопросу развития импульсных наземных сейсмоисточников для сейсморазведки // Научное обозрение. – 2012. – № 2. – С. 313–321.
5. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю., Шабанов А.С.** Упрощенный расчет электромагнитного ударного привода в повторно-кратковременном режиме работы // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 50–53.
6. Способы повышения энергетических показателей однообмоточных импульсных устройств с электромагнитным возбуждением / В.Ю. Нейман, Д.М. Евреинов, Л.А. Нейман, А.А. Скотников, Ю.Б. Смирнова // Транспорт: наука, техника, управление. – 2010. – № 8. – С. 29–31.
7. Принципы повышения эффективности импульсных электромагнитных сейсмоисточников малой мощности для исследования малых глубин / В.А. Селезнев, В.А. Живодров, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2003. – № 1 (03). – С. 28–29.
8. **Певчев В.П.** Анализ влияния форсировки короткоходового импульсного электромагнитного двигателя сейсмоисточника на КПД // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 6. – С. 77–78.

9. **Нейман В.Ю.** К вопросу о рационализации рабочих процессов и выбора конструктивных схем электромагнитных ударных машин // Автоматизированные электромеханические системы / под ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 155–169.
10. Электромагнитный импульсный сейсмоисточник малой мощности / Н.А. Бритков, А.П. Малахов, Н.П. Ряшенцев, А.П. Копейкин, Г.Г. Щерба // Электромагнитные импульсные системы. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1982. – С. 160–166.
11. **Угаров Г.Г., Усанов К.М., Нейман В.Ю.** Рабочий цикл электромагнитной ударной машины с аккумулярованием магнитной энергии в период холостого хода // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1997. – № 3. – С. 76–80.
12. Strike action electromagnetic machine for immersion of rod elements into ground / K.M. Usanov, A.V. Volgin, E.A. Chetverikov, V.A. Kargin, A.P. Moiseev, Z.I. Ivanova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87. – P. 032050. – DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032050.
13. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Скотников А.А.** Структурный анализ синхронных электромагнитных машин ударного действия // Автоматизированные электромеханические системы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 106–120.
14. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Динамическая модель электромагнитного привода колебательного движения для систем генерирования низкочастотных вибраций // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 3 (28). – С. 75–87. – DOI: 10.17212/1727-2769-2015-3-75-87.
15. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин, А.Т. Малов. – Новосибирск: Наука, 1981. – 150 с.
16. **Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В.** Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
17. Имитационное моделирование рабочего процесса электромагнитного привода скважинного виброисточника / Б.Ф. Симонов, В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.О. Кордубайло // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 3. – С. 120–130. – DOI: 10.15372/FTPRPI20200312.
18. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – № 5. – С. 32–40. – DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.032-040.
19. **Манжосов В.К., Лукутина Н.О., Невенчанная Т.О.** Динамика и синтез электромагнитных генераторов силовых импульсов. – Фрунзе: Илим, 1985. – 119 с.
20. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Расчет динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем // Вестник МЭИ. – 2016. – № 6. – С. 64–71.
21. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 73–78. – DOI: 10.21293/1818-0442-2016-19-1-73-78.
22. **Добронравов В.В., Никитин Н.Н.** Курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 1983. – 576 с.

23. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 6. – С. 35–40. – DOI: 10.17588/2072-2672.2015.6.035-040.
24. **Meeker D.** Finite Element Method Magnetics. User's manual. Version 4.0. June 17, 2004.
25. **Симонов Б.Ф., Нейман В.Ю., Шабанов А.С.** Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного виброисточника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 118–126.
26. К вопросу учета главных размеров при выборе типа электромагнита по значению конструктивного фактора / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова, А.А. Скотников, О.В. Рогова // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 50а–53.
27. **Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A.** Calculation of efficiency of a DC power electromagnet for mechanotronic systems // The Third International Forum on Strategic Technologies: Proceedings of IFOST 2008. – Novosibirsk, 2008. – P. 452–454.
28. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики электромагнитного ударного узла с упругими связями // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 2 (31). – С. 94–107. – DOI: 10.17212/1727-2769-2016-2-94-107.
29. **Дьяконов В.П.** Matlab и Simulink для радиоинженеров. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 976 с.
30. **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.
31. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Линейные синхронные электромагнитные машины ударного действия. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. – 480 с. – (Монографии НГТУ).

MATHEMATICAL MODEL OF AN ELECTROMAGNETIC DRIVE OF THE SEISMIC SOURCE

Neyman V.Yu., Neyman L.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The relevance of the study is determined by the prospects for the practical use of electromagnetic seismic sources in shallow seismic exploration, as well as the need to improve the methods of their dynamic calculation. The object of the study is an adjustable electromagnetic drive of a seismic source with an elastic striker reverser. The main objective of the research is to create a more accurate mathematical model of the electromagnetic drive of a seismic source. Based on the equation of the electrical state of the system and the Lagrange equations of the second kind, a refined mathematical model of the dynamics of an electromagnetic drive has been developed in the form of a system of differential equations taking into account the interaction of inertial masses connected by elastic links. The model takes into account the nonlinear properties of the structural materials used, as well as leakage fluxes, and various types of energy losses in the electro-mechanical system. Using the model allows for the analysis of the dynamic state of an electromagnetic seismic source over a wide range of input parameters and improves the

design quality. The results of the presented research may be of particular interest to specialists in the field of calculation and design of electromagnetic pulse impact power systems.

Keywords: seismic exploration, electromagnetic seismic source, electromagnetic impact drive, mathematical model, Lagrange equations of the second kind, numerical method, structural modeling methods, magnetic field, electromechanical processes.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-38-53

REFERENCES

1. Shneerson M.B., ed. *Teoriya i praktika nazemnoi nevzryvnoi seismorazvedki* [Theory and practice of ground non-explosive seismic exploration]. Moscow, Nedra Publ., 1998. 527 p.
2. Shneerson M.B. Osnovnye napravleniya razvitiya tekhnologii polevykh rabot nazemnoi seismorazvedki [Basis survey directions of developments in onshore seismic acquisition]. *Ekspozitsiya Neft Gaz = Exposition Oil Gas*, 2020, no. 1 (74), pp. 16–19. DOI: 10.24411/2076-6785-2019-10065.
3. Bakulin A., Silvestrov I., Pevzner R. Surface seismics with DAS: An emerging alternative to modern point-sensor acquisition. *The Leading Edge*, 2020, vol. 39 (11), pp. 808–818. DOI: 10.1190/tle39110808.1.
4. Ivashin V.V., Pevchev V.P. K voprosu razvitiya impul'snykh nazemnykh seismoistochnikov dlya seismorazvedki [On the problem of the development of impulse ground seismic sources for seismic exploration]. *Nauchnoe obozrenie = Science Review*, 2012, no. 2, pp. 313–321.
5. 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 (12), pp. 757–760. DOI: 10.3103/S1068371214120104. Translated from *Elektrotehnika*, 2014, no. 12, pp. 50–53.
6. Neyman V.Yu., Evreinov D.M., Neyman L.A., Skotnikov A.A., Smirnova Yu.B. Sposoby povysheniya energeticheskikh pokazatelei odnoobmotochnykh impul'snykh ustroystv s elektromagnitnym vzbuzhdeniem [Ways to improve the energy performance of single-winding pulsed devices with electromagnetic excitation]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie = Transportation: Science, Technology, Management*, 2010, no. 8, pp. 29–31.
7. Seleznev V.A., Zhivodrov V.A., Ugarov G.G., Usanov K.M. Printsipy povysheniya effektivnosti impul'snykh elektromagnitnykh seismoistochnikov maloi moshchnosti dlya issledovaniya malykh glubin [Principles of increasing the efficiency of low-power pulsed electromagnetic seismic sources for shallow depth research]. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki*, 2003, no. 1 (03), pp. 28–29. (In Russian).
8. Pevchev V.P. The superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source. *Journal of Mining Science*, 2010, vol. 46 (6), pp. 656–665. DOI: 10.1007/s10913-010-0083-9. Translated from *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2010, no. 6, pp. 77–78.
9. Neyman V.Yu. K voprosu o ratsionalizatsii rabochikh protsessov i vybora konstruktivnykh skhem elektromagnitnykh udarnykh mashin [On the issue of rationalization of work processes and selection of design schemes for electromagnetic impact machines]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy* [Automated electromechanical systems]. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004, pp. 155–169.

10. Britkov N.A., Malakhov A.P., Ryashentsev N.P., Kopeikin A.P., Shcherba G.G. Elektromagnitnyi impul'snyi seismoistochnik maloi moshchnosti [Low power electromagnetic pulse seismic source]. *Elektromagnitnye impul'snye sistemy* [Electromagnetic pulse systems]. Novosibirsk, Institute of Mining SB AN USSR Publ., 1982, pp. 160–166.
11. Ugarov G.G., Usanov K.M., Neiman V.Yu. Operating cycle of an electromagnetic percussion machine with storage of magnetic energy during the no-load period. *Journal of Mining Science*, 1997, vol. 33 (3), pp. 253–257. DOI: 10.1007/BF02765651. Translated from *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 1997, no. 3, pp. 76–80.
12. 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, p. 032050. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032050.
13. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Skotnikov A.A. Strukturnyi analiz sinkhronnykh elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya [Structural analysis of synchronous electromagnetic impact machines]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy* [Automated electromechanical systems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 106–120.
14. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Dinamicheskaya model' elektromagnitnogo privoda ko-lebatel'nogo dvizheniya dlya sistem generirovaniya nizkочастотных vibratsii [Oscillatory motion electro-magnetic drive dynamic model for low-frequency vibration generation systems]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 3 (28), pp. 75–87. DOI: 10.17212/1727-2769-2015-3-75-87.
15. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., Fedonin V.N., Malov A.T. *Elektroprivod s lineinymi elektromagnitnymi dvigatelyami* [Electric drive with linear electromagnetic motors]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 150 p.
16. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., L'vitsin A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic presses]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
17. 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 (3), pp. 435–444. DOI: 10.1134/S1062739120036726. Translated from *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2020, no. 3, pp. 120–130. DOI: 10.15372/FTPRPI20200312.
18. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki dvukhkatu-shechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya so svobodnym vybegom boika [Mathematical model of the dynamics of a two-coil synchronous electromagnetic impact machine with a free run-out striker]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2016, no. 5, pp. 32–40. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.032-040.
19. Manzhosov V.K., Lukutina N.O., Nevenchannaya T.O. *Dinamika i sintez elektromagnitnykh generatorov silovykh impul'sov* [The dynamics and synthesis of electromagnetic power pulse generators]. Frunze, Ilim Publ., 1985. 119 p.
20. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Raschet dinamiki elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya s odnopoluperiodnym vypryamitelem [The calculation of the dynamics of the magnetic drive of oscillatory motion with half-wave rectifier]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta = Bulletin of MPEI*, 2016, no. 6, pp. 64–71.

21. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie protsessov v elektromagnitnom vibratsionnom preobrazovatele s poteryami energii v magnitoprovoде [Modelling of processes in the electromagnetic vibration transducer with energy losses in the yoke]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* = *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 73–78. DOI: 10.21293/1818-0442-2016-19-1-73-78.
22. Dobronravov V.V., Nikitin N.N. *Kurs teoreticheskoi mekhaniki* [Course of theoretical mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 576 p.
23. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' elektromekhanicheskoi sistemy kolebatelnogo dvizheniya s uprugimi svyaziyami [Mathematical model of a vibratory electromechanical system with spring linkages]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* = *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2015, no. 6, pp. 35–40. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.6.035-040.
24. Meeker D. *Finite Element Method Magnetics*. User's Manual. Version 4.0. June 17, 2004.
25. Simonov B.F., Neiman V.Yu., Shabanov A.S. Pulsed linear solenoid actuator for deep-well vibration source. *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53 (1), pp. 117–125. DOI: 10.1134/S1062739117011921. Translated from *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2017, no. 1, pp. 118–126.
26. Neiman V.Yu., A. N. Neiman L.N., Petrova A.A., Skotnikov A.A., Petrova A.A., Rogova O.V. On the issue of taking into account the main dimensions when choosing the type of electromagnet according to the value of the constructive factor. *Russian Electrical Engineering*, 2011, vol. 82 (6), pp. 328–331. DOI: 10.3103/S1068371211060095. Translated from *Elektrotehnika*, 2011, no. 6, pp. 50a–53.
27. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Calculation of efficiency of a DC power electromagnet for mechanotronic systems. *The Third International Forum on Strategic Technologies: Proceedings of IFOST 2008*. Novosibirsk, 2008, pp. 452–454.
28. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki elektromagnitnogo udarnogo uzla s uprugimi svyaziyami [A dynamic mathematical model of the electromagnetic impact unit with spring linkages]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii* = *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2016, no. 2 (31), pp. 94–107. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-2-94-107.
29. D'yakonov V.P. *Matlab i Simulink dlya radioinzhenerov* [Matlab and Simulink for radio engineers]. Moscow, DMK Press, 2016. 976 p.
30. Pavlov V.E. Issledovanie rezhimov raboty dlinnokhodovogo elektromagnitnogo molota metodom komp'yuternogo modelirovaniya [Study of long-stroke electromagnetic hammer operation modes by computer simulation]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2019, vol. 23, no. 2 (145), pp. 260–270. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-260-270.
31. Neyman L.A., Neyman V.Yu. *Lineinye sinkhronnye elektromagnitnye mashiny udarnogo deistviya* [Linear synchronous electromagnetic impact machines]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2021. 480 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Нейман Владимир Юрьевич – родился в 1960 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: силовые электромагнитные импульсные системы. Опубликовано более 300 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: nv_nstu@mail.ru).

Neyman Vladimir Yurievich (b. 1960), Doctor of Sciences (Eng.), professor, Head of the Department of Theory of Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on power electromagnetic pulse systems. More than 300 scientific papers have been published. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nv_nstu@mail.ru).



Нейман Людмила Андреевна – родилась в 1966 году, д-р техн. наук, профессор кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: линейные синхронные электромагнитные машины и технологии. Опубликовано более 150 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: neyman31@gmail.com).

Neyman Lyudmila Andreevna (b. 1966) – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the Electrotechnological Units Department in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests include linear synchronous electromagnetic machines and technology. She is the author of 150 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: neyman31@gmail.com).

Статья поступила 28 января 2026 г.
Received January 28, 2026

To Reference:

Neyman V.Yu., Neyman L.A. Matematicheskaya model' elektromagnitnogo privoda seismoistochnika [Mathematical model of an electromagnetic drive of the seismic source]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2026, no. 2 (71), pp. 38–53. DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-38-53.