

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК: 621.313.282.2

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА СКВАЖИННОГО ВИБРОИСТОЧНИКА

Б. Ф. Симонов¹, В. Ю. Нейман², Л. А. Нейман², А. О. Кордубайло¹

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,*
E-mail: Simonov_BF@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²*Новосибирский государственный технический университет,*
E-mail: nv.nstu@ngs.ru, просп. Карла Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск, Россия

Рассмотрены вопросы математического моделирования электромагнитных и электромеханических процессов в электромагнитном линейном приводе скважинного виброисточника. Предложена математическая модель электропривода на основе электромагнитной машины двойного действия, обеспечивающая широкие возможности анализа рабочих процессов в переходных и квазиустановившихся режимах работы. Изучен алгоритм расчета и пример схемной реализации модели методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink. Выполнена верификация модели путем сравнения результатов имитационного моделирования с физическим моделированием электропривода в составе скважинного импульсного виброисточника и подтверждена адекватность созданной модели. Даны рекомендации по дальнейшему улучшению модели и повышению точности при расчетах динамических характеристик.

Скважинный виброисточник, электропривод, электромагнитная машина двойного действия, математическая модель, алгоритм расчета, программа Matlab Simulink, структурная схема, имитационное моделирование, рабочий процесс, динамические характеристики модели

DOI: 10.15372/FTPRPI20200312

Истощение основных месторождений России и в мире достигает 70–80 %, увеличение разведанных запасов происходит медленно, поэтому вопрос повышения нефтеотдачи пластов разрабатываемых месторождений до сих пор актуален. Особый интерес вызывают методы виброволнового воздействия [1–3], в развитие которых внес вклад и Институт горного дела СО РАН [4]. Работы в данном направлении направлены на создание поверхностных и скважинных виброисточников.

В настоящее время интенсивно развиваются скважинные виброисточники, использование которых на больших глубинах (до 3 км) позволяет повысить эффективность вибросейсмического метода за счет необходимого силового воздействия в обсадной колонне на уровне призабойной зоны скважины [5–7]. По типу энергоносителя перспективной оказалась концепция создания скважинного виброисточника с электрическим приводом на основе импульсной элек-

тромагнитной машины двойного действия [8]. Преимущество такого электропривода объясняется необходимостью ограничения его радиальных размеров по диаметру скважины и возможностью повышения энергии удара за счет увеличения линейных размеров, а также простотой конструкции, технологичностью изготовления, высокой надежностью работы и экологичностью энергоносителя. Комплекс исследований рабочих процессов, выполненных в ИГД СО РАН на физических моделях скважинного виброисточника на основе линейного электромагнитного привода с гидравлическим силовым преобразователем осевых перемещений, подтверждает перспективность развития данного направления.

Ограничения из-за размеров скважины позволили в настоящее время сформулировать требования к конструкции виброисточника и ударного электропривода [9]. Комплекс экспериментальных исследований выявил трудности оптимизации рабочего процесса электромагнитной системы виброисточника и выбора режимов ее работы. Решить данную проблему можно с помощью математического моделирования рабочих процессов в электромагнитном приводе виброисточника, обоснованного подхода к оценке и выбору его параметров, повышения качества уровня исследований.

Цель настоящей работы — разработка имитационной модели электропривода скважинного виброисточника на основе электромагнитной машины двойного действия, позволяющей проводить всесторонний анализ рабочих процессов в переходных и квазиустановившихся режимах методами имитационного моделирования. Существующие методики расчета рабочих процессов электромагнитных машин основаны на статических подходах, т. е. не учитывают изменения параметров во времени, что осложняет их использование при решении задач динамики [10–12].

Основная трудность при проведении динамического расчета вызвана большим числом взаимосвязанных факторов, изменяющихся во времени и зависящих от скорости механического движения, степени подвижности взаимодействующих инерционных масс, характеристик упругих связей в механической системе, магнитных свойств конструкционных материалов, потоков рассеяния, различного рода потерь энергии электрической, магнитной и механической природы и т. д. [13, 14]. Применяемый электромагнитный привод представляет собой дискретную и нелинейную систему, функционирующую в переходных режимах.

При разработке имитационной модели электропривода скважинного виброисточника используется блочное моделирование с применением современной технологии визуально-ориентированного программирования с помощью базовой системы Matrix Laboratory и ее главного расширения Simulink (Matlab Simulink), основанных на применении численных методов [15, 16]. Предполагается последовательное выполнение следующих действий: определение входных и выходных переменных при моделировании; разработка и построение имитационной модели привода виброисточника; верификация модели привода; планирование и реализация плана модельных экспериментов; анализ результатов моделирования. Последние два действия зависят от качества первых двух.

Результаты моделирования позволяют на этапе проектирования обойтись без дорогостоящих физических моделей и ограничиться только данными всестороннего анализа на основе созданной имитационной модели привода виброисточника. На рис. 1 представлен фрагмент физической модели испытательного стенда виброисточника, основным элементом которого является электропривод ударного узла, выполненный по конструктивной схеме электромагнитной машины (молота) двойного действия [17].

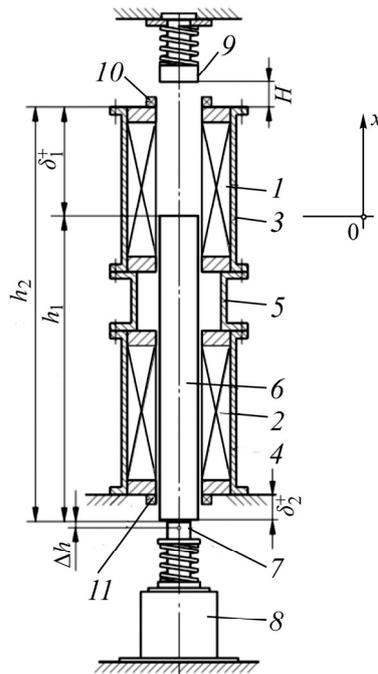


Рис. 1. Электромагнитный ударный электропривод виброисточника

Для реализации рабочего процесса ударного узла применена двухкатушечная система, состоящая из двух одинаковых секций катушек холостого 1 и рабочего 2 хода, заключенных в отдельные магнитопроводы $3, 4$, соединенные между собой звеном 5 . Каждая из катушек обеспечивает ускоренное перемещение ударной массы бойка 6 в противоположных направлениях. Боек под действием электромагнитных сил, поочередно создаваемых катушками холостого и рабочего хода, совершает возвратно-поступательные движения и в конце каждого рабочего цикла наносит удар по штоку 7 силового элемента 8 .

При выбеге бойка 6 вверх под действием электромагнитных сил катушки 1 холостого хода боек тормозится собственным весом или отбойником 9 в виде упругого звена. Величину выбега можно регулировать высотой H подъема отбойника (рис. 1). Наличие верхнего и нижнего ограничителей движения в виде штока 7 и отбойника 9 не позволяют бойку 6 выходить за установленные пределы. При холостом ходе боек запасает потенциальную энергию, которая при рабочем ходе переходит в кинетическую. Управление переключением катушек электропривода ударного узла обеспечивается по координате положения бойка с помощью датчиков $10, 11$. Боек приобретает необходимую кинетическую энергию за счет подачи на катушки двух электрических импульсов напряжения за время полного рабочего цикла. Управление работой катушек осуществляется с помощью специальной электрической схемы питания и управления (на рис. 1 схема не представлена). Подробнее работа привода ударного узла и схема для его питания и управления описаны в [9]. Подача управляющих импульсов напряжения на катушки строго синхронизируется с координатой положения бойка.

При разработке математической модели одномассовой системы с двумя катушками в качестве основного допущения принимаем, что потери энергии в магнитной цепи от действия вихревых токов и гистерезиса минимальны или равны нулю (рис. 1). Взаимодействие бойка с отбойниками, имитирующими нагрузку двухударного привода при нанесении бойком ударов по инструменту в нижнем и верхнем положении, определяется коэффициентами упругости и отскока.

В этом случае рабочий процесс привода будет характеризоваться следующей системой дифференциальных уравнений электрического равновесия и действующих в системе сил:

$$\begin{cases} u_q(t) - i_1 r_{\text{вн}} = i_1 r_1 + \frac{d\psi_1(i_1, x)}{dt}; \\ u_q(t) - i_2 r_{\text{вн}} = i_2 r_2 + \frac{d\psi_2(i_2, x)}{dt}; \\ m \frac{d^2 x}{dt^2} = f_{\text{эм1}}(i_1, x) + f_{\text{эм2}}(i_2, x) - mg - f_{\text{тр}} \text{sign} \frac{dx}{dt} - f_{\text{упр}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $u_q(t)$ — напряжение на выходе схемы питания при отключенной нагрузке; $r_{\text{вн}}$ — внутреннее сопротивление вторичных цепей питающего источника электроэнергии; r_1, r_2 — активное сопротивление в цепи катушек холостого и рабочего хода; i_1, i_2 — мгновенный ток в цепи питания катушек холостого и рабочего хода; $\psi_1(i_1, x), \psi_2(i_2, x)$ — потокосцепление катушек холостого и рабочего хода, зависящее от протекающего тока i_1, i_2 и координаты x , положения бойка; m — масса бойка; $f_{\text{эм1}}(i_1, x), f_{\text{эм2}}(i_2, x)$ — электромагнитные силы катушек холостого и рабочего хода; g — ускорение свободного падения; $f_{\text{тр}}$ — сила сухого трения скольжения бойка; $f_{\text{упр}}$ — упругая сила действующая на боек при движении вместе с ограничителями:

$$f_{\text{упр}} = \begin{cases} -k_1(x - h_2 - H) & \text{при } x \geq h_2 + H \\ -k_2 x & \text{при } x \leq 0 \\ 0 & \text{при } 0 < x < h_2 + H \end{cases}$$

здесь k_1, k_2 — коэффициенты жесткости введенных упругих связей.

Таким образом, динамическое состояние электромеханической системы описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений. В системе (1) механическая и магнитная подсистемы связаны зависимостями электромагнитного усилия $f_{\text{эм1}}(i_1, x)$ и $f_{\text{эм2}}(i_2, x)$ от тока в цепи катушек и координаты положения бойка. Взаимодействие магнитной и электрической подсистем выражается через зависимости $\psi_1(i_1, x)$ и $\psi_2(i_2, x)$.

Деформацию штока относительно ударного сечения можно свести к частично упругому удару с потерями кинетической энергии на деформацию и неполному восстановлению объемов соударяющихся тел (рис. 1). Часть кинетической энергии за вычетом потерь передается в деформируемую среду в виде полезной работы, а другая часть вследствие отскока бойка возвращается в механическую систему и используется в период обратного холостого хода.

При реализации модели привода принято, что потери энергии при ударе малы по отношению к кинетической энергии бойка T_1 . В таком случае энергия, передаваемая в деформируемую среду T_2 , и энергия, возвращаемая в механическую систему T_3 , связаны соотношениями

$$T_2 = T_1(1 - k_{\text{от1}}^2), \quad T_3 = T_1 k_{\text{от1}}^2, \quad \frac{T_3}{T_2} = \frac{k_{\text{от1}}^2}{(1 - k_{\text{от1}}^2)}, \quad (2)$$

где $k_{\text{от1}} = \bar{v}_1 / v_1$ — коэффициент отскока бойка при ударе по штоку (или отбойнику); v_1, \bar{v}_1 — скорости центра масс бойка до удара и после.

Система дифференциальных уравнений (1) с формулами передачи кинетической энергии бойка (2) составляют обобщенную математическую модель динамического состояния ударного привода, созданного по конструктивной схеме электромагнитной машины двойного действия (рис. 1). На этапе реализации модели выполнялся предварительный расчет массива значений рабочих точек статических параметров потокосцепления $\psi_1 = f(i_1, \delta_1)$, $\psi_2 = f(i_2, \delta_2)$ и электромагнитного усилия $f_{эм1} = f(i_1, \delta_1)$, $f_{эм2} = f(i_2, \delta_2)$ в зависимости от фиксированной величины, протекающего в катушках тока i_1 , i_2 и рабочего воздушного зазора δ_1 , δ_2 .

Для нахождения статических параметров решалась полевая задача по расчету магнитного поля активной зоны электромагнитной машины в программе FEMM (Finite Element Method Magnetics) [18]. Расчет выполнялся для двухмерной постановки решения задачи. Значения статических параметров определялись в режиме параметров блока по средневзвешенному тензору натяжения. Учитывались нелинейные магнитные свойства конструкционных сталей, потоки рассеяния и проводимость электропроводящих материалов.

Расчетная область активной зоны модели и результаты построения картины поля линий магнитного потока показаны на рис. 2. Все геометрические размеры, используемые в математической модели, взяты из физической модели на рис. 1.

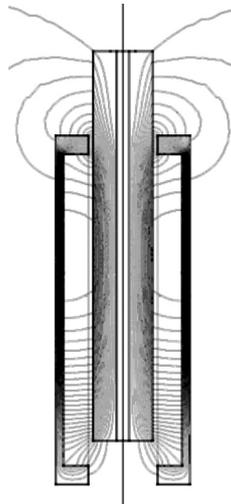


Рис. 2. Картина поля линий магнитного потока активной зоны секции катушки электропривода

На рис. 3а, б в качестве примера представлены трехмерные графики зависимостей $\psi_1 = f(i_1, \delta_1)$ и $f_{эм1} = f(i_1, \delta_1)$ катушки холостого хода, полученные по результатам расчета массива значений статических параметров, содержащего 520 расчетных опорных точек. Точность расчета статических параметров проверялась экспериментально с помощью физической модели [9].

Один из вариантов имитационной модели в виде структурной схемы в Matlab Simulink, реализованный в соответствии с уравнениями (1)–(4), изображен на рис. 4. Динамическая имитационная модель содержит три основные подсистемы: электрическую, магнитную и механическую. Электрическая подсистема включает в себя трехфазный источник электроэнергии (Three-Phase Voltage Source), мостовой трехфазный выпрямитель (Universal Bridge) и блоки управления катушками холостого (Control block_1) и рабочего хода (Control block_2). На выходе блоков управления формируется постоянное напряжение источника по сигналам датчика положения бойка.

Магнитная подсистема (Magnetic Subsystem) реализована в соответствии с первыми двумя уравнениями системы (1), отражающими электрическое равновесие модели и ее нелинейные свойства. Детализированная структурная схема Magnetic Subsystem приведена на рис. 5.

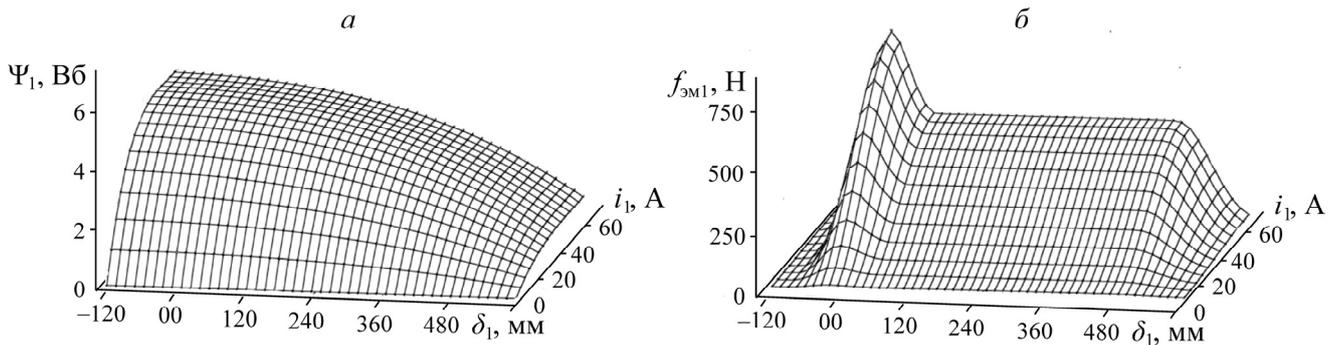


Рис. 3. Трехмерные графики расчета статических параметров: *а* — потокосцепления $\psi_1 = f(i_1, \delta_1)$; *б* — электромагнитного усилия $f_{эм1} = f(i_1, \delta_1)$

Задание функции двух аргументов для тока и координаты положения бойка, а также интерполяции статических параметров потокосцепления $\psi_1(i_1, \delta_1)$, $\psi_2(i_2, \delta_2)$ и электромагнитного усилия $f_{эм1}(i_1, \delta_1)$, $f_{эм2}(i_2, \delta_2)$ в подсистеме выполняется с помощью блоков двухмерных таблиц. Для катушки холостого хода это блоки Linkage_1, Electromagnetic Force_1, а для катушки рабочего хода — Linkage_2, Electromagnetic Force_2 (рис. 5).

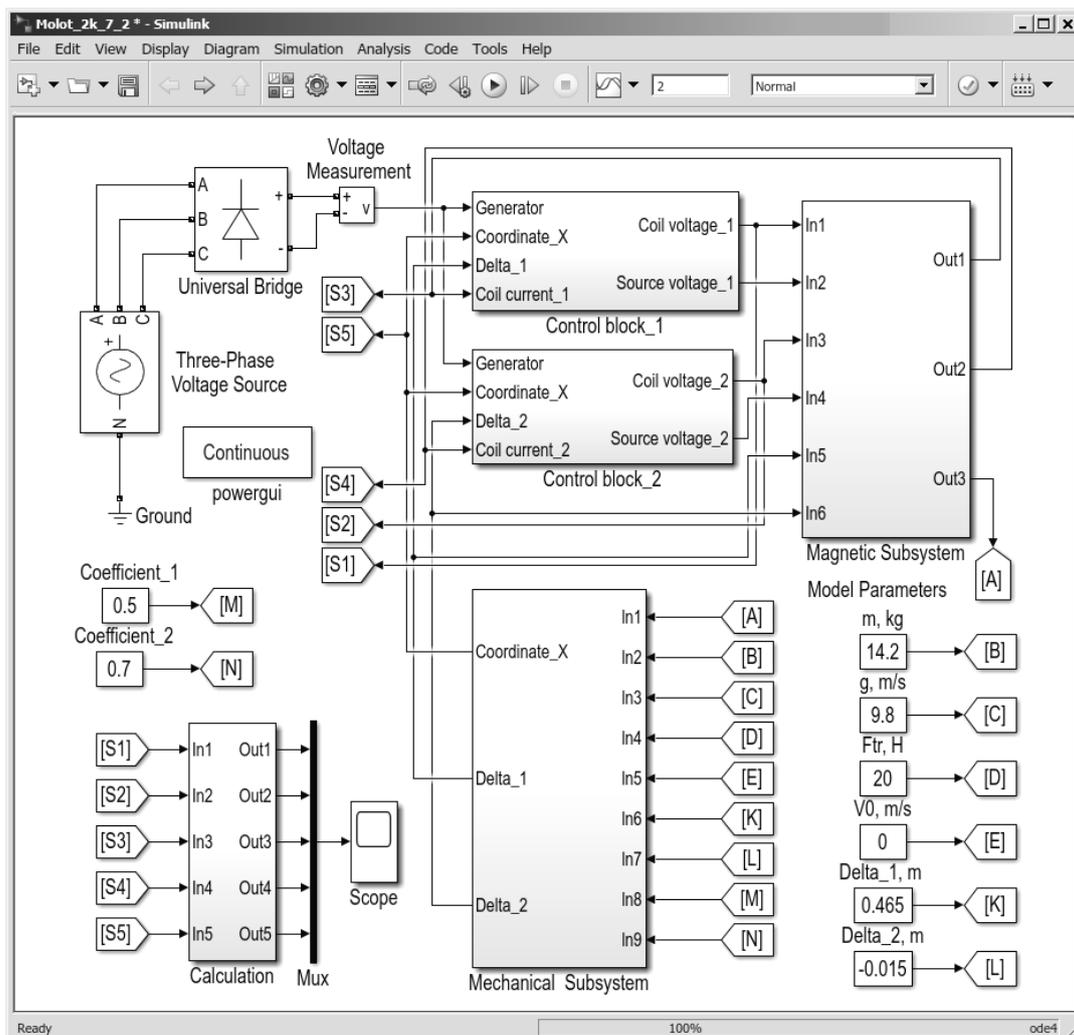


Рис. 4. Вариант структурной схемы динамической модели в Matlab Simulink

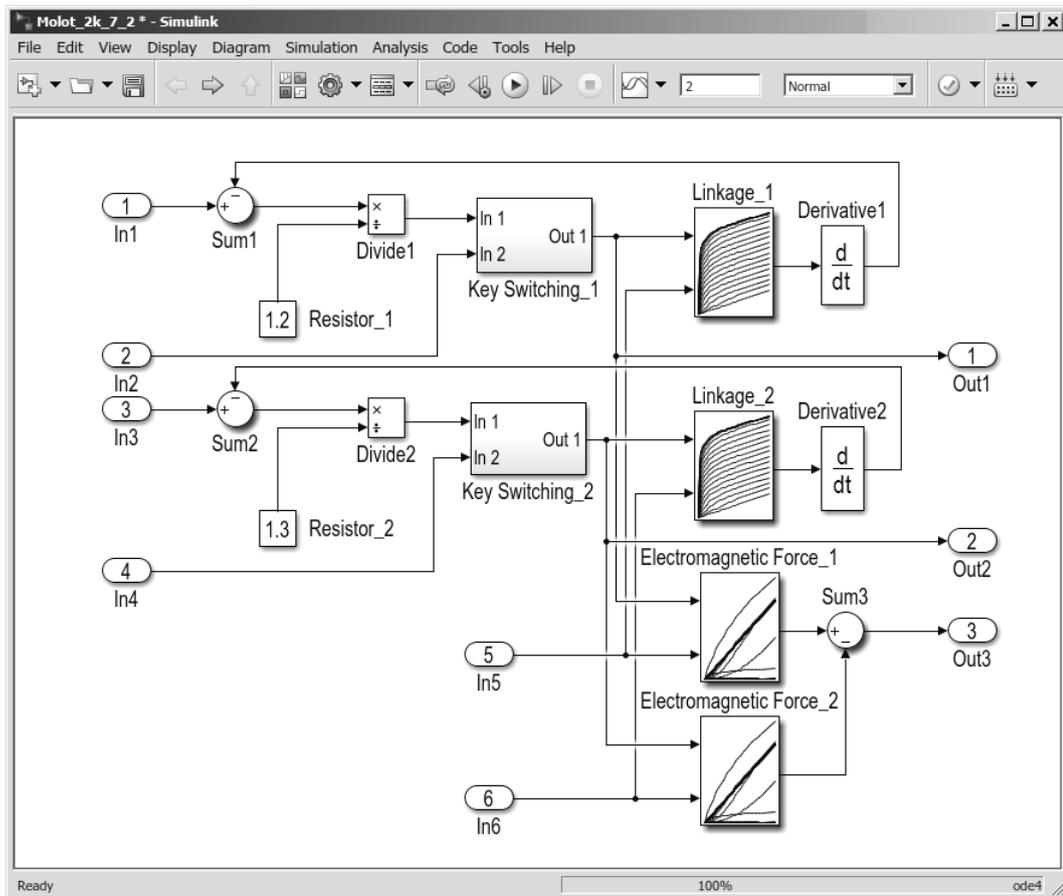


Рис. 5. Структурная схема подсистемы по учету магнитных свойств модели Magnetic Subsystem

Входные сигналы для указанных блоков двумерных таблиц — токи и положения бойка, выходные — потокосцепления и электромагнитные усилия. Принудительная коммутация силовых ключей осуществляется в схеме при помощи блоков Key Switching_1 и Key Switching_2. Запирание ключей происходит по сигналам с блоков управления катушками, входящих в электрическую подсистему.

Механическая подсистема (Mechanical Subsystem) (рис. 4) реализована в соответствии с третьим уравнением системы (1) и представлена в виде детализированной структурной схемы на рис. 6. В качестве входной переменной здесь выступает электромагнитное усилие, а выходов — координата положения бойка (Coordinate_X) и воздушные зазоры (Delta_1, Delta_2), взаимосвязанные между собой. Условия, ограничивающие перемещение бойка в крайних точках, реализованы с помощью блока Restriction block, входными величинами которого являются координата положения и коэффициенты отскока бойка. Для оценивания и фиксации выходных переменных при моделировании используется система измерения, разработанная с помощью блока Calculation, имеющего многоканальный выход на виртуальный приемник сигналов Scope (рис. 4).

При расчете динамических характеристик и верификации имитационной модели в качестве исходных данных при выполнении моделирования использовались конструктивные параметры физической модели электромагнитного ударного электропривода, приведенные в [25], с массой бойка $m = 14.2$ кг, диаметром бойка $d_1 = 48$ мм и длиной катушек холостого и рабочего хода $L_k = 605$ мм. Привод получает питание от источника постоянного напряжения $U_q = 60$ В по трехфазной схеме выпрямления.

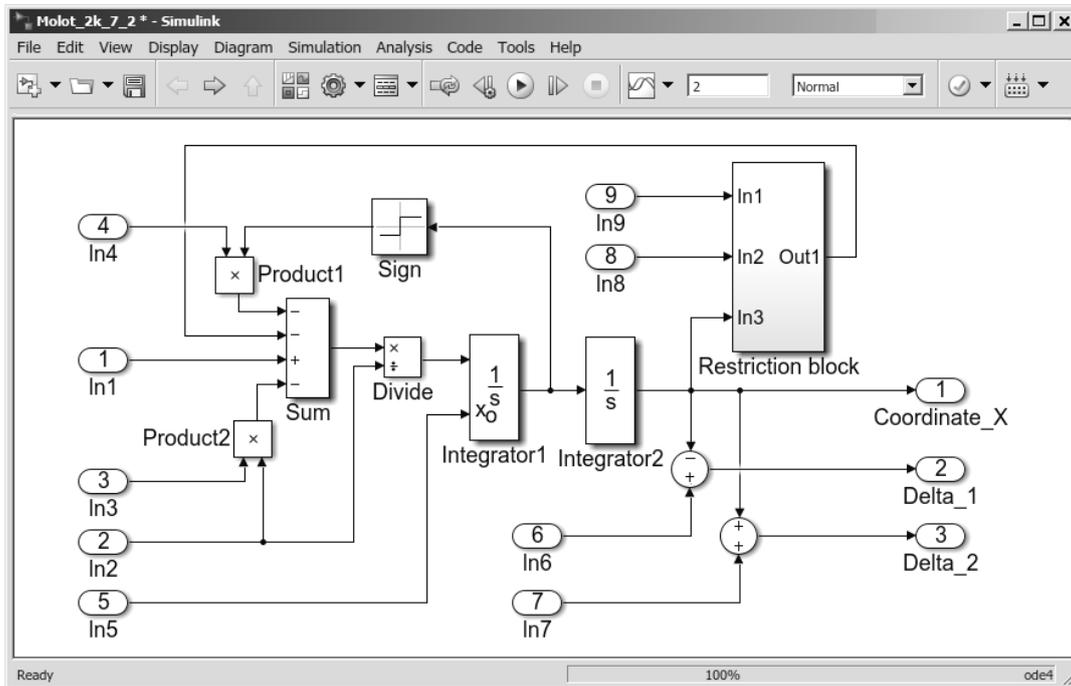


Рис. 6. Структурная схема подсистемы по учету механических свойств модели в Mechanical Sub-system

Расчет статических параметров потокосцепления и электромагнитного усилия выполнялся с помощью решения полевой задачи в соответствии с рекомендациями [19]. Результаты этих расчетов в виде трехмерных графиков статических параметров представлены на рис. 3а, б.

На рис. 7 приведены осциллограммы рабочего процесса созданной модели, которые отражают процесс включения электропривода с последующим выходом на квазиустановившийся режим работы, в виде временных зависимостей напряжений и токов катушки холостого $u_1(t)$, $i_1(t)$ и рабочего хода $u_2(t)$, $i_2(t)$.

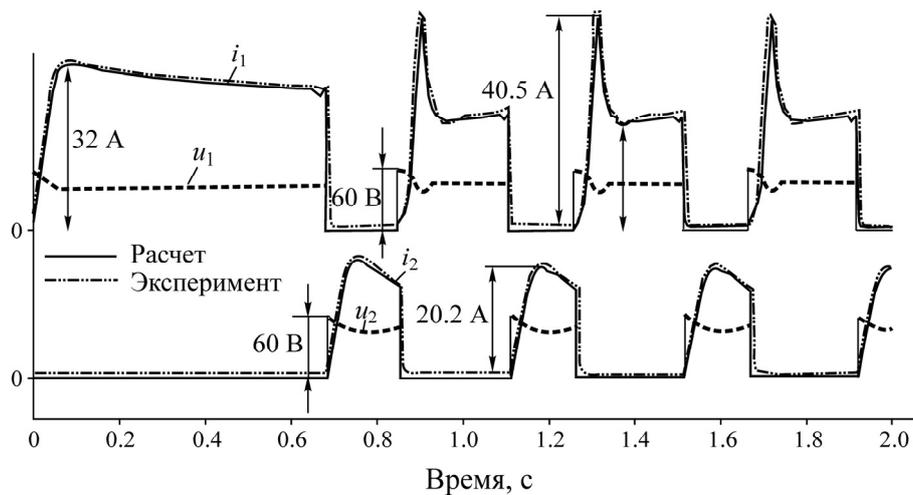


Рис. 7. Осциллограмма токов $i_1(t)$, $i_2(t)$ и напряжений $u_1(t)$, $u_2(t)$ катушек холостого и рабочего хода

Осциллограммы рабочего процесса на рис. 8 иллюстрируют зависимости скорости бойка $v(t)$ и действующего на боек электромагнитного усилия $f_{эм}(t) = f_{эм1}(t) + f_{эм2}(t)$, совмещенные с координатой положения бойка $x(t)$. Получение подобных зависимостей с помощью физической модели всегда вызывало затруднения.

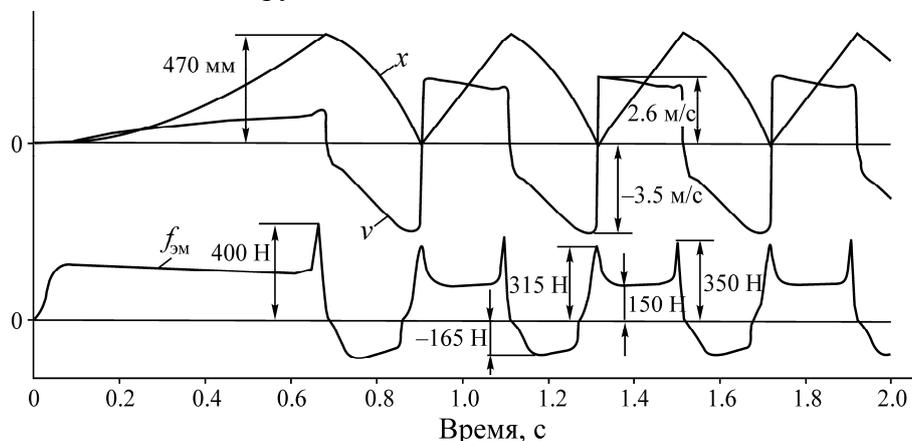


Рис. 8. Осциллограмма скорости $v(t)$, координаты $x(t)$ бойка и электромагнитного усилия $f_{эм}(t) = f_{эм1}(t) + f_{эм2}(t)$

Верификация имитационной модели выполнялась сравнением значений для тока относительно максимальных и действующих величин с показателями физической модели. Установлено качественное и количественное совпадение результатов. Расхождение расчетных и экспериментальных значений величин для тока за цикл работы электропривода при выходе на квазиустановившийся режим работы не превышает 6 %, что позволяет сделать вывод о корректности созданной модели (рис. 7).

В ходе моделирования также установлено, что расчетные зависимости изменения мгновенных величин, характеризующие рабочий процесс электромагнитного привода, а также частота ударов бойка зависят от таких параметров, как коэффициент отскока бойка, напряжение источника, сила сухого трения скольжения, выбег бойка до отбойника при холостом ходе и т. д.

ВЫВОДЫ

Точность при воспроизведении динамических характеристик модели определяется корректностью математического представления характеристик механической системы, а также магнитных свойств конструкционных материалов. Допущение об одномассовой системе обеспечивает расхождение с результатами физического моделирования не превышающее 6 % в различных режимах работы электропривода. Для увеличения точности расчета динамических характеристик перспективным вариантом построения модели электропривода виброисточника будет применение многомассовой механической системы, включающей боек, магнитопроводы с заключенными в них катушками а, также верхний и нижний ограничители движения.

Предварительный расчет рабочих точек статических параметров в виде массива значений потокосцепления и электромагнитного усилия, полученных путем решения полевой задачи в программе FEMM, позволяет повысить эффективность использования имитационной модели за счет сокращения времени расчета динамических характеристик. С помощью алгоритма расчета и варианта схемной реализации модели методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink можно варьировать набор входных параметров и выходных переменных в функции времени в переходных и квазиустановившихся режимах работы электропривода.

Созданная имитационная модель электропривода виброисточника позволяет при их проектировании проанализировать возможность применения различных конструкционных материалов, условий и режимов работы привода. Данная модель может перестраиваться под любые конструктивные особенности реальных физических моделей с целью оптимизации на этапе их разработки на уровне технических проектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беляева А. С., Кунакова Р. В., Николаева С. В.** Повышение нефтеотдачи пластов виброволновым методом // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. — 2011. — № 1. — С. 25–30.
2. **Лысенко В. Д.** Методы воздействия на пласт и повышения нефтеотдачи // Нефтепромысловое дело. — 2012. — № 2. — С. 14–17.
3. **Чичинин И. С.** Вибрационное излучение сейсмических волн. — М.: Недра, 1984. — 240 с.
4. **Serdyukov S. V. and Kurlenya M. V.** Mechanism of oil production stimulation by low-intensity seismic fields, *Acoust. Phys.*, 2007, Vol. 53, No. 5. — P. 618–628.
5. **Кремлев Г. А., Савченко А. В., Погарский Ю. В.** Разработка скважинного виброисточника гармонических колебаний с регулируемой частотой // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2014. — Т. 2. — № 4. — С. 80–84.
6. **Волновые технологии** и их использование при разработке месторождений нефти с трудноизвлекаемыми запасами / В. П. Дыбленко, Е. Ю. Марчунов, И. А. Туфанов, Р. Я. Шарифуллин, В. С. Евченко. — М.: РАЕН, 2012. — Кн. 1. — 338 с.
7. **Савченко А. В., Ступин В. П., Тюгаев Р. А., Сергеев А. А.** Разработка скважинных дебалансных виброисточников и стендов для их исследования // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2016. — Т. 2. — № 4. — С. 3–7.
8. **Симонов Б. Ф., Нейман В. Ю., Шабанов А. С.** Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного виброисточника // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 118–126.
9. **Симонов Б. Ф., Кордубайло А. О., Нейман В. Ю., Полищук А. Е.** Рабочие процессы в импульсном линейном электромагнитном приводе скважинного виброисточника // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — С. 71–78.
10. **Мошкин В. И.** Сравнение магнитных циклов импульсного линейного электромагнитного двигателя с учетом мощности потерь в его обмотке // Изв. ТПУ. — 2012. — № 4. — Т. 321. — С. 93–96.
11. **Усанов К. М., Каргин В. А., Волгин А. В.** Оценка эффективности энергопреобразований в электромагнитной ударной машине с упругим возвратным элементом // Тр. КубГАУ. — 2008. — № 1. — С. 86–87.
12. **Нейман В. Ю., Петрова А. А.** Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей // Электротехника. — 2007. — № 9. — С. 47а–50.
13. **Нейман Л. А., Нейман В. Ю.** Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Современные проблемы теории машин. — 2014. — № 2. — С. 109–110.
14. **Саттаров Р. Р., Исмагилов Ф. Р.** Периодические режимы в электромагнитных вибрационных преобразователях // Вестн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. — 2010. — Т. 14. — № 1 (36). — С. 50–55.
15. **Черных И. В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. — М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. — 288 с.

16. **Герман-Галкин С. Г.** Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: учеб. пособие. — СПб.: КОРОНА принт, 2001. — 320 с.
17. **Ряшенцев Н. П., Малов А. Г., Носовец А. В., Угаров Г. Г., Федонин В. Н., Малахов А. П., Антонов А. Н.** Электромагнитные молоты. — Новосибирск: Наука, 1979. — 268 с.
18. **Буль О. Б.** Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM: учеб. пособие. — М.: Изд. центр “Академия”, 2005. — 336 с.
19. **Neyman V. Y., Neyman L. A., and Petrova A. A.** Calculation of efficiency of DC electromagnet for mechatronic systems, IFOST 2008: Proceedings of the 3d Int. forum on strategic technology, June 23–29, 2008, Novosibirsk, Tomsk. — P. 452–454.

Поступила в редакцию 21/X 2019

После доработки 14/III 2020

Принята к публикации 29/V 2020