

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 004.942

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ ANSYS MAXWELL¹

Статья поступила в редакцию 21.06.2016, в окончательном варианте – 17.01.2017.

Жаутиков Бахыт Ахатович, доктор технических наук, профессор, Атырауский государственный университет им. Х. Досмухамедова, 060011, Республика Казахстан, г. Атырау, пр. Студенческий, 212, e-mail: bakhyt.zhautikov@atgu.kz

Айкеева Алтын Аманжоловна, кандидат технических наук, доцент, Карагандинский государственный университет им. академика Е.А. Букетова, 100028, Республика Казахстан, г. Караганда, ул. Университетская, 28, e-mail: aikееva@mail.ru

Маханов Канат Мэтович, кандидат физико-математических наук, доцент, Карагандинский государственный университет им. академика Е.А. Букетова, 100028, Республика Казахстан, г. Караганда, ул. Университетская, 28, e-mail: makanov@inbox.ru

Жаутиков Фархат Бахытович, магистр технических наук, Карагандинский государственный индустриальный университет, 101400, Республика Казахстан, г. Темиртау, пр. Республики, 30, e-mail: farhat_zhautikov@mail.ru

Роговая Ксения Сергеевна, магистр технических наук, Карагандинский государственный университет им. академика Е.А. Букетова, 100028, Республика Казахстан, г. Караганда, ул. Университетская, 28, e-mail: ksusharogova@mail.ru

Мухтарова Перизат Асхатовна, студент, Азиатско-Тихоокеанский университет технологий и инноваций, 57000, Малайзия, Куала-Лумпур, Technology Park Malaysia, Bukit Jalil, e-mail: mukhtarova_p@mail.ru

Телман Ердос Муратович, инженер, Карагандинский государственный университет им. академика Е.А. Букетова, 100028, Республика Казахстан, г. Караганда, ул. Университетская, 28, e-mail: erdosm@list.ru

Представлено описание процесса получения решения для виртуальной модели электромагнитной подъемной установки на основе использования программы ANSYS MAXWELL. Задача моделирования решалась для определения основных параметров элементов электромагнитной подъемной установки (силы Лоренца, напряженности магнитного поля, магнитной индукции). Имитационное моделирование динамических процессов взаимодействия основных постоянных магнитов скипа и обмоток катушки, расположенной в стволе шахты электромагнитной подъемной установки, позволило без дорогостоящих лабораторных экспериментов расчетным путем определить оптимальные параметры системы. В работе приведены результаты моделирования для пяти виртуальных экспериментов, соответствующих различным параметрам модели. Эти результаты относятся к значениям параметров (силы Лоренца, напряженности магнитного поля и магнитной индукции) в каждый из моментов времени в период от нуля до восьми секунд. По результатам моделирования были установлены закономерности для основных динамических характеристик электромагнитной подъемной установки.

Ключевые слова: электромагнитная подъемная установка, конечно-элементное моделирование, «скип-постоянный магнит-катушка», программа ANSYS, этапы решения задачи, индукция магнитного поля, сила Лоренца, напряженность магнитного поля

RESEARCH OF MAGNETIC PARAMETERS OF ELECTROMAGNETIC LIFTING INSTALLATION WITH THE SOFTWARE PACKAGE ANSYS MAXWELL

The article has been received by editorial board 21.06.2016, in the final version – 17.01.2017.

Zhautikov Bakhyt A., D.Sc. (Engineering), Professor, Atyrau State University named after Kh. Dosmukhamedov, 212 Studencheskaya Ave., Atyrau, 060011, Republic of Kazakhstan, e-mail: bakhyt.zhautikov@atgu.kz

¹Статья написана на основании результатов исследований, выполняемых в рамках грантового финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан по приоритету «Энергетика и машиностроение» по теме № 0686/ГФ4 «Разработка системы автоматического управления и комплексной защиты энергосберегающей электромагнитной подъемной установки».

Aykeeva Altyn A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Karaganda State University named after E.A. Buketov, 28 Universitetskaya St., Karaganda, 100028, Republic of Kazakhstan, e-mail: aikeeva@mail.ru

Makhanov Kanat M., Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Karaganda State University named after E.A. Buketov, 28 Universitetskaya St., Karaganda, 100028, Republic of Kazakhstan, e-mail: makanov@inbox.ru

Zhautikov Farkhat B., Master of technical science, Karaganda State Industrial University, 30 Respublika Ave., Temirtau, 101400, Republic of Kazakhstan, e-mail: farhat_zhautikov@mail.ru

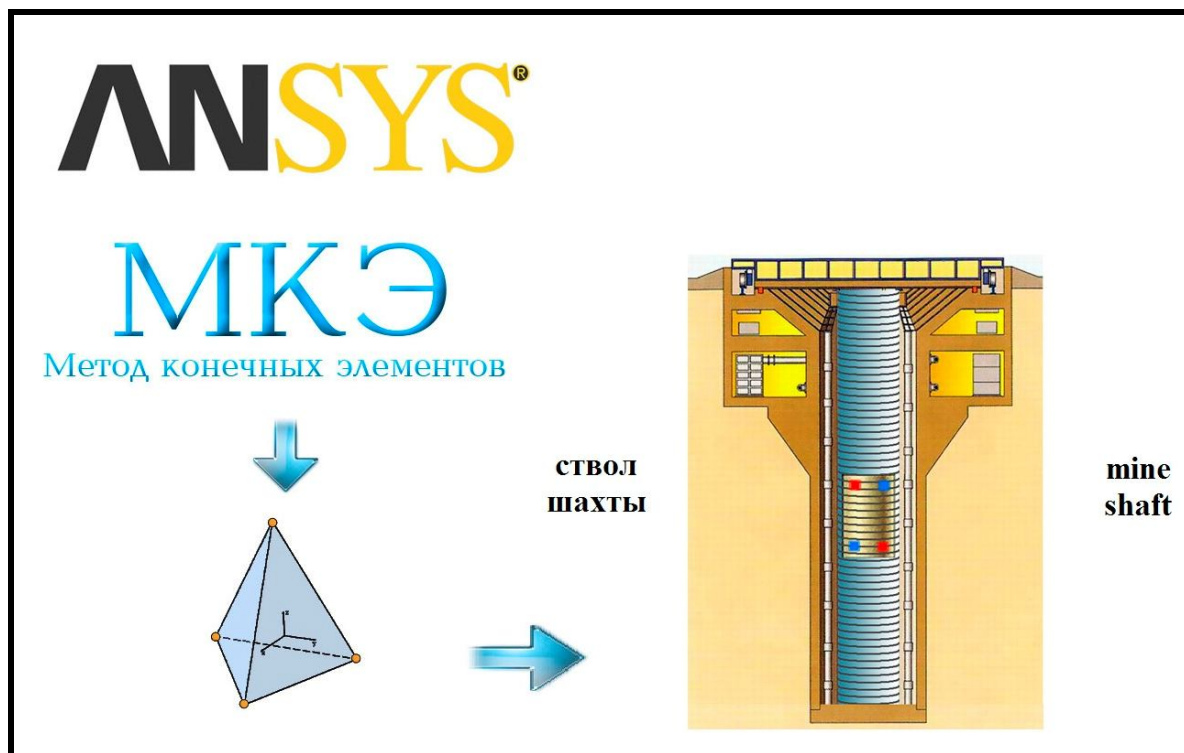
Rogovaya Ksenia S., Master of technical science, Karaganda State University named after E.A. Buketov, 28 Universitetskaya St., Karaganda, 100028, Republic of Kazakhstan, e-mail: ksusharogovaya@mail.ru

Mukhtarova Perizat A., student, Asia Pacific University of Technology and Innovation, Technology Park Malaysia, Bukit Jalil, Kuala Lumpur, 57000, Malaysia, e-mail: mukhtarova_p@mail.ru

Telman Erdos M., engineer, Karaganda State University named after E.A. Buketov, 28 Universitetskaya St., Karaganda, 100028, Republic of Kazakhstan, e-mail: erdosm@list.ru

The description of the process of obtaining solutions for the virtual model of the electromagnetic lifting installation through the use of ANSYS MAXWELL program. Simulation problem is solved to determine the main parameters of the elements electromagnetic lifting installation (Lorentz force of the magnetic field, magnetic induction). Simulation of dynamic processes of interaction between the main permanent magnets and the coil windings skip located at mines electromagnetic lifting installation trunk allowed without expensive laboratory experiments by calculation to determine the optimum parameters of the system. The paper presents the simulation results for the five virtual experiments corresponding to different model parameters. These results refer to parameter values (the Lorentz force, the magnetic field intensity and magnetic flux density) in each of the time points during the period from zero to eight seconds. According to the simulation results for the basic laws of dynamic performance electromagnetic lifting installation it was installed.

Keywords: electromagnetic lifting installation, finite element modeling, "skip-a permanent magnet-coil", ANSYS program, steps for solving the problem, magnetic field, Lorentz force of the magnetic field strength



Введение. В связи с необходимостью роста производительности подъемных установок (ПУ) в условиях нестабильных нагрузок, а также из-за увеличения глубины добычи полезных ископаемых, возрастают требования к качеству, надежности и долговечности элементов ПУ. Поэтому следует уделять *большее* внимание данной проблематике.

Подъемная установка является самым важным звеном при транспортировке полезных ископаемых на поверхность. Однако существующие технологии, применяемые в малоэффективных шахтных подъемных машинах, приводят к увеличению себестоимости добычи полезных ископаемых. Решением данной проблемы может быть создание электромагнитной ПУ (ЭМПУ), с помощью которой возможна вертикальная транспортировка грузов гораздо *большой* массы и с меньшим расходом энергоресурсов.

Однако разработка сложных структурных элементов подъемных установок требует создания соответствующих методов расчета с использованием современных информационных технологий. Их развитие (включая аппаратные и программные средства) значительно расширило возможности моделирования устройств на предпроектной стадии; разработки оптимальных конструкций таких устройств и т.д. Эти возможности могут быть использованы для различных целей: учебных, инженерных, научно-исследовательских. В данной статье ставилась цель продемонстрировать обширные возможности использования современного пакета моделирования для исследования работы ЭмПУ в шахтах. Данную статью следует рассматривать как продолжение [5].

Общая характеристика проблематики работы. Развитие средств компьютерного проектирования и расчета конструкций обеспечило возможность передачи информации, созданной в одной «CAD (Computer-aided design) – CAM (Computer-Aided Manufacture)» – системе, в другие аналогичные системы. В результате объекты, созданные, например, средствами CAD, могут в дальнейшем использоваться при подготовке производства (то есть применяться в средствах, относимых к категории CAM); при расчете конструкций на прочность и на иные характеристики, то есть использоваться средства категории CAE (Computer-aided engineering); учитываться при планировании и реализации корпоративного проекта, то есть обрабатываться с помощью продуктов категории PDM (Product data management) [16, 17].

Во многих случаях логически взаимосвязанное применение средств CAD и CAE приводит к существенному ускорению подготовки расчетных моделей для исследования прочностных, динамических, иных свойств и характеристик проектируемой конструкции. Отраженный в [1] практический опыт, накопленный авторами, показывает, что в технологической цепочке расчетов подготовка средствами CAD геометрической модели для последующего использования метода конечных элементов (МКЭ) уменьшает время создания модели объекта минимум в три раза. При этом внедрение автоматизированных расчетов на основе математического моделирования позволяет осуществить комплексный анализ и оптимизацию изделия (конструкции) задолго до изготовления его опытного образца.

Современные методы исследований/расчетов базируются на системном анализе и учитывают вышеперечисленные особенности технологии изготовления и эксплуатации изделий с использованием моделирования машин, реализации моделей методами нелинейной механики деформирования твердого тела и механики разрушения. Применение таких методов к расчету подъемных сосудов (скипов) шахтных и карьерных ЭмПУ является актуальной задачей в отношении обеспечения надежности их работы; экспериментальной проверки результатов, полученных теоретическим путем. При этом современные теоретические методы расчета и проектирования различных изделий и конструкций предполагают активное использование МКЭ.

Постановка задачи и обоснование подходов к ее решению. Мы ставили следующие конечные цели: разработать метод расчета (моделирования) работы ЭмПУ с учетом конструктивно-технологических факторов; создать систему автоматизированного анализа работы этой установки для обеспечения ее прочности, надежности и долговечности. Возможности, обеспечивающие достижение этих целей, удобно реализованы в пакете прикладных программ (ППП) ANSYS. Указанный пакет может быть использован и при теоретических, аналитических исследованиях [2] рассматриваемых задач.

Программное обеспечение ANSYS Maxwell в отличие от таких программ как Scilab (<http://www.scilab.org/>), Octave (<https://www.gnu.org/software/octave/>), FreeMat (<http://freemat.sourceforge.net/>) характеризуется сочетанием широты возможностей и простоты освоения. Все развитие софта ANSYS для электромагнитных расчетов сосредоточено на Maxwell и других продуктах, полученных поглощением фирмы Ansoft в 2008 г.

Программа ANSYS Maxwell нацелена на то, чтобы разработчик электротехнического оборудования тратил как можно меньше времени непосредственно на решение задач, связанных с расчетами полей. Для этого предусмотрена библиотека свойств материалов, удобные средства для параметризации модели и автоматизации расчетов при различных сочетаниях параметров [4, 10–13].

ANSYS Maxwell с высокой точностью и максимальной скоростью позволяет рассчитать статические, гармонические электромагнитные и электрические поля, а также переходные процессы в полевых задачах. Также этот пакет предоставляет огромный инструментальный и современный постпроцессор для расчёта и оптимизации электромеханических устройств, основанный на анализе виртуальных моделей.

В [5] была показана эффективность использования ЭмПУ для реализации транспортных операций в шахтах. Авторами настоящей статьи были созданы модели работы электромагнитов ЭмПУ, комплексно учитывающие конструктивно-технологические факторы [7, 14, 15]. Для реализации этих моделей были разработаны алгоритмы и программное обеспечение, предназначенные для расчета взаимодействия электромагнитов скипа и направляющих устройств ЭмПУ. Эти объекты и их взаимосвязи показаны на рисунке 1.

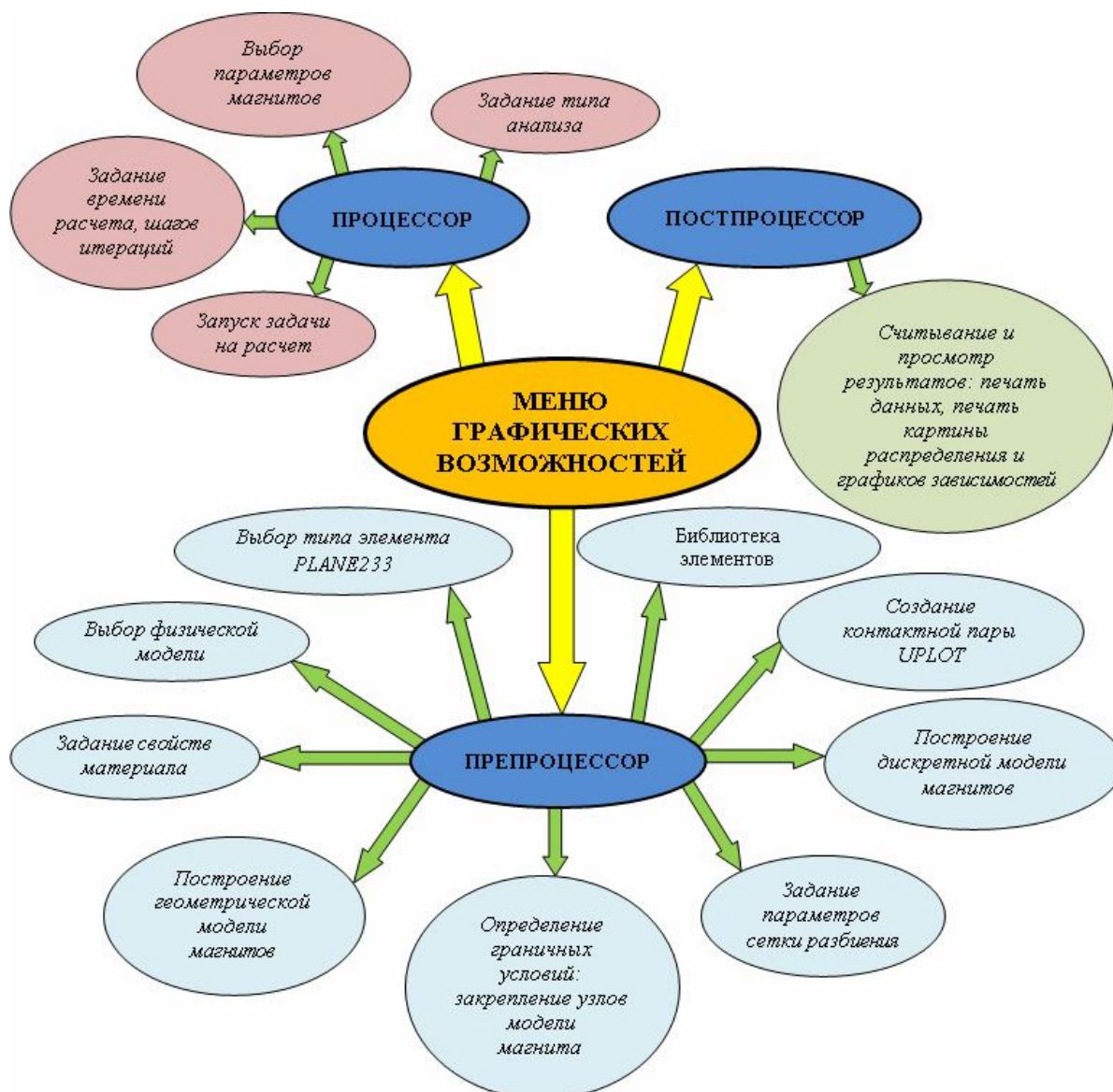


Рисунок 1 – Взаимосвязи объектов, используемых при моделировании электромагнитной подъемной установки в ППП ANSYS

Укажем функциональное назначение отдельных блоков.

* Препроцессор – обеспечивает этап подготовки задачи к моделированию.

* Выбор типа элемента PLANE 233 – выбор характеристик элемента моделирования (температуры нагрева, сопротивления, прочности, плотности и т.д.).

* Создание контактной пары UPLOT – создание граничной области взаимодействия элементов моделирования.

* Процессор – проводит расчет (решение) задачи моделирования;

* Постпроцессор – обеспечивает просмотр результатов решения задачи моделирования.

Возможности современных компьютеров и ППП позволяют достаточно полно реализовывать системный подход к описанию многофакторных динамических состояний для органически взаимосвязанных звеньев единой динамической системы. В данном случае это система «скип + постоянный магнит + электромагнит» [2, 3, 5].

Конечно-элементный анализ с использованием ANSYS состоит (рис. 1) из трех этапов: начальной подготовки данных (препроцессор); получения решения (процессор); обработки результатов моделирования (постпроцессор) [5].

МКЭ, программно реализованный в ANSYS, широко известен и пользуется популярностью среди инженеров, которые занимаются вопросами, не только динамики и прочности устройств, но также и исследованиями электромагнитных полей.

В ППП ANSYS имеется более 100 различных типов конечных элементов (КЭ). Как правило, в различных вариантах ППП доступны не все виды КЭ из указанных 100. Это зависит от того, какие конкретные виды расчетов могут использоваться в применяемом варианте ППП.

При разработке модели для данного исследования свойства материалов брались из библиотеки программы ANSYS Maxwell. Материалом для постоянного магнита был выбран элемент NdFeB (неодим-железо-бор). Это класс редкоземельных магнитов, изготавливаемых прессованием или литьем из интерметаллида $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Преимуществами этого класса магнитов являются высокие магнитные свойства (B , H и $(B-H)_{\text{max}}$), а также относительно невысокая стоимость. В связи со слабой коррозионной устойчивостью изделия из этого материала обычно покрываются медью, никелем или цинком. В нашем случае предполагается, что магниты должны быть покрыты никелем. Материалом для обмоток катушки была выбрана медь. Дополнительно выбирались размеры скипа и катушки.

Имитационное моделирование процессов взаимодействия элементов ЭМП, защищенной инновационным патентом № 27177 «Электромагнитная подъемная установка (варианты)», Республика Казахстан, имеет целью без дорогостоящих лабораторных экспериментов расчетным путем определять допустимые и оптимальные параметры эксплуатации системы.

В ходе исследований была разработана модель движения скипа в стволе шахты. Она основывается на эффекте магнитной левитации. Суть метода состоит в том, что на скипе или под скипом располагаются постоянные магниты, а по всей высоте ствола шахты располагаются витки катушки. В этом случае скип с постоянными магнитами движется в стволе примерно по оси катушки. Взаимодействие постоянных магнитов, размещенных на скипе с магнитным полем катушки, через которую протекает ток, обеспечивает возможность перемещения скипа вверх или его плавного спуска вниз [3–6].

Результаты проведенного моделирования. Мы исследовали 5 моделей с различными сочетаниями геометрических параметров скипа и катушки. Исходные данные, использованные для имитационных моделей, приведены в таблице 1, а геометрические параметры моделей – в таблице 2. Начальная модель имела малые геометрические размеры.

Общее количество тетраэдральных КЭ, использованных в каждой модели составило 821544. При этом каждый КЭ имел 20 узлов. Такое сочетание обеспечивало возможность детального расчета характеристик электромагнитных полей в расчетной области.

Размеры тетраэдральных элементов составляли от 0.001 до 0.01 мм. Как это и принято в МКЭ, элементы с меньшими размерами использовались в областях с большими градиентами изменения электромагнитного поля – в данном случае в районе расположения магнитов на скипе. При этом только часть КЭ имели форму «правильных» тетраэдров.

Таблица 1 – Исходные данные для разработки имитационных моделей

Вид модели	Элемент	x, см	y, см	z, см	dx, см	dy, см	dz, см	$t_{\text{двиг}}$, с
Начальная модель	Скип	0	0	-1	0	1.4	1	8
	Катушка	0	1.5	-2.5	0	2.5	2.5	0
Модель 1	Скип	0	0	-1	0	1	1	8
	Катушка	0	1.1	-2.5	0	2.1	2.5	0
Модель 2	Скип	0	0	-1	0	0.6	1	8
	Катушка	0	0.7	-2.5	0	1.7	2.5	0
Модель 3	Скип	0	0	-1	0	1.8	1	8
	Катушка	0	1.9	-2.5	0	2.9	2.5	0
Модель 4	Скип	0	0	-1	0	2.2	1	8
	Катушка	0	2.3	-2.5	0	3.3	2.5	0

Таблица 2 – Геометрические параметры имитационных моделей

Вид модели	Радиус скипа, см	Высота скипа, см	Внутренний радиус катушки, см	Внешний радиус катушки, см	Высота катушки, см
Начальная модель	1.4	2	1.5	2.5	5
Модель 1	1	2	1.1	2.1	5
Модель 2	0.6	2	0.7	1.7	5
Модель 3	1.8	2	1.9	2.9	5
Модель 4	2.2	2	2.3	3.3	5

На рисунке 2 представлена расчетная схема для имитационной модели ЭМП в программе ANSYS. Данные для этой модели были выбраны в соответствии с позицией «начальная модель» в таблицах 1 и 2.

В ходе исследования основными параметрами, которые необходимо было определять (рассчитывать), были такие: показатели вектора магнитной индукции « B », напряженности магнитного поля « H » и силы Лоренца « J ». Сила Лоренца направлена по вертикальной оси (оси « z »), согласно размещению катушки в стволе шахты по ее периметру.

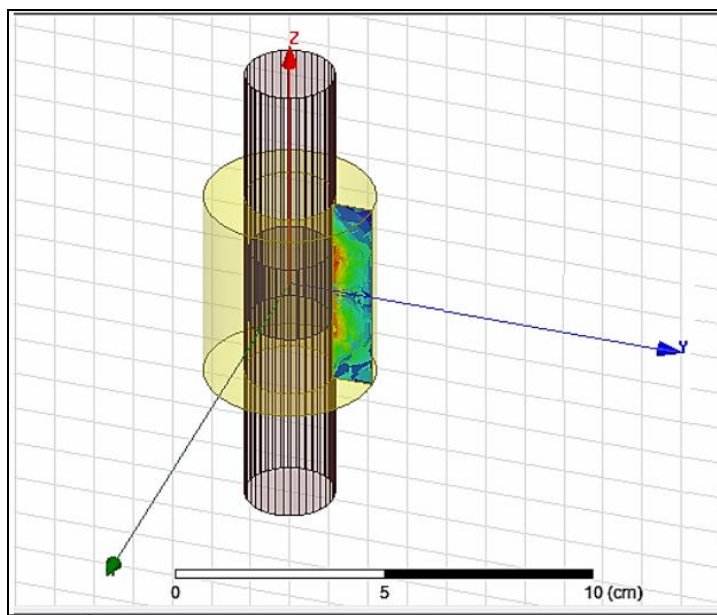


Рисунок 2 – Расчетная схема к моделированию «начальной модели» ЭМПУ в ППП ANSYS

Далее для каждой секунды процесса моделирования в графической форме представлены результаты взаимодействия массива из постоянных магнитов (размещенных на скипе) с магнитным полем катушки (размещенной в стволе шахты). Результаты показаны в виде семейств кривых для « B », « H » и « J ». Данные для построения зависимостей (графиков) были выбраны исходя из максимальных параметров для каждой «модельной» секунды проведенных вычислительных экспериментов.

На рисунке 3 представлено семейство зависимостей параметров силы Лоренца от времени для всех пяти экспериментальных моделей. Как видно из этого графика, самые высокие и самые низкие значения силы Лоренца наблюдаются у модели № 4. Для нее были заданы самые большие геометрические параметры (размеры).

Самые низкие максимальные и минимальные значения параметров силы Лоренца имеют место у модели № 2 (для нее были заданы самые малые геометрические параметры).

Таким образом, силы Лоренца (по результатам расчетов) оказались прямо пропорциональны геометрическим параметрам моделей.

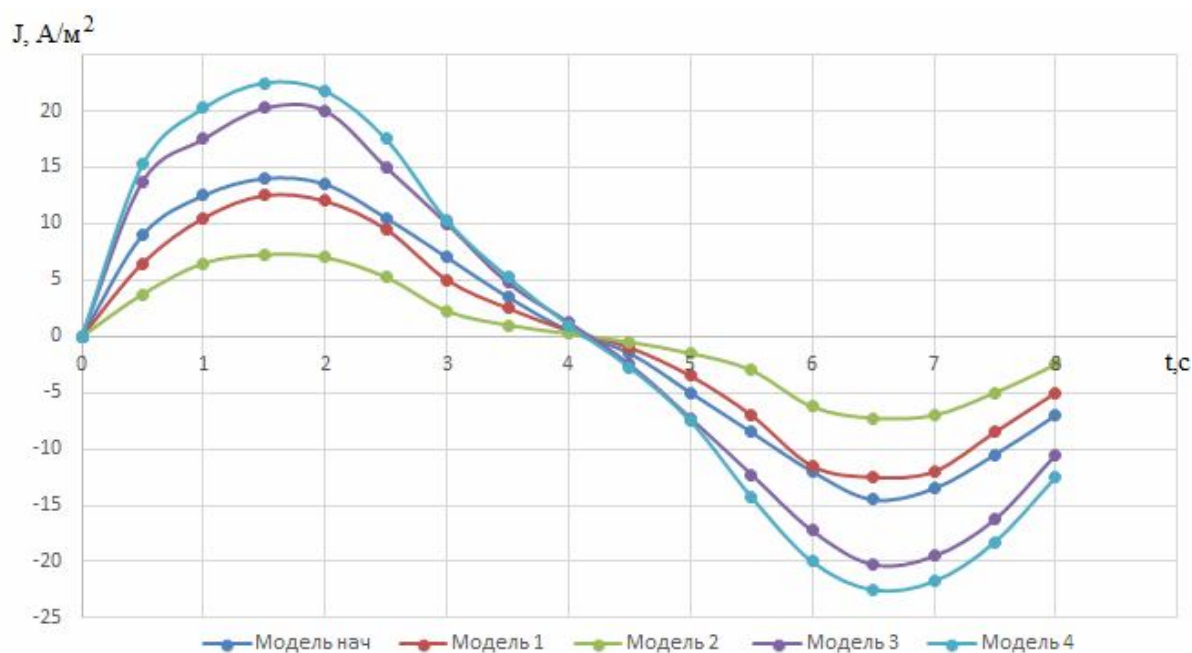


Рисунок 3 – Семейство зависимостей силы Лоренца от времени для пяти вариантов моделей

Такая же картина наблюдается и на рисунке 4, где представлена зависимость параметров силы Лоренца от перемещения скипа по вертикальной оси (оси «z»). Чем больше геометрические параметры скипа, тем больше значения силы Лоренца.

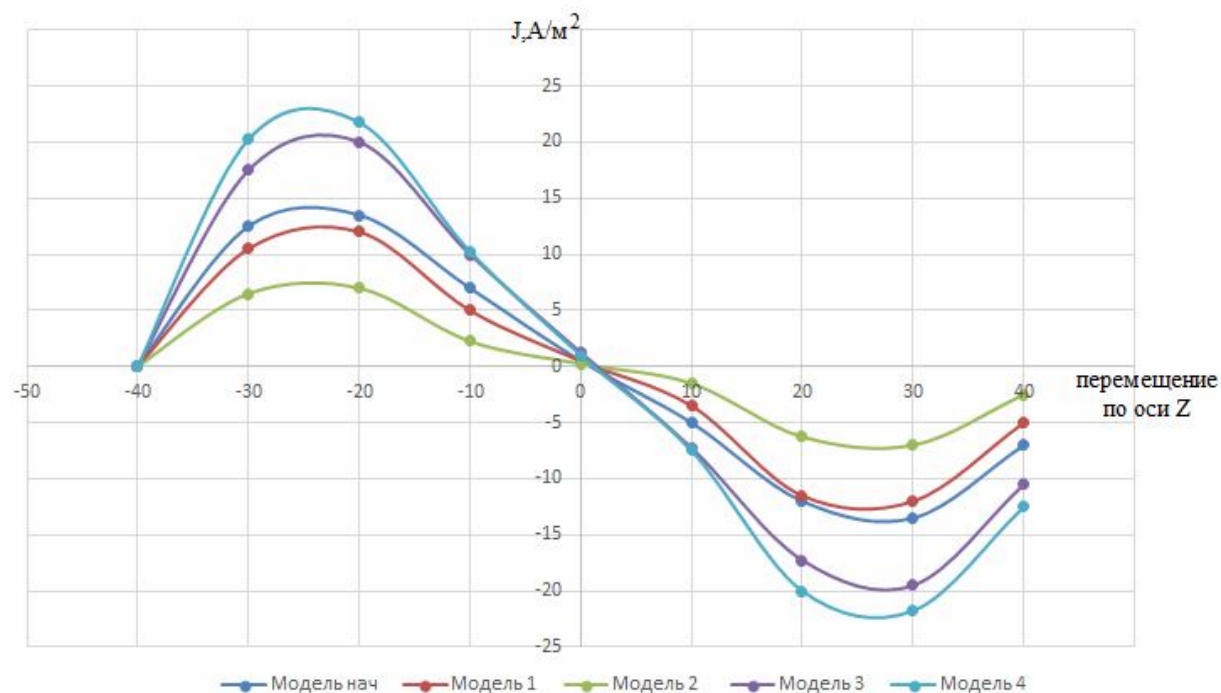


Рисунок 4 – Семейство зависимостей силы Лоренца от перемещения скипа по оси «z»

На рисунке 5 представлено семейство зависимостей параметров напряженности магнитного поля от времени для всех пяти экспериментальных моделей. Как видно из графиков, самые высокие и самые низкие значения напряженности магнитного поля наблюдаются также у модели № 4. Самые малые максимальные и минимальные значения параметров напряженности магнитного поля – у модели 2 (напомним, что для нее были заданы самые малые геометрические параметры). Таким образом, напряженности магнитного поля оказались пропорциональными геометрическим параметрам рассматриваемых моделей.

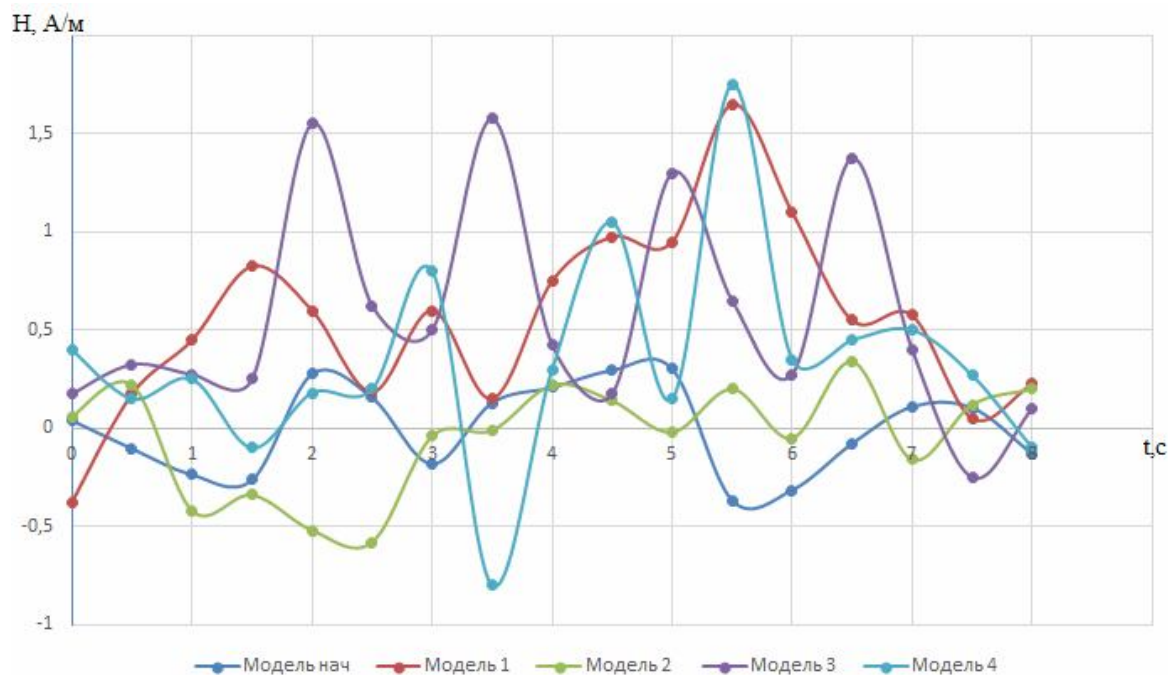


Рисунок 5 – Семейство зависимостей напряженности магнитного поля от времени

На рисунке 6 графики носят более «плавный» характер. Здесь не видно резких пиков (как для модели 4). Причина этого – «скачки» расчетных величин происходили в «половинные» доли секунд, а позициям перемещения по оси «z» на рис.6 соответствуют целые доли секунд. Поэтому в данном случае зависимость такова: чем больше или чем меньше геометрические параметры скипа, тем на графике имеют место более плавные перепады максимальных и минимальных значений для напряженности магнитного поля. Иными словами, перепады оказываются выше у моделей № 1 и № 3 – для них геометрические размеры были по величине «вторыми» и «четвертыми» соответственно из пяти рассматриваемых моделей.

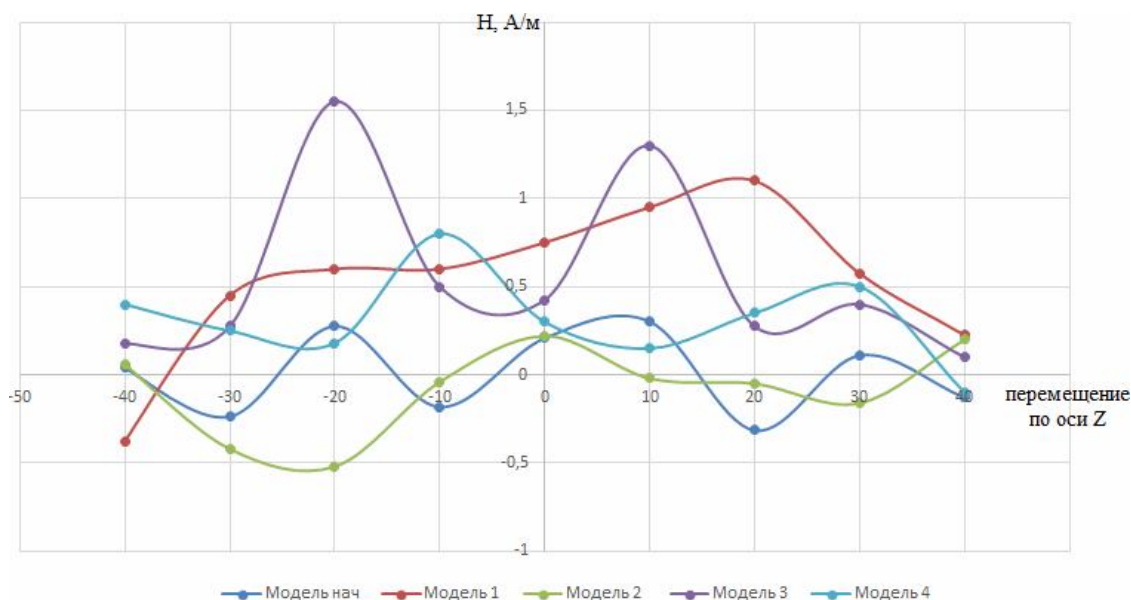


Рисунок 6 – Семейство зависимостей напряженности магнитного поля от перемещения скипа по оси «z»

На рисунке 7 представлено семейство зависимостей параметров индукции магнитного поля от времени для всех пяти экспериментальных моделей. При этом самые высокие и самые низкие значения магнитной индукции наблюдаются у модели № 4. Самые низкие по модулям «максимальные и минимальные значения» параметров индукции магнитного поля – у модели № 2. Таким образом, величина магнитной индукции прямо пропорциональна значениям геометрических величин рассматриваемых моделей.

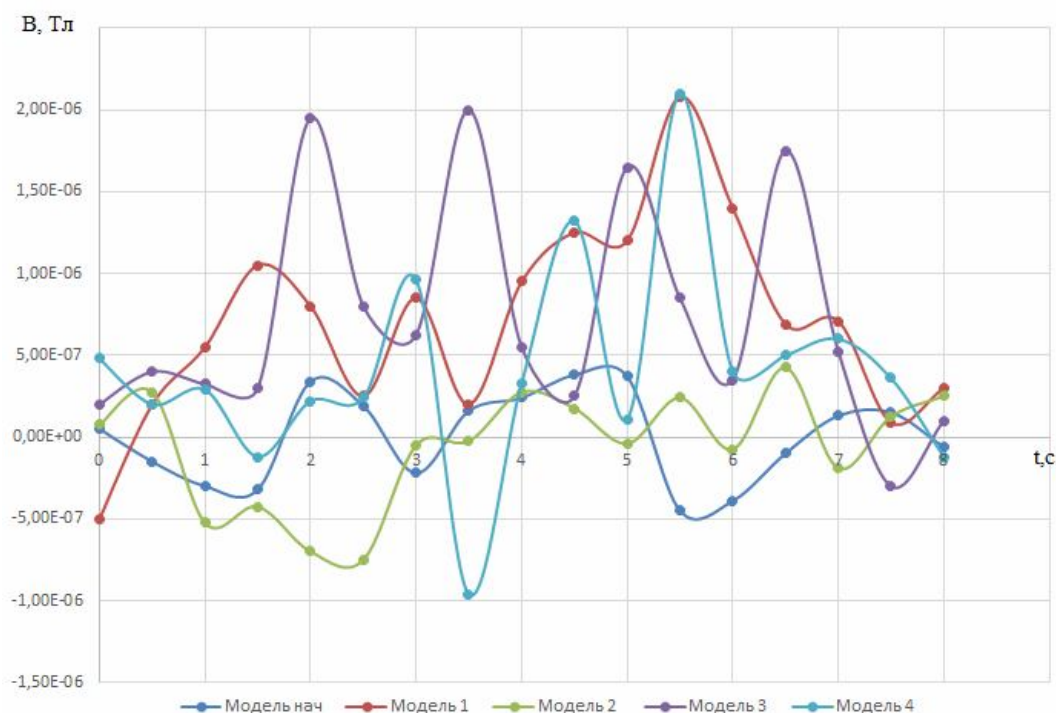


Рисунок 7 – Семейство зависимостей индукции магнитного поля от времени

На рисунке 8 графики выглядят более плавными по сравнению с рисунком 7. Причина – «скачки» величин индукции магнитного поля происходили в «половинные» доли секунд, а позициям перемещения по оси «z» соответствуют целые доли секунд. Поэтому перепады максимальных и минимальных значений индукции магнитного поля обратно пропорциональны геометрическим параметрам скипа. Как следствие такие перепады выше у моделей № 1 и № 3 (они имеют соответственно «вторые» и «четвертые» по величине геометрические размеры из всех пяти моделей).

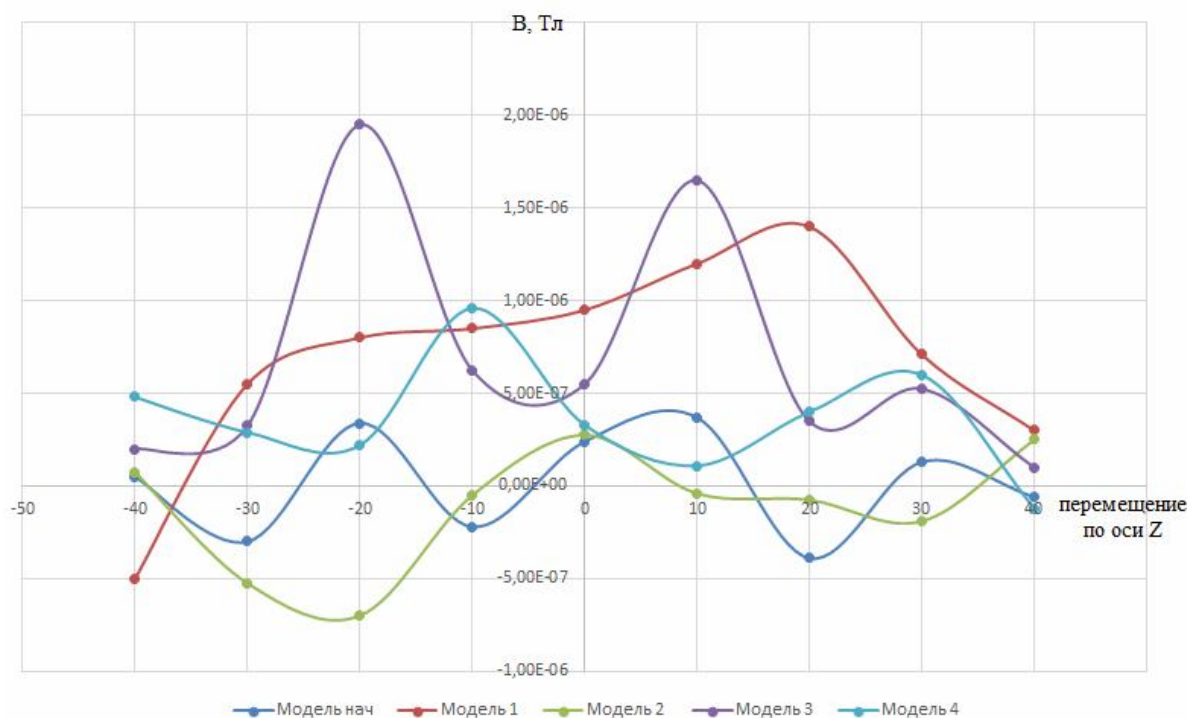


Рисунок 8 – Семейство зависимостей индукции магнитного поля от перемещения скипа по оси «z»

При обработке приведенных в данной статье результатов исследования были получены нелинейные целевые функции (регрессионные уравнения) основных магнитных характеристик (параметров), т.е. « H », « B » и « J » в зависимости от таких аргументов: радиуса скипа; внутреннего радиуса катушки; внешнего радиуса катушки [5, 17, 18]. При этом регрессионные уравнения были составлены для каждой секунды проводимых экспериментов по каждой из пяти моделей. Эти регрессионные уравнения могут быть использованы для аналитических (инженерных) расчетов в рамках проектирования ЭмПУ [8, 9, 19, 20] без использования конечно-элементного моделирования.

Выводы. На основании проведенных исследований были получены следующие новые результаты:

1. Разработан алгоритм моделирования ЭмПУ с использованием ППП ANSYS. Этот алгоритм учитывает специфические особенности анализируемого объекта.
2. Проведены расчеты для моделей системы «скип – постоянный магнит – катушка» при различных величинах геометрических параметров скипа и обмотки в стволе шахты.
3. По результатам моделирования выполнен сравнительный анализ зависимости динамических характеристик пяти экспериментальных моделей от параметров этих моделей. Результаты проведенного анализа показали зависимость трех основных определяемых характеристик (силы Лоренца, индукции магнитного поля и напряженности магнитного поля) непосредственно от геометрических параметров объектов в моделях – скипа и обмотки (катушки), расположенной в стволе шахты.
4. Составлены семейства зависимостей силы Лоренца, индукции магнитного поля и напряженности магнитного поля всех моделей от времени и перемещения скипа по вертикальной оси «z». Эти зависимости позволяют осуществлять инженерные расчеты на основе регрессионных уравнений – без использования моделирования на основе МКЭ.

Список литературы

1. Айкеева А. А. Исследование нагрузок на скип шахтной и карьерной электромагнитной подъемной установки / А. А. Айкеева, Б. А. Жаутиков, А. С. Жанасбаева, П. А. Мухтарова // Вестник Карагандинского государственного университета. – 2015. – № 3 (79). – С. 90–95.

2. Айкеева А. А. 2-D моделирование системы «скип-электромагнит» / А. А. Айкеева, Б. А. Жаутиков, К. С. Роговая, Ф. Б. Жаутиков, П. А. Мухтарова // Вестник Атырауского государственного университета имени Х. Досмухамедова. – 2015. – № 2 (37). – С. 56–62.
3. Андреева Е. Г. Расчет стационарных магнитных полей и характеристик электротехнических устройств с помощью программного пакета ANSYS : учебное пособие / Е. Г. Андреева, С. П. Шамец. – Омск : Омский государственный технический университет, 1992. – 92 с.
4. Брумштейн Ю. М. Сравнительный анализ функциональности программных средств управления проектами, распространяемых по модели SAAS / Ю. М. Брумштейн, И. А. Дюдилов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 4. – С. 34–51.
5. Жаутиков Б. А. Разработка имитационной модели движения скипа в программной среде ANSYS MAXWEL / Б. А. Жаутиков, А. А. Айкеева, Ф. Б. Жаутиков, К. С. Роговая, П. А. Мухтарова, А. Р. Танскожанова, А. Е. Аюбекова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2016. – № 3. – С. 81–91.
6. Жилин Л. Э. Анализ номенклатуры программных средств массового использования, применяемых в российских вузах (на примере Астраханского государственного университета) / Л. Э. Жилин, А. Н. Горбачева, Ю. М. Брумштейн, Е. Ю. Васильевский // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 2. – С. 20–37.
7. Зарипова В. М. Классификация автоматизированных систем поддержки инновационных процессов на предприятии (Computer aided innovation – CAI) / В. М. Зарипова, И. Ю. Петрова, Е. С. Цырульников // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2012. – № 1. – С. 111–129.
8. Казаков Ю. Б. Исследование магнитного поля в воздушном зазоре стартера СТ230Б / Ю. Б. Казаков, Ю. Я. Щельяков // Тезисы докладов научно-технической конференции. – Иваново, 2008. – 129 с.
9. Каранчук В. П. Основы применения ЭВМ : учебное пособие / В. П. Каранчук. – Москва : Радио и связь, 2008. – 288 с.
10. Карпасюк В. К. Особенности построения датчиков магнитного поля на основе эффекта колоссального магнетосопротивления / В. К. Карпасюк, А. М. Смирнов, А. Г. Баделин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4. – С. 291–297.
11. Морозов Ю. В. Новая технология для изготовления магнитопроводов. Компоненты и технологии : учебное пособие / Ю. В. Морозов. – Омск : Омский государственный технический университет, 2006. – 95 с.
12. Наседкин А. В. Конечно-элементное моделирование на основе ANSYS. Программы решения статических задач сопротивления материалов с вариантами индивидуальных заданий / А. В. Наседкин. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет, 1998. – 44 с.
13. Чигарев А. В. ANSYS для инженеров : справочное пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – Москва : Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
14. Aykeeva A. A. The research loads on the skip of mine and quarry electromagnetic lifting installation / A. A. Aykeeva, B. A. Zhautikov, F. B. Zhautikov, P. A. Mukhtarova // Eurasian Physical Technical Journal. – 2015. – № 1 (23). – P. 59–64.
15. Aykeeva A. A. 3-D modeling of elements of skip-electromagnet system / A. A. Aykeeva, B. A. Zhautikov, K. S. Rogovaya, F. B. Zhautikov, P. A. Mukhtarova // Eurasian Physical Technical Journal. – 2015. – Vol. 12, № 2 (24). – P. 28–32.
16. Bleuler H. A survey of magnetic levitation and magnetic bearing types / H. Bleuler // International Journal of Japan Society of Mechanical Engineers. – 1992. – № 35. – P. 335–342.
17. Demerdash N. A. An Evaluation of the Methods of Finite Elements and finite differences in the Solution of Nonlinear Electromagnetic Fields in Electrical Machines / N. A. Demerdash, T. W. Nehl // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 2009. – Vol. 98 (1). – P. 74–87.
18. Hajjaji E. Modeling and nonlinear control of magnetic levitation systems / E. Hajjaji, M. Ouladsine // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – № 48 (4). – P. 831–838.
19. Hyung-Suk Han. Magnetic Levitation. Maglev Technology and Applications / Hyung-Suk Han, Dong-Sung Kim. – Springer Science & Business Media Dordrecht, 2016. – P. 184–187.
20. Munaro C. J. Modeling and observer-based nonlinear control of a magnetic levitation system / C. J. Munaro, et al. // Control Applications, 2002 : proceedings of the 2002 International Conference. – 2002. – P. 121–124.

References

1. Aykeeva A. A., Zhautikov B. A., Zhanasbaeva A. S., Mukhtarova P. A. Issledovanie nagruzok na skip shakhtnoy i karernoy elektromagnitnoy podemnoy ustanovki [Research of loads on skip shaft and pit electromagnetic lifting installation]. *Vestnik Karagandinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Karagandy State University], 2015, no. 3 (79), pp. 90–95.
2. Aykeeva A. A., Zhautikov B. A., Rogovaya K. S., Zhautikov F. B., Mukhtarova P. A. 2-D modelirovanie sistemi «skip-elektromagnit» [2-D modeling of skip-electromagnet system]. *Vestnik Atirausskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Kh. Dosmukhamedova* [Bulletin of Atyrau State University named after Kh. Dosmukhamedov], 2015, no. 2(37), pp. 56–62.
3. Andreeva Ye. G., Shamets S. P. *Raschet statsionarnykh magnitnykh poley i kharakteristik elektrotekhnicheskikh ustroystv s pomoshchyu programmnoy paketa ANSYS* [Calculation of stationary magnetic fields and characteristics of electrical devices using the software package ANSYS], Omsk, Omsk State Technical University Publ. House, 1992. 92 p.
4. Brumshteyn Yu. M., Dyudikov I. A. Sravnitelnyy analiz funktsionalnosti programnykh sredstv upravleniya proektami, rasprostranyaemykh po modeli SAAS [Comparative analysis of the functionality of project management software, released under the SAAS model]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2014, no. 4, pp. 34–51.
5. Zhautikov B. A., Aykeeva A. A., Zhautikov F. B., Rogovaya K. S., Mukhtarova P. A., Tanskozhanova A. R., Ayubekova A. Ye. Razrabotka imitatsionnoy modeli dvizheniya skipa v programmnoy srede ANSYS MAXWEL [Development of a simulation model of a skip motion in a software environment ANSYS MAXWEL]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2016, no. 3, pp. 81–91.

6. Zhilin L. E., Gorbachev A. N., Brumshteyn Yu. M., Vaskovskiy Ye. Yu. Analiz nomenklatury programmnykh sredstv massovogo ispolzovaniya, primenyaemykh v rossiyskikh vuzakh (na primere Astrakhanskogo gosudarstvennogo universiteta) [Analysis software for mass use of the nomenclature used in Russian universities (for example, the Astrakhan State University)]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 2, pp. 42–51.
7. Zaripova V. M., Petrova I. Yu., Tsyrlunikov Ye. S. Klassifikatsiya avtomatizirovannykh sistem podderzhki innovatsionnykh protsessov na predpriyatii (Computer aided innovation – CAI) [Classification of automated systems to support innovative processes at the enterprise (Computer aided innovation – CAI)]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2012, no. 1, pp. 32–40.
8. Kazakov Yu. B., Shelikalov Yu. Ya. Issledovanie magnitnogo polya v vozdushnom zazore startera ST230B [Investigation of the magnetic field in the air gap starter ST230B]. *Tezisy doklada nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Theses of Report Scientific and Technical Conference], Ivanov, 2008, 129 p.
9. Karanchuk V. P. *Osnovy primeneniya EVM* [Fundamentals of computer application], Moscow, Radio i Kommunikatsii, 2008. 288 p.
10. Karpasyuk V. K., Smirnov A. M., Badelin A. G. Osobennosti postroyeniya datchikov magnitnogo polya na osnove efekta kolossalnogo magnitosoprotivleniya [Features of construction of the magnetic field sensors based on the colossal magnetoresistance effect]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 4, pp. 291–297.
11. Morozov Yu. V. *Novaya tekhnologiya dlya izgotovleniya magnitoprovodov. Komponenty i tekhnologii* [New technology for the production of magnetic cores. Components and Technology], Omsk, Omsk State Technical University Publ. House, 2006. 95 p.
12. Nasedkin A. V. *Konechno-elementnoe modelirovanie na osnove ANSYS. Programmy resheniya staticheskikh zadach soprotivleniya materialov s variantami individualnykh zadaniy* [Finite-element simulation based on ANSYS. Program solutions of static problems of strength of materials with options for individual tasks], Rostov-on-Don, Rostov State University Publ. House, 2008. 44 p.
13. Chigarev A. V., Kravchuk A. S., Smalyuk A. F. *ANSYS dlya inzhenerov* [ANSYS for engineer], Moscow, Mashinostroenie–1, 2004. 512 p.
14. Aykeeva A. A., Zhautikov B. A., Zhautikov F. B., Mukhtarova P. A. The research loads on the skip of mine and quarry electromagnetic lifting installation. *Eurasian Physical Technical Journal*, 2015, no. 1 (23), pp. 59–64.
15. Aykeeva A. A., Zhautikov B. A., Rogovaya K. S., Zhautikov F. B., Mukhtarova P. A. 3-D modeling of elements of skip-electromagnet system. *Eurasian Physical Technical Journal*, 2015, vol. 12, no. 2 (24), pp. 28–32.
16. Bleuler H. A survey of magnetic levitation and magnetic bearing types. *International Journal of Japan Society of Mechanical Engineers*, 2012, no. 32 (5), pp. 335–342.
17. Demerdash N. A., Nehl T. W. An Evaluation of the Methods of Finite Elements and finite differences in the Solution of Nonlinear Electromagnetic Fields in Electrical Machines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 2009, vol. 98 (1), pp. 74–87.
18. Hajjaji E., Ouladsine M. Modeling and nonlinear control of magnetic levitation systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, no. 48 (4), pp. 831–838.
19. Hyung-Suk Han, Dong-Sung Kim. *Magnetic Levitation. Maglev Technology and Applications*. Springer Science & Business Media Dordrecht, 2016, pp. 184–187.
20. Munaro C. J., et al. Modeling and observer-based nonlinear control of a magnetic levitation system. *Control Applications, 2002. Proceedings of the 2002 International Conference*, 2002, pp. 121–124.

УДК 004.942, 519.213, 519.872.4

СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ АППРОКСИМАЦИИ ЛОГОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МОМЕНТОВ НА ГИПЕРЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ

Статья поступила в редакцию 24.02.2017, в окончательном варианте – 22.03.2017.

Гаевой Сергей Владимирович, кандидат технических наук, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: gaevserge@mail.ru
Ахмед Весам Мохаммед Абдо, аспирант, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: wesamalsofi@gmail.com
Быков Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: mitril@list.ru
Фоменков Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: saf@vstu.ru

Одним из типов вычислительных систем являются вычислительные кластеры. Они используются для обслуживания приходящих заданий. Важным способом анализа нагрузки вычислительных кластеров является моделирование их работы с использованием модели входящей нагрузки. В работе в рамках такого моделирования предлагается использовать метод моментов с целью определения параметров гиперэкспоненциального распределения с двумя ветками