

УДК 004.942

А.А.Айкеева¹, Б.А.Жаутиков², А.М.Айдарханов³,
А.С.Жанасбаева¹, Ф.Б.Жаутиков¹, А.С.Бельгибаев¹

¹Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова;

²Атырауский государственный университет им. Х.Досмухамедова;

³Рудненский индустриальный институт

(E-mail: aikееva@mail.ru)

Моделирование электромагнитных систем

Статья посвящена моделированию электромагнитных систем, которое проводилось в пакете прикладных программ ANSYS. ANSYS — универсальная программная система конечно-элементного анализа. Моделирование и анализ в некоторых областях промышленности позволяют избежать дорогостоящих и длительных циклов разработки типа «проектирование – изготовление – испытания». Система работает на основе геометрического элемента. Каждый тип элементов использует значения свойств материала.

Ключевые слова: электромагнит, постоянный магнит, имитационное моделирование, сила Лоренца, магнитная индукция, напряженность магнитного поля.

В настоящее время наряду с построением аналитических моделей большое внимание уделяется задачам оценки характеристик больших систем на основе имитационных моделей, реализованных на современных ЭВМ с высоким быстродействием и большим объемом оперативной памяти. Причем ориентация на персональные ЭВМ для реализации экспериментов с имитационными моделями больших систем позволяет не только проводить анализ их характеристик, но и решать задачи структурного, алгоритмического и параметрического синтеза таких систем при заданных критериях оценки эффективности и ограничениях, в отличие от метода прямой аналогии и метода электрического моделирования [1].

Имитационное моделирование сложных систем часто является единственным практически реализуемым методом исследования процесса функционирования таких систем на этапе их проектирования. Для полного анализа характеристик процесса функционирования систем приходится многократно воспроизводить имитационный эксперимент, варьируя исходные данные задачи. То есть можно получить полное, а не частное решение поставленной задачи исследования [2].

Одним из самых распространенных программных комплексов сегодня является пакет прикладных программ ANSYS, использующий метод конечных элементов. Метод конечных элементов ANSYS широко известен и пользуется популярностью среди инженеров-исследователей, занимающихся не только вопросами динамики и прочности, но и исследованиями электромагнитного поля [3].

При расчете этим методом строится сеть конечных элементов: пространство, занимаемое полем, разбивается с помощью прямых и кривых линий при двумерной задаче, а также с помощью плоских или кривых поверхностей при трехмерной задаче на отдельные части, имеющие достаточно малые, но конечные размеры. Эти части называются конечными элементами. При решении двумерной задачи конечные элементы чаще всего имеют форму треугольников или прямоугольников, а при трехмерной — форму параллелепипедов, тетраэдров, все боковые поверхности которых представляют собой треугольники [4].

В системе ANSYS имеется более 100 различных типов элементов. Как правило, в различных вариантах программы доступны не все виды элементов. Это зависит от того, какие виды расчета могут использоваться в данном варианте программы [5].

В нашей работе был проведен 2-D статический магнитный анализ. В статическом магнитном анализе можно моделировать насыщаемые и ненасыщаемые магнитные материалы, а также постоянные магниты. Элементы, которые мы использовали в магнитном анализе, имеют 2-D геометрию. Хотя все объекты и сооружения являются 3-D, в нашем анализе мы заменили их на 2-D элементы, так как 2-D гораздо проще генерировать и расчет занимает меньше времени. Такое моделирование называется плоским, или осесимметричным [6].

Статический магнитный анализ был проведен в пять этапов:

1. Создание физической окружающей среды.
2. Построение модели и назначение физических атрибутов для каждого области.
3. Применение граничных условий и нагрузки (возбуждения).
4. Получение решения.
5. Просмотр результатов.

Для создания физической среды анализа были выбраны типы конечных элементов. В таблице 1 показаны области, которые могут существовать внутри 2-D модели [7].

Т а б л и ц а 1

Области 2-D моделирования

Воздух	Степени свободы: AZ. Параметры материала: μ_r (MURD2), ρ (RSVD2)
Железо	Степени свободы: AZ. Параметры материала: μ_r (MURD2) или B-H кривая (команда TB)
Постоянный магнит	Степени свободы: AZ. Параметры материала: μ_r (MURD2) или B-H кривая (кривая TB); H_c (коэрцитивная сила)

Для моделирования электромагнитной системы мы использовали элемент PLANE 233, который является 2-D элементом для моделирования плоских или осесимметричных электромагнитных полей. Элемент состоит из 8 или 6 узлов и имеет до 2 степеней свободы на узел, также может выполнять электромагнитный анализ с интегрированным по времени электрическим потенциалом (напряжением) в качестве степени свободы [8]. Элемент PLANE 233 имеет нелинейный магнитный потенциал для моделирования кривых B-H или кривых размагничивания постоянных магнитов для статических и переходных по времени анализов. Узлы и система координат показаны на рисунке 1. Треугольной формы элемент может быть сформирован путем совмещения K, L, O в одной точке.

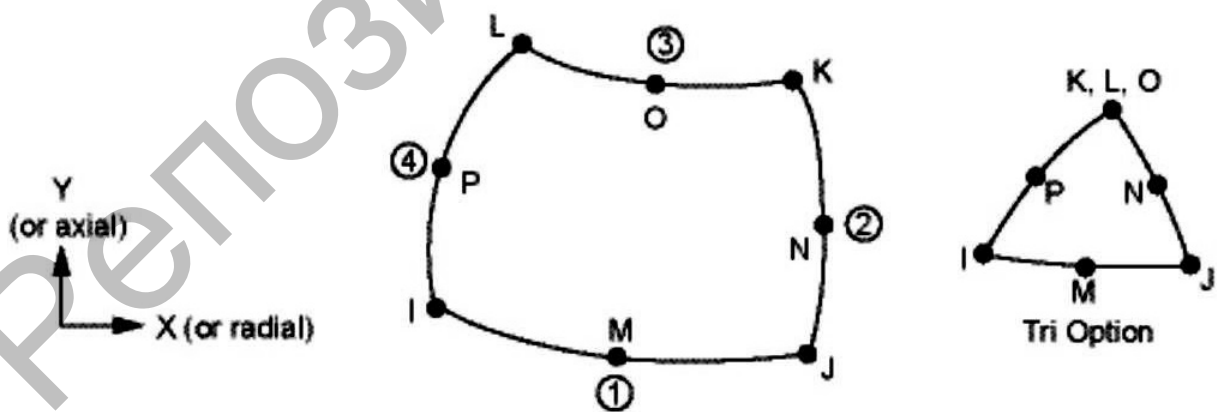


Рисунок 1. Геометрия элемента PLANE 233

Целью работы является определение взаимодействия электромагнита и постоянного магнита. Для этого изменяются параметры электромагнита и постоянного магнита.

Для расчета магнитной индукции B , напряженности магнитного поля H и силы Лоренца F мы использовали следующие исходные данные:

! Параметры электромагнита постоянного тока
 $D1 = 3.048 * \text{MM}$! внутренний диаметр катушки
 $R_1 = D1 / 2$! внутренний радиус катушки
 $D2 = 3.9624 * \text{MM}$! внешний диаметр катушки
 $R_2 = D2 / 2$! внешний радиус катушки
 $L_1 = 1.524 * \text{MM}$! высота катушки
 $SE = 0.127 * \text{MM}$! толщина конца обмотки катушки
 $DEL = 0.234 * \text{MM}$! осевое смещение
 $N = 280$! количество витков
 $R = 57$! сопротивление катушки, Ом
 $I = 0.050$! Ток, А
 $AC = (R_2 - R_1) * L_1$! площадь катушки, M^2
 $JS = N * I / AC$! плотность тока
 $SD = SE + DEL$
 ! постоянный магнит
 $D3 = 2.9972 * \text{MM}$! диаметр магнита
 $R_3 = D3 / 2$! радиус магнита
 $L_3 = 1.6 * \text{MM}$! длина
 $BR = 1.02$! магнитная индукция, Тл
 $HC = 720000$! коэрцитивная сила / А/м
 $MU0 = 4 * \pi * 1\text{E-}7$! проницаемость свободного пространства / Н/м

Расчеты проводились для различных параметров электромагнита и постоянного магнита. Изменяя один параметр, остальные оставались неизменными. Изменялись следующие параметры:

! Параметры электромагнита постоянного тока
 $D1 = 3.048 * \text{MM}$! внутренний диаметр катушки
 $D2 = 3.9624 * \text{MM}$! внешний диаметр катушки
 $L_1 = 1.524 * \text{MM}$! высота катушки
 $SE = 0.127 * \text{MM}$! толщина конца обмотки катушки
 $DEL = 0.234 * \text{MM}$! осевое смещение
 $I = 0.050$! Ток, А
 ! постоянный магнит
 $D3 = 2.9972 * \text{MM}$! диаметр магнита
 $L_3 = 1.6 * \text{MM}$! длина
 $BR = 1.02$! магнитная индукция, Тл
 $HC = 720000$! коэрцитивная сила / А/м
 $MU0 = 4 * \pi * 1\text{E-}7$! проницаемость свободного пространства / Н/м

Модель системы электромагнит–постоянный магнит и полученные линии электромагнитного поля показаны на рисунке 2.

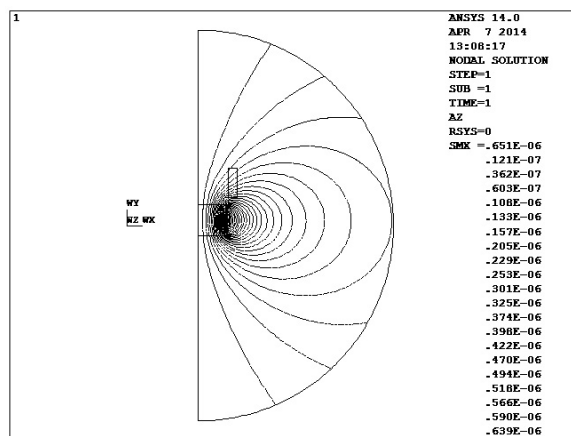


Рисунок 2. Модель системы электромагнит–постоянный магнит

В зависимости от моделируемого материала PLANE 253 может иметь в узлах степень свободы (DOF), который называется AZ — это векторный магнитный потенциал (в двумерном анализе предполагается, что векторный магнитный потенциал имеет одну лишь составляющую — по оси Z , т.е. в направлении, перпендикулярном рассматриваемой области); векторный потенциал электромагнитного поля в электродинамике; векторный потенциал, ротор которого равен магнитной индукции.

Исследовано влияние изменения параметров электромагнита и постоянного магнита на электромагнитное взаимодействие. Проведена статистическая обработка данных экспериментов, полученных в результате расчетов по разработанным алгоритмам.

В результате расчетов получены минимальные и максимальные значения магнитной индукции B и напряженности магнитного поля H . С целью анализа влияния изменения параметров электромагнита и постоянного магнита на электромагнитное взаимодействие был проведен ряд экспериментов при различных параметрах электромагнита и постоянного магнита (рис. 3).

По результатам были построены зависимости магнитной индукции и напряженности магнитного поля от переменного (изменяемого) параметра электромагнита и постоянного магнита для дальнейшего анализа свойств электромагнита и влияния его параметров на магнитное поле.

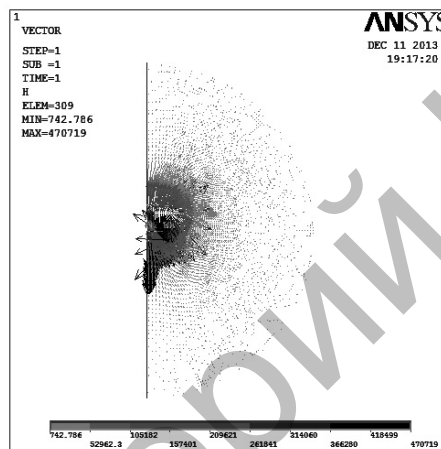


Рисунок 3. Результаты расчетов электромагнитного взаимодействия элементов системы

Получены аппроксимирующие функции зависимостей параметров электромагнитного поля от изменения параметров электромагнита и постоянного магнита (рис. 4).

Эксперименты показали, что параметры магнитного поля не зависят от толщины конца обмотки катушки и осевого смещения. При изменении электрического тока минимальные значения магнитной индукции и напряженности магнитного поля в начальных точках сначала уменьшаются, затем увеличиваются, максимальные значения только увеличиваются. При изменении внешнего диаметра катушки магнитная индукция и напряженность магнитного поля уменьшаются.

При изменении магнитной индукции постоянного магнита, его длины, коэрцитивной силы параметры магнитного поля увеличиваются, а при изменении магнитной проницаемости свободного пространства — уменьшаются.

При обработке результатов были получены следующие целевые функции, которые можно применить при создании электромагнитных установок.

При изменении параметров постоянного магнита:

$$B_{\min}(L3) = -1E-05(L3)^2 + 0,0006(L3) - 6E-05$$

$$B_{\max}(L3) = 0,0116(L3)^4 - 0,1086(L3)^3 + 0,3558(L3)^2 - 0,4291(L3) + 0,9707$$

$$H_{\min}(L3) = -9,5759(L3)^2 + 498,83(L3) - 48,309$$

$$H_{\max}(L3) = 24159(L3)^4 - 236889(L3)^3 + 849391(L3)^2 - 1E+06(L3) + 1E+06$$

$$B_{\min}(Br) = -4E-07(Br)^4 + 1E-05(Br)^3 - 0,0001(Br)^2 + 0,0006(Br) + 0,0004$$

$$B_{\max}(Br) = -0,0004(Br)^4 + 0,0128(Br)^3 - 0,1529(Br)^2 + 0,9973(Br) - 0,0454$$

$$H_{\min}(Br) = -0,3414(Br)^4 + 9,1005(Br)^3 - 93,626(Br)^2 + 481,92(Br) + 322,02$$

$$H_{\max}(Br) = 565,66(Br)^3 - 19626(Br)^2 + 249807(Br) + 408319$$

$$B_{\min}(HC) = 1E-22(HC)^3 - 6E-16(HC)^2 + 1E-09(HC) + 0,0003$$

$$B_{\max}(HC) = -1E-19(HC)^3 + 5E-13(HC)^2 - 5E-07(HC) + 0,9609$$

$$H_{min}(HC) = 8E-17(HC)^3 - 4E-10(HC)^2 + 0,001(HC) + 210,26$$

$$H_{max}(HC) = -1E-07(HC)^2 + 1,1269(HC) - 100480$$

$$V_{min}(MUO) = -4E-06(MUO)^3 + 5E-05(MUO)^2 - 0,0003(MUO) + 0,0012$$

$$V_{max}(MUO) = 0,0015(MUO)^4 - 0,0272(MUO)^3 + 0,1942(MUO)^2 - 0,673(MUO) + 1,33$$

$$H_{min}(MUO) = -2,9752(MUO)^3 + 42,858(MUO)^2 - 256,06(MUO) + 941,46$$

$$H_{max}(MUO) = -197,38(MUO)^4 + 3473,1(MUO)^3 - 23728(MUO)^2 + 50064(MUO) + 613805$$

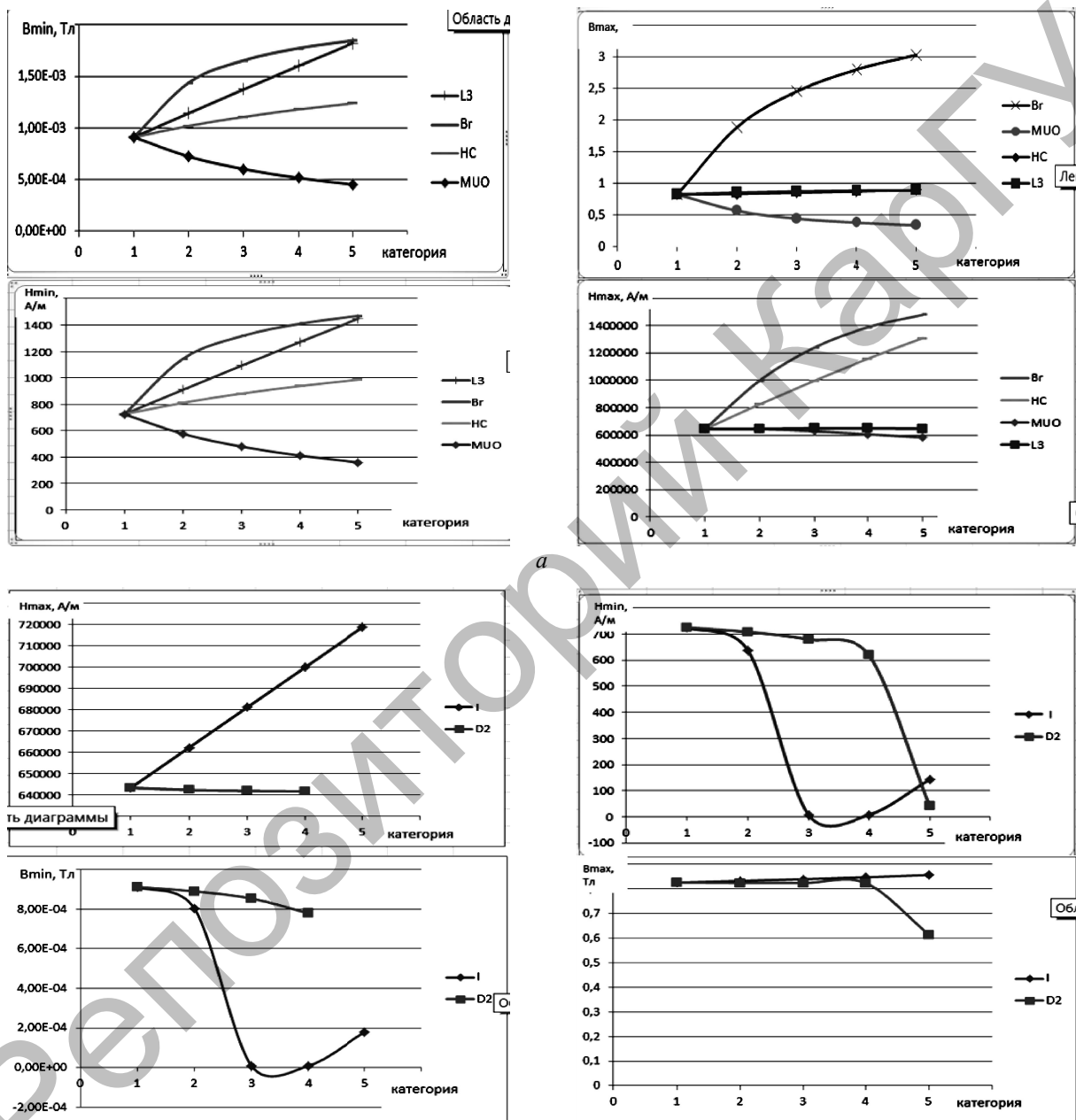


Рисунок 4. Зависимости параметров электромагнитного поля от изменения параметров постоянного магнита (а) и электромагнита (б)

При изменении параметров электромагнита:

$$V_{min}(D2) = -1E-07(D2)^4 + 4E-06(D2)^3 - 5E-05(D2)^2 + 0,0003(D2) + 0,0004$$

$$V_{max}(D2) = -3E-05(D2)^4 + 0,0013(D2)^3 - 0,0186(D2)^2 + 0,1049(D2) + 0,6275$$

$$H_{min}(D2) = -0,076(D2)^4 + 2,9797(D2)^3 - 41,398(D2)^2 + 231,44(D2) + 291,74$$

$$H_{max}(D2) = -36,897(D2)^4 + 1469,2(D2)^3 - 20451(D2)^2 + 115858(D2) + 423134$$

$$B_{\min}(I) = -0,0021(I)^4 + 0,0089(I)^3 - 0,0114(I)^2 + 0,0039(I) + 0,0007$$

$$B_{\max}(I) = 0,0019(I)^2 + 0,0132(I) + 0,8252$$

$$H_{\min}(I) = -1702,4(I)^4 + 7089,4(I)^3 - 9079,6(I)^2 + 3068,6(I) + 593,86$$

$$H_{\max}(I) = 41921(I) + 641317$$

При различных параметрах постоянного магнита и электромагнита был проведен расчет силы Лоренца (рис. 5). Сила Лоренца — сила, с которой электромагнитное поле, согласно классической электродинамике, действует на точечную заряженную частицу. Иногда силой Лоренца называют силу, действующую на движущийся со скоростью предмет со стороны электрического и магнитного полей.

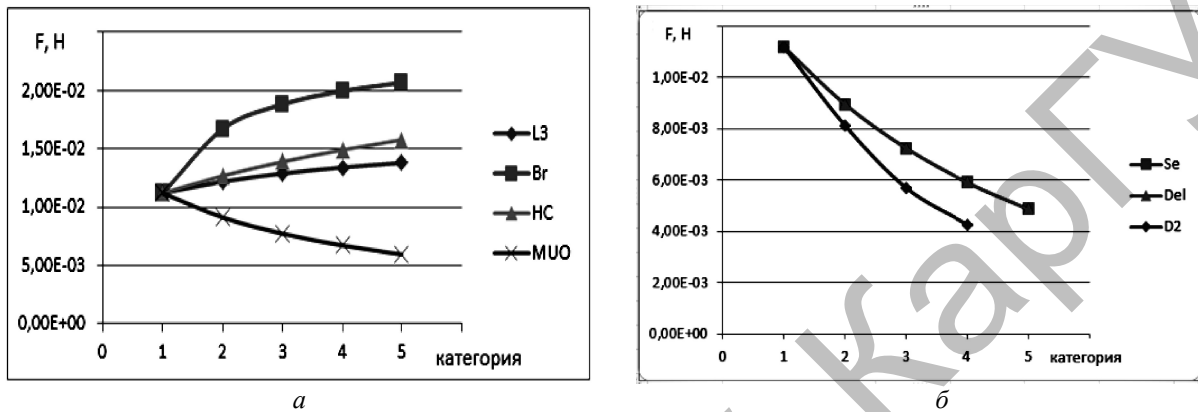


Рисунок 5. Зависимость силы Лоренца от параметров постоянного магнита (а) и электромагнита (б)

Из рисунка 5 следует, что при изменении магнитной индукции постоянного магнита, его длины, коэрцитивной силы сила Лоренца увеличивается плавно по экспоненте. А при изменении проницаемости свободного пространства сила Лоренца уменьшается по экспоненте (рис. 5а). При изменении таких параметров электромагнита, как внешний диаметр катушки, осевое смещение и толщина конца обмотки катушки сила Лоренца уменьшается по экспоненте (рис. 5б).

Данные результаты необходимы для дальнейших исследований электромагнитных установок. В ходе исследования изучен метод конечных элементов для решения электромагнитных задач, разработаны алгоритмы определения механизма электромагнитного взаимодействия структурных составляющих электромагнитной системы в среде программы ANSYS.

На основании проведенных исследований были получены новые научно обоснованные теоретические результаты.

1. Получены функциональные зависимости параметров электромагнитного поля от изменения параметров электромагнита и постоянного магнита.
2. Дана оценка силе Лоренца при различных параметрах электромагнита и постоянного магнита.

Данная статья написана на основании результатов исследований, выполняемых в рамках грантового финансирования МОН РК по подприоритету «Технологии разработки полезных ископаемых», по теме «Обоснование и разработка энергосберегающей технологии выемки горной массы путем создания электромагнитной подъемной установки».

Список литературы

- 1 Руководство по использованию пакета прикладных программ ANSYS.
- 2 Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практ. руководство. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 272 с.
- 3 Руководство Ansys. — М.: Представительство CAD-FEM, 1999. — 500 с.
- 4 Meeker D. Finite Element Method Magnetics. User's Manual. Version 4.0; June 17, 2004 // [ЭП]. Режим доступа: <http://femm.foster-miller.com>
- 5 Басов К.А. ANSYS и LMS Virtual Lab. Геометрическое моделирование. — М.: ДМК Пресс, 2006. — 240 с.
- 6 Басов К.А. ANSYS для конструкторов. — М.: ДМК Пресс, 2009. — 248 с.
- 7 Жаутиков Б.А., Айкеева А.А., Таранов А.В. Разработка рекомендаций по выбору конструкции скипов пневмоподъемных установок с использованием пакета ANSYS // Автоматика и информатика. — 2007. — № 1. — С. 8–10.
- 8 John Krouse. The Changing role of analysis // J. ANSYS News. — 1996. — Second Issue. — P. 25.

А.А.Айкеева, Б.А.Жәутікoв, А.М.Айдарханoв,
А.С.Жанасбаева, Ф.Б.Жәутікoв, А.С.Белгібаев

Электрoмагниттік жүйелерді модельдеу

Мақала ANSYS қолданбалы бағдарламасының пакетінде жүргізілген электрoмагниттік жүйелерді модельдеуге арналған. ANSYS ақырғы элементтік талдауға арналған әмбебап бағдарламалық жүйе болып табылады. Көптеген өндірістік аймақтарда модельдеу және талдау қымбат әрі ұзақ уақыт жүргізілетін «жобалау – құрастыру – сын жүргізу» типті әзірлеу жұмыс циклдерін жүргізуге мүмкіндік береді. Жүйе геометриялық элемент негізінде жұмыс жасайды. Өрбір элемент типі материалдың сипаттамаларын қолданады.

A.A.Aikeyeva, B.A.Zhautikov, A.M.Aidarkhanov,
A.S.Zhanasbayeva, F.B.Zhautikov, A.S.Belgibayev

Modeling electromagnetic systems

The article is devoted to the modeling electromagnetic systems, which was carried on ANSYS software package. ANSYS is universal software system for terminal element analysis. Modeling and analysis in some industrial region allows avoiding expensive and long term cycles operate of type «design – manufacture – test». The system operates on the basis of geometry element. Each element type uses the properties of the material.

References

- 1 *Guidelines for use of the software package ANSYS.*
- 2 Kaplun A.B., Morozov Ye.M., Olfer'yeva M.A. *ANSYS in the hands of the engineer: A Practical Guide*, Moscow: Editorial URSS, 2003, 272 p.
- 3 *Guide Ansys*, Moscow: Representation of CAD-FEM, 1999, 500 p.
- 4 Meeker D. *Finite Element Method Magnetics. User's Manual*. Version 4.0; June 17, 2004; <http://femm.foster-miller.com>
- 5 Basov K.A. *ANSYS and LMS Virtual Lab. Geometric modeling*, Moscow: DMK Press, 2006, 240 p.
- 6 Basov K.A. *ANSYS for designers*, Moscow: DMK Press, 2009, 248 p.
- 7 Zhautikov B.A., Aikeeva A.A., Taranov A.V. *Automatics and Informatics*, 2007, 1, p. 8–10.
- 8 John Krouse. *J. ANSYS News*, 1996, Second Issue, p. 25.