

УДК 621.455.32

М. Ю. ТИТОВ, А. В. ЛОЯН, Е. И. ИЩЕНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КЛАПАНА СРЕДСТВАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*В работе представлены результаты расчета магнитной системы электромагнитного клапана в пакете для численного моделирования. Приведена схема клапана-прототипа, принцип его работы и основные характеристики. Представлено описание численной модели магнитной системы клапана – магнитных свойств элементов, сил действующих на подвижные элементы клапана, закона электропитания клапана. Результатами расчетов являлись законы изменения во времени силы притяжения якоря клапана к статору, перемещение якоря во времени, а также распределение индукции магнитного поля в элементах магнитной системы клапана. Расчетным способом исследовано влияние размеров элементов магнитной системы, влияние напряжения открытия, типа применяемых магнитных материалов на характеристики клапана.*

**Ключевые слова:** клапан, соленоид, магнитная система, численное моделирование.

### Введение

Электромагнитный клапан (он же соленоидный клапан) – запорное и регулирующее устройство, предназначенное для открытия / перекрытия подачи рабочего тела по трубопроводу. Управление электромагнитным клапаном (ЭМК) осуществляется электрическим током – при запитке соленоида током сердечник втягивается внутрь электромагнита и в зависимости от исполнения (нормально закрытый или нормально открытый) открывает либо перекрывает пропускное отверстие.

ЭМК получили широкое распространение в системах хранения и подачи рабочего тела двигательных установок космических аппаратов (КА). Критическими требованиями для ЭМК «космического» исполнения являются [1]:

- 1) минимальные массогабаритные характеристики;
- 2) минимальное энергопотребление;
- 3) работоспособность в условиях экстремальных температур:  $-40 \dots +120^\circ \text{C}$ ;
- 4) стойкость к динамическим нагрузкам, действующим на участке выведения КА ракетой-носителем;
- 5) повышенный ресурс и срок службы.

Исходя из вышеперечисленных требований, стоимость ЭМК вырастает от нескольких сотен долларов за «коммерческий» клапан до нескольких десятков тысяч за клапан космического исполнения.

Первые два требования в существенной степени определяются качеством проектирования магнитной системы (МС) клапана.

Современные пакеты для численного моделирования позволяют осуществлять расчеты переходных электромагнитных процессов одновременно с задачами движения. Так, например, в пакете Ansoft Maxwell (сейчас входит в Ansys Electromagnetic suite) одновременно с параметрами магнитного поля можно рассчитать перемещение и силы действующей на подвижные элементы. При этом возможно задавать действие внешних сил (условия прижатия, разность давления), а также законы изменения тока электропитания клапана. Широкий набор управляющих опций позволяет существенно приблизить численную модель к реальному устройству.

Целью данной работы является проведение расчетов ЭМК и поиск путей улучшения характеристик существующего прототипа. В частности необходимо повысить скорость срабатывания, снизить энергопотребление и улучшить массогабаритные характеристики.

### 1. Прототип ЭМК

Прототипом является ЭМК используемый в СХПРТ двигательных установок КА и работе с неагрессивными газами. Клапан (рис. 1) является нормально закрытым и выдерживает перепад давлений до 40 атм. В обесточенном состоянии пропускное отверстие перекрыто уплотнением (5), которое прижимается к упору (6) через якорь клапана (3) с помощью пластинчатой пружины (4). После запитки соленоида (1) якорь (3) под действием магнитной силы притягивается к статору (2) и открывает пропускное отверстие.

Расстояние хода якоря составляет 0,2 мм. В закрытом состоянии при разнице давлений  $\Delta P = 40$  атм, на якорь действует сила  $F_{\Delta P} = 4$  Н. Пружина имеет линейную зависимость силы растяжения от перемещения: в закрытом состоянии клапана  $F_{пруж} = 1$  Н, в открытом – 1,2 Н. Элементы МС клапана изготовлены из электротехнической стали 10880. Катушка соленоида рассчитана на номинальное напряжение 27 В. На рис. 2 приведена реальная вольт-амперная характеристика открытия клапана, по которой видно, что время открытия  $\tau_{откр}$  составляет  $\approx 2$  мс при  $\Delta P = 0$  атм. По паспорту при  $\Delta P = 4$  МПа  $\tau_{откр}$  – менее 10 мс. Соленоид имеет 4000 витков, индуктивность  $L = 0,7$  мГн, сопротивление 290 Ом.

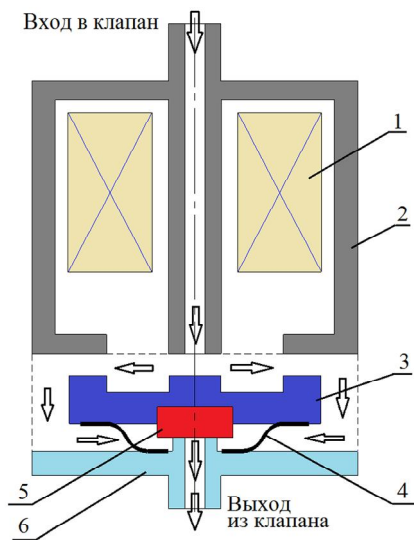


Рис. 1. Схема клапана:

- 1 – соленоид; 2 – статор; 3 – якорь; 4 – пружина;
- 5 – уплотнение; 6 – упор (выходной фланец)

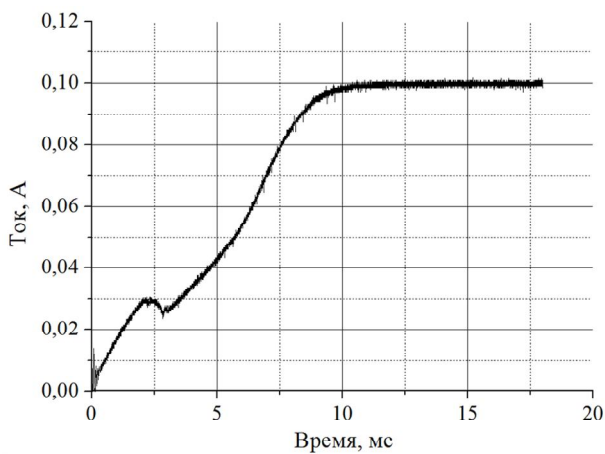


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика клапана

## 2. Описание численной модели

Расчет ЭМК проводился в Ansys Electromagnetic suite 17.2 [2]. Конечно-элементная модель (рис. 3) включала в себя элементы магнитной системы, изготовленные из электротехнической стали 10880, соленоид и окружающее пространство – вакуум. Размеры расчетной области (внешние границы вакуума) в 2 – 3 раза превышали габариты МС клапана. На границах расчетной области задавалось условие «balloon», смысл которого в следующем – с внешней стороны границы программа автоматически строит дополнительную расчетную область, уже на границах которой и задается граничное условие – равенство векторного магнитного потенциала нулю.

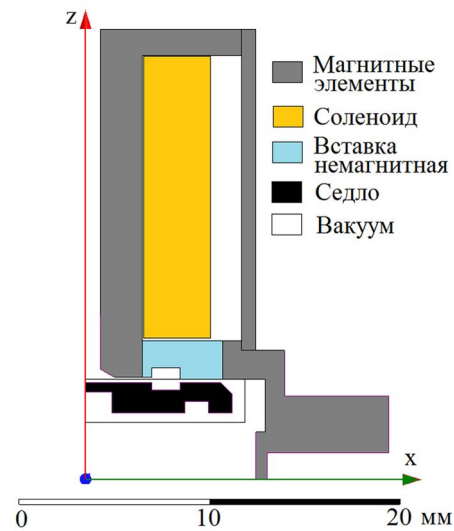


Рис. 3. Конечно-элементная модель клапана

Задача решалась в плоском осесимметричном виде. По умолчанию на оси симметрии (ось z) задавалось условие Неймана – тангенциальность вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ .

Для магнитных материалов задавалась кривая намагничивания  $B(H)$  [3], для немагнитных материалов и вакуума – магнитная проницаемость среды  $\mu = 1$ .

На якорь клапана было задано действие двух внешних сил –  $F_{\Delta P}$  и  $F_{пруж}$ . Сила от разности давлений  $F_{\Delta P}$  и  $F_{пруж}$  действуют в одном направлении. Сила  $F_{\Delta P}$  действует на якорь, только когда клапан закрыт. Для ее моделирования было сделано приближение, что после начала движения якоря сила  $F_{\Delta P}$  экспоненциально убывает. Тогда с учетом характеристики пружины была задана следующая зависимость суммарной внешней силы от перемещения якоря (рис. 4):

$$F_{внеш.сумм.}(z) = F_{\Delta P}(z) + F_{пруж}(z) = \frac{4}{10000z + 1} + (z + 1).$$

Для учета переходных процессов в электрической цепи, связанных с наличием индуктивности соленоида, был задан закон нарастания тока по времени [4]:

$$I(t) = \frac{U}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

где  $U$  – напряжение питания, В;

$R$  – омическое сопротивление соленоида, Ом;

$t$  – время, с;

$\tau$  – постоянная времени, равная отношению индуктивности  $L$  к сопротивлению  $R$ , с.

Временной шаг расчета выбирался таким образом, чтобы при дальнейшем уменьшении шага не происходило изменения времени срабатывания клапана (времени движения якоря из одного крайнего положения в другое) более чем на 5%. Для всех вариантов расчета временной шаг составил 0,02 мс.

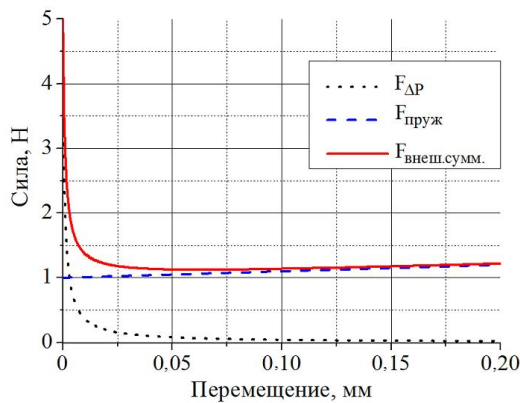


Рис. 4. Зависимость внешних сил, действующих на якорь при перемещении

### 3. Результаты расчета

Результаты предварительных расчетов клапана (рис. 5) показали, что при заданных параметрах соленоида открытие клапана происходит не более чем через 2 – 3 мс после подачи напряжения на соленоид. По мере нарастания тока в соленоиде увеличивается сила магнитного притяжения якоря к статору и как только эта сила достигает величины суммарной внешней силы, происходит скачкообразное перемещение якоря в направлении статора.

В то же время ток в соленоиде достигает насыщения не ранее чем через 10 мс после подачи напряжения. К этому моменту сила магнитного притяжения якоря к статору достигает величины 20 Н, что в 5 раз больше силы необходимой для «срыва» якоря клапана и открытия пропускного сечения и в 15 раз больше силы необходимой для удерживания клапана открытым (силы противодействия пружине). Это объясняет применяемый на практике перевод напряжения питания клапана на напряже-

ние удержания после открытия клапана, что позволяет уменьшить энергопотребление клапана без потери его функциональности.

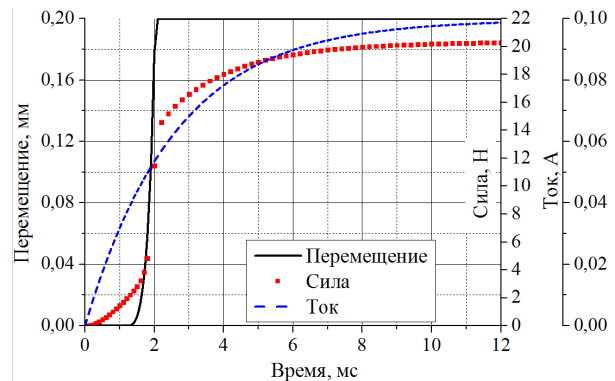


Рис. 5. Зависимость перемещения якоря, силы притяжения якоря к статору и тока соленоида от времени ( $\Delta P = 40$  атм.,  $U = 27$  В)

Известно, что магнитное сопротивление увеличивается одновременно увеличением длины силовых магнитных линий (СМЛ). В используемом прототипе СМЛ замыкаются с якоря (1) на фланец (3) под некоторым углом (рис. 6). Наименьшая протяженность СМЛ будет в том случае, если СМЛ будут «выходить» из якоря под прямым углом. В таком случае можно ожидать уменьшения магнитного сопротивления участка цепи 2 – 1 – 3 и увеличение силы притяжения. На рис. 7 приведен профиль СМЛ, полученный при уменьшении диаметра  $D_\phi$ , у которого линии замыкающиеся на магнитный фланец выходят из якоря под прямым углом.

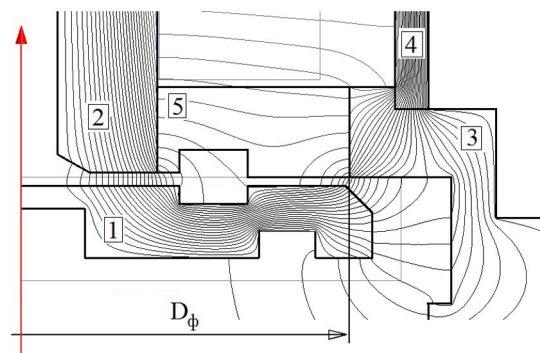


Рис. 6. Профиль СМЛ при  $D_\phi = 14,5$  мм ( $t = 0,5$  мс):  
1 – якорь; 2 – сердечник; 3 – фланец;  
4 – кожух; 5 – проставка

Были проведены расчеты при различных  $D_\phi$  и получены зависимости силы притяжения (рис. 8), времени срабатывания клапана от диаметра  $D_\phi$  (рис. 9). Обнаружено, что есть оптимальное значение  $D_\phi$  при котором обеспечивается минимальное время срабатывания клапана. Объясняется наличие оптимума следующим – при слишком большом зна-

чении  $D_\phi$  магнитное сопротивление в цепи 2 – 1 – 3 повышенное, а при слишком маленьком  $D_\phi$  уменьшается сопротивление в цепи 2 – 5 – 3 и в результате через цепь 2 – 1 – 3 проходит меньший магнитный поток, что и сказывается на увеличении времени срабатывания клапана.

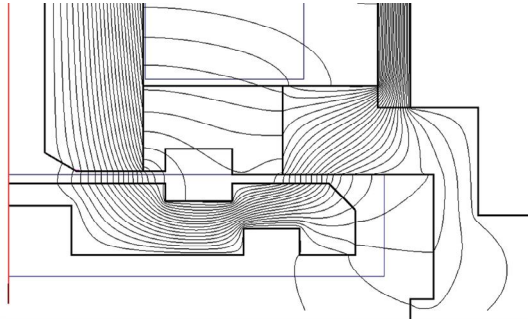


Рис. 7. Профиль СМЛ при  $D_\phi = 12,0$  мм ( $t = 0,5$  мс)

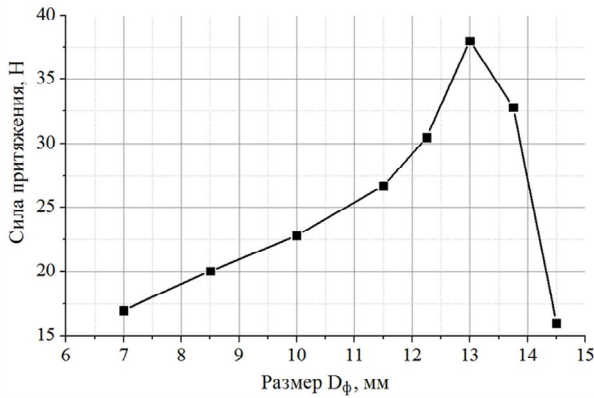


Рис. 8. Зависимость силы притяжения якоря в момент полного открытия клапана от  $D_\phi$

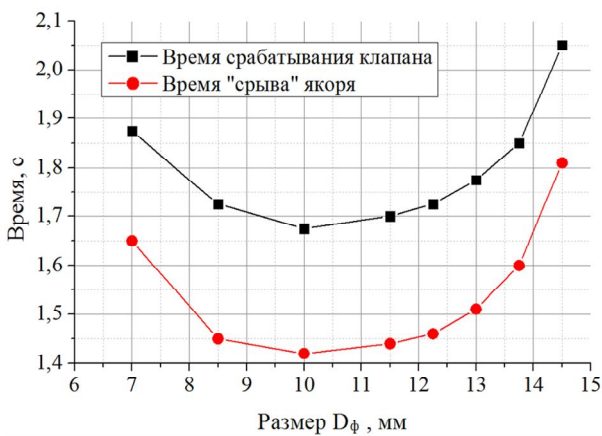


Рис. 9. Зависимость времени срабатывания клапана и времени до «срыва» якоря от  $D_\phi$

На рис. 10 приведен график зависимости времени срабатывания клапана от напряжения открытия. Видно, что при заданных характеристиках маг-

нитной системы клапана, время открытия при напряжениях менее 20 В увеличивается более чем в 2 раза. Увеличение напряжения открытия выше номинального значения не приводит к существенному уменьшению времени открытия клапана.

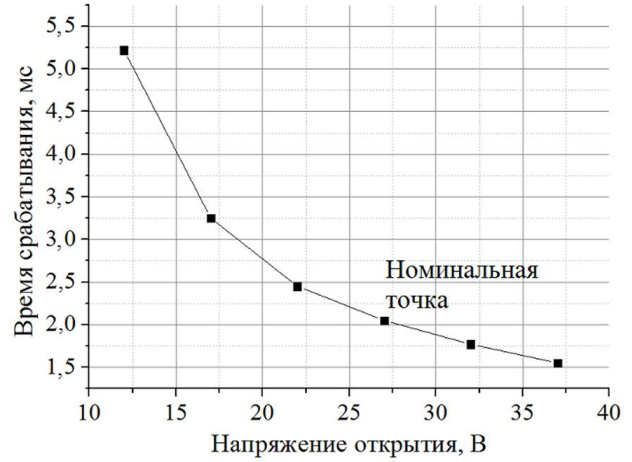


Рис. 10. Зависимость времени срабатывания клапана от напряжения открытия

Распределение магнитной индукции по элементам магнитной системы (рис. 11) в момент полного открытия клапана показывает, что сердечник уже достигает магнитного насыщения (рис. 12) вне зависимости от марки материала. Остальные элементы имеют запас по насыщению, а, следовательно, могут быть уменьшены по толщине. Очевидно, что в данном случае задачу снижения массы клапана за счет уменьшения сечения магнитопроводов необходимо решать учитывая его механическую прочность.

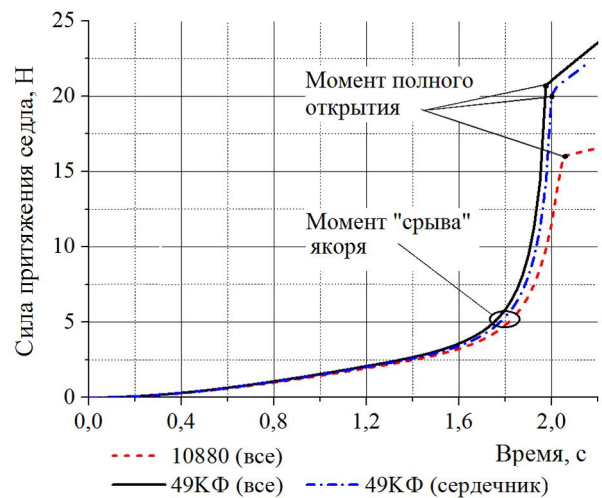


Рис. 11. Влияние материала элементов магнитной системы на силу притяжения якоря к статору

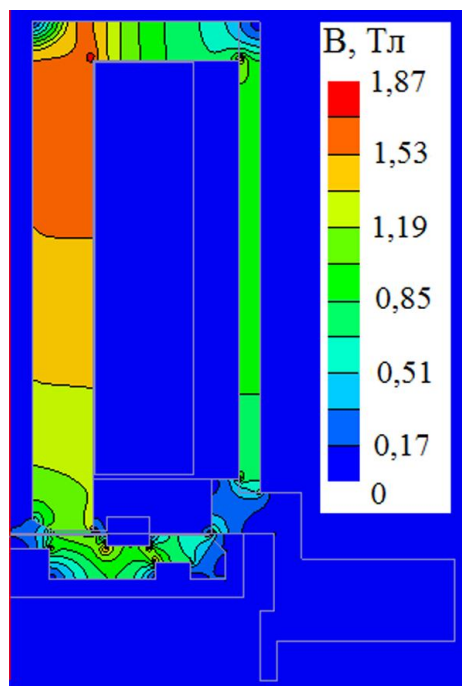


Рис. 12. Распределение магнитной индукции по конструкции клапана

### Выводы

В работе приведены результаты численного моделирования электромагнитного клапана. В результате расчетов были получены следующие основные сведения:

1) для исследуемого электромагнитного клапана основным способом повышения скорости срабатывания является уменьшение магнитного сопротивления в цепи, включающей подвижный элемент – якорь. Изменяя соответствующие размеры элементов магнитной системы клапана возможно уменьшение скорости срабатывания на 20%;

2) возможно уменьшение толщин элементов магнитной системы без увеличения полей рассеяния, так как элементы не находятся в режиме магнитного насыщения. Однако в данном случае задача снижения массы должна решаться одновременно с задачей обеспечения механической прочности.

Поступила в редакцию 18.04.2017, рассмотрена на редколлегии 8.06.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. науч. сотр., проф. кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем Ю. А. Сысоев, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### Литература

1. Теленков, А. А. Разработка и внедрение методики и инженерной программы создания оптимальных конструкций электромагнитных клапанов жидкостных ракетных двигателей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05 : защищена 18.12.2012 : утв. 21.01.13 / Теленков Александр Алексеевич. – Химки, 2012. – 152 с.
2. ANSYS Maxwell V16 Training Manual - Lecture 3 : Static Magnetic Solvers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell\\_v16\\_L03\\_Static\\_Magnetic\\_Solvers.pdf](http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell_v16_L03_Static_Magnetic_Solvers.pdf). – 01.04.2017.
3. ГОСТ 11036-75. Сталь сортовая электротехническая нелегированная. Технические условия [Текст]. – Введ. 1977-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 5 с.
4. Добротворский, И. Н. Теория электрических цепей [Текст] : учеб. для техникумов / И. Н. Добротворский. – М. : Радио и связь, 1989. – 472 с.
5. Преображенский, А. А. Магнитные материалы [Текст] / А. А. Преображенский. – М. : Высш. шк., 1965. – 234 с.

### References

1. Telenkov, A. A. *Razrabotka i vnedrenie metodiki i inzhenernoi programmy sozdaniya optimal'nykh konstruksii elektromagnitnykh klapanov zhidkostnykh raketnykh dvigatelei* Diss. cand. tekhn. nauk [Development and innovation of a method and modified program of electromagnetic valves with optimized design creation for liquid rocket engines. Dr. eng. sci. diss.]. Khimki, 2012. 152 p.
2. ANSYS Maxwell V16 Training Manual - Lecture 3 : Static Magnetic Solvers. Available at: [http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell\\_v16\\_L03\\_Static\\_Magnetic\\_Solvers.pdf](http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell_v16_L03_Static_Magnetic_Solvers.pdf) (accessed 01.04.2017).
3. GOST 11036-75. *Electrotechnical quality unalloyed steel. Specification*. Moscow, Standartinform Publ., 2003. 5 p. (In Russian).
4. Dobrotvorskii, I. N. *Teoriya elektricheskikh tsepei* [Circuit theory]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989. 472 p.
5. Preobrazhenskii, A. A. *Magnitnye materialy* [Magnetic materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1965. 234 p.

**РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО КЛАПАНА  
ЗАСОБАМИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ***М. Ю. Тітов, А. В. Лоян, Е. І. Іщенко*

В роботі представлені результати розрахунку магнітної системи електромагнітного клапана в пакеті для чисельного моделювання. Наведено схему клапана-прототипу, принцип його роботи та основні характеристики. Представлено опис чисельної моделі магнітної системи клапана: магнітних властивостей елементів, сил діючих на рухливі елементи клапана, закону електроживлення клапана. Результатами розрахунків були закони зміни в часі сили притягання якоря клапана до статора, переміщення якоря в часі, а також розподіл індукції магнітного поля в елементах магнітної системи клапана. Розрахунковим способом досліджено вплив розмірів елементів магнітної системи, вплив напруги відкриття, типу застосовуваних магнітних матеріалів на характеристики клапана.

**Ключові слова:** клапан, соленоїд, магнітна система, чисельне моделювання.

**ELECTROMAGNETIC VALVE CALCULATION  
USING NUMERICAL SIMULATION***M. Yu. Titov, A. V. Loyan, E. I. Ischenko*

The paper presents results of calculating the magnetic system of a solenoid valve in a package for numerical simulation. A scheme of the prototype valve, a principle of its operation and the main characteristics are given. A description is given of numerical model of the magnetic valve system: magnetic properties of the elements, the forces acting on the movable elements of the valve, the law of the electric power supply of the valve. The results of the calculations were: laws of armature force to stator variation in time, movement of the armature in time, as well as the distribution of the induction of the magnetic field over the elements of the magnetic system of the valve. The effect of the dimensions of the elements of the magnetic system, the influence of the opening voltage, the type of magnetic materials used on the valve characteristics were studied by calculation.

**Keywords:** valve, solenoid, magnetic system, numerical simulation.

**Тітов Максим Юрьевич** – мл. науч. сотр. кафедры 402 Национального Аэрокосмического Университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: titov@khai.edu.

**Лоян Андрей Витальевич** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. кафедры 402 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.

**Іщенко Евгений Иванович** – ст. науч. сотр. кафедры 402 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: e.ischenko@khai.edu.

**Titov Maksym Yurevich** – junior researcher, 402 department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: m.y.titov@ukr.net.

**Loyan Andriy Vitalevich** – Candidate of Technical Science, senior staff scientist, 402 department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: a.loyan@khai.edu.

**Ischenko Evgeniy Ivanovich** - senior staff scientist, 402 department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: e.ischenko@khai.edu.