

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КЛАПАНА С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2020

- А. А. Иголкин** доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматические системы энергетических установок»; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; igolkin97@gmail.com
- Т. А. Чубенко** аспирант кафедры «Автоматические системы энергетических установок»; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; chubenkott@mail.ru
- А. Д. Максимов** аспирант кафедры «Теория двигателей летательных аппаратов»; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; asdds2014@mail.ru

Проблема создания оптимальных конструкций электромагнитных клапанов актуальна для многих сфер промышленности. Развитие техники характеризуется увеличением мощности, повышением давлений, применяемых для приводных механизмов, уменьшением габаритов и массы агрегатов автоматики. Целью данной работы является созданием усовершенствованного электромагнитного клапана, обеспечивающего оптимальное сочетание высоких параметров, надежности, технологичности и минимальной стоимости. На основе стандартных зависимостей для электромагнитных явлений была создана математическая модель клапана – СУ.1, которая была просчитана в нескольких специализированных программных пакетах: NISA, FEMM, ANSYS Maxwell. Проведён параметрический расчёт в ANSYS Maxwell при переменных величинах рабочего зазора и силы тока в катушке, по результатам которого получено поле распределения магнитной индукции. Представлены результаты моделирования работы клапана и поле распределения магнитной индукции при различных значениях силы тока в катушке и величины рабочего зазора. На основе полученных зависимостей была создана модель электромагнитного клапана с улучшенными характеристиками для жидкостного ракетного двигателя, минимальное время единичного включения которого составило 40 мс. Полученные результаты позволят создать клапан с временем удержания в открытом состоянии 800 с, что считается достаточным при применении в электромагнитных клапанах постоянного тока.

Электромагнитный клапан; жидкостный ракетный двигатель; быстродействие; характеристики; магнитная индукция; ANSYS Maxwell

Цитирование: Иголкин А.А., Чубенко Т.А., Максимов А.Д. Разработка модели электромагнитного клапана с улучшенными характеристиками для жидкостного ракетного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19, № 4. С. 30-42. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-4-30-42

Введение

Электромагнитные клапаны (ЭК) являются элементами, наиболее часто используемыми для управления потоками жидкостей, они находят широчайшее применение в энергетике, нефтяной, химической и в других областях техники. В системах управления жидкостными ракетными двигателями (ЖРД) ЭК используются как в качестве главных клапанов, например топливные, так и в качестве управляющих агрегатов, обеспечивающих приведение в действие главных клапанов и других устройств [1]. В случае применения в малоразмерных ЖРД от быстродействия клапана в значительной степени зависит уровень тяги в импульсном режиме работы двигателя, а также единичный импульс. Поэтому крайне важной задачей при создании нового двигателя

является разработка ЭК [2]. В данной работе рассматривается малоразмерный ЖРД, представленный на рис. 1.

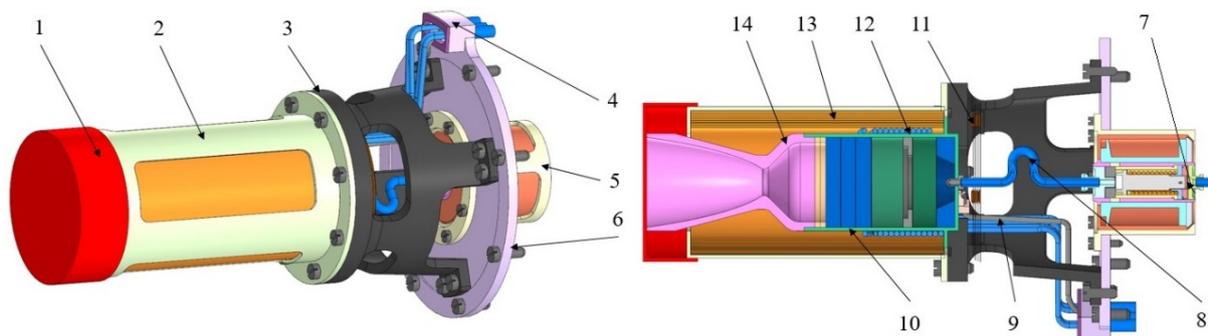


Рис. 1. Модель ЖРД:

1 – технологическая заглушка; 2 – корпус теплоизоляции; 3 – стойка; 4 – чашечка для разводки проводов; 5 – корпус клапанов; 6 – плата; 7 – узел клапанный; 8 – трубка подвода топлива; 9 – термopара; 10 – камера; 11 – торцевые экраны; 12 – электрический нагреватель; 13 – экраны ЭВТИ; 14 – сопло

Постановка задачи

Последовательность работы топливных клапанов, скорость их открытия и закрытия, характер изменения гидравлического сопротивления, герметичность узлов – всё это входит в число факторов, определяющих характер переходного процесса изменения режима в камере двигателя [3]. Поэтому целью работы стало:

- 1) анализ доступных для определения характеристик магнитной системы клапана CAD/CAM/CAE программных комплексов, разработка метода их применения;
- 2) численный расчёт магнитной системы клапана;
- 3) проектирование ЭК с улучшенными характеристиками относительно ближайших аналогов, то есть клапанов малоразмерных ЖРД со схожим уровнем удельного импульса и тяги [4; 5].

Проектирование прототипа электромагнитного клапана

Проектирование ЭК состоит в выборе его конструктивной формы, наиболее полно соответствующей заданным условиям работы двигателя. Затем, в зависимости от требуемой величины времени срабатывания, определяются размеры магнитопровода и параметры обмотки так, чтобы создать требуемую силовую характеристику электромагнита. Так как перемещение якоря происходит под действием пружины, то задачей электромагнита является обеспечение удержания якоря в притянутом положении. По величине усилий, необходимых для перемещения клапана, выбирается пружина и соответственно определяется противодействующая характеристика электромагнита. Кроме того, клапан должен удовлетворять всем специфическим условиям эксплуатации [6]. Основываясь на перечисленных выше условиях, были определены необходимые расчётные данные для клапана, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для расчёта клапана

№ п/п	Параметр	Величина	Описание
1	$P_{вх}$	2,5-5,0 МПа	Давление на входе
2	U	27-34 В	Напряжение открытия
3	\dot{m}	23,2 г/с	Массовый расход
4	k	0,5-3	Коэффициент дроселирования массового расхода
5	δ_p	0,4±0,1мм	Рабочий зазор

Давление на входе, а именно диапазон рабочего давления ($P_{ex} = P_{раб. max} - P_{раб}$) выбирался бóльшим, чем у ближайших аналогов. Допуск на величину зазора обусловлен технологической сложностью изготовления и сборки, так при его значении меньше 0,3 мм возможно залипание якоря клапана, а при величине более 0,5 мм величина тяги электромагнита может оказаться недостаточной для открытия клапана. В зависимости от коэффициента дросселирования можно получить величину массового расхода от 11,6 до 69,9 г/с.

Для определения параметров ЭК рассчитывалась магнитная система по методике ОСТ 92-9376-80 [7]. Конструктивная схема исследуемого клапана СУ.1 представлена на рис. 2. Он представляет собой осесимметричную конструкцию с осевым входом и выходом рабочего тела.

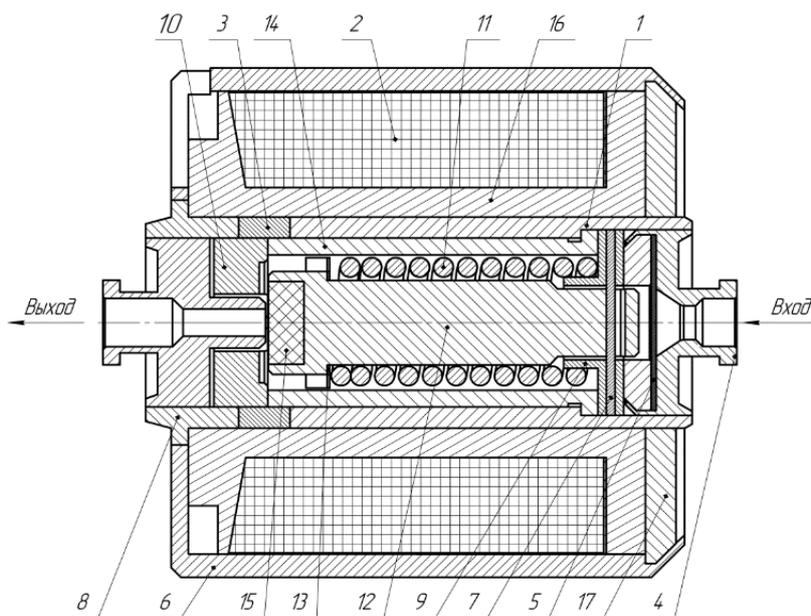


Рис. 2. Конструктивная схема клапана СУ.1:

1 – корпус; 2 – катушка; 3 – вставка; 4 – штуцер-фильтр; 5 – фильтр; 6 – корпус; 7 – чека; 8 – седло-штуцер; 9 – втулка; 10 – якорь; 11 – пружина; 12 – упор; 13 – шайба; 14 – стоп; 15 – уплотнительный элемент; 16 – каркас; 17 – крышка

Расчёт магнитных полей и силовых характеристик клапана с использованием CAD/CAM/CAE программных комплексов

Процесс срабатывания электромагнитов носит динамический характер. Чтобы охарактеризовать его динамический режим работы, необходимо иметь зависимость изменения вектора магнитной индукции и пути, пройденного якорем от времени.

Для получения поля распределения магнитной индукции и визуализации работы клапана были проведены электромагнитные расчёты в следующих программных комплексах [8; 9]:

- модуль EMAG пакета прикладных программ NISA; базовая из рассматриваемых программ, рассчитывает 2D- и 3D-модели, обладает достаточной точностью, автоматически не генерирует сетку конечных элементов.

- FEMM – простейшая из рассматриваемых программ, рассчитывает только 2D модели, имеет небольшую базу материалов, обладает простым интерфейсом.

- Ansys Maxwell; ведущий программный продукт для 2D- и 3D-моделирования электромагнитных полей.

Математическая модель магнитной системы клапана включает в себя стандартные зависимости для электромагнитных явлений, описанных в [10].

Общей задачей расчёта магнитного поля является нахождение вектора магнитной индукции \vec{B} или вектора напряжённости магнитного поля \vec{H} , которые связаны соотношением:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (1)$$

где μ – абсолютная магнитная проницаемость.

Расчёт осуществляется на основе математической модели, базирующейся на уравнениях Максвелла. Основные уравнения Максвелла для магнитоэлектростатического поля, записанные в дифференциальной форме, имеют следующий вид:

1. Закон полного тока:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}. \quad (2)$$

2. Принцип непрерывности магнитного потока:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0. \quad (3)$$

Исходя из формулы (3), вектор магнитной индукции можно записать как

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}, \quad (4)$$

так как всегда $\text{div} \text{rot} A = 0$, где A – векторный магнитный потенциал. После подстановки формул (4) и (1) в (2) имеем

$$\nabla \times \nu \nabla \times \vec{A} = \vec{J}, \quad \nu = \frac{1}{\mu}. \quad (5)$$

Подчинив из (5) \vec{A} условию $\text{div} \vec{A} = 0$, т.е. считая, что поле вектора \vec{A} не имеет источников, получаем:

$$(\nabla \cdot \nu \nabla) \vec{A} = -\vec{J}.$$

Действительно, при условии $\text{div} \vec{A} \neq 0$ можно положить $\vec{A} = \vec{A}' + \vec{A}''$, причём $\text{div} \vec{A}' = 0$ и $\text{div} \vec{A}'' \neq 0$. Поле составляющей \vec{A}'' , как созданное источниками, является потенциальным и, следовательно, $\text{rot} \vec{A}'' = 0$. Поэтому $\vec{B} = \text{rot} \vec{A} = \text{rot} \vec{A}'$ и можно принять $\vec{A}'' = 0$. После нахождения векторного магнитного потенциала по уравнению (4) вычисляется индукция магнитного поля. Магнитный поток сквозь некоторую поверхность S вычисляется как

$$\Phi = \int_S B ds = \int_S \text{rot} A ds = \oint A dl.$$

Полученная в результате преобразований по методу конечных элементов исходных дифференциальных уравнений поля система уравнений решается итерационным методом Ньютона-Рафсона.

С целью упрощения модели и минимизации времени расчёта в случае, когда рассматривается поле токов, протекающих по круговым контурам, лежащих в параллельных плоскостях и имеющих центры на общей оси, например OZ , вместо трёхмерной задачи достаточно рассмотреть картину поля в одной плоскости, проходящей через эту ось. То есть рассмотреть двумерную осесимметричную задачу магнитостатики, которая будет решаться только относительно ϕ -составляющей магнитного векторного потенциала. Таким образом, магнитный расчёт сводится к решению одного уравнения в частных производных для азимутальной составляющей векторного потенциала:

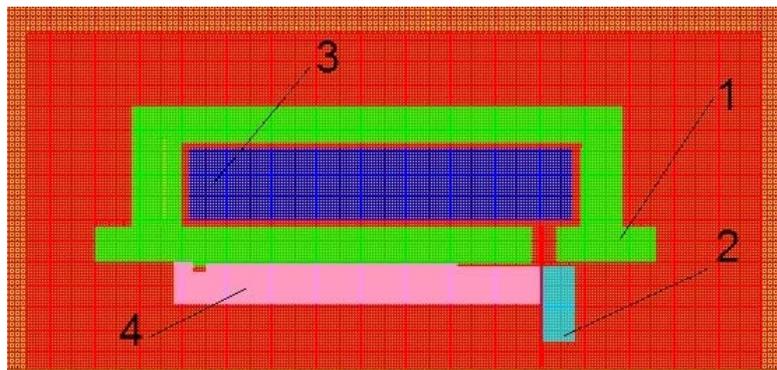
$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\nu \frac{\partial (rA_\phi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial A_\phi}{\partial z} \right) = -\vec{J}.$$

Решив данное уравнение и зная распределение векторного магнитного потенциала в области моделирования, можно найти распределение составляющей вектора магнитной индукции по выражениям:

$$B_r = -\frac{\partial A_\phi}{\partial z}, \quad B_z = \frac{\partial A_\phi}{\partial r}, \quad B_\phi = \sqrt{B_r^2 + B_z^2}.$$

Для того чтобы уравнения имели единственное решение они дополняются граничными условиями: граничными условиями 1 рода (Дирихле) – на границе задаётся значение искомой функции, или граничными условиями 2 рода (Неймана) – для них задаётся изменение искомой функции по нормали к границе.

При создании расчётной модели клапана была использована двумерная (для программ NISA и FEMM) упрощённая осесимметричная магнитная схема, изображённая на рис. 3.



*Рис. 3. Расчётная схема клапана:
1 – магнитопровод; 2 – якорь; 3 – обмотка; 4 – стоп*

При расчётах рассматривался наихудший случай работы клапана, то есть с наибольшим значением дросселирования тяги при максимальном входном давлении, а для FEMM при наибольшем значении допуска на рабочий зазор, величина которого составила 0,5 мм, количество витков катушки принималось равным 1050.

Также учитывались возможные зазоры между магнитопроводом и стопом, между якорем и магнитопроводом, технологические выемки. Непараллельность поверхностей

якоря и магнитопровода не регламентировалась, в связи с этим в расчётах непараллельность принимается равной нулю.

Расчётная ветка в NISA состояла из 117169 конечных элементов. При построении модели клапана КЭМ необходимая точность результатов расчётов достигалась разбиением магнитной схемы на простейшие элементы сеткой, состоящей из не менее четырёх, пяти элементов как по высоте, так и по ширине каждой детали. Элементам магнитной системы были присвоены соответствующие свойства материала, магнитомягкой стали с зависимостью индукции B от напряжённости H магнитного поля, изображённой на рис. 4. Данная кривая намагничиваемости была построена по данным из ГОСТ 10160-75 [11].

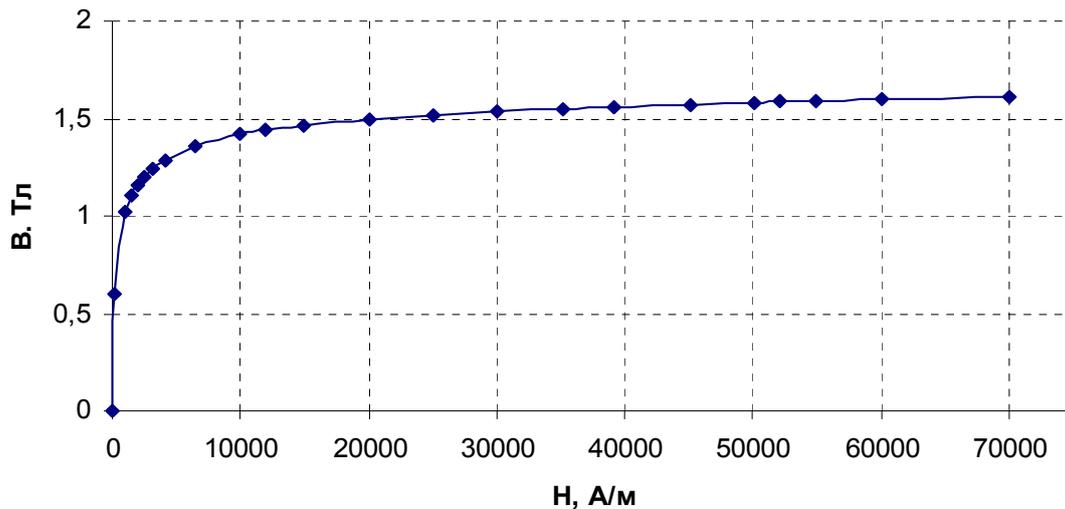


Рис. 4. Зависимость индукции от напряжённости магнитного поля для магнитомягкой стали 16Х-ВИ

В качестве граничных условий задавалась плотность тока в катушке, которая зависит от определённых при проектировании параметров: количества витков, геометрии катушки и напряжения, подаваемого на клапан. Также моделировалось условие периодичности и окружающая клапан среда.

Следует отметить, что в данных магнитных расчётах при задании свойств стали не были учтены зависимости их состояния от предшествующего магнитного воздействия. Так после отключения обмотки части магнитопровода сохраняют некоторое намагничивание, обусловленное коэрцитивной силой. Коэрцитивная сила H_c – это размагничивающее поле, которое должно быть приложено к предварительно намагниченному образцу для того, чтобы индукция в нём стала равной нулю. Поэтому при малых рабочих зазорах возможно «залипание» притянутого якоря под воздействием остаточного потока, то есть потока, который остался в образце после снятия магнитного поля.

Проводилось несколько расчётов с учётом изменения рабочего зазора в поле допуска (рис. 5, 6). В результате расчётов было получено поле распределения магнитной индукции в конструкции клапана, а также определены величины силы тяги электромагнита и магнитной индукции в рабочем воздушном зазоре между якорем и стопом. Поля распределения магнитной индукции в рабочем зазоре при $\delta_p = 0,3$ мм; 0,4 мм; 0,5 мм представлены на рис. 5.

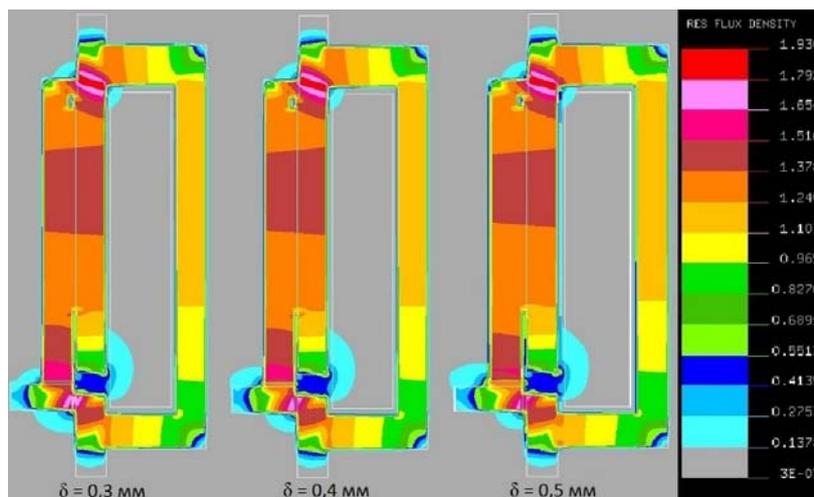


Рис. 5. Поля распределения магнитной индукции при рабочем зазоре $\delta_p = 0,3 - 0,5$ мм в NISA

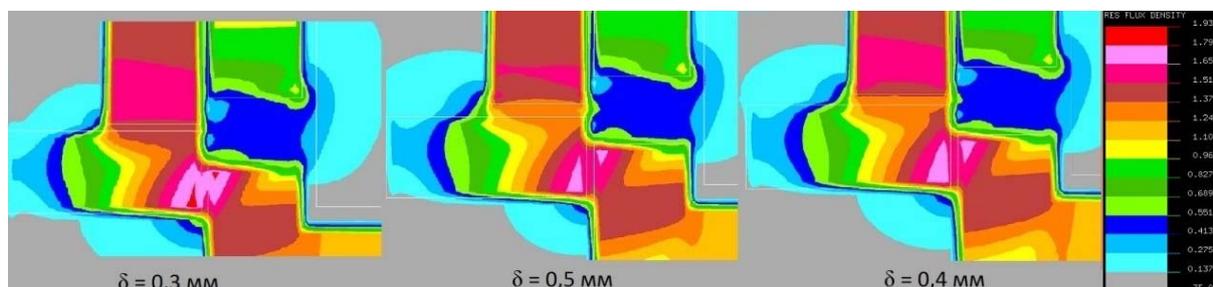


Рис. 6. Поля распределения магнитной индукции в рабочем зазоре

Из рис. 5 видно, что по мере увеличения ширины рабочего зазора между якорем и стопом величина магнитной индукции уменьшается и изменяется в пределах от 1,6 до 1,25 Тл. Поля распределения магнитной индукции в рабочем зазоре при $\delta_p = 0,3$ мм; 0,4 мм; 0,5 мм представлены на рис. 6.

Для сравнения был проведён расчёт в программе FEMM с аналогичной геометрией клапана и граничными условиями. В имеющейся версии программы было невозможно задать кривую намагничиваемости стали, поэтому был выбран ближайший аналог магнитомягкого материала. Также автоматически сгенерированная сетка (рис. 7) имеет в 10 раз меньше элементов, чем в NISA. Полученное распределение вектора магнитной индукции представлено на рис. 7.

В программе ANSYS Maxwell рассматривалась усложнённая, по сравнению с предыдущими программами, 3D-модель магнитной системы при аналогичных граничных условиях. Программа допускает задание кривой намагничиваемости материала, а необходимая точность расчёта достигается выбором количества проходов и величины погрешности [12]. Явным достоинством данной программы является возможность проведения параметрического анализа, результаты, полученные в ходе него, представлены на рис. 8, 9, а полная визуализация открытия/закрытия клапана доступна по ссылке <https://youtu.be/nCKHH6WFEiY>.

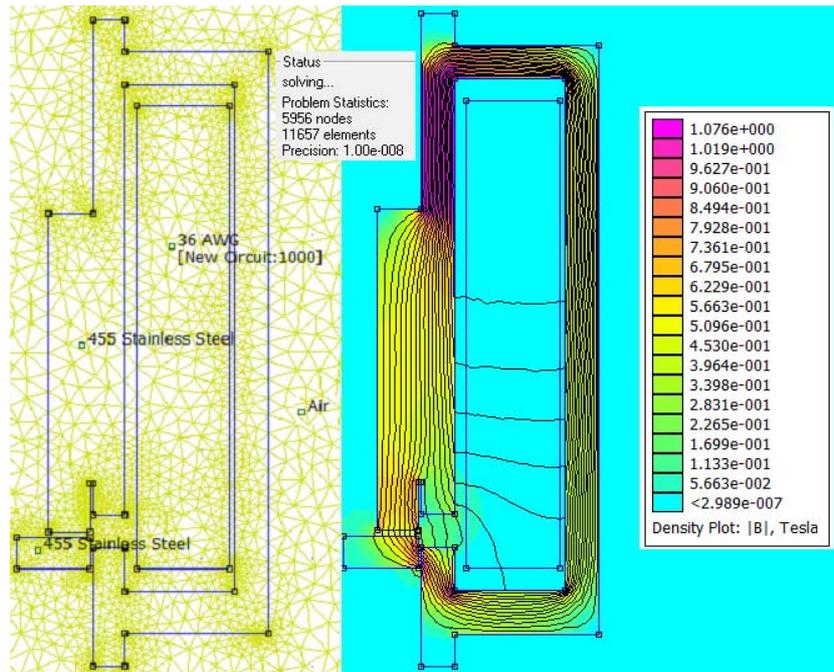


Рис. 7. Расчёт в FEMM

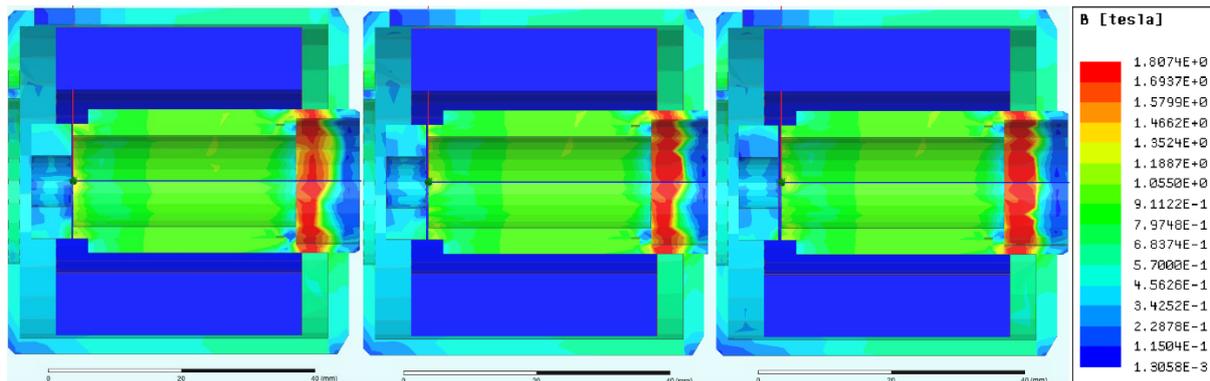


Рис. 8. Поля распределения магнитной индукции в рабочем зазоре при $\delta_p = 0,3 - 0,5$ мм в Ansys Maxwell

Основными силовыми характеристиками электромагнита являются величина магнитной индукции в рабочем зазоре B_p и его тяга F_T , которые можно определить следующим образом:

$$B_p = \sqrt{\frac{2\mu_B\mu_0 Q_{эм}}{\pi r_{яэ}^2}},$$

где μ_B – относительная магнитная проницаемость воздуха; $Q_{эм}$ – потребное усилие электромагнита, то есть совокупность сил, которые необходимо преодолеть при движении якоря, с учётом коэффициента запаса.

$$F_T = 5,1 \cdot 10^{-8} J^2 \omega^2 \frac{dG_\delta}{d\delta},$$

где J – установившееся значение тока в обмотке; ω – количество витков; G_δ – магнитная проводимость рабочего зазора; δ – величина рабочего зазора.

Полученные значения силы тяги электромагнита F_T и магнитной индукции в рабочем зазоре B_p , при одинаковом количестве витков, в программах NISA, FEMM и ANSYS Maxwell, совместно с значениями, определёнными по [8], представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчёта

Рабочий зазор, мм	$\delta_p = 0,3$	$\delta_p = 0,4$	$\delta_p = 0,5$
Теоретическая магнитная индукция B_p , Тл	1,33	1,33	1,33
Рассчитанная в NISA магнитная индукция B_p , Тл	1,46	1,37	1,25
Рассчитанная в FEMM магнитная индукция B_p , Тл	–	–	0,61
Рассчитанная в ANSYS M. магнитная индукция B_p , Тл	1,27	1,19	1,09
Теоретическая сила тяги электромагнита F_T , Н	360	360	360
Рассчитанная в NISA сила тяги электромагнита F_T , Н	395	370	338
Рассчитанная в ANSYS M. сила тяги электромагнита F_T , Н	344	323	298
Рассчитанная сила тяги электромагнита F_T , Н	–	–	155

Из табл. 2 видно, что погрешность относительно теоретического расчёта по [7] составляет от 3 до 13% и является удовлетворительной с учётом допущений, принятых в методике ОСТ 92-9376-80 [7]. При доводке магнитной системы, с учётом теоретических расчётов и параметрического расчёта в программе ANSYS Maxwell при переменных величинах рабочего зазора и силы тока в катушке (рис. 9), были увеличены толщины магнитопровода и стопа, а для улучшения характеристик – уменьшена толщина якоря.

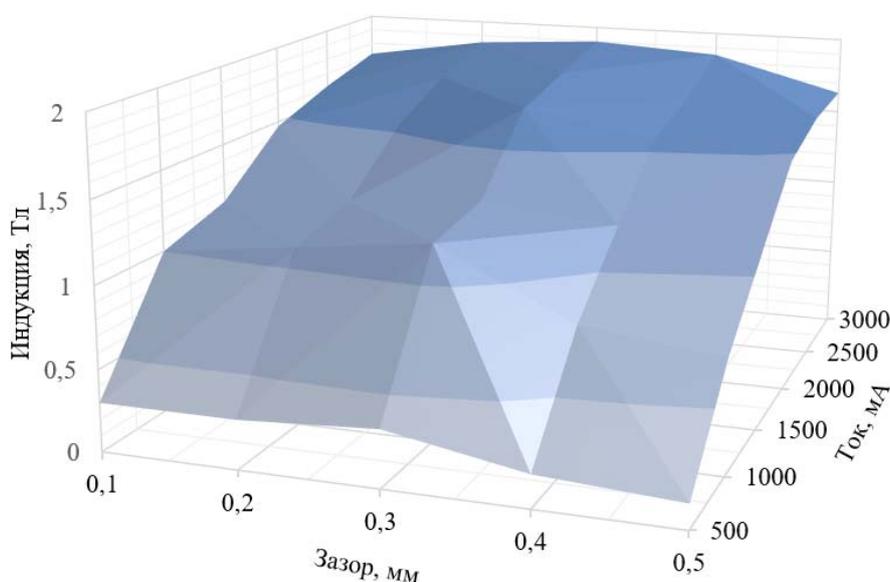


Рис. 9. Параметрический анализ в ANSYS Maxwell

Полученное поле (рис. 9) позволяет достаточно легко и с требуемой точностью определить оптимальную величину тока при выбранном размере рабочего зазора и рассчитанном значении магнитной индукции. Например, для рассматриваемого клапана СУ.1 особенно важно распределение магнитной индукции в поле допуска на рабочий зазор. По данным из поля можно сделать предварительный вывод о том, что индукция в зазоре (1,1-1,3 Тл) имеет достаточное значение для открытия и удержания клапана. В противном случае необходимо было изменить диапазон параметрического анализа. Так как на практике существует тенденция по снижению потребляемой бортовой энергии, но при этом предел насыщения прецизионных магнитно-мягких стальных сплавов составляет до 2,5 Тл, что не гарантирует в будущем развития достаточной силы тяги электромагнита при устоявшейся конструкции. Это даёт предпосылки к модернизации структуры клапана или улучшению характеристик имеющихся материалов [13].

Заключение

Анализ доступных для определения характеристик магнитной системы клапана CAD/CAM/CAE программных комплексов показывает, что наиболее точным и функциональным является ANSYS Maxwell, так как позволяет решать задачи как в 2D так и 3D постановке, допускает задание кривой намагничиваемости материала, а также получить необходимую точность расчёта путём выбора количества проходов и величины погрешности. Применённый параметрический метод позволяет на этапе проектирования конструкции ЭК достичь требуемого значения магнитной индукции, а также улучшить конструкцию клапана. Например, применяя в качестве запорного элемента упругую мембрану, которая заменит собой массивную пружину и якорь, повысив тем самым надёжность и эффективность работы клапана. Также методика параметрических расчётов позволит значительно упростить разработку клапанов с поляризованными электромагнитами. У поляризованных электромагнитов время срабатывания может быть получено на порядок меньше, чем у нейтральных, так как постоянная времени их обмоток обычно мала, ход якоря невелик, а сам якорь выполняется лёгким, что значительно уменьшит потребление бортовой энергии космического аппарата.

С использованием вышеперечисленных результатов спроектирован электромагнитный клапан СУ.1 с улучшенными характеристиками. Для сравнения в табл. 3 представлены параметры клапанов ближайших аналогов со схожим уровнем тяги и значением удельного импульса, рассматриваемого малоразмерного ЖРД – двигателей МТ-6 [4] и ДОК-50 [5]. Достигнуты ли цели и прочее.

Таблица 3. Параметры клапанов ЖРД

Наименование	МТ-6	ДОК-50	СУ.1
Давление на входе, $P_{вх}$, МПа	0,9-2,8	1,48-1,52	2,5-5
Энергопотребление клапана, P , Вт, не более	20	16,2	15
Максимальное количество включений, n , тыс.	14,8	4	5*
Время единичного включения, t , мс	–	50	40
Максимальное время работы, с	–	600	800

По данным табл. 3 можно сделать вывод, что клапан рассматриваемого ЖРД обладает меньшим энергопотреблением и улучшенным временем единичного включения по сравнению с клапанами аналогов, а более широкий диапазон рабочего давления обеспечит применимость клапана на большем количестве двигателей.

Таким образом поставленные задачи выполнены в полном объёме, а результаты данной работы могут найти практическое применение на предприятиях, занимающихся разработкой ЭК.

Результаты исследования были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (Проект № 0777-2020-0015).

Библиографический список

1. Теленков А.А. Разработка и внедрение методики и инженерной программы создания оптимальных конструкций электромагнитных клапанов жидкостных ракетных двигателей. Дис. ... канд. техн. наук. Химки, 2011. 152 с.
2. Конох В.И., Бойко В.С., Трояк А.Б., Ивашура А.В. Электромагнитные клапаны разработки КБ жидкостных ракетных двигателей ГП «КБ «Южное» // Космическая техника. Ракетное вооружение. 2018. № 2 (116). С. 34-48.
3. Эдельман А.И. Топливные клапаны жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1970. 244 с.
4. Hydrazine monopropellant thrusters.
<https://www.ihl.co.jp/ia/en/products/space/hydrazine>
5. ЖРДМТ от 0,5 кгс до 250 кгс. <http://kbhmisaeva.ru/main.php?id=33>
6. Беляев Н.М., Уваров Е.И. Расчёт и проектирование реактивных систем управления космических летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1974. 200 с.
7. ОСТ 92-9376-80. Электромагниты пневматических и гидравлических клапанов, методика расчёта. 1980. 49 с.
8. Пантелят М.Г. Численный анализ связанных процессов в электромагнитных устройствах: состояние вопроса и обобщение // Электротехника і електромеханіка. 2013. № 3. С. 29-35.
9. Wislati R., Haase H. Design and simulation of an electromagnetic valve actuator using COMSOL multiphysics // Proceedings of the COMSOL Conference (04.-06.11.2008, Hannover, Germany).
10. Врублевский А.Н., Григорьев А.Л. Модель быстродействующего электромагнитного привода для управляющего клапана системы питания теплового двигателя // Вестник Национального технического университета «ХПИ». 2014. № 39 (1082). С. 28-44.
11. ГОСТ 10160-75. Сплавы прецизионные магнитно-мягкие. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 2004. 48 с.
12. Pantelyat M.G., Shulzhenko N.G., Matyukhin Yu.I., Gontarowsky P.P., Doležel I., Ulrych V. Numerical simulation of electrical engineering devices: magneto-thermo-mechanical coupling // COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. 2011. V. 30, Iss. 4. P. 1189-1204. DOI: 10.1108/03321641111133127
13. Балакин А.В., Гафуров Т.Х., Пономарёв И.Г., Ушаков С.И. Разработка электромагнитного клапана с улучшенными характеристиками // Системы управления и обработки информации. 2013. № 27. С. 65-72.

DEVELOPMENT OF IMPROVED PERFORMANCE ELECTROMAGNETIC VALVE FOR LIQUID ROCKET ENGINE

© 2020

- A. A. Igolkin** Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Power Plant Automatic Systems;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
igolkin97@gmail.com
- T. A. Chubenko** Postgraduate Student, Department of Power Plant Automatic Systems;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
chubenkott@mail.ru
- A. D. Maksimov** Postgraduate Student, Department of Aircraft Engine Theory;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
asdds2014@mail.ru

The problem of developing optimal-design electromagnetic valves is relevant for many industries. The development of technology is characterized by increased power and pressures used for actuator mechanisms, as well as by reducing the dimensions and mass of automatic units. The goal of this article is to develop an advanced electromagnetic valve that would ensure optimal combination of high performance, reliability, technological effectiveness and minimal cost. On the basis of standard dependences for electromagnetic phenomena a mathematic model of a SU.1 valve was developed. It was calculated in several special-purpose software packages: NISA, FEMM, ANSYS Maxwell. Parametric analysis was implemented in ANSYS Maxwell for variable working gap settings and values of current force in the solenoid. As a result, the magnetic induction distribution field was obtained. The results of modeling the operation of the electromagnetic valve and the magnetic induction distribution field are presented for variable working gap settings and different values of current force in the solenoid. The model of an advanced electromagnetic valve for a liquid rocket engine was developed on the basis of the dependences obtained. The duration of single engine firing obtained is 40 msec. The results obtained make it possible to create a valve with hold-open time of 800 msec, which is considered sufficient for application in electromagnetic direct current valves.

Electromagnetic valve; liquid rocket engine; fast response; performance; magnetic induction; ANSYS Maxwell

Citation: Igolkin A.A., Chubenko T.A., Maksimov A.D. Development of improved performance electromagnetic valve for liquid rocket engine. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2020. V. 19, no. 4. P. 30-42. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-4-30-42

References

1. Telenkov A.A. *Razrabotka i vnedrenie metodiki i inzhenernoy programmy sozdaniya optimal'nykh konstruksiy elektromagnitnykh klapanov zhidkostnykh raketnykh dvigateley. Diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development and implementation of methods and engineering program for designing electromagnetic valves for liquid rocket engines. Candidate's dissertation (Engineering)]. Khimki, 2011. 152 p.
2. Konokh V.I., Boyko V.S., Troyak A.B., Ivashura A.V. Electromagnetic valves of development DO of liquid rocket engines GP «DO Yuzhnoye». *Space Technology. Missile Armaments*. 2018. No. 2 (116). P. 34-48. (In Russ.)
3. Edel'man A.I. *Toplivnye klapany zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Propellant valves of liquid rocket engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1970. 244 p.
4. Hydrazine monopropellant thrusters. Available at: <https://www.ihp.co.jp/ia/en/products/space/hydrazine>
5. *ZhRDMT ot 0,5 kgs do 250 kgs* [Low-thrust liquid-propellant jet engines from 0.5 kgf to 250 kgf]. Available at: <http://kbhmisaeva.ru/main.php?id=33>

6. Belyaev N.M., Uvarov E.I. *Raschet i proektirovanie reaktivnykh sistem upravleniya kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* [Calculation and design of spacecraft reaction control systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1974. 200 p.

7. OST 92-9376-80. Solenoids of air-operated and hydraulic valves, design procedure. 1980. 49 p. (In Russ.)

8. Pantelyat M.G. Multiphysical numerical analysis of electromagnetic devices: state-of-the-art and generalization. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2013. No. 3. P. 29-35. (In Russ.)

9. Wislati R., Haase H. Design and simulation of an electromagnetic valve actuator using COMSOL multiphysics. *Proceedings of the COMSOL Conference (04.-06.11.2008, Hannover, Germany)*.

10. Vrublevskiy A.N., Grigor'ev A.L. Model of a fast-response electromagnetic drive for the pilot valve of a heat engine power supply. *Vestnik NTU «KhPI»*. 2014. No. 39 (1082). P. 28-44. (In Russ.)

11. GOST 10160-75. Magnetically soft precision alloys. Specifications. Moscow: Izdatel'stvo Standartov Publ., 2004. 48 p. (In Russ.)

12. Pantelyat M.G., Shulzhenko N.G., Matyukhin Yu.I., Gontarowsky P.P., Doležel I., Ulrych B. Numerical simulation of electrical engineering devices: magneto-thermo-mechanical coupling. *COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 2011. V. 30, Iss. 4. P. 1189-1204. DOI: 10.1108/03321641111133127

13. Balakin A.V., Gafurov T.Kh., Ponomarev I.G., Ushakov S.I. Development of an advanced electromagnetic valve. *Control and Information Processing Systems*. 2013. No. 27. P. 65-72. (In Russ.)