

В. Ю. Цивилицин,

член-корреспондент НАН Украины Ю. В. Мильман, В. А. Гончарук,

И. Б. Бондар

## Создание магнитных пружин с заданной силовой характеристикой

*Проведено углубленное исследование типичной силовой характеристики магнитной пружины конструкции типа два постоянных магнита. С помощью магнитной пружины удвоенной длины экспериментально установлено, что пики на силовой характеристике обусловлены взаимодействием торцов постоянных магнитов. На коротких магнитных пружинах ( $L < D$ ) два пика на силовой характеристике сливаются в один. Предложены методы сглаживания силовой характеристики (уменьшения или устранения пиков). Показано, что можно получить практически любую заранее заданную силовую характеристику, используя постоянные магниты специальной формы и ограничители перемещения пружины.*

В связи с появлением новых магнитных материалов с высокими магнитными свойствами и относительно невысокой стоимостью [1], весьма актуальным становится вопрос о применении магнитных пружин вместо обычных механических в целом ряде приборов и устройств. Магнитные пружины выгодно отличаются от обычных механических большим ресурсом эксплуатации и широким спектром зависимости усилия втягивания/вытягивания от смещения. На механических пружинах, например, очень непросто получить практически постоянное усилие, не зависящее от смещения. Эта же задача легко решается с применением магнитной пружины.

Магнитные пружины уже нашли широкое применение не только в бытовой технике (дверные доводчики, амортизаторы), но и в конструкциях различных сложных изделий (обратный клапан для промывочных насосов в скважинах, совместная работа с шаговыми двигателями и т. д.).

Ранее было показано [2], что магнитная пружина типа два постоянных магнита, конструкция которой состоит из постоянного цилиндрического магнита с осевой намагниченностью, помещенного внутрь кольцевого магнита с антипараллельной намагниченностью, имеет улучшенную силовую характеристику по сравнению с магнитной пружиной типа постоянный магнит — магнитопровод. Общий вид магнитной пружины типа два постоянных магнита с указанием магнитных полюсов:  $N$ ,  $S$  иллюстрирует на рис. 1 [2]. Внутренний магнит входит во внешний по скользящей посадке. Типичная силовая характеристика указанной пружины с геометрическими размерами ( $D = 40$  мм,  $d = 25$  мм,  $L = 35$  мм) приведена на рис. 2. В отличие от механических пружин магнитная пружина типа два постоянных магнита имеет почти постоянное усилие втягивания. Значение усилия на горизонтальном участке или “полочке” довольно точно рассчитывается теоретически, исходя из геометрических размеров постоянных магнитов и их магнитных свойств [3]:

$$F = \frac{B_r^2}{\mu_0} \left[ \left( 1 + \frac{D^2}{L^2} \right)^{-0,5} - \left( 1 + \frac{d^2}{L^2} \right)^{-0,5} \right] S, \quad (1)$$

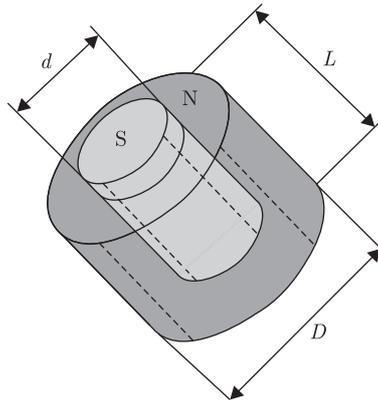


Рис. 1

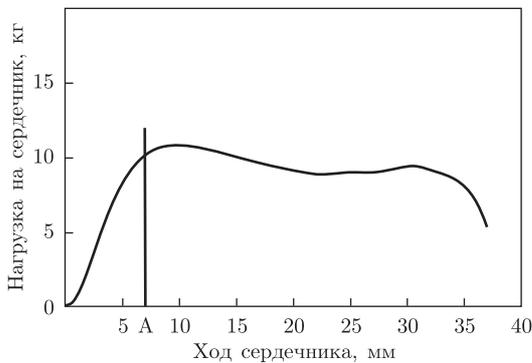


Рис. 2

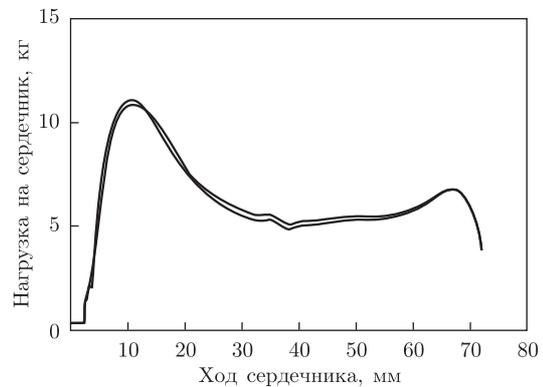


Рис. 3

где  $F$  — сила втягивания внутреннего магнита;  $D$  — внешний,  $d$  — внутренний диаметры трубчатого магнита;  $L$  — длина внешнего и внутреннего магнита;  $B_r$  — остаточная индукция материала магнита;  $S$  — площадь сечения внутреннего магнита;  $\mu_0$  — универсальная магнитная постоянная.

Однако предложенная теория не объясняет наличие на кривой усилия втягивания двух максимумов. В процессе исследования нами выполнен ряд экспериментов на магнитных пружинах типа два постоянных магнита с разными геометрическими размерами и длиной рабочего хода с целью выяснить происхождение максимумов усилия втягивания на силовой характеристике.

Следует подчеркнуть, что приведенная на рис. 2 характеристика является типичной для данного типа магнитной пружины с длиной хода большей, чем диаметр внешнего магнита: на всех снятых экспериментальных кривых присутствовали два максимума и “полочка” между ними. Второй максимум меньше первого и присутствует всегда. На основании полученных экспериментальных данных сделано следующее предположение: первый максимум на силовых характеристиках обусловлен взаимодействием двух торцов внешнего и двух торцов внутреннего магнита, а второй — взаимодействием только одного торца внешнего магнита с одним торцом внутреннего магнита. При этом первый максимум обусловлен притяжением торцов, тогда как второй максимум обусловлен их отталкиванием.

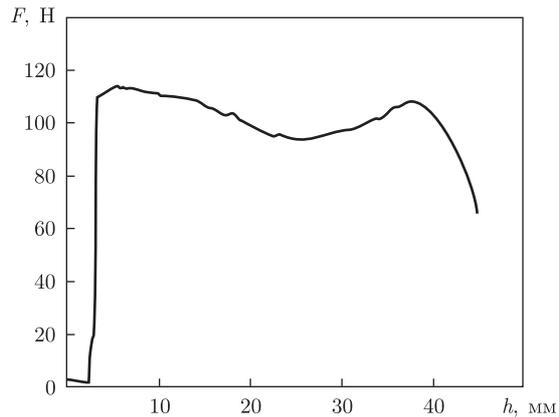


Рис. 4

Для проверки данного предположения была изготовлена магнитная пружина с удвоенной длиной по сравнению с пружиной, характеристика которой приведена на рис. 2. Силовая характеристика такой пружины ( $L = 70$  мм,  $D = 40$  мм,  $d = 25$  мм) представлена на рис. 3.

Абсолютная величина левого пика осталась прежней, а падение усилия до величины “полочки” увеличилось в два раза. Интервал, на котором происходит падение, также увеличился в два раза: с 10 до 30 мм вместо интервала с 10 до 20 мм в первом случае. Усилие втягивания на “полочке” находится в хорошем соответствии с теоретическим значением, полученным, согласно формуле (1). Левый (первый) пик оказался почти в четыре раза больше правого (второго) пика.

Эффект, описанный выше, также вполне объясним. Отметим, что два дисковых магнита с осевой намагниченностью на определенном расстоянии притягиваются в три раза сильнее, чем отталкиваются. Первый максимум обусловлен притяжением четырех торцов, а второй — отталкиванием только двух торцов. Поэтому левый максимум, согласно расчетам, должен быть больше почти в 6 раз, а в эксперименте получилось больше всего в 4 раза. Следовательно, значение “полочки” под левым пиком еще не достигло своего расчетного значения, приблизительно равного 5 кг, так как поверхность с нулевой индукцией удлиненного трубчатого магнита находится на расстоянии большем, чем 10 мм от левого торца магнитной пружины [4, с. 206].

Из изложенного выше следует, что если мы задались созданием пружины с возможно большим участком постоянного усилия втягивания, то нам надо избавиться от большего левого максимума. Проще всего это можно сделать следующими способами: 1) введением немагнитного ограничителя хода внутреннего магнита (пространственное удаление торцов внешнего и внутреннего магнита друг от друга); 2) уменьшением поперечного сечения внутреннего магнита вблизи торца (применение усеченного конуса вместо цилиндра), так как расчетное значение усилия втягивания на первом максимуме пропорционально площади поперечного сечения внутреннего магнита, в соответствии с формулой (1). Во втором случае мы уменьшаем значение “полочки” под максимумом, а также усилие взаимодействия торцов. Наиболее эффективно использование обоих указанных методов.

Экспериментальную зависимость силы втягивания  $F$  от смещения  $h$  внутреннего магнита пружины с немагнитным ограничителем и постоянным магнитом в форме усеченного конуса демонстрирует рис. 4. Нам удалось почти полностью “срезать” большой левый мак-

симум. Следует отметить, что в данном эксперименте наблюдалось увеличение второго максимума. Его тоже можно убрать, используя вместо цилиндрического магнита магнит в форме усеченного конуса, направленного вершиной в сторону нерабочего торца. В то же время наличие второго максимума усилия втягивания можно успешно использовать в практических применениях магнитной пружины данного типа.

На коротких пружинах ( $L < D$ ) максимумы силовой характеристики, вызванные влиянием торцов магнита, практически отсутствуют. Это обусловлено тем, что вклад торцов в общее усилие втягивания становится заметно меньше, чем усилие на “полочке”, а при небольшом ходе пружины оба максимума сливаются. Магниты с такими силовыми характеристиками также могут быть востребованы в промышленности.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов показали следующее:

взаимодействие торцов постоянных магнитов между собой приводит к возникновению максимумов на силовой характеристике магнитной пружины;

применяя постоянный магнит в форме усеченного конуса вместо цилиндра можно сглаживать максимумы, обусловленные влиянием торцов;

в коротких магнитных пружинах ( $L < D$ ) максимумы сливаются, а их абсолютная величина относительно “полочки” уменьшается;

изменяя размеры магнитной пружины можно изменять ее силовую характеристику  $F(x)$  в широких пределах и получить заранее заданную силовую характеристику.

1. Цивилицин В. Ю. Магнитные сплавы и керамики // Неорганічне матеріалознавство. В 2 т. Енциклопедичне видання. Т. 2, кн. 1: Матеріали і технології / За ред. Г. Г. Гнесіна, В. В. Скорохода. – Київ: Наук. думка, 2008. – С. 598–609.
2. Цивилицин В. Ю., Мильман Ю. В., Гончарук В. А., Бондар И. Б. Магнитная пружина из двух постоянных магнитов // Доп. НАН України. – 2011. – № 1. – С. 81–85.
3. Цивилицин В. Ю., Мильман Ю. В., Гончарук В. А., Бондар И. Б. Оптимизация магнитной пружины конструкции “два постоянных магнита” // Там само. – 2012. – № 2. – С. 122–127.
4. Постоянные магниты. Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Ю. М. Пятина. – Москва: Энергия, 1980. – 488 с.

*Институт проблем материаловедения  
им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев*

*Поступило в редакцию 24.07.2012*

**В. Ю. Цивіліцин**, член-кореспондент НАН України **Ю. В. Мільман**,  
**В. А. Гончарук**, **І. Б. Бондар**

### **Створення магнітних пружин із заданою силовою характеристикою**

*Виконано поглиблене дослідження типової силової характеристики магнітної пружини конструкції типу два постійних магніти. За допомогою магнітної пружини подвоєної довжини експериментально встановлено, що піки на силовій характеристиці зумовлені взаємодією торців постійних магнітів. На коротких магнітних пружинах ( $L < D$ ) два піки на силовій характеристиці зливаються в один. Запропоновано методи згладжування силової характеристики (зменшення або вилучення піків). Показано, що можна отримати практично будь-яку заздалегідь задану силову характеристику, використовуючи постійні магніти спеціальної форми та обмежувачі переміщення пружини.*

**V. Yu. Tsivilitsin**, Corresponding Member of the NAS of the Ukraine **Yu. V. Milman**,  
**V. A. Goncharuk**, **I. B. Bondar**

### **Creation of magnetic spring having a prescribed power characteristic**

*The comprehensive investigation of typical force characteristics of a magnetic spring (construction “two permanent magnets”) is carried out. It is shown that the peaks on the force dependence for a magnetic spring of double length are caused by the interaction of the ends of the permanent magnets. In short magnetic springs ( $L < D$ ), the peaks on the power characteristics merge into one. The methods of smoothing the force characteristics (reduce or eliminate the peaks) are proposed. It is shown that one can get almost any pre-determined force characteristics, by using a special form of permanent magnets and a spring motion limiter.*