

В. Ю. Цивилицин,член-корреспондент НАН Украины **Ю. В. Мильман, В. А. Гончарук,****И. Б. Бондар**

Магнитная пружина из двух постоянных магнитов

Розглянуто магнітну пружину нової конструкції — “два постійні магніти”. Виведено теоретичну формулу для розрахунку величини зусилля втягування. Проведено експеримент з вимірювання зусилля втягування на виготовленому робочому зразку магнітної пружини. Спостерігається хороша відповідність теоретичних розрахунків та експериментальних даних. Відзначено ряд переваг магнітної пружини даної конструкції порівняно з конструкцією “постійний магніт — магнітопровід”, зокрема, майже повна відсутність тертя між магнітами, а також більша висока величина зусилля втягування.

Магнитная пружина, состоящая из высокоэнергетического постоянного магнита и магнитопровода, замыкающего его полюса, рассмотрена в работе авторов [1]. Некоторым недостатком пружин данного типа является довольно сильное притяжение постоянного магнита к внутренней поверхности магнитопровода, что требует тщательной центровки магнита с помощью износостойких немагнитных тонких (до 1,5–2 мм) вставок между полюсами магнитов и магнитопроводом. В противном случае сила трения по величине может достигать почти трети величины втягивающего усилия. Для полного устранения этого нежелательного эффекта нами была разработана конструкция магнитной пружины, состоящей только из постоянных магнитов: из мощного трубчатого магнита с намагниченностью вдоль оси и цилиндрического постоянного магнита, помещаемого внутрь кольцевого магнита по скользящей посадке таким образом, что его намагниченность антипараллельна намагниченности внешнего магнита (рис. 1).

Внутренний магнит в такой системе практически не притягивается к внутренней поверхности кольцевого (находится в состоянии безразличного равновесия относительно смещений в плоскости, перпендикулярной оси симметрии), и, следовательно, сила трения между магнитами становится пренебрежимо малой по сравнению с усилием втягивания.

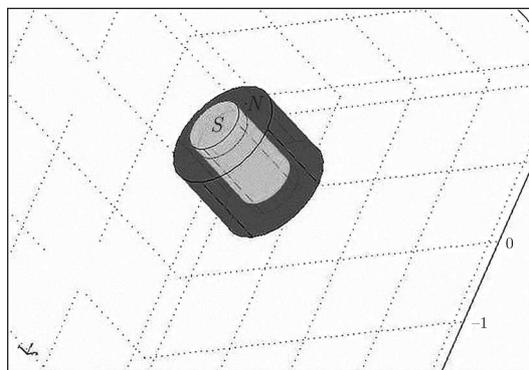


Рис. 1. Общий вид магнитной пружины

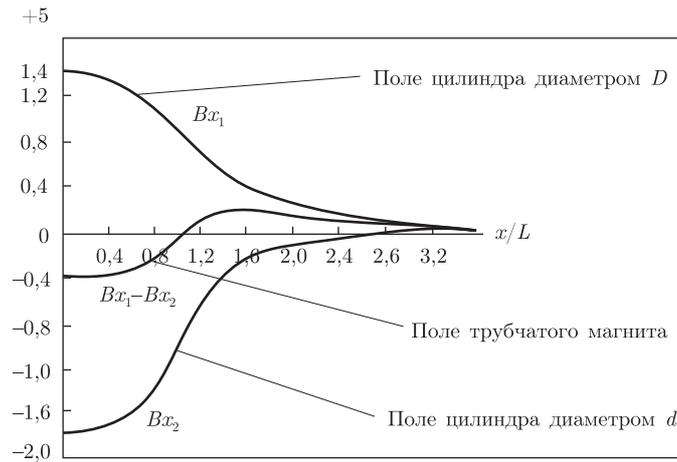


Рис. 2. Распределение индукции на оси трубчатого магнита [2] (x — точка на оси трубчатого магнита, L — его длина)

Оценим усилие втягивания этой магнитной пружины. Как известно, поле внутри трубчатого магнита практически однородно и его величина внутри полости магнита легко рассчитывается по формуле [1]:

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

где D — внешний, d — внутренний диаметр трубчатого магнита; L — его длина; B_r — остаточная индукция материала магнита.

Для магнита, у которого $D = 2d = 1,33L$, $B_r = 1,26$ Тл, величина магнитного поля в центре составит

$$H_{\text{внутр}} = 0,292 \text{ Тл}. \quad (2)$$

Из графика распределения индукции на оси трубчатого магнита (рис. 2) [2] следует, что нулевая точка индукции магнитного поля лежит вблизи торца магнита (при $x/L = 1$).

Для расчета втягивающего усилия применим метод виртуальных перемещений. Допустим, что внутренний магнит сместился относительно внешнего на величину dx . При этом будет совершена механическая работа:

$$dA = F dx. \quad (3)$$

С другой стороны, эта работа должна равняться изменению энергии элемента внутреннего магнита dW , поскольку элемент магнита длиной dx попадает из поля $H_{\text{внутр}}$ в поле с практически нулевой индукцией:

$$dW = I H_{\text{внутр}} dV = \frac{B_r}{\mu_0} H_{\text{внутр}} dV = B_r H_{\text{внутр}} \frac{\pi d^2}{4\mu_0} dx, \quad (4)$$

где I — намагниченность образца; dV — объем элемента внутреннего магнита длиной dx ; μ_0 — универсальная магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

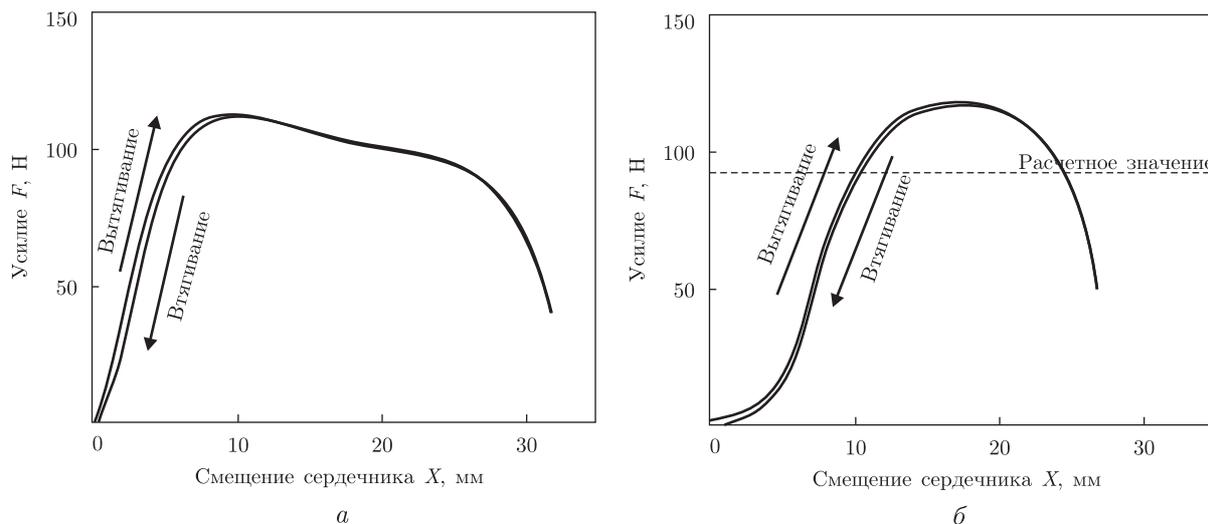


Рис. 3. Зависимость усилия втягивания — вытягивания F от смещения сердечника x : a — для магнитной цилиндрической пружины (внешний и внутренний диаметры — 40 и 20 мм соответственно; длина — 30 мм; длина внутреннего магнита — 35 мм); b — для укороченной магнитной цилиндрической пружины длиной 20 мм. Усилия втягивания и вытягивания практически совпадают, так как сила трения между движущимися элементами пружины ничтожно мала

Приравнявая (3) и (4), получаем выражение для величины втягивающего усилия:

$$F = B_r H_{\text{внутр}} \frac{\pi d^2}{4\mu_0} = B_r H_{\text{внутр}} \frac{S}{\mu_0} = B_r^2 \left[\left(1 + \frac{D^2}{L^2}\right)^{-0,5} - \left(1 + \frac{d^2}{L^2}\right)^{-0,5} \right] \frac{S}{\mu_0}, \quad (5)$$

где S — площадь сечения внутреннего магнита.

Оценка втягивающего усилия для внутреннего магнита с $d = 2 \cdot 10^{-2}$ м с учетом (2) дает:

$$F = 0,292 \cdot 1,26 \text{ Тл} \cdot \pi \cdot 10^{-4} \text{ м} / (4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}) = 92 \text{ Н}.$$

Эта теоретическая оценка была проверена экспериментально для магнитной пружины с геометрическими размерами $D = 2d = 1,33L = 4$ см. Оба постоянных магнита были изготовлены из магнитного материала N38 ($B_r = 1,26$ Тл).

График зависимости втягивающего усилия пружины от смещения (хода) сердечника приведен на рис. 3, a . Экспериментальное среднее значение усилия втягивания на рабочем ходе пружины (при смещении внутреннего магнита от 6 до 26 мм) достигает $F \approx 100$ Н, что близко к теоретической оценке, с превышением ее на 10%. Это превышение, очевидно, связано с изменением энергии размагничивающего поля трубчатого и цилиндрического магнита [1], которое при расчетах не учитывалось. Величину этой поправки можно легко оценить, замерив индукцию на поверхности полюсов:

1) отдельно стоящего кольцевого магнита (магнитно изолированного от других частей магнитной системы);

2) отдельно стоящего цилиндрического магнита;

3) в тех же точках на поверхности всей магнитной системы в сборе.

Такие измерения были проведены с использованием цифрового универсального тесламетра 43 205/1. Размагничивающий фактор рассчитывался по формуле:

$$N = 1 - \frac{B_{\text{пов}}}{B_r}. \quad (6)$$

Для отдельного кольца его значение составило $N_1 = 0,635$, для изолированного цилиндра — $N_3 = 0,555$, для кольца в сборе — $N_2 = 0,619$ и цилиндра в сборе — $N_4 = 0,540$.

Энергия размагничивающего поля трубчатого магнита изменилась на величину

$$W_{\text{тр}} = (B_r^2 V_{\text{тр}}) \cdot (N_1^2 - N_2^2) / 2\mu_0 = 0,357 \text{ Дж}, \quad (7)$$

энергия размагничивающего поля цилиндрического магнита — на величину:

$$W_{\text{ц}} = (B_r^2 V_{\text{ц}}) \cdot (N_3^2 - N_4^2) / 2\mu_0 = 0,095 \text{ Дж}. \quad (8)$$

Общее изменение энергии размагничивающего поля в “разобранной” и “собранный” пружине составило 0.452 Дж при характерном перемещении $3 \cdot 10^{-2}$ м. Отсюда следует, что увеличение силы втягивания за счет изменения энергии размагничивающего поля составляет величину порядка 15 Н (16% от теоретического усилия втягивания), что находится в хорошем соответствии с экспериментальными данными.

Интересно сравнить полученный результат с величиной втягивания магнитной пружины конструкции “постоянный магнит — магнитопровод”. Для цилиндрического магнита с площадью поперечного сечения постоянного магнита $S = 6,566 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ усилие втягивания было равно 153 Н, а в нашем случае при $S = \pi \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 104 \text{ Н}$. Если площадь поперечного сечения внутреннего магнита увеличить до $6,566 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ (и пропорционально — все геометрические размеры всей магнитной системы), то усилие магнитной пружины на постоянных магнитах возрастет до 217 Н, т. е. превысит усилие втягивания пружины конструкции “постоянный магнит — магнитопровод” на 42%. К тому же, рассматриваемая магнитная пружина предельно проста в изготовлении, а сила трения между движущимися элементами пружины практически отсутствует: на рис. 3, а, б видно, что усилия втягивания и вытягивания практически совпадают.

Некоторым недостатком такой пружины является относительно небольшая глубина хода. Технологически очень трудно изготавливать высокоэнергетические анизотропные спеченные магниты системы Nd-Fe-B с расстоянием между полюсами более 50 мм. Казалось, проблему можно легко преодолеть, сделав трубчатый магнит сборным из нескольких частей, длина каждой из которых не превышает 50 мм, но расчеты показывают, что величина поля внутри длинного магнита сильно снижается, вызывая снижение силовых характеристик магнитной пружины. Поэтому при увеличении хода пружины необходимо увеличивать и внешний диаметр трубчатого магнита, что часто неприемлемо. Для магнитных пружин с большим ходом лучше использовать конструкцию типа “постоянный магнит — магнитопровод”. Она не чувствительна к увеличению длины хода.

Конструкция “два постоянных магнита” позволяет в достаточно широких пределах изменять форму кривой и максимальное усилие вытягивания за счет изменения соотношения между наружным и внутренним диаметром, а также длиной трубчатого магнита. Например, укорачивание трубчатого магнита до 20 мм приводит к экспериментальной зависимости, представленной на рис. 3, б. Максимальное усилие втягивания возрастает до 117 Н за счет увеличения магнитного поля внутри кольцевого магнита, а ширина “полочки”, на которой усилие превышает 93 Н, сужается.

Проводя сравнение двух типов магнитных пружин, следует отметить, что усилие втягивания в конструкции “постоянный магнит — магнитопровод” имеет тенденцию к увеличению при увеличении смещения сердечника, а в конструкции “два постоянных магнита” наблюдаем тенденцию к уменьшению этой величины. Кроме того, конструкция “два постоянных магнита” позволяет закоротить нерабочий торец пружины ферромагнитным диском

и тем самым устранить левый ниспадающий участок силовой характеристики пружины (см. рис. 3, б). Применяв немагнитные дисковые прокладки между этим диском и внутренним магнитом, можно регулировать конечное усилие втягивания магнитной пружины. Более детальное рассмотрение этих возможностей требует дополнительного исследования.

Формула (5) позволяет оценить усилия магнитных пружин конструкции “два постоянных магнита” при замене магнитного материала с остаточной индукцией 1,26 Тл на материал с остаточной индукцией 1,44 Тл (максимальная B_r для спеченных магнитов, выпускаемых промышленностью) [3, 4]. Увеличение усилия втягивания за счет замены материала с более высокой B_r составит 30%. Промышленность выпускает кольцевые постоянные магниты из материала N38 диаметром до $2 \cdot 10^{-1}$ м. Значит, максимальное усилие втягивания может достигать 2300 Н, или 235 кг, при ходе в 17,5 см. Оптимизация магнитной пружины (по нашим оценкам) может увеличить усилие втягивания еще на 20–50%.

В данной конструкции можно использовать и дешевые магнитотвердые ферриты. Усилие втягивания при переходе на ферритовые магниты в соответствии с формулой (5) уменьшится в 14–16 раз и составит для пружины с $D = 2d = 1,33L$ около 7Н. Пружина с небольшой силой втягивания также может найти свое применение в различных областях. Стоимость такой пружины в 18–20 раз меньше, чем при использовании редкоземельных магнитов марки N38.

1. Цивилицин В. Ю., Мильман Ю. В., Гончарук В. А., Бондар И. Б. Применение спеченных высокоэнергетических постоянных магнитов при разработке “магнитных пружин” // Доп. НАН України. – 2009. – № 9. – С. 78–84.
2. Альтман А. Б., Герберг А. Н., Гладышев П. А. и др. Постоянные магниты. Справочник / Под ред. Ю. М. Пятина. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Москва: Энергия, 1980. – 488 с.
3. Цивилицин В. Ю. Магнитные сплавы и керамики // Неорг. материаловедение. Энциклопед. изд. Т. 2, кн. 1. – С. 598–609.
4. Цивилицин В. Ю., Мильман Ю. В., Бондар И. Б. Современные магнитотвердые материалы на основе РЗМ // Журн. функц. материалов. – 2008. – 2, № 2. – С. 42–47.

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

Поступило в редакцию 29.06.2010

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

Magnetic spring based on two permanent magnets

A new type of the magnetic spring construction “two permanent magnets” has been considered. A mathematical expression for the estimation of a pulling-in force has been offered. This expression is verified experimentally on the produced operating magnetic spring. The theoretical and experimental data are in good accordance. A number of advantages of the magnetic spring over the construction “permanent magnet – magnetic circuit” such as an insignificant friction force between two magnets and a higher pulling force are discussed.