

В. Ю. Цивилицин,

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

Оптимизация магнитной пружины конструкции “два постоянных магнита”

Изучена возможность оптимизации магнитной пружины типа “два постоянных магнита”. Проведено теоретическое исследование зависимости усилия втягивания (вытягивания) и длины рабочего хода пружины от ее геометрических размеров. Все полученные результаты были подтверждены экспериментально. Отмечается хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов. Установлены оптимальные соотношения между диаметрами внешнего и внутреннего цилиндрических магнитов для получения максимального усилия втягивания при заданной длине хода пружины. Предложена перспективная конструкция магнитной пружины с применением торцевого диска и проведены ее экспериментальные исследования.

Магнитная пружина выгодно отличается от обычной механической пружины значительно большим ресурсом эксплуатации, а также имеет широкое применение, как например, в совместной работе с шаговыми двигателями, а в быту — в качестве дверного доводчика. Усилие втягивания, как правило, является почти постоянным, а не пропорциональным смещению, как у большинства механических пружин. Магнитные пружины на постоянных магнитах делятся на два больших класса в зависимости от типа их конструкции: “два постоянных магнита” и “постоянный магнит-магнитопровод”.

В данном сообщении авторы рассматривают условия оптимизации магнитной пружины конструкции “два постоянных магнита”, которая оказывается эффективнее магнитной пружины конструкции “постоянный магнит-магнитопровод”. Исследуется также влияние замыкающего магнитопровода на нерабочем торце пружины на силовые характеристики магнитомеханического устройства. Рассматриваемая пружина состоит из двух постоянных магнитов в форме коаксиальных кольца и цилиндра с антипараллельной намагниченностью (рис. 1). Намагниченность обоих магнитов может быть и параллельной, но тогда нельзя обеспечить “дощелкивание” с помощью дискового магнитопровода на нерабочем торце. Хотя в этом случае можно осуществить “телескопическую” конструкцию, состоящую более чем из двух магнитов, и в ненагруженном состоянии пружина будет иметь максимальную длину (секции выдвинутся друг из друга). Это может оказаться полезным для увеличения хода пружины при сохранении внешнего диаметра неизменным. Все приведенные ниже рассуждения справедливы для параллельной и антипараллельной ориентации коаксиальных магнитов.

Нерабочий торец магнитной системы при необходимости замыкается ферромагнитным диском (магнитопроводом). Произведем расчет втягивающего усилия магнитной пружины конструкции “два постоянных магнита”. За начало координат примем рабочий торец большего магнита (рис. 2). Ранее было показано [1], что усилие втягивания (вытягивания)

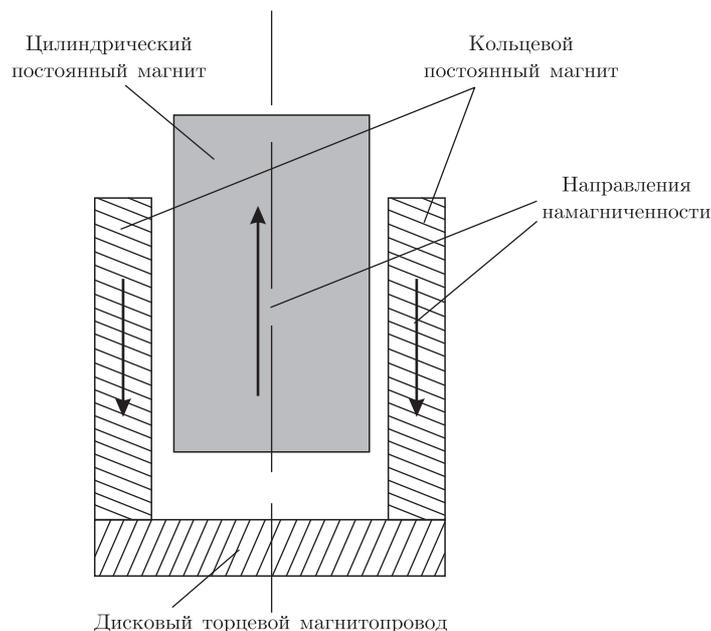


Рис. 1. Схема магнитной пружины конструкции “два постоянных магнита” с антипараллельными намагниченностями постоянных магнитов

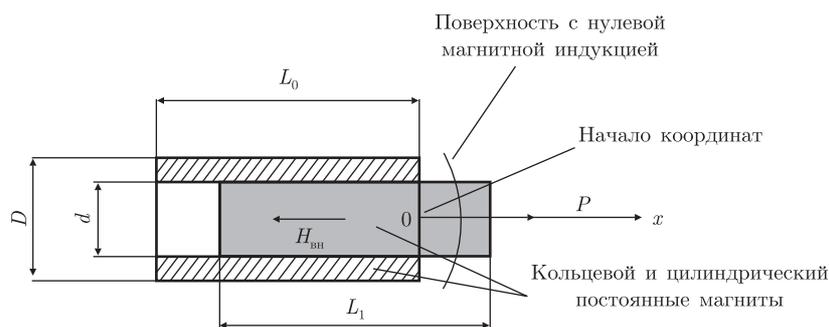


Рис. 2. Схема к расчету усилия втягивания магнитной пружины конструкции “два постоянных магнита”

подобной магнитной системы хорошо описывается формулой

$$F = \frac{B_r H_{вн} S}{\mu_0}, \quad (1)$$

где F — сила магнитодвижущая; S — площадь поперечного сечения внутреннего магнита; B_r — остаточная индукция материала, из которого изготовлены постоянные магниты; μ_0 — универсальная магнитная постоянная; $H_{вн}$ — поле внутри внешнего кольцевого магнита, определяемое по формуле, приведенной из [2, с. 206]:

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

где D и d — соответственно внешний и внутренний диаметры трубчатого магнита, L — его длина.

Если остаточная индукция обоих постоянных магнитов одинакова, то, используя формулы (1) и (2), получаем:

$$F = B_r^2 \left[\left(1 + \frac{D^2}{L^2}\right)^{-0,5} - \left(1 + \frac{d^2}{L^2}\right)^{-0,5} \right] \frac{S}{\mu_0}. \quad (3)$$

В рассматриваемом случае

$$S = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (4)$$

Подставляя уравнение (4) в выражение (3), имеем

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

Итак, получено выражение для усилия вытягивания (вытягивания) в зависимости от геометрических размеров применяемых магнитов. Рассмотрим случай $D = L = 4 \cdot 10^{-2}$ м и определим диаметр внутреннего магнита d , при котором усилие будет максимальным. Решая задачу нахождения максимума функции $F(d)$, имеем $d = 2,64 \cdot 10^{-2}$ м. Т.е. у трубчатого магнита с внешним диаметром, равным его длине, d должен составлять 66% от D . Для получения максимального усилия вытягивания пружины, у которой внешний диаметр равен половине длины ($2D = L = 8 \cdot 10^{-2}$ м), d составит 70% от D , хотя среднее усилие вытягивания уменьшится почти в два раза. Отсюда можно сделать два важных вывода: 1) для максимального усилия вытягивания должно выполняться условие

$$D = (1,42-1,52)d; \quad (6)$$

2) увеличивать ход пружины только за счет удлинения внешнего трубчатого магнита нецелесообразно. Увеличить ход пружины, что гораздо более эффективнее, можно за счет изменения длины внутреннего магнита L_1 . Поскольку плоскости с нулевой индукцией на оси трубчатого магнита находятся на небольшом расстоянии от торцов снаружи магнита [2], то максимальная полезная длина внутреннего магнита будет равна длине внешнего магнита плюс расстояние до плоскости с нулевой магнитной индукцией на оси симметрии магнита.

Проще и точнее всего указанное расстояние можно определить экспериментально. Для этого была изготовлена магнитная пружина с внешним трубчатым магнитом с размерами $D_0 = L_0 = 4 \cdot 10^{-2}$ м и $d_0 = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м. В это кольцо вставлена немагнитная трубочка $D_1 = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м, $d_1 = 2,5 \cdot 10^{-2}$ м, по которой свободно перемещался внутренний магнит с $D_3 = 2,5 \cdot 10^{-2}$ м. Длина внутреннего магнита составляла $L_1 = 3,5 \cdot 10^{-2}$ м. График экспериментальной зависимости усилия вытягивания от величины перемещения приведен на рис. 3, а. Из рисунка видно, что усилие вытягивания достигает максимального значения при 7–8 мм смещении сердечника пружины, характерное усилие вытягивания составляет более 8 кг. Когда вместо немагнитной трубки нами использовался внутренний магнит с тонким никелевым покрытием и $d = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м (на одну десятую миллиметра меньше внутреннего диаметра внешнего магнита), то характерное усилие вытягивания повысилось на 25% и составило >10 кг.

В начальном положении правый торец внутреннего магнита находился в равновесном положении при $X = (L_0 - L_1)/2 = -2,5$ мм, а расстояние от торца внешнего кольцевого

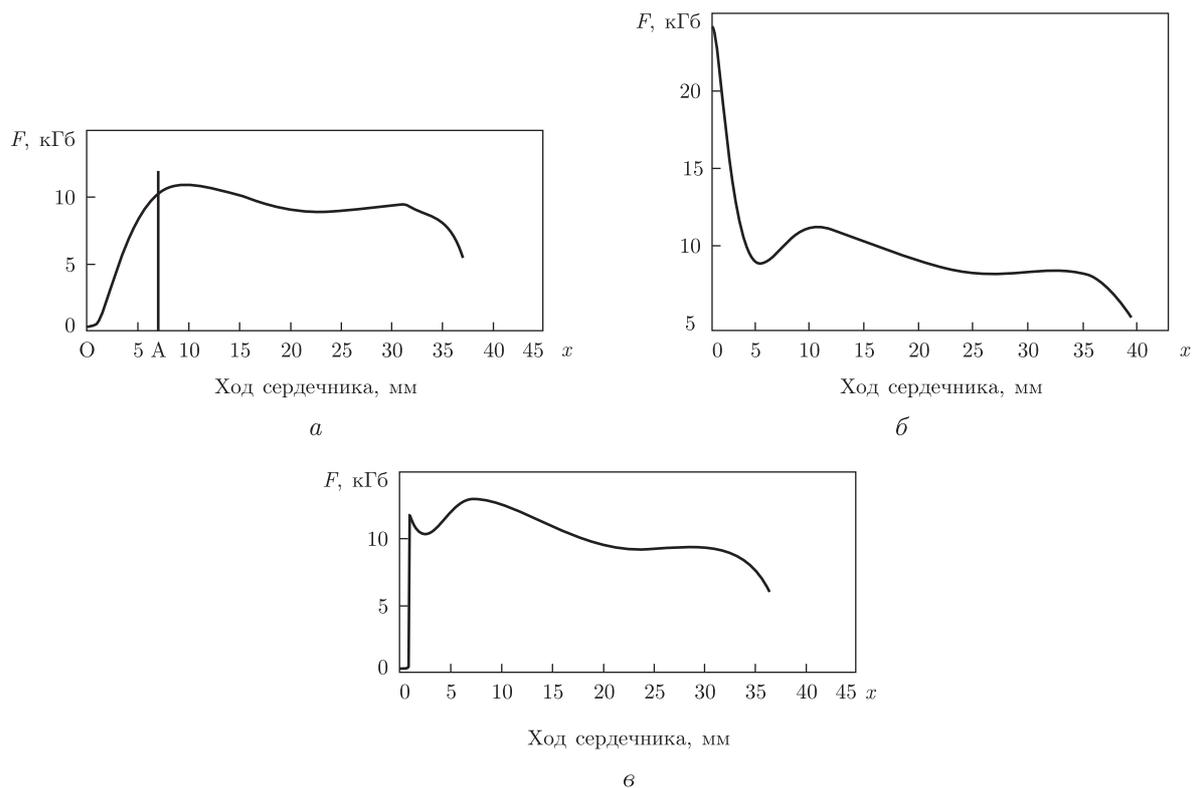


Рис. 3. График усилия втягивания магнитной пружины: *a* — без торцевого магнитопровода; *б* — с торцевым магнитопроводом без зазора между внутренним магнитом и магнитопроводом; *в* — с торцевым магнитопроводом с немагнитной прокладкой 2,5 мм между внутренним магнитом и магнитопроводом

магнита (см. рис. 2, точка 0) до плоскости с нулевой индукцией составляло около 5–6 мм. Отсюда следует, что оптимальная длина внутреннего магнита должна составить 45–46 мм (при длине внешнего магнита 40 мм); в начальном положении нерабочие торцы обоих магнитов пружины должны находиться в одной плоскости (чего можно достичь механическим ограничением движения внутреннего магнита). В этом случае зависимость на рис. 3, *a* не будет иметь участка *ОА* с нарастающим усилием втягивания и ход пружины при почти постоянном усилии втягивания будет максимальным.

Экспериментальная проверка показала, что при использовании механического ограничителя на нерабочем торце пружины максимальное усилие достигается при перемещении в 2 мм. Если увеличение длины внутреннего магнита не дает нужного хода пружины, то его можно увеличить двумя путями: 1) пропорционально увеличить все размеры магнитной системы (если есть возможность увеличения диаметра); 2) поставить две или более магнитные пружины последовательно на большем расстоянии друг от друга, чем длина одной пружины, для исключения нежелательного магнитного влияния (если нет возможности увеличения диаметра). Причем в первом случае усилие втягивания пружины возрастет пропорционально увеличению площади торца внутреннего магнита, а во втором — останется неизменным.

Очень полезным для создания оптимальной магнитной пружины оказывается дополнительное расположение диска из магнитомягкого материала на нерабочий торец пружины. Во-первых, имеем механическое ограничение движения внутреннего магнита в сторону

второй точки с нулевой индукцией (отсутствие нарастающего участка ОА). Во-вторых, усилие притяжения внутреннего магнита к этому магнитопроводу на небольшом расстоянии (3–5 мм) может в несколько раз превышать рабочее усилие пружины и легко регулироваться в широком интервале за счет введения немагнитных прокладок различной толщины между магнитопроводом и внутренним магнитом. График усилия втягивания магнитной пружины с торцевым цилиндрическим магнитопроводом представлен на рис. 3, б. Как видно из рисунка, усилие отрыва внутреннего магнита от магнитопровода составляло 24 кг, затем усилие быстро падало до рабочего усилия втягивания — 9 кг. Ход пружины, на котором усилие втягивания превышает 8 кг, составил 34 мм. Введение немагнитной прокладки толщиной 2,5 мм снижало конечное усилие втягивания (отрыва) до 11 кг (см. в на рис. 3). Ход пружины составил 32 мм, что в сравнении с рис. 3, б говорит о том, что немагнитную прокладку лучше вмонтировать заподлицо в магнитопровод с тем, чтобы избежать потери 6% хода пружины. При необходимости усилие отрыва можно еще увеличить введением второго магнитопровода со стороны рабочего торца пружины, который будет перемещаться вместе с внутренним магнитом. Усилие “дощелкивания” на данной магнитной пружине может быть доведено до 48 кг без уменьшения тяговых характеристик пружины на основном участке.

Основным задаваемым параметром пружины обычно является ее ход, отсюда несомненный интерес представляет нахождение максимального усилия втягивания при заданной длине L трубчатого магнита. Как было показано ранее, для того чтобы максимально использовать магнитные потоки обоих магнитов пружины, должно выполняться условие (6). Для случая, что соответствует условию (6),

$$D = 2^{1/2}d \quad (7)$$

найдем максимальную величину поля внутри трубчатого магнита. Подставляя выражение (7) в формулу (2), получаем:

$$H_{\text{вн}} = B_r \left[\left(1 + \frac{2d^2}{L^2} \right)^{-0,5} - \left(1 + \frac{d^2}{L^2} \right)^{-0,5} \right]. \quad (8)$$

Введя подстановку $d = k^{0,5}L$, получаем функцию:

$$H(k) = B_r [(1 + 2k)^{-0,5} - (1 + k)^{-0,5}]. \quad (9)$$

Приравнивание к нулю производной данной функции $H(k)$ приводит к кубическому уравнению:

$$k^3 - 1,5k - 0,75 = 0, \quad (10)$$

которое имеет точное аналитическое действительное решение:

$$k = (0,5)^{1/3} + (0,25)^{1/3} = 1,423661. \quad (11)$$

Отсюда следует, что при $d = 1,193L$ поле внутри трубчатого магнита будет максимальным при заданном ходе пружины L . При этом внешний диаметр пружины составляет $D = 1,687L$. Теперь можно оценить габариты оптимизации магнитной пружины при

заданном ее ходе L . При $L = 50$ мм получаем: $D = 84,3$ мм и $d = 59,6$ мм, при этом усилие втягивания в соответствии с выражением (5) составит 47,7 кг, а экспериментальное — несколько выше — около 54 кг.

Экспериментальное значение усилия втягивания в проведенных опытах всегда на 10–13% превышало теоретическое значение, поскольку подвижный магнит пересекает не плоскость с нулевой индукцией, а некую криволинейную поверхность вращения, площадь которой больше поперечного сечения магнита на 10–13% в зависимости от геометрических размеров магнитной пружины.

Проведенные оценочные расчеты показывают, что магнитные пружины вполне могут быть использованы в амортизаторах велосипедов и мотоциклов. При диаметре магнитной пружины 160 мм усилие втягивания будет превышать 200 кг; усилие двух магнитных пружин — 400 кг, что превышает вес мотоцикла и двух пассажиров. Ход пружины при этом составит 100 мм.

Все расчеты проводились для наиболее распространенного коммерческого магнитного материала на основе системы Nd–Fe–B с остаточной индукцией $B_r = 1,25$ Тл. Если требуется получить большее втягивающее усилие при тех же габаритах магнитной пружины, то можно использовать более дорогие марки магнитов на основе системы Nd–Fe–B с повышенной остаточной индукцией [3, 4]. Только за счет смены марки постоянного магнита можно получить увеличение втягивающего усилия на 30%. Магниты с повышенной B_r стоят в 2–2,5 раза дороже обычных неодимовых магнитов, поэтому их применяют редко.

Магнитную пружину с торцевым магнитопроводом очень легко использовать как дверной доводчик с “дощелкиванием”. Данный вариант магнитной пружины удовлетворяет всем требованиям к доводчикам и очень прост в изготовлении.

Таким образом, проведенные исследования магнитной пружины конструкции “два постоянных магнита” показали ряд ее преимуществ по сравнению с конструкцией “постоянный магнит-магнитопровод”:

большее усилие втягивания (на 20–40%) при одинаковых диаметрах магнитных систем; практически полное отсутствие силы трения между движущимися частями пружины; отсутствие участка с изменяющимся усилием втягивания. Втягивающее усилие становится постоянным сразу с началом смещения;

возможность осуществления “дощелкивания” без какого-либо влияния на усилие втягивания на рабочем перемещении пружины. Усилие “дощелкивания” может в 2–5 раз превосходить рабочее усилие втягивания;

возможность широкого изменения каждого из параметров пружины в зависимости от того, какой из них в конкретном применении является основным.

1. 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.
2. Постоянные магниты. Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Ю. М. Пятина. – Москва: Энергия, 1980. – 488 с.
3. Цивилицин В. Ю. Магнитные сплавы и керамики // Неорганическое материаловедение: Энциклопедическое издание. Т. 2, кн. 1 / Под ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода. – Киев: НВП Видавництво “Наук. думка” НАН України, 2008. – 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.

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

Оптимізація магнітної пружини конструкції “два постійні магніти”

Вивчено можливість оптимізації магнітної пружини типу “два постійні магніти”. Проведено теоретичне дослідження взаємозв’язку геометричних розмірів пружини з її зусиллям втягування (витягування) і довжиною робочого ходу. Всі отримані результати було підтверджено експериментально. Відзначається хороша відповідність теоретичних і експериментальних результатів. Встановлено оптимальні співвідношення між діаметрами зовнішнього й внутрішнього циліндричних магнітів для отримання максимального зусилля втягування при заданій довжині ходу пружини. Запропоновано перспективну конструкцію магнітної пружини із застосуванням торцевого диску й проведено її експериментальні дослідження.

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

Optimization of a “two permanent magnets”-type magnetic spring

Optimization possibilities of a magnetic spring (“two permanent magnets” type) are investigated. The theoretical calculation of the relationship of geometrical sizes and forces is carried out. All theoretical results are checked experimentally. A very good agreement of theoretical and experimental data is detected. The optimal ratio between two diameters of cylinder magnets for the maximal force at a given spring length is calculated. The perspective construction of a magnetic spring with applying the butt-end soft magnetic material disk is offered, and its experimental tests are carried out.