

Запропонована електромагнітна система для приладів магнітного контролю із визначеною топографією магнітного поля поза нею та методика синтезу цієї системи, змінними параметрами якої є кількість витків у секціях котушок, струм та геометричні розміри

Ключові слова: магнітна система, синтез, дефектоскоп

Предложена электромагнитная система для приборов магнитного контроля с заданной топографией магнитного поля за ее пределами и методика синтеза этой системы, переменными параметрами которой являются число витков в секциях катушек, ток и геометрические размеры

Ключевые слова: магнитная система, синтез, дефектоскоп

The electromagnetic system for magnetic-testing devices with given topography of magnetic field outside it and the method of synthesis of this system with different parameters such as number of windings in coils sections, current and geometrical sizes, are offered

Keywords: magnetic system, synthesis, flaw-detector

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ ФЕРРОЗОНДОВЫХ ПРИБОРОВ

Олейви Анвер
Аспирант*

В.В. Мирошников

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой

*Кафедра "Приборы"

Восточноукраинский национальный университет им.

В.Даля

кв. Молодежный, 20а, г. Луганск, Украина, 91034

Контактный телефон: (0642) 50 — 32 — 34

E-mail: v.miroshnikov@mail.ru

1. Введение

Для проведения магнитного контроля материалов, изделий и сред необходимо в области контроля создать магнитное поле требуемой величины и заданной однородности во всей контролируемой области. Широко применяются для этих целей электромагнитные системы с магнитопроводом (например, в коэрцитиметрах), которые создают заданную величину магнитного поля только в области расположения полюсных наконечников. При увеличении зазора свыше 2 ... 3 мм увеличивается поле рассеяния полюсного наконечника, что приводит к резкой неоднородности поля, создаваемого такой электромагнитной системой. При этом магниточувствительные элементы, расположенные под полюсами или между полюсов электромагнитной системы, находятся в сильном магнитном поле, что снижает их чувствительность. Площадь полюсных наконечников достаточно мала и ее увеличение связано с увеличением массы магнитопровода.

Создание зондирующего магнитного поля в больших объемах наиболее удобно осуществлять с использованием катушек круглого или прямоугольного сечения. Необходимо только решить задачу синтеза магнитного поля, создаваемого катушкой и определить место положения магниточувствительных элементов (например, феррозондов) и размер контролируемой области, в которой будет создано требуемое магнитное поле.

2. Классификация методов синтеза магнитных систем

Известен метод синтеза поля в катушках, получивший название локального метода, развитый в работах Мак-Кихена, Гарета [1, 2]. Основная идея метода основывается на разложении функции напряженности поля катушки в ряд, причем число витков и геометрия обмотки выбираются таким образом, что несколько коэффициентов ряда становятся равными нулю. Существенным недостатком метода является локальная формулировка условий синтеза, когда значение поля задается лишь в одной точке.

Применяются для синтеза поля и метод внешних рядов и закрытых систем [3] предназначены для получения электромагнитного поля заданной топографии не внутри катушки, а вне ее на некотором от нее отдалении. Этот метод приемлем при синтезе таких устройств, у которых токонесущая поверхность является границей пространственной области, внутри которой задается распределение электромагнитного поля.

Наиболее перспективным следует считать интегральный метод синтеза [4], основанный на выполнении требования минимального отклонения формируемого электромагнитного поля во всем рабочем пространстве от заданного распределения. К достоинствам метода относится возможность формирования заданного неоднородного электромагнитного поля внутри и вне катушки. При синтезе заданной топо-

графии электромагнитного поля достигают изменением граничных условий, внешним возбуждением, изменением параметров среды, геометрией области, включающей внешние локальные источники электромагнитного поля.

По нашему мнению более технологичным и конструктивно более гибким при проектировании электромагнитных систем следует считать способ, заключающийся в подборе числа витков в секциях катушки, величины и направления тока в них.

3. Математическая модель синтеза магнитной системы

Конструкция электромагнитной системы показана на рис. 1. Катушка состоит из четырех секций. Каждая из секций имеет отдельное энергоснабжение. Задача электромагнитной системы создать переменное или постоянное магнитное поле в области контроля. Между секцией катушки 1 и поверхностью контролируемого материала находится линейка магниточувствительных элементов, выполненная из феррозондов.

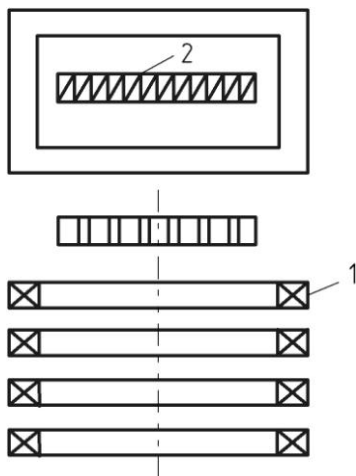


Рис. 1. Конструкция электромагнитной системы зондирующего поля: 1 — секции катушки; 2 — линейка феррозондов.

Желательно, чтобы линейка феррозондов находилась в зоне, где зондирующее поле близко к нулю (рис. 2). В этом случае можно скомпенсировать в выходящем сигнале феррозондов наводку, вызванную зондирующим полем. Кроме того, размещение сердечников феррозондов перпендикулярно силовым линиям зондирующего поля, также уменьшает влияние последнего на выходной сигнал. Поэтому задачей синтеза является сформировать топографию зондирующего поля такой, как показано на рис. 2.

В точке (а), где располагается линейка феррозондов напряженность магнитного поля должна равняться нулю, а в точке (b), максимальному значению, так как точка (b) соответствует нижнему краю контролируемой области. Синтез магнитного поля осуществляется по методике, которая заключается в том, что размеры секций катушек не остаются постоянными во время синтеза, а изменяются в некоторых пределах.

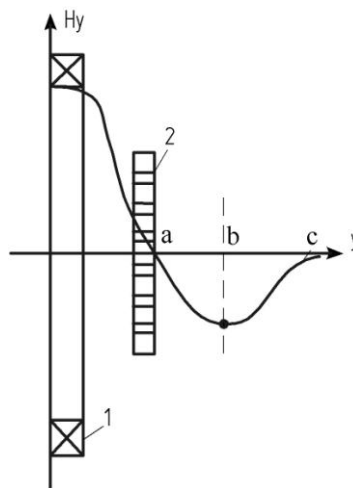


Рис. 2. Распределение y -составляющей вектора напряженности магнитного поля: 1 — секция катушки; 2 — линейка феррозондов

Задача синтеза формируется следующим образом.

Пусть в объеме V_c , имеющем форму параллелепипеда с размерами вдоль осей x, y, z соответственно $2a_c, 2b_c, 2c_c$ (рис. 3), требуется создать поле $H(x,y,z)$. Электромагнитная система представляет собой N тонких секций катушки, витки которые имеют прямоугольную форму, и лежат в плоскостях параллельных плоскости xoz . Толщины секций и зазоры между ними обозначим соответственно через $d_j (j=1,2,3,\dots,N)$, $\Delta_j (j= 1,2,3,\dots,N-1)$.

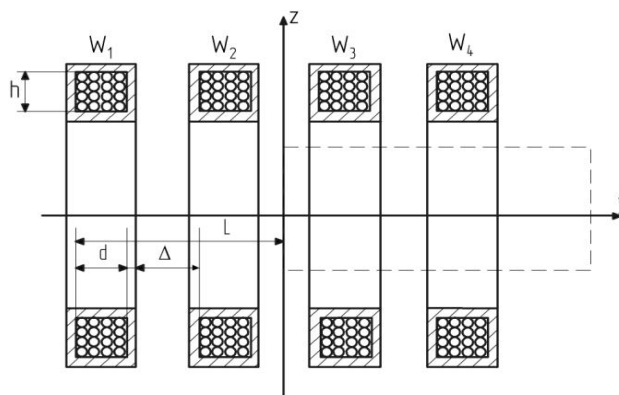


Рис. 3 Общий вид синтезируемой катушки

Величины d_j и Δ_j могут быть неодинаковы. Секции катушки изготовлены из провода радиусом r , по которым протекает ток i , величина которого выбирается из условия нагрева катушки. Направления плотности тока в различных секциях катушки могут быть различными. Внутренние размеры катушки вдоль осей x и z обозначим соответственно через $2a_j^{(i)}$ и $2c_j^{(i)}$. Размер

катушки вдоль оси равен $2b$. Искомыми будут числа витков тонких секций катушки W_1, W_2, \dots, W_N направления плотности тока в тонких секциях, по которым легко устанавливается характер соединения этих секций катушки.

Вначале найдем токи $i_1^{(1)}, i_2^{(1)}, \dots, i_N^{(1)}$ бесконечно тон-

ких прямоугольных витков, размеры которых вдоль x и z равны внутренним размерам проектируемых тонких секций катушки, то есть равны $2a_j^{(1)}$ и $2c_j^{(1)}$ ($j=1,2,3,\dots,N$),

а y -координаты этих витков соответствуют серединам (вдоль y) проектируемых тонких секций катушки. Для случая, когда $d_j = d, \Delta_j = \Delta$ ($j=1, \bar{N}$), y -координаты этих витков, справедливо (рис. 4).

$$y_j = -b + \frac{d}{2} + (d + \Delta)(j-1), (j = \bar{1}, \bar{N}). \quad (1)$$

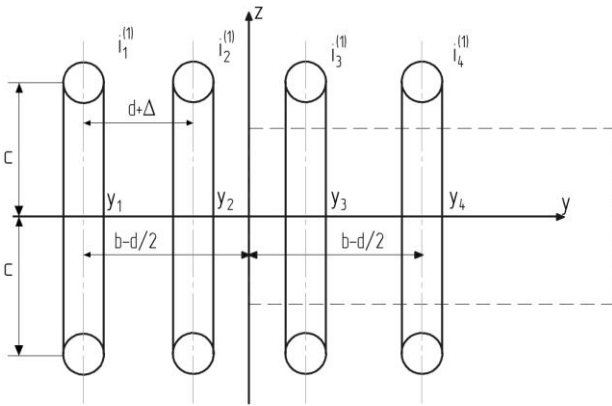


Рис. 4. Бесконечно тонкие витки, заменяющие секции катушки

Направления токов $i_1^{(1)}, i_2^{(1)}, \dots, i_N^{(1)}$ выбираем так, как указано на рис. 4.

Используя формулу Био-Савара-Лапласа, можно найти напряженность единичного j -го витка в объеме V_c . Она будет равна при токе в витке равном 1 А (рис. 5).

$$\begin{aligned} H_j^{(1)}(x,y,z) = & \left[\frac{Y_j}{X_{j-}^{(1)2} + Y_j^2} \left(\frac{Z_{j+}^{(1)}}{r_{3j}^{(1)}} - \frac{Z_{j-}^{(1)}}{r_{2j}^{(1)}} \right) - \frac{Y_j}{X_{j+}^{(1)2} + Y_j^2} \left(\frac{Z_{j+}^{(1)}}{r_{4j}^{(1)}} - \frac{Z_{j-}^{(1)}}{r_{1j}^{(1)}} \right) \right] \bar{i}_x + \\ & + \left[\frac{Z_{j-}^{(1)}}{Y_{j+}^2 + Z_{j-}^{(1)2}} \left(\frac{X_{j-}^{(1)}}{r_{2j}^{(1)}} - \frac{X_{j+}^{(1)}}{r_{1j}^{(1)}} \right) + \frac{X_{j-}^{(1)}}{X_{j-}^{(1)2} + Y_j^2} \left(\frac{Z_{j-}^{(1)}}{r_{2j}^{(1)}} - \frac{Z_{j+}^{(1)}}{r_{3j}^{(1)}} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{Z_{j+}^{(1)}}{Y_{j+}^2 + Z_{j+}^{(1)2}} \left(\frac{X_{j+}^{(1)}}{r_{4j}^{(1)}} - \frac{X_{j-}^{(1)}}{r_{3j}^{(1)}} \right) + \frac{X_{j+}^{(1)}}{X_{j+}^{(1)2} + Y_j^2} \left(\frac{Z_{j+}^{(1)}}{r_{4j}^{(1)}} - \frac{Z_{j-}^{(1)}}{r_{1j}^{(1)}} \right) \right] \bar{i}_y + \\ & + \left[\frac{Y_j}{Z_{j-}^{(1)2} + Y_j^2} \left(\frac{X_{j+}^{(1)}}{r_{1j}^{(1)}} - \frac{X_{j-}^{(1)}}{r_{2j}^{(1)}} \right) + \frac{Y_j}{Z_{j+}^{(1)2} + Y_j^2} \left(\frac{Z_{j-}^{(1)}}{r_{3j}^{(1)}} - \frac{Z_{j+}^{(1)}}{r_{4j}^{(1)}} \right) \right] \bar{i}_z \end{aligned} \quad (2)$$

где $x + a_j^{(1)} = x_{j+}^{(1)}, x - a_j^{(1)} = x_{j-}^{(1)}, y + y_j = Y_j, z + c_j^{(1)} = z_{j+}^{(1)},$

$z - c_j^{(1)} = z_{j-}^{(1)}, r_{1j}^{(1)} = \sqrt{X_{j+}^{(1)2} + Y_j^2 + Z_{j-}^{(1)2}}, r_{2j}^{(1)} = \sqrt{X_{j+}^{(1)2} + Y_j^2 + Z_{j+}^{(1)2}},$

$r_{3j}^{(1)} = \sqrt{X_{j-}^{(1)2} + Y_j^2 + Z_{j-}^{(1)2}}, r_{4j}^{(1)} = \sqrt{X_{j-}^{(1)2} + Y_j^2 + Z_{j+}^{(1)2}}.$

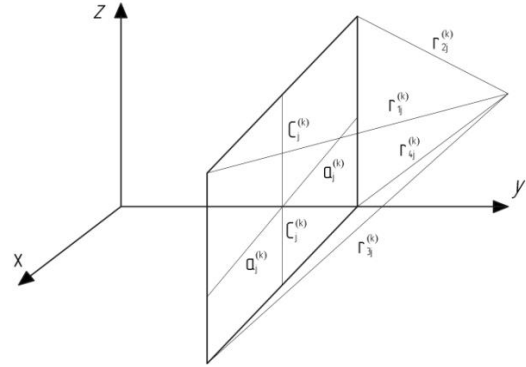


Рис. 5. К расчету напряженности магнитного поля прямоугольного витка с током

В формуле (2) и далее через x, y, z обозначены координаты точки наблюдения M в объеме V_c .

На рис. 6 показано распределение y -составляющей индукции магнитного поля ($B = \mu_0 H, \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м) для секции с геометрическими размерами $a=0,15$ м; $c=0,2$ м, ток $i=1$ А.

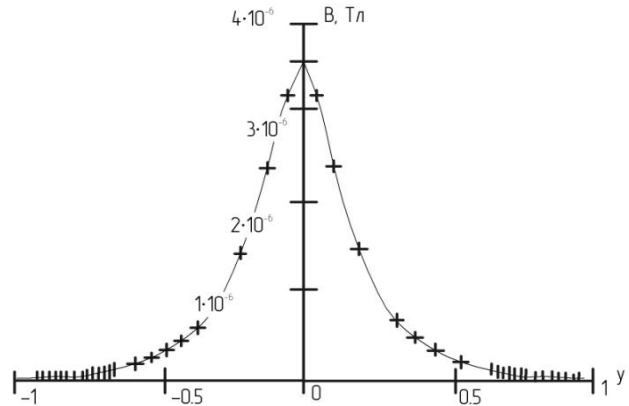


Рис. 6. График y -составляющей индукции магнитного поля одного витка

На рис. 7 приведена зависимость x -составляющей вектора индукции от координаты x .

Для пяти витков, расположенных с равным расстоянием $y = -0,2; -0,15; 0; 0,15; 0,2$ и с одинаковым током $i = 1$ А в каждом витке распределение y -составляющей индукции магнитного поля показано на рис. 8.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 6, 7, 8, y -составляющая индукции является преобладающей. При одинаковом поле в каждом витке поле в интервале $y \in [-0,2; 0,2]$ является неравномерным и его градиент имеет максимальные значения у стенок секций катушки.

Будем искать токи $i_j^{(1)} j = (\bar{1}, \bar{N})$ из условия [5 – 7]

$$\left\| \bar{H}_0(x,y,z) - \sum_{j=1}^N i_j^{(1)} \bar{H}^{(1)}(x,y,z) \right\| = \min \quad (3)$$

Здесь и ниже норма понимается в смысле нормы в линейном Гильбертовом пространстве векторных по-

лей, заданных в объеме V_c (его можно обозначить через $\bar{L}^2(V_c)$), то есть, например,

$$\|\bar{H}(x,y,z)\| = + \sqrt{\int_{V_c} H^2(x,y,z) dV} \tag{4}$$

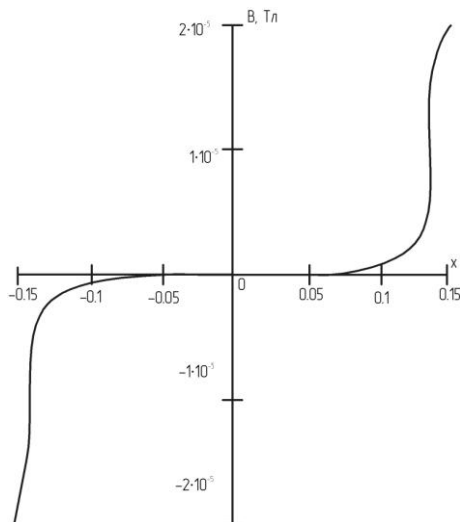


Рис. 7. График x -составляющей индукции магнитного поля одного витка

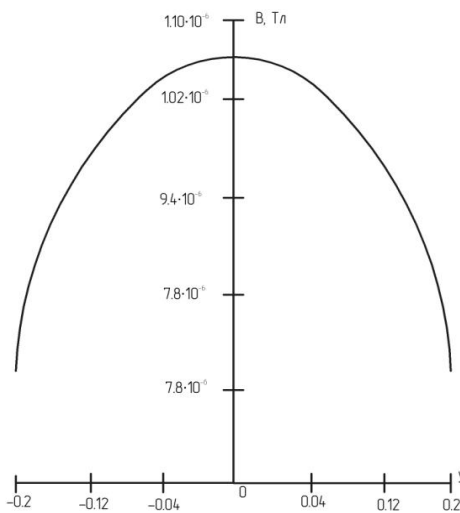


Рис. 8. График распределения y -составляющей индукции магнитного поля, созданного током в пяти секциях катушки

Скалярное произведение в этом пространстве определяется по правилу

$$(\bar{v}, \bar{u}) = \int_{V_c} \bar{v}(x,y,z) \bar{u}(x,y,z) dV$$

Постановка задачи синтеза (3) указывает на то, что мы приходим к задаче о разложении по неортогональной системе, так как функция $H_j(x,y,z)$ неортогональная. Эту задачу легко можно свести к современной системе линейных алгебраических уравнений.

$$\sum_{j=1}^N (\bar{H}_j^{(t)} \cdot \bar{H}_k^{(t)}) i_j^{(t)} = (\bar{H}_k^{(t)} \cdot \bar{H}_k^{(t)}) i_k, k = \overline{1, N} \tag{5}$$

Решая систему алгебраических уравнений (5), находим совокупность сов $i_1^{(t)}, i_2^{(t)}, \dots, i_N^{(t)}$. После этого находим электромагнитное поле этих токов $\bar{H}_n^{(t)}(x, y, z)$ и погрешность $\eta_n^{(t)} = \frac{\|\bar{H} - \bar{H}_n^{(t)}\|}{\|\bar{H}\|}$ (индекс n обозначает то,

что напряженность создана секциями катушки с бесконечно тонкими лишками).

Далее по этим токам строим первое приближение совокупности секций, то есть найденные токи распределяем по секциям катушки с учетом коэффициента заполнения. В результате находим размеры секций катушки в первом приближении, то есть $h_1^{(t)}, h_2^{(t)}, \dots, h_N^{(t)}$

(рис. 3). Направления плотности тока в секциях (для первого приближения) определяются знаками токов $i_j^{(t)}$. Если $i_j^{(t)} > 0$, то плотность тока в верхнем сечении

j -ой секции катушки направлена вдоль оси x , если же $i_j^{(t)} < 0$, то против оси x .

Найдя параметры первого приближения совокупности секций катушки, необходимо найти поле в объеме V_c , создаваемое ими $\bar{H}^{(t)}(x, y, z)$ и погрешность

$$\eta^{(t)} = \frac{\|\bar{H} - \bar{H}^{(t)}\|}{\|\bar{H}\|}.$$

Если эта погрешность будет превышать погрешность $\eta_n^{(t)}$, то необходимо выполнить второе прибли-

жение, располагая бесконечно тонкие прямоугольные витки сверху секций катушки первого приближения и затем распределяя найденные в них токи по сечениям секции катушки (размер $h_j^{(t)}$ увеличивается, если токи $i_j^{(1)}$ и $i_j^{(2)}$ одного

знака, и уменьшается в противном случае) и т.д.

Итерационный процесс прекращается после n -го шага, когда наступает приближенное равенство $\eta^{(n)} = \eta_n^{(t)}$.

Согласно выбранной конструкции электромагнитной системы металлодетектора задаются четыре значения напряженности электромагнитного поля H_1, H_2, H_3, H_4 .

Векторы напряженности заданного электромагнитного поля имеют одну y -вую составляющую. Координаты точек, в которых задаются значения напряженности электромагнитного поля, приведены на рис. 4. После задается на си катушки электромагнитной системы.

Тогда в развернутом виде система уравнений для i -ой итерации (5) запишется так

$$\begin{bmatrix} H_1 \cdot H_1 & H_2 \cdot H_1 & H_3 \cdot H_1 & H_4 \cdot H_1 \\ H_1 \cdot H_2 & H_2 \cdot H_2 & H_3 \cdot H_2 & H_4 \cdot H_2 \\ H_1 \cdot H_3 & H_2 \cdot H_3 & H_3 \cdot H_3 & H_4 \cdot H_3 \\ H_1 \cdot H_4 & H_2 \cdot H_4 & H_3 \cdot H_4 & H_4 \cdot H_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \cdot H_{10} \\ H_2 \cdot H_{20} \\ H_3 \cdot H_{30} \\ H_4 \cdot H_{40} \end{bmatrix}. \tag{6}$$

Разложением системы уравнений (6) будут известны токи в секциях катушки.

Выводы

По изложенной выше методике был проведен синтез поля с применением MathCad Professional. Для проверки корректности математической модели синтеза магнитного поля произведены численные эксперимен-

ты для четырех секций катушки. Размеры секции катушки равны: $a=0,15$ м; $b=0,36$ м; $c=0,2$ м.

Координаты секций $y_1=-0,36$ м; $y_2=-0,09$ м; $y_3=0,09$ м; $y_4=0,2$ м.

Координаты точек, в которых задавалась напряженность поля (y -составляющая поля) $y_1=-0,2$ м; $y_2=-0,05$ м; $y_3=0,05$ м; $y_4=0,2$ м.

Расхождение между напряженностью поля и напряженностью заданного поля не превышает 1,5 %.

Литература:

1. Garret M.W. Axially symmetric system for generating measuring magnetic fields. Pt.1// I. Applied Physics. — 1951. — Vol.22, №9. — PP. 91 — 99.
2. Garret M.W. Tick cylindrical coil systems for strong magnetic fields with field or gradient homogeneities of the 6-th to 20-th order// I. Applied Physics. — 1967. — Vol.38, №6. — PP. 1211 — 1221.
3. Афанасьев Ю.В. Средства измерения параметров магнитного поля// Ю.В.Афанасьев, Н.В.Студенцов и др. — Л.: Энергия, 1987. — 320 с.
4. Стадник И.П. Решение одного класса задач синтеза электро- и магнитостатических полей/ И.П.Стадник// Электромеханика. — 1979. — № 5 — С. 359 — 385.
5. Стадник И.П. Улучшение сходимости итерационного процесса разложения по неортогональной системе в применении синтезу катушки прямоугольного сечения по заданному магнитному полю в объеме/ И.П. Стадник// Электромеханика. — 1984. — № 7. — С. 5 — 11.
6. Стадник И.П. Метод последовательных приближений для разложения по неортогональной системе и его применение к синтезу осесимметричной катушки по заданному магнитному полю на оси/ И.П. Стадник// Электромеханика. — 1982. — № 2. — С. 137 — 141.
7. Стадник И.П. Сведение задач синтеза магнито- и электростатических к СЛАУ/ И.П. Стадник// Электромеханика. — 2001. — № 4. — С. 3 — 4.