

## ОБ УСТРОЙСТВАХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ ГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ ТЕХНИКИ

*Наведені результати аналізу пристрою для виміру магнітного моменту габаритних об'єктів техніки, заснованого на способі прямих вимірів магнітного потоку. Визначені вимоги до виконання первинного перетворювача цього пристрою. Запропоновано спосіб синтезу складних систем первинних перетворювачів.*

*Приведены результаты анализа устройства для измерения магнитного момента габаритных объектов техники, основанного на способе прямых измерений магнитного потока. Определены требования к выполнению первичного преобразователя этого устройства. Предложен способ синтеза сложных систем первичных преобразователей.*

**Постановка задачи.** Эффективная эксплуатация ряда наукоемких объектов техники, в частности космических аппаратов, требует точного знания их магнитного момента  $M$ . Его величина определяется экспериментально [1], с помощью, адаптированных для этих целей, измерительных устройств.

Их построение производится, основываясь на заданных требованиях к точности нахождения магнитного момента  $M$ , а также на частичном знании "магнитного образа" испытуемого объекта – совокупности  $N$  элементарных (точечных) магнитных диполей (рис. 1) величина ( $M_k$ ) и расположение ( $x_k, y_k, z_k$ ) которых в объеме  $V$  объекта [2] определяют, как его магнитное поле, так и магнитный момент  $M$ :

$$M = \sum_{k=1}^N M_k(x_k, y_k, z_k). \quad (1)$$

При этом с ростом размеров (объема  $V$ ) испытуемого объекта, возможность точного определения его магнитного момента, как правило, снижается, а сложности конструктивного исполнения измерительного устройства – увеличиваются.

Настоящая статья, посвящена проблематике решения этого вопроса, а именно поиску путей построения высокоточных измерительных устройств магнитного момента, адаптированных для габаритных объектов техники

**Общие положения.** Решение поставленных в статье вопросов тесно увязано с выбором разумных критериев, связывающих воедино характеристики испытуемого объекта и метрологические возможности измерительного устройства.

В контексте этого выбора, обратимся к общим вопросам построения измерительных устройств магнитного момента. В основу этих устройств заложен принцип прямого [3, 4] измерения магнитного потока  $\Phi$ , который создается испытуемым объектом (совокупностью его магнитных моментов  $M_k$ ) за пределами его оболочки. При этом полагается, что величина определяемой компоненты  $M_i$  магнитного момента  $M$  по каждому из трех ортогональных направлений ( $i = x, y, z$ ) находится в линейной зависимости ( $\beta_i$ ) от измеренной части магнитного потока  $\Phi_i$  по соответствующему направлению:

$$M_i = \beta_i \cdot \Phi_i. \quad (2)$$

На рис. 1 приведен простейший (отчасти гипотетический) вариант устройства для определения магнитного момента  $M_x$  в направлении оси  $X$ . Его основ-

ным элементом, как и любого другого устройства, является первичный преобразователь, выполненный в виде обмотки.

Назначение преобразователя заключается в прямом измерении магнитного потока  $\Phi_x$ , создаваемого испытуемым объектом. В данном случае, измерение именно магнитного потока  $\Phi_x$  обеспечивается выполнением обмотки преобразователя плоской и симметричной относительно оси  $X$ .

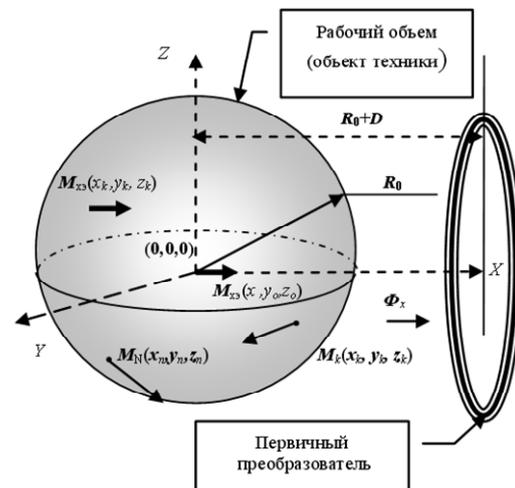


Рис. 1. Устройство для определения магнитного момента

При проведении измерений испытуемый объект, а точнее всю совокупность его  $N$  точечных магнитных диполей  $M_k$ , устанавливают в рабочий объем (сферу радиусом  $R_0$ ) измерительной установки – ограниченную область пространства, удаленную от преобразователя на заданное расстояние  $R_0 + D$ .

Основной метрологический параметр – коэффициент  $\beta_i$  – измерительных устройств такого типа определяется путем их калибровки с помощью эталонного источника магнитного момента  $M_{i3}$ , максимально приближенного, по своему магнитному проявлению, к точечному магнитному диполу [5]. В качестве такого эталонного источника можно использовать, например, плоский токовый контур с заданной величиной магнитного момента  $M_i = I \times S_k$ , где  $I$  – ток контура, а  $S_k$  – его площадь. Точечный характер такого источника обеспечивается за счет минимизации площади  $S_k$  контура.

При калибровке измерительного устройства, эталонный источник устанавливают в центре  $(0, 0, 0)$  рабочего объема, ориентируют его магнитный момент в заданном направлении  $i$  (в данном примере  $i = x$ ),

измеряют создаваемый им поток  $\Phi_{i3}$ , после чего значение  $\beta_i$  определяют как:

$$\beta_i = M_{i3} / \Phi = S_k / L_{i3}, \quad (3)$$

где  $L_{i3}$  – взаимная индуктивность между первичным преобразователем и эталонным источником.

Технология определения магнитного момента  $M_i$  объекта в целом (2) базируется на том допущении, что установленный таким образом коэффициент  $\beta_i$  полагают справедливым для всех магнитных моментов  $M_{ki}$ , независимо от места их расположения  $x_k, y_k, z_k$  в объеме  $V$  испытуемого объекта.

Степень справедливости соотношения (2), в отношении удаленных от центра рабочего объема точечных магнитных моментов  $M_{ki}$  определяет, по сути, метрологические возможности измерительного устройства.

Представляется разумным оценку погрешности коэффициента  $\beta_i$  измерительного устройства определять по такому критерию [6], как погрешность  $\Delta_{ki}$ , нахождения магнитного момента  $M_{i3}$  эталонного источника при его смещении от геометрического центра рабочего объема:

$$\Delta_{ki} = \frac{M_{i3}^k - M_{i3}}{M_{i3}} = \frac{\Phi_{i3}^k - \Phi_{i3}}{\Phi_{i3}} = \frac{L_{i3}^k - L_{i3}}{L_{i3}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $M_{i3}^k$  – определенная, в соответствии с (2), величина магнитного момента эталонного источника при его установке в  $k$ -той точке рабочего объема;  $\Phi_{i3}^k$  – величина магнитного потока, обусловленная эталонным источником при его установке его в  $k$ -той точке рабочего объема;  $L_{i3}^k$  – взаимная индуктивность между первичным преобразователем и эталонным источником при его установке в  $k$ -той точке рабочего объема.

Чем меньше значение  $\Delta_{ki}$  для данного рабочего объема, тем выше точность определения магнитного момента объекта в целом.

Математически погрешность (4), учитывая "точечный характер" ( $S_k \rightarrow \min$ ) эталонного источника магнитного момента, удобно выразить через неравномерность распределения индукции магнитного поля, которое потенциально может быть создано обмоткой первичного преобразователя при протекании по ней тока:

$$\Delta_{kx} = \frac{L_{x3}^k - L_{x3}}{L_{x3}} \cdot 100\% = \frac{B_{x3}^k - B_{x3}}{B_{x3}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $B_{x3}^k, B_{x3}$  – индукция магнитного поля, соответственно, в  $k$ -той точке и центре рабочего объема, при протекании тока по первичному преобразователю.

Такую форму представления критерия  $\Delta_{ki}$  отличает полнота описания взаимной связи между метрологическими характеристиками измерительного устройства и параметрами его первичного преобразователя.

Вторым критерием, определяющим качество измерительных устройств, является их способность к определению малых величин магнитного момента.

Эту способность определяет удельное значение  $\Phi_i^*$  магнитного потока первичного преобразователя, вызванного действием эталонного источника:

$$\Phi_i^* = \Phi_{i3} / M_{i3}. \quad (6)$$

Величина  $\Phi_i^*$  определяет, по сути, уровень ин-

формационного сигнала о магнитном потоке  $\Phi_i$  испытуемого объекта. Чем больше значение  $\Phi_i^*$ , тем выше разрешающая способность устройства.

Учитывая, что величина  $\Phi_i^*$  снижается в степенной зависимости от расстояния ( $R_0 + D$ ), то априорно очевидно, что обеспечение высокой разрешающей способности  $\Phi_i^*$ , может быть достигнуто за счет уменьшения именно расстояния  $D$  между первичным преобразователем и рабочим объемом.

Представленные критерии точности  $\Delta_{kx}$  и разрешающей способности  $\Phi_i^*$ , увязывающие размеры первичного преобразователя с метрологическими характеристиками измерительного устройства, по существу, указывают на факторы, требующие особо пристального внимания, при создании измерительных устройств для определения магнитных моментов габаритных объектов, а именно:

- первичный преобразователь должен обеспечивать заданную погрешность  $\Delta_{ki}$  в большом рабочем объеме, куда помещается испытуемый объект;
- размеры первичного преобразователя должны быть максимально приближены к размерам рабочего объема ( $D \rightarrow \min$ ), чтобы обеспечить высокие показатели разрешающей способности  $\Phi_i^*$ .

Кроме того, конструктивное исполнение преобразователя должно быть, по возможности, воплощено в категориях простых инженерных решений.

Особенности построения измерительных устройств для определения магнитных моментов габаритных объектов рассмотрим в последовательности – "анализ первичных преобразователей – их конструктивное воплощение".

**Первичные преобразователи.** Основой для построения первичных преобразователей измерительных устройств, как следует из соотношения (5), является широкий спектр систем обмоток [7], для создания однородного магнитного поля.

Возможностями в части разрешения главной задачи – максимальный рабочий объем при минимальных размерах преобразователя – обладают многообмоточные системы [7] для создания однородного магнитного поля.

Так, при выполнении первичного преобразователя, в виде системы квадратных ( $a \times a$ ) обмоток Рубенса (рис. 2), методическая погрешность для рабочего объема цилиндрической формы длиной  $0,5a$  и диаметром  $0,5a$ , будет равна  $\Delta_{kx} \leq 1\%$ .

Системы с разными размерами обмоток, обеспечивают более высокие показателями однородности магнитного поля в рабочем объеме. Примером тому является погрешность  $\Delta_{kx} \leq 1\%$  для первичного преобразователя, выполненного в виде системы обмоток Браунбека (рис. 3,а). В [7] показано, что улучшить равномерность  $\Delta_{kx}$  за счет увеличения числа обмоток свыше 6 единиц реально не представляется возможным по причинам конструктивно-технологического характера.

Рассмотрим ряд эффективных, хотя и конструктивно сложных, вариантов выполнения первичного преобразователя, способных обеспечить низкий уровень погрешности  $\Delta_{ki}$  в больших рабочих объемах.

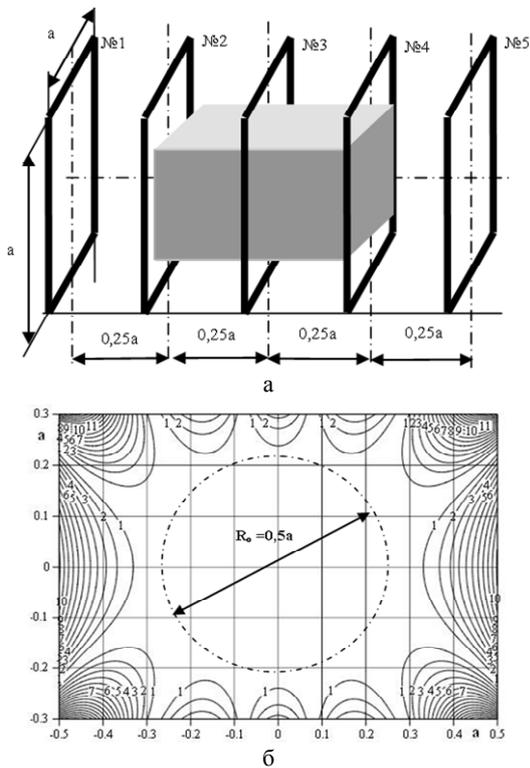


Рис. 2. Система обмоток Рубенса (а) и однородность (б) индукции  $\Delta_{kx}$  магнитного поля в сечении обмотки № 3 рабочего объема

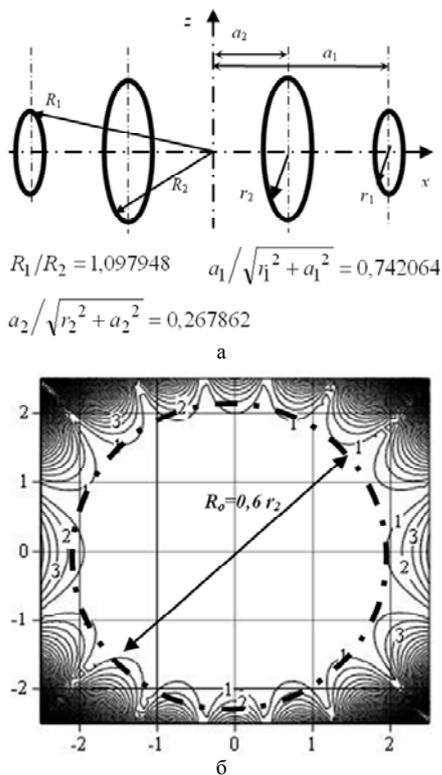


Рис. 3. Система обмоток Браунбека (а) и однородность (б) индукции  $\Delta_{kx}$  магнитного поля в их центральном (по оси  $z$ ) поперечном сечении

**Вариант № 1.** Круговая обмотка на цилиндрической поверхности (рис. 4,а) с равномерной плотностью укладки ее витков  $I_0 W_{уд}$  (ампер-витки/м). При бесконечной протяженности обмотки, индукция  $B_x$  во всех точках ее внутренней области будет одинакова [8], что

предопределяет выполнение в ней условия  $\Delta_{kx} = 0$ . Естественно, что в этом случае внутренняя область обмотки будет являться и рабочим объемом измерительного устройства.

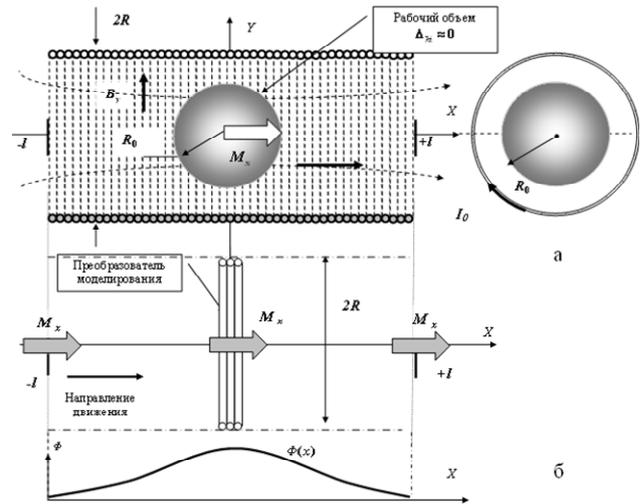


Рис. 4. Синтез (б) первичного преобразователя выполненного в виде круговой обмотки (а) на цилиндрической поверхности

При установленном размере рабочего объема, условие  $\Delta_{kx} \approx 0$  может быть обеспечено и при ограниченной длине ( $2l$ ) обмотки.

**Вариант № 2.** Образующая обмотка на цилиндрической поверхности (рис. 5,а) бесконечной протяженности с укладкой ампер-витков вдоль образующей поверхности с плотностью:

$$IW(\alpha) = I_0 W_{уд} \cdot \cos \alpha, \quad (7)$$

где:  $W_{уд}$  (витки/рад) – плотность обмотки, при угле  $\alpha = 0$ .

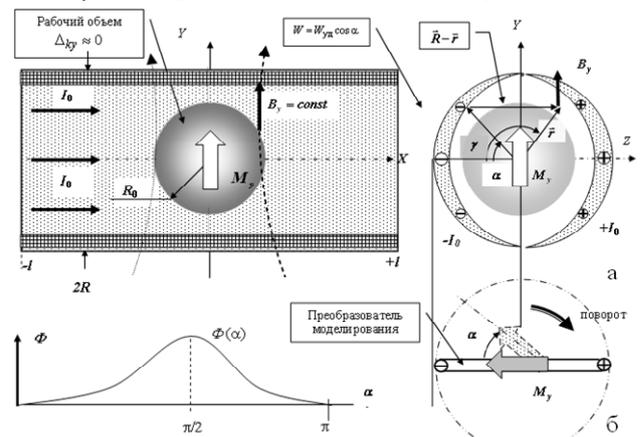


Рис. 5. Синтез (б) первичного преобразователя выполненного в виде образующей обмотки (а) на цилиндрической поверхности

Такой обмоткой в любой точке ее внутренней области создается равномерная однонаправленная индукция  $B_y$  магнитного поля вдоль оси  $Y$ .

В правильности этого постулата несложно убедиться, воспользовавшись классическим определением [9] индукции  $B$  магнитного поля проводника с током:

$$B = B_y = \int_0^{2\pi} \frac{I_0 W_{уд}}{|R-r|} \cdot \cos \alpha da = \text{const}. \quad (8)$$

где  $\mathbf{R} - \mathbf{r}$  – радиус-вектор расстояния между точкой во внутренней области ( $r \leq R$ ) соленоида и токовым проводником при угле  $\alpha$  (см. рис. 5,а).

Конечный результат интегрирования (8) – неизменная величина индукции  $\mathbf{B}$  независимо от параметра  $r$ . Рабочий объем такого преобразователя, как и в предыдущем случае (рис. 4), будет представлять внутреннюю область цилиндрической поверхности. При заданном размере рабочего объема, условие  $\Delta_{ky} \approx 0$  обеспечивается при ограниченной ее длине.

**Вариант №3.** На цилиндрической поверхности радиусом  $R$  уложены две круговые наклонные обмотки № 1 и № 2, плоскости витков которых, соответственно, имеют наклон  $+\varphi$  и  $-\varphi$ , как это показано на рис. 6. При этом плотность  $I_0 W_{уд}$  укладки ампер-витков обеих обмоток одинакова.

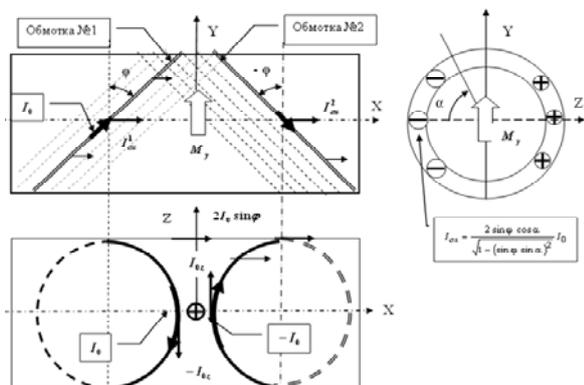


Рис. 6. Первичный преобразователь, выполненный в виде двух круговых наклонных обмоток (а) на цилиндрической поверхности

Система двух таких обмоток, благодаря выбранному встречному их включению (по осям  $Y$  и  $Z$ ) схожа, по своему магнитному проявлению, укладке ампер-витков  $I_{0x} W_{уд}$  уложенных вдоль образующей цилиндрической поверхности (ось  $X$ ), как это имело место в варианте № 2 (см. рис.5).

При этом ток  $I_{0x}$  определяется как сумма двух равных между собой  $I_{0x}^1$  и  $I_{0x}^2$  токов обмоток № 1 и № 2, соответственно:

$$I_{0x}^1 = I_{0x}^2 = I_{0x}/2. \quad (9)$$

Величина тока  $I_{0x}$ , при этом, определяется исходя из совпадения, по направлению, в каждой точке витка вектора тока  $\mathbf{I}_0$  и касательной  $\boldsymbol{\tau}$  к этой точке.

Основываясь на знании геометрии витка, например, обмотки № 1, как  $y = R \cdot \cos \alpha$ ;  $z = R \cdot \sin \alpha$ ;  $x = R \cdot \tan \varphi \cdot \sin \alpha$  величина составляющей тока  $I_{0x}^1$ , направленной вдоль оси  $X$  цилиндрической поверхности будет определяться как:

$$I_{0x}^1 = \frac{I_{0x}}{2} = \frac{dx/d\alpha}{\sqrt{[(dx/d\alpha)^2 + (dy/d\alpha)^2 + (dz/d\alpha)^2]}} I_0 = I_0 \sin \varphi \cos \alpha / \sqrt{1 - (\sin \varphi \sin \alpha)^2} \cdot I_0 \quad (10)$$

Это соотношение устанавливает и изменение плотности ампер-витков  $IW(\alpha)$  в системе обмоток по варианту № 3, в зависимости от угла  $\alpha$ :

$$IW(\alpha) = 2I_0 W_{уд} \sin \varphi \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - (\sin \varphi \cdot \sin \alpha)^2}}. \quad (11)$$

Сопоставление распределения ампер-витков (11) в системе обмоток по варианту № 3 с идеальным вариантом (7) их распределения, позволяет сделать однозначный вывод о том, что система обмоток по варианту № 3 не обеспечивает абсолютную однородность магнитного поля внутри рабочего объема. Иллюстрацией сказанному являются представленные на рис.7,а результаты расчета погрешности  $\Delta_{ky}$  в сечении  $XZ$  цилиндрической поверхности, при  $\varphi = \pi/4$ .

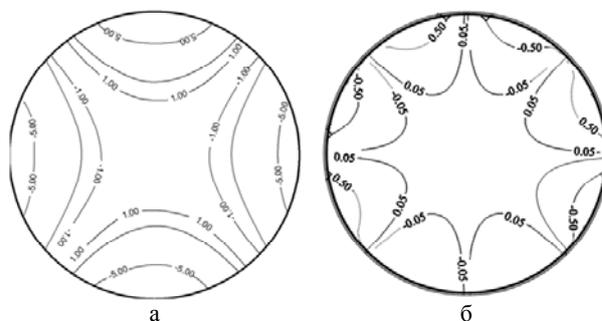


Рис. 7. Результаты расчета погрешности  $\Delta_{ky}$  для двух (а) и четырех (б) наклонных круговых обмоток на цилиндрической поверхности

В то же время эти результаты (рис. 7,а) указывают на возможность снижения погрешности  $\Delta_{ky}$  за счет приведения к уже имеющейся паре обмоток (№ 1 и № 2) второй, идентичной ей пары.

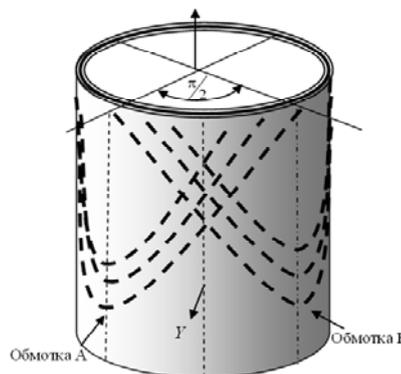


Рис. 8. Пара смещенных на угол  $\alpha_c = \pi/2$  обмоток первичного преобразователя

При этом вторая, приведенная пара должна быть установлена с угловым смещением  $\alpha_c = \pi/2$  по отношению к первой паре. На рис. 8 представлен фрагмент расположения на цилиндрической поверхности такой пары смещенных обмоток (А и В). За счет этого смещения, погрешности, вносимые каждой из пар, отчасти взаимно компенсируются, что и проиллюстрировано на рис.7,б.

**Конструктивная реализация.** Адаптация (по критерию "размер первичного преобразователя – размер рабочей зоны") рассмотренных систем обмоток для измерительных устройств магнитного момента габаритных объектов решает поставленную задачу лишь в ее метрологическом аспекте.

Вполне очевидно, воплощение рассмотренных систем обмоток для габаритных изделий связано с конструктивно-технологическими сложностями.

Так, при выполнении первичного преобразователя в виде обмоток Рубенса для максимального размера испытываемого объекта до 2 м и при  $\Delta_{kx} \leq 1\%$ , его

габаритные размеры (рис. 2) должны быть не менее, чем 4×4 м. Еще более сложной представляется конструктивная реализация обмоток уложенных на цилиндрической поверхности.

Поэтому предлагается, как альтернативу такому прямому конструктивному воплощению первичных преобразователей, использовать методы их моделирования (синтеза), как рецепторов магнитного поля.

Основным аппаратным средством такого моделирования являются конструктивно простые первичные преобразователи моделирования. Их количество равняется числу типоразмеров обмоток, из которых состоит моделируемая многообмоточная система. Так, в системе обмоток Рубенса (рис. 2) используются один типоразмер квадратных обмоток, а в системе обмоток (рис. 3) Браунбека – два типоразмера (радиусом  $R$  и  $r$ ) круглых обмоток.

В основу самой технология синтеза заложена процедура измерения величин магнитного потока от испытуемого изделия при его фиксированных (дискретных) положениях относительно преобразователя моделирования. Эти фиксированные положения определяются параметрами моделируемой многообмоточной системы первичного преобразователя.

Основываясь на результатах проведенных измерений, по заданному алгоритму их интегрирования, определяют магнитный поток  $\Phi$ , равный магнитному потоку в моделируемом первичном преобразователе при проведении прямых измерений магнитного момента объекта.

В общем случае принципы моделирования кроме общих положений несут в себе и индивидуальные черты, которые вносятся особенностями моделируемого многообмоточного преобразователя измерительного устройства. Поэтому при дальнейшем рассмотрении вопросов моделирования сложных первичных преобразователей сосредоточимся на конкретных примерах, которые в той или иной степени отражают все многообразие их исполнения.

**Синтез системы обмоток Рубенса.** Первичный преобразователь с такой системой обмоток представлен на рис. 2,а. Он включает в себя пять квадратных обмоток. При этом соотношение витков крайних (№ 1, № 5) и средних (№ 2, № 4) обмоток к виткам обмотки (№ 3), равно, соответственно, 19/10 и 4/10.

Процедура определения магнитного момента в устройстве с таким преобразователем включает в себя установку испытуемого объекта в рабочем объеме измерительного устройства, последующее измерение магнитного потока  $\Phi$  и определение, согласно (1), величины магнитного момента  $M$  объекта.

Основа синтеза такого преобразователя заложена в трактовке измеренного магнитного потока  $\Phi$ , который можно рассматривать как сумму магнитных потоков измеренных каждой из обмоток системы Рубенса:

$$\Phi = \Phi^1 + \Phi^2 + \Phi^3 + \Phi^4 + \Phi^5, \quad (12)$$

где  $\Phi^1 - \Phi^5$  – магнитные потоки обмоток (индекс при потоке указывает на номер обмотки, в которой он формируется).

Первичным преобразователем моделирования данной системы обмоток Рубенса, является одна квадратная обмотка с размером  $(a \times a)$ .

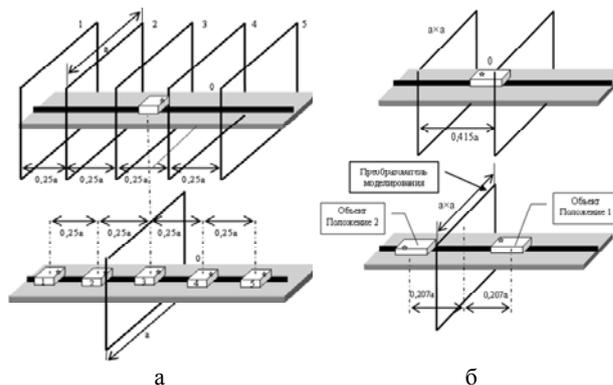


Рис. 9. Синтез системы обмоток Рубенса (а) и Гельмгольца (б)

Синтез первичного преобразователя (рис. 9,а) включает в себя проведение пяти измерений магнитного потока ( $\Phi_1 - \Phi_5$ ) при пяти дискретных положениях (рис. 8,а) испытуемого объекта относительно преобразователя моделирования. Индекс магнитного потока  $\Phi_1 - \Phi_5$  соответствует номеру позиции испытуемого объекта относительно преобразователя моделирования. Этот номер на рис 9,а проставлен на испытуемом объекте.

Магнитный поток  $\Phi$ , который служит основой для определения магнитного момента (1) объекта будет определяться, по аналогии с (12), как:

$$\Phi = \frac{4}{10} \Phi_1 + \frac{19}{10} \Phi_2 + \Phi_3 + \frac{19}{10} \Phi_4 + \frac{4}{10} \Phi_5. \quad (13)$$

Величина (13) магнитного потока  $\Phi$  при этом будет соответствовать результатам (12) их прямых измерений в системе обмоток Рубенса.

**Синтез системы обмоток Гельмгольца.** Преобразователь моделирования в виде квадратной обмотки может быть основой для синтеза других, сходных по типоразмеру, многообмоточных систем первичных преобразователей.

Так, на рис. 9,б представлен пример синтеза обмоток Гельмгольца на основе уже упомянутого преобразователя моделирования – квадратной обмотки. Здесь величина магнитного потока  $\Phi$ , определяющая магнитный момент испытуемого изделия будет определяться как:

$$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi. \quad (14)$$

**Синтез системы обмоток Браунбека.** Выполнение преобразователя моделирования в виде в двух, например круглых обмоток, позволяет осуществлять синтез многообмоточных систем обмоток с разными размерами. На рис. 10,а приведен пример моделирования первичного преобразователя выполненного на основе обмоток Браунбека (рис. 2,б).

Здесь преобразователь моделирования состоит из двух обмоток № 1 и № 2. Их радиусы ( $R$ ,  $r$ ) и смещение ( $b$ ) друг относительно друга находятся в пропорциях определяемых параметрами системы обмоток Браунбека (см. рис. 2) в целом.

При синтезе обмоток Браунбека используются результаты двух измерений магнитного потока  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  испытуемого объекта при различной его ориентации (поворот на угол  $\pi$ ) относительно обмоток преобразователя моделирования.

При этом, величина магнитного потока  $\Phi$ , опре-

деляющая магнитный момент испытуемого изделия будет определяться как:

$$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi. \quad (15)$$

Систему обмоток Браунбека можно смоделировать и посредством преобразователя моделирования, состоящего из двух обмоток, находящихся в одной плоскости, как показано на рис. 10,б. При этом количество измерений увеличится до четырех. Измерение № 1 и № 4 (номер проставлен на объекте) проводятся обмоткой № 1 при смене ориентации (поворот на угол  $\pi$ ) испытуемого объекта, а измерение № 2 и № 3 – обмоткой № 2.

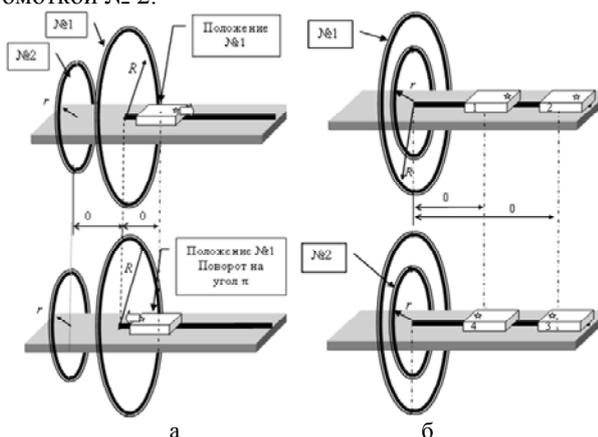


Рис. 10. Варианты (а, б) синтеза системы обмоток Браунбека

**Синтез круговой обмотки (вариант № 1).** Первичный преобразователь, уложенный в виде круговой обмотки на цилиндрической поверхности (рис. 5) моделируется по аналогии с рассмотренными многообмоточными системами моделирования.

Единственный ее типоразмер – плоская круглая (см. рис. 5,б) обмотка. Именно ее вид будет повторять и обмотка преобразователя моделирования.

Значимым отличием здесь будет количество дискретных положений испытуемого объекта, относительно испытуемого объекта, при котором проводятся измерения магнитного потока. Поэтому при моделировании первичных преобразователей такого типа значительно удобнее измеренные величины магнитного потока при дискретных значениях месторасположения испытуемого объекта представить в виде проходных характеристик (рис. 5,б) типа  $\Phi(x)$ , где  $-l \leq x \leq +l$ ,  $x$  – координаты месторасположения объекта относительно преобразователя моделирования.

При этом величина магнитного потока  $\Phi$ , определяющая магнитный момент (2) испытуемого изделия будет определяться как:

$$\Phi = \int_{-l}^{+l} \Phi(x) dx. \quad (16)$$

В целом вопросы такого моделирования круговых обмоток (рис. 5), имеют растянутую во времени предысторию, достаточно полно описанную, как в далеких [10] так и современных работах [11, 12] в области магнитных измерений.

По такой же схеме осуществляется моделирование [13] круговых наклонных обмоток (вариант № 3) уложенных на цилиндрической поверхности. Отличие

будет состоять лишь в преобразователе моделирования – он должен выполняться в виде двух плоских круговых обмоток развернутых относительно друг друга на угол  $2\phi$ , по аналогии с витками наклонных обмоток. При этом отметим, что изначальное различие в эффективности (величина погрешность  $\Delta_{кx}$ ) круговых и наклонных обмоток, будет присутствовать и при их моделировании.

Для синтеза более эффективных (рис. 7,б) систем обмоток потребуются более сложный преобразователь моделирования – из четырех плоских обмоток.

**Синтез образующей обмотки (вариант № 2).** Моделирование первичного преобразователя, в виде образующей обмотки на цилиндрической поверхности (рис. 5), отличается в деталях от моделирования круговой обмотки (рис. 4):

- во-первых, здесь преобразователь моделирования будет представлять собой плоскую прямоугольную обмотку. Ее ширина равна радиусу  $2R$  цилиндрической поверхности (рис. 5), а высота – ее длине  $2l$ ;
- во-вторых, проходная характеристика, в данном случае, должна определяться в форме зависимости  $\Phi(\alpha)$  магнитного потока  $\Phi$  при угловом перемещении  $\alpha$  испытуемого объекта (рис. 5,б) в преобразователе моделирования.

При этом величина магнитного потока  $\Phi$ , по которой рассчитывают магнитный момент (2), испытуемого изделия будет равна:

$$\Phi = \int_0^{\pi} \Phi(\alpha) \cdot \sin \alpha \, d\alpha. \quad (17)$$

Что касается точности моделирования, то если в варианте с круговой обмоткой она определялась длиной проезда  $2l$  испытуемого объекта, то в данном случае она определяется длиной  $2l$  контура обмотки преобразователя моделирования. Тот и другой параметр – это длина цилиндрической поверхности. В этом просматривается определенная симметрия круговой и образующей обмоток.

Эскиз устройства, в котором реализованы принципы синтеза образующей обмотки, представлен на рис. 10. Это устройство включает в себя преобразователь моделирования (ПМ), с размерами  $2R$  и  $2l$ , поворотное устройство (ПУ) на которое устанавливается испытуемый объект техники (ОТ).

В процессе определения зависимости магнитного потока  $\Phi_x(\alpha)$ , испытуемый объект, располагаемый на столе поворотного устройства, поворачивается на угол  $\alpha = \pi$ . При этом осуществляется регистрация зависимости магнитного потока  $\Phi(\alpha)$  в виде проходной характеристики, по аналогии с рис. 5,б. По этой зависимости определяют магнитный момент согласно (2), (17) как:

$$M_x = \beta_x \int_0^{\pi} \Phi_x(\alpha) \sin \alpha \, d\alpha. \quad (18)$$

На рис. 10,а представлены результаты расчета погрешности  $\Delta_{кx}$  при соотношении  $2l/2R = 4$ . Приведенные расчеты показывают, что в этом случае погрешность  $\Delta_{кx} \leq 1\%$  обеспечивается в объеме радиусом  $R_0 \leq 0,8R$ .

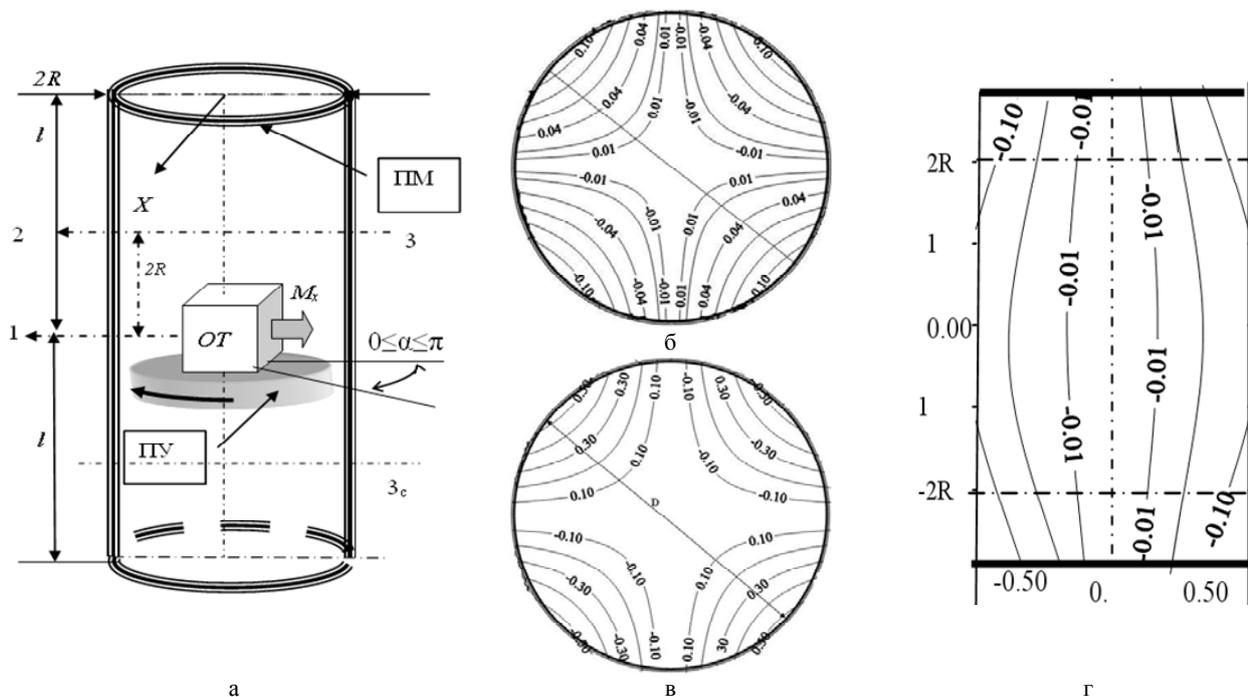


Рис. 10. Эскиз устройства поворотного типа (а) и результаты расчета его погрешности  $\Delta_{kx}$ : для горизонтального сечения 1 (б); для горизонтального сечения 2 (в); для вертикального сечения 3 (г) ( $l = 2R$ ) –  $3_c$ , ( $l = -2R$ )

### ОБОБЩЕНИЯ

1. Синтез, с помощью конструктивно простых преобразователей моделирования, сложных первичных преобразователей является основой для упрощения конструкции высокоточных устройств измерения магнитного момента габаритных объектов техники.

2. Рассмотрены варианты построения оригинальных высокоэффективных устройства для определения магнитных моментов объектов техники. В этих вариантах синтез первичного преобразователя измерительного устройства производится, основываясь на результатах измерения магнитного потока, при:

- повороте испытуемого объекта в объеме преобразователя моделирования;
- сочетании линейного и углового перемещений испытуемого объекта относительно преобразователя моделирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко А.П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. М: Машиностроение, 1975.
2. Розов В.Ю. Математическая модель электрооборудования как источника внешнего магнитного поля // Технічна електродинаміка. – 1995. – №2. – С. 3-7.
3. Пилюгіна О.Ю., Пелевін Д.Е., Ерисов А.В. Про засоби вимірювання магнітного моменту технічних об'єктів // Електроінформ. – 2006. – № 1. – С. 18-20.
4. Семенов В.Г. Определение дипольного, квадрупольного и октупольного магнитных моментов точечно-контурными методами // Проблемы повышения точности средств измерения магнитной индукции. Сб. науч. труд. НПО им. Менделеева. – 1983. – С. 35-47.
5. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Т.1. – Л.: Изд-во Ленинградского государственного университета, 1964. – 445 с.
6. Пилюгіна О.Ю., Пелевін Д.Е., Ерисов А.В. О расчете методической погрешности средств определения магнитного момента // Вестник НТУ "ХПИ". – 2005. – № 48. – С. 127-136.
7. Шрамберггер Г.А. Устройства для создания слабых пост-

янных магнитных полей. – Новосибирск: Наука, 1972 – 176 с.

8. Зильберман Г.Е. Электричество и магнетизм. – М.: Наука, 1970. – 384 с.

9. Шимони К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1965. – 774 с.

10. Драновский В.И., Зигунов В.Н., Ростовская А.А., Чердынченко Э.А. Измерение и компенсация магнитного момента спутника // Сб. "Космическая стрела". – М.: Наука, 1974. – С. 147-161

11. Волохов С.А., Ивлева Л.Ф. Методическая погрешность измерений магнитного момента. // Техническая электродинамика. – 1996. – № 4. – С. 72-74.

12. Волохов С.А., Кильдишев А.В. Магнитные сигнатуры мультипольного источника, полученные поперечными измерительными контурами // Техническая электродинамика. – 1996. – № 5. – С. 65-68.

13. Окон П. И., Семенов В.Г. Исследование метода интегрирования магнитного потока для измерения поперечных компонент магнитного момента. // Совершенствование методов и средств проверки магнитоизмерительной аппаратуры, используемой для контроля качества магнитных материалов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 59-73.

*Гринченко Владимир Сергеевич*

*Ерисов Анатолий Васильевич*

Институт Электродинамики НАН Украины

Отделение магнетизма

30106, Харьков, ул. Индустриальная, 19

тел/факс (0572) 992162, e-mail: ITL900@online.kharkov.ua

*V.S. Grinchenko, A.V. Erisov*

### About device for testing magnetic moments in large-dimensioned technical objects.

Analysis of a device for measuring magnetic moments in large-dimensioned technical objects is made on the basis of direct measurements of magnetic flux. Requirements for design of the device's primary converter are specified. A technique for complex primary converter systems synthesis is introduced.

**Key words** – large-dimensioned technical objects, magnetic moment, measurements, primary converters, synthesis.