

# Преобразователь линейных ускорений с улучшенными метрологическими характеристиками

ИСМАГИЛОВ Ф.Р., ЯНГИРОВ И.Ф.

*Исследуется преобразователь линейных ускорений с улучшенными метрологическими характеристиками, полученными благодаря дополнению конструкции короткозамкнутым витком.*

**Ключевые слова:** преобразователь линейных ускорений, преобразовательная характеристика, короткозамкнутый виток

В автоматических системах управления широко применяются преобразователи первой производной скорости по времени контролируемых объектов в электрический сигнал. Несмотря на большое число конструкций таких преобразователей, часто возникает потребность в разработке новых преобразователей линейных ускорений (ПЛУ) с улучшенными метрологическими характеристиками.

Предлагаемая схема ПЛУ [1], показанная на рис. 1, обладает улучшенными метрологическими характеристиками (повышены чувствительность и крутизна преобразовательной характеристики), что достигнуто за счет дополнительного использования в известной конструкции ПЛУ короткозамкнутого (КЗ) электропроводящего витка. Это приводит к усилению изменения магнитного поля в магнитопроводе 1 по времени при вибрации ферромагнитного кольца 2 относительно электропроводящего КЗ витка 3, которое далее преобразуется в последовательно-встречно включенных сигнальных обмотках 4 в информационный сигнал.

В статье рассмотрено определение преобразовательной характеристики ПЛУ на основе использования уравнений динамики, электродинамики

*A transducer of linear accelerations with improved metrological characteristics obtained by incorporating a short-circuited turn into its is studied.*

**Key words:** transducer of linear accelerations, conversion characteristics, short-circuited turn

Максвелла и методов математического анализа. Расчетная схема ПЛУ представлена на рис 2, где  $\frac{d^2 x}{dt^2} = A_{\text{вх}} \sin \omega t$ .

Задача решалась при следующих допущениях: значение немагнитного зазора намного меньше радиуса его кривизны; магнитное поле в зазоре плоскопараллельное; магнитная индукция первичного поля задана основной гармоникой и не меняется вдоль радиуса полюса; магнитная проницаемость материала витка равна проницаемости вакуума  $\mu_0$ , а стали магнитопровода — бесконечно большая,  $\mu_{\text{ст}} = \infty$ ; магнитная проницаемость ферромагнитного кольца одинакова и постоянна по всему объему; электропроводность ферромагнитного кольца равна нулю; плотность индуцированных токов по толщине витка постоянна; поля рассеяния вне кругового полюса не учитываются.

Учитывая электродинамическую силу притяжения кольца к явно выраженному полюсу [2 и 3], силу тяжести кольца в вертикальном расположении относительно контролируемого объекта и силу трения, уравнение движения ферромагнитного кольца

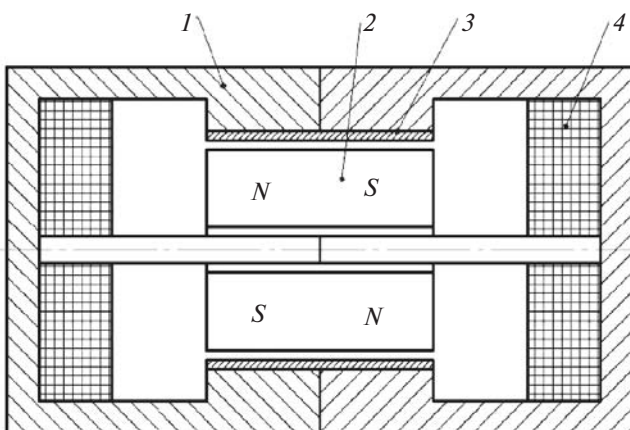


Рис. 1. Конструкция предлагаемого ПЛУ

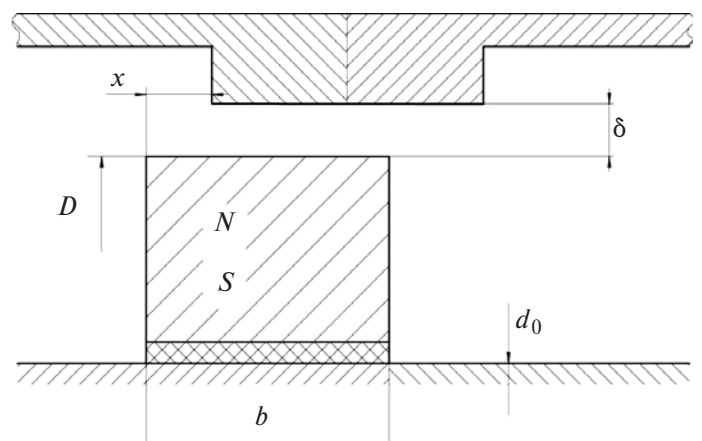


Рис. 2. Расчетная схема ПЛУ

после математических преобразований запишем в таком виде:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{4b}{r_{\text{маг}} \rho D^2 b} \frac{dx}{dt} + \frac{2B_d^2 (D+2d)}{r_{\text{маг}} m_0 D^2 b} x = \frac{2B_d^2 (D+2d)}{r_{\text{маг}} m_0 D^2} g + \frac{4F_0}{r_{\text{маг}} m_0 D^2 b} \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $b$  – ширина полюса;  $D$  – диаметр кольца;  $d$  – зазор;  $r_{\text{маг}}$  – плотность материала кольца;  $b$  – коэффициент динамического трения;  $F_0$  – внешняя сила возмущения;  $x$  – координата ферромагнитного кольца, изменяющаяся по гармоническому закону (разложение в ряд Фурье).

Рассмотрим частные случаи решения задачи.

1. Электромагнитная сила уравновешивается силой тяжести кольца в вертикальном расположении ПЛУ относительно плоскости колебания контролируемого объекта, т.е. справедливо выражение

$$F_{\text{ЭМ}} = \frac{2B_d^2 \rho (D+2d)b}{2m_0} = r_{\text{маг}} \frac{\rho D^2}{4} bg; \quad (2)$$

тогда решение уравнения (1) будет иметь следующий вид:

$$x = \frac{A_{\text{ВХ}}}{\omega_0^2 \sqrt{(1-l^2)^2 + g^2 l^2}} \sin(\omega t + j_0), \quad (3)$$

где  $l = \omega / \omega_0$  – относительная частота;  $g = 2nz / \omega_0$  – коэффициент учета динамичности колебательной системы трения и демпфирования КЗ витком;  $A_{\text{ВХ}}$  – амплитуда ускорения контролируемого объекта.

Наводимая в последовательно-встречно включенных сигнальных обмотках преобразователя ЭДС

$$E = -w \frac{d\Phi}{dt} = \frac{2\rho B_d (D+2d)}{w_0} A_{\text{ВХ}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-l^2)^2 + g^2 l^2}} \sin(\omega t + j_0), \quad (4)$$

где  $w$  – число витков сигнальной обмотки.

Принимая за базовое значение ЭДС величину  $e_{\text{баз}} = \frac{2\rho B_d (D+2d)}{w_0} A_{\text{ВХ}}$ , получаем выражение для преобразовательной характеристики ПЛУ (в отн. ед.):

$$e = e_{\text{баз}} \frac{1}{\sqrt{(1-l^2)^2 + g^2 l^2}} \cos(\omega t + j_0). \quad (5)$$

2. Сила тяжести ферромагнитного кольца равна нулю,  $P = mg = 0$  (относительно сил трения и демпфирования), когда ПЛУ расположена в горизонтальной плоскости. В этом случае решение уравнения (1) будет иметь следующий вид:

$$x = b + \frac{A_{\text{ВХ}}}{\omega_0^2 \sqrt{(1-l^2)^2 + g^2 l^2}} \sin(\omega t + j_0), \quad (6)$$

а выражение для выходного сигнала будет аналогично выражению (5).

3. Для случая неучета силы трения и демпфирования выражение (5) перепишем так:

$$e = e_{\text{баз}} \frac{1}{1-l^2} \cos(\omega t + j_0). \quad (7)$$

На рис. 3 приведены графические зависимости выходного электрического сигнала ПЛУ от частоты входного воздействия при различных случаях демпфирования  $g = 2nz / \omega_0$ .

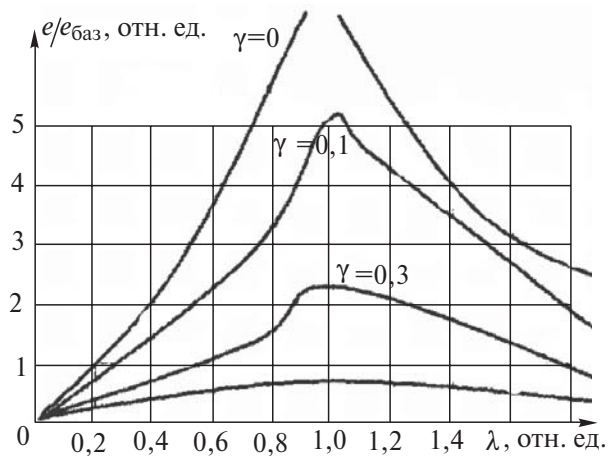


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала ПЛУ от частоты входного воздействия

Анализ этих кривых показывает, что с уменьшением степени демпфирования  $g$  возрастает крутизна преобразовательной характеристики ПЛУ и при  $g \rightarrow 0$  она максимальна, что необходимо учитывать при их проектировании.

Далее определим демпфирующую силу КЗ витка. Первичное магнитное поле ферромагнитного кольца изменяется по гармоническому закону вдоль оси магнитопровода  $Ox$ , тогда изменение и электромагнитных характеристик процессов характеризуется также гармоническим законом:

$$\vec{H}_1 = \text{Re } \vec{H}_1(t) e^{-j\alpha x}; \quad \vec{H}_2 = \text{Re } \vec{H}_2(t) e^{-j\alpha x}, \quad (8)$$

где  $\alpha = \rho / 2b$ .

В этом случае уравнение электромагнитного процесса в КЗ витке будет иметь вид

$$\frac{d^2 \vec{H}_{2m}}{dy^2} - (a^2 + j m_0 s w K_d) \vec{H}_{2m} = j m_0 s w K_d \vec{H}_{1m}, \quad (9)$$

где  $s$  – активная электрическая проводимость материала витка;  $K_d$  – коэффициент приведения по поперечной оси магнитопровода.

Вводя безразмерную величину  $e_f$ , получаем выражение

$$\frac{d^2 H_{2m}}{dy^2} - |^2 H_{2m} = j m_0 s w K_d H_{1m}, \quad (10)$$

где  $|^2 = a^2 + j m_0 w K_d = a^2 (1 + e_f)$ ;  $e_f = \frac{m_0 s w}{d^2} K_d$  – магнитное число Рейнольдса (МЧР).

Решение уравнения (10) имеет следующий вид:

$$H_{2m} = C_1 \text{shl } y + C_2 \text{shl } y - \frac{j e_f a^2}{|^2} H_{1m}. \quad (11)$$

Учитывая граничные условия для нахождения постоянных интегрирования  $C_1$  и  $C_2$ , получаем соотношение для определения интегральной демпфирующей силы:

$$F_x = \frac{\rho}{2} \frac{B_{1m}^2}{m_0 k_d} D l_{cp} \frac{e_f}{1 + e_f^2}, \quad (12)$$

где  $D$  – толщина КЗ витка;  $l_{cp}$  – средний периметр этого витка.

Из (12) видна прямая зависимость исходной электромагнитной силы от геометрических соотношений для КЗ витка, МЧР, характеристик первичного магнитного поля.

Определим преобразовательную характеристику ПЛУ с учётом демпфирующей силы КЗ витка. Запишем уравнение движения ферромагнитного кольца:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{4b}{\rho D^2 r_{mag} b} \frac{dx}{dt} + \frac{2B_d^2 (D+2d)}{r_{mag} m_0 D^2 b} x = \\ = \frac{\dot{e}}{\hat{e}} \frac{2B_d^2 (D+2d)}{r_{mag} m_0 D^2} - \frac{\dot{u}}{g \dot{u}} + \\ + \frac{\dot{e}}{\hat{e}} \frac{4F_0}{r_{mag} m_0 \rho D^2 b} - \frac{4B_d^2}{r_{mag} m_0 K_d b D^2} \frac{D l_{cp}}{b D^2} \frac{e}{1 + e^2} \frac{\dot{u}}{\dot{u}} \sin wt. \quad (13) \end{aligned}$$

Решения этого уравнения имеют вид:

$$x_1 = b + \frac{A_{BX}}{w_0^2 \sqrt{(1 - |^2)^2 + g^2 |^2}} \sin(wt + j_0); \quad (14)$$

$$\begin{aligned} x_2 = \frac{4B_d^2}{r_{mag} m_0 K_d b D^2} \frac{D l_{cp}}{b D^2} \frac{e}{1 + e^2} \sin(wt + j_0) = \\ = \frac{A_{BX} \frac{e_f}{1 + e_f^2}}{w_0^2 \sqrt{(1 - |^2)^2 + g^2 |^2}} \sin(wt + j_0). \quad (15) \end{aligned}$$

Тогда ЭДС, наводимые в ПЛУ, будут определяться соответственно как

$$e_1^* = e_{1\text{баз}} \frac{1}{\sqrt{(1 - |^2)^2 + g^2 |^2}} \cos(wt + j_0); \quad (16)$$

$$e_2^* = e_{2\text{баз}} \frac{1}{\sqrt{(1 - |^2)^2 + g^2 |^2}} \cos(wt + j_0), \quad (17)$$

где базовые величины (в отн. ед.) равны:

$$\begin{aligned} e_{1\text{баз}} &= \frac{\rho B_d (D+2d)}{w_0} A_{BX}; \\ e_{2\text{баз}} &= \frac{4B_d}{r_{mag} m_0 K_d b D^2} \frac{D l_{cp}}{b D^2} A_{BX}. \end{aligned} \quad (18)$$

Действительный выходной сигнал по принципу суперпозиции

$$e = e_1^* + e_2^* \frac{e_f}{1 + e_f^2} = e_1^* + e_2^* K_i. \quad (19)$$

Анализ выражения (19) для частных случаев ( $e_f = 0$ ;  $e_f = \infty$ ;  $e_f = 1$ ;  $K_i = \frac{e_f}{1 + e_f^2}$ ) показывает, что

максимальное значение сигнала будет  $e = e^* + 0,5e^* = 1,5e^*$ , т.е. применение КЗ витка позволяет повысить крутизну преобразовательной характеристики и чувствительность ПЛУ в 1,5 раза.

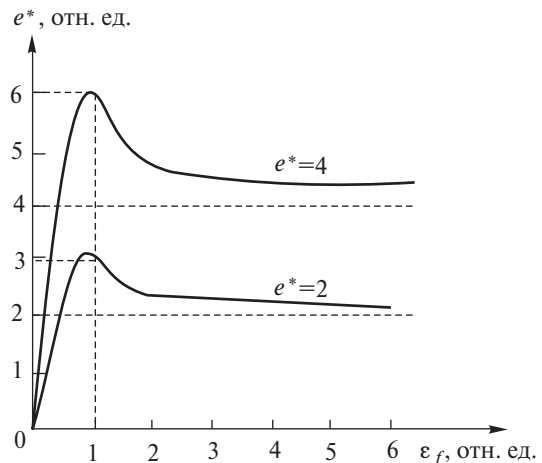


Рис. 4. Зависимость выходного сигнала ПЛУ от МЧР

Так, при использовании в исследуемом ПЛУ магнитного кольца с  $F = 400$  А порог чувствительности преобразователя без диамагнитного кольца может достичь значения  $A_{BX} = 2 \cdot 10^{-4}$  м/с<sup>2</sup>, а с использованием диамагнитного кольца  $A_{BX} = 2 \cdot 10^{-4}$  м/с<sup>2</sup>, при этом погрешность коэффициента преоб-

разования при измерении может доходить до  $D=0,02\%$ .

**Вывод.** Полученные расчетные формулы обеспечивают возможность конструирования ПЛУ с большими чувствительностью и крутизной преобразовательной характеристики при оптимальном соотношении конструктивных параметров и могут найти применение при исследовании электромеханических устройств, содержащих КЗ виток (индуктивные элементы, электромагнитные пушки, устройства контроля обмоток электродвигателей и трансформаторов и т.д.).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. №1642404 (СССР). Преобразователь линейных ускорений/ И.Х.Хайруллин, Ф.Р.Исмагилов, И.Ф. Янгиров, Р.К. Фаттахов. — БИ, 1991, №14.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. — Л.: Энергия, 1974.
3. Буль Б.К., Буль О.Б., Азанов В.А., Шоффа В.Н. Электромеханические аппараты автоматики. — М.: Высшая школа, 1988.

4. Пляхтиев А.М. Измерительные преобразователи с определенными параметрами. — Ташкент: Изд. АН СССР, 1987.

5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1973.

[26.11.09]

*Авторы: Исмагилов Флюр Рашитович окончил в 1973 г. факультет авиационного приборостроения Уфимского авиационного института (УАИ). В 1998 г. В 1998 г. защитил докторскую диссертацию «Электромагнитные элементы систем управления со сложной геометрией ротора». Проректор Уфимского государственного авиационного университета.*

*Янгиров Ильгиз Флюсович окончил в 1988 г. факультет авиационного приборостроения УАИ, где в 1993 г. защитил кандидатскую диссертацию «Электромеханический вибрационный преобразователь со спиральным вторичным элементом для систем управления». Доцент Нефтекамского нефтяного колледжа.*

\* \* \*

### ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении (стоимость по договоренности).

При повторении той же рекламы в следующем номере — скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах — скидка 20%. Стоимость оплаты рекламных статей — по договоренности. Последний срок представления рекламного материала — за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (7-495)362-7485

E-mail: l.s.kudinova@rambler.ru