

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УСКОРЕНИЙ\*

Ф.Р. Исмагилов, И.Ф. Янгиров, Д.В. Максудов

Предлагается конструкция преобразователя линейных ускорений (ПЛУ), обладающая повышенной чувствительностью и крутизной преобразовательной характеристики за счет дополнительного использования в известном ПЛУ короткозамкнутого электропроводящего кольца. В процессе математического моделирования получены расчетные формулы, позволяющие определить преобразовательную характеристику датчика линейных ускорений с учетом короткозамкнутого витка. Рассмотрены частные случаи при решении задачи. Приведено экспериментальное подтверждение аналитических исследований с необходимой точностью. Расчетные формулы, полученные в процессе математического моделирования и приведенные в данной статье, дают возможность провести анализ влияния всех параметров ПЛУ как по отдельности, так и в их взаимосвязи на преобразовательные характеристики ПЛУ. Кроме того, полученные формулы обеспечивают возможность конструирования ПЛУ с наибольшей чувствительностью и крутизной преобразовательной характеристики с оптимальным соотношением конструктивных параметров. Выражения, полученные в ходе аналитических исследований, были эмпирически подтверждены проведенными экспериментальными исследованиями. Результаты математического моделирования, приведенного в данной статье, могут найти применения при исследовании электромеханических устройств с наличием КЗВ (индуктивные элементы, электромагнитная пушка, устройства контроля брака обмоток электродвигателей и трансформаторов на замыкание и т. д.).

*Ключевые слова:* магнитное число Рейнольдса, преобразователь линейных ускорений, диамагнитное кольцо, короткозамкнутый виток, порог чувствительности, крутизна преобразовательной характеристики.

### Введение

В автоматических системах управления широко применяются преобразователи второй производной скорости контролируемых по времени объектов в электрический сигнал. При этом в качестве преобразователей могут использоваться емкостные, струнные, индуктивные, индукционные элементы. Однако несмотря на большое количество таких преобразователей, все же возникает потребность в разработке новых преобразователей линейных ускорений в целях расширения их метрологических характеристик.

### Решение задачи

Предлагаемая схема преобразователя линейных ускорений (ПЛУ) [1] показана на рис. 1. Данная конструкция обладает улучшенными метрологическими характеристиками, т. е. повышенной чувствительностью и крутизной преобразовательной характеристики за счет дополнительного использования в ПЛУ короткозамкнутого электропроводящего витка.

Улучшение метрологических характеристик ПЛУ достигается усилением изменения магнитного поля в магнитопроводе 1 при вибрации ферромагнитного кольца 2 относительно электропроводящего витка 3, которое далее преобразуется в последовательно-встречно включенных обмотках 4 в информационный электрический сигнал.

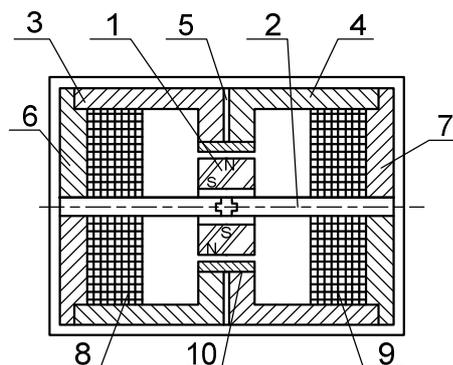


Рис. 1. Конструкция ПЛУ

В данной статье приведено решение задачи по определению преобразовательной характеристики ПЛУ. При решении использованы уравнения динамики, электродинамики Максвелла, методы математического анализа. Расчетная схема ПЛУ представлена на рис. 2.

Задача решена при следующих допущениях; величина 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 – бесконечности

\* Работа выполнена в рамках НИР «Исследование электрических и магнитных полей и газоразрядных процессов в сложных гетерогенных средах перспективных электротехнических комплексов и систем», задание № 2014/40 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России.

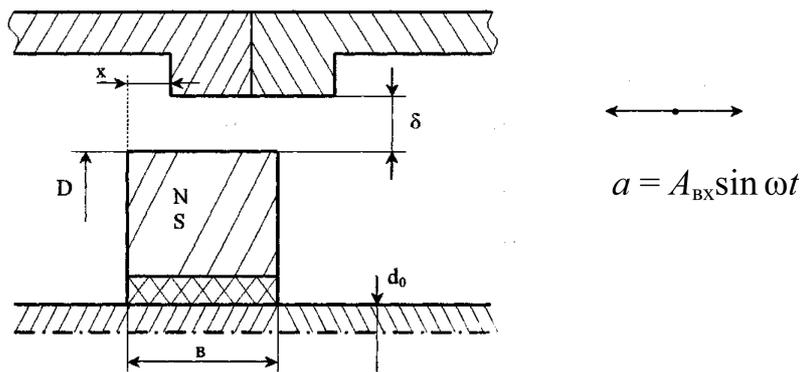


Рис. 2. Расчетная схема ПЛУ

$\mu_{ст} = \infty$ ; 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.

Полагается, что информационный сигнал изменяется по гармоническому закону:

$$a = A_{вх} \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $a$  – величина информационного сигнала.

Учитывая электромагнитную силу притяжения кольца к явно выраженному полюсу [2, 3], силу тяжести на кольцо в вертикальном положении и силы трения, после математических преобразований уравнение колебательного движения ферромагнитного кольца может быть записано в виде

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{4\beta}{\rho_{маг} \pi D^2 b} \frac{dx}{dt} + \frac{2B_{\delta}^2 (D + 2\delta)}{\rho_{маг} \mu_0 D^2 b} x = \frac{2B_{\delta}^2 (D + 2\delta)}{\rho_{маг} \mu_0 D^2} - g + \frac{4F_0}{\rho_{маг} \mu_0 D^2 b} \sin \omega t, \quad (2)$$

которое после введения постоянных коэффициентов

$$A = \frac{4\beta}{\rho_{маг} \pi D^2 b}; \quad B = \frac{2B_{\delta}^2 (D + 2\delta)}{\rho_{маг} \mu_0 D^2 b};$$

$$C = \frac{2B_{\delta}^2 (D + 2\delta)}{\rho_{маг} \mu_0 D^2} - g; \quad K = \frac{4F_0}{\rho_{маг} \pi D^2 b} = A_{вх},$$

где  $A_{вх}$  – амплитуда величины ускорения контролируемого объекта;  $b$  – ширина полюса;  $D$  – диаметр кольца;  $\delta$  – величина зазора;  $\rho_{маг}$  – плотность материала кольца;  $\beta$  – коэффициент динамического трения;  $F_0$  – внешняя сила возмущения, приобретает вид

$$\frac{d^2x}{dt^2} + A \frac{dx}{dt} + Bx = C + K \sin \omega t, \quad (3)$$

при этом собственная частота для колеблющейся системы

$$\omega_0 = B_{\delta} \sqrt{\frac{2(D + 2\delta)}{\rho_{маг} \mu_0 D^2 b}}, \quad (4)$$

что совпадает с результатами, ранее полученными авторами.

В процессе математического моделирования были рассмотрены следующие частные случаи решения задачи.

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

$$F_{эм} = \frac{B_{\delta}^2 \pi (D + 2\delta) b}{2\mu_0} = \rho_{маг} \frac{\pi D^2}{4} b g, \quad (5)$$

и уравнение (2) приобретает вид дифференциального уравнения

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{4\beta}{\rho_{маг} \pi D^2 b} \frac{dx}{dt} + \frac{2B_{\delta}^2 (D + 2\delta)}{\rho_{маг} \mu_0 D^2 b} x = \frac{4F_0}{\rho_{маг} \pi D^2 b} \sin \omega t, \quad (6)$$

решение которого выражается соотношением

$$x = \frac{A_{вх}}{\omega_0^2 \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + \gamma^2 \lambda^2}} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (7)$$

где  $\lambda = \omega/\omega_0$  – относительная частота;  $\gamma = 2n\xi/\omega_0$  – коэффициент учета динамичности колебательной системы (трения и демпфирования короткозамкнутым витком).

При этом ЭДС, наводимая в сигнальных обмотках преобразователя

$$E = -W \frac{d\Phi}{dt} = \frac{2\pi B_{\delta} (D + 2\delta)}{\omega_0} A_{вх} \times$$

$$\times \frac{w\lambda}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + \gamma^2 \lambda^2}} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (8)$$

где  $W$  – число витков сигнальной обмотки.

Введение базового значения ЭДС

$$e_{баз} = \frac{2\pi B_{\delta} (D + 2\delta)}{\omega_0} A_{вх} w$$

позволяет получить преобразовательную характеристику ПЛУ в относительных единицах

$$e^* = \frac{\lambda}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + \gamma^2 \lambda^2}} \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (9)$$

2. Сила тяжести равна нулю  $P = mg = 0$ , когда ПЛУ расположена в горизонтальной плоскости. В этом случае уравнение (2) приобретает вид

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{4\beta}{\rho_{\text{маг}}\pi D^2 b} \frac{dx}{dt} + \frac{2B_{\delta}^2(D+2\delta)}{\rho_{\text{маг}}\mu_0 D^2 b} x = \frac{2B_{\delta}^2(D+2\delta)}{\rho_{\text{маг}}\mu_0 D^2} + \frac{4F_0}{\rho_{\text{маг}}\pi D^2 b} \sin \omega t \quad (10)$$

и решение можно найти в виде  $x = A' + B \sin(\omega t + \varphi)$ .

В этом случае для постоянной составляющей справедливо соотношение

$$\frac{2B_{\delta}^2(D+2\delta)}{\rho_{\text{маг}}\mu_0 D^2 b} A' = \frac{2B_{\delta}^2(D+2\delta)}{\rho_{\text{маг}}\mu_0 D^2} \Rightarrow A' = b, \quad (11)$$

решение исходного уравнения (10) имеет вид

$$x = b + \frac{A_{\text{вх}}}{\omega_0^2 \sqrt{(1-\lambda^2)^2 + \gamma^2 \lambda^2}} \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (12)$$

и выражение для выходного сигнала аналогично выражению (9).

3. Силы трения и демпфирования не учитываются. В этом случае выражение (9) приобретает вид

$$e^* = \frac{\lambda}{1-\lambda^2} \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (13)$$

При использовании общего выражения колебательного движения ферромагнитного кольца, решение ищется в виде  $x = A'' + B \sin(\omega t + \varphi)$ , постоянная составляющая определяется из соотношения

$$A'' = b \left[ 1 - \frac{\rho_{\text{маг}}\mu_0 D^2}{B_{\delta}^2(D+2\delta)} \right], \quad (14)$$

и выражение для выходного электрического сигнала будет аналогично выражению (9).

На рис. 3 приведена графическая зависимость выходного электрического сигнала ПЛУ от частоты входного воздействия при различных степенях успокоения  $\gamma = 2n\zeta/\omega_0$  в относительных единицах (о.е.).

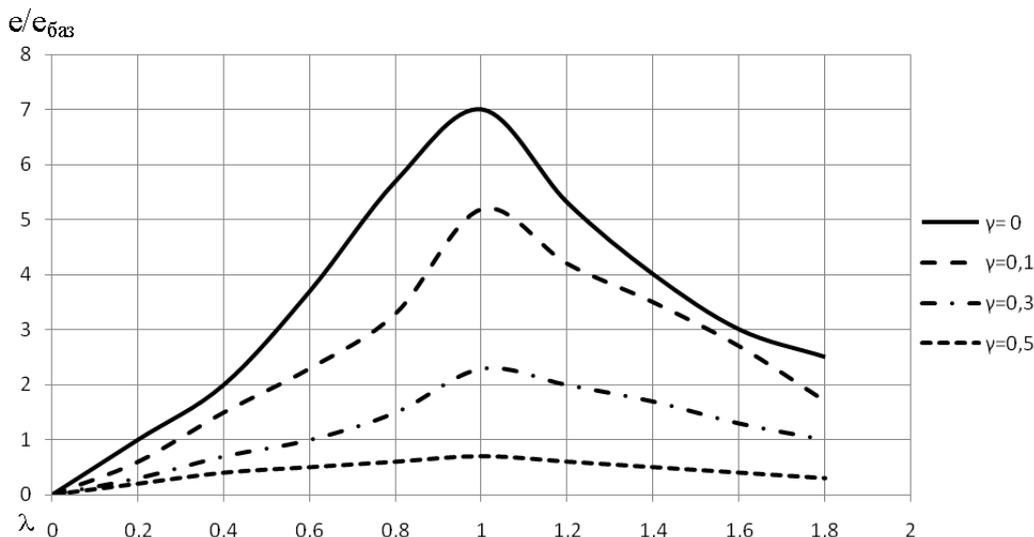


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала ПЛУ от частоты входного воздействия

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

На следующем этапе были определены демпфирующие силы короткозамкнутого витка (КЗВ).

Первичное магнитное поле изменяется по гармоническому закону вдоль оси перемещения магнитного кольца  $OX$ , следовательно, и электромагнитные процессы изменяются также по гармоническому закону

$$\begin{aligned} \dot{H}_1 &= \text{Re } \dot{H}_1(t) e^{-j\alpha x}; \\ \dot{H}_2 &= \text{Re } \dot{H}_2(t) e^{-j\alpha x}, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $\alpha = \pi/2b$ ;  $b$  — ширина полюса.

При этом уравнение электромагнитного процесса в КЗВ имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \dot{H}_{2m}}{dy^2} - (\alpha^2 + j\mu_0 \delta \omega K_d) \dot{H}_{2m} &= \\ = j\mu_0 \delta \omega K_d \dot{H}_{3m}, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $\delta$  — электрическая проводимость материала витка;  $K_d$  — коэффициент приведения по продольной оси, или

$$\frac{d^2 H_{2m}}{dy^2} - \lambda^2 \dot{H}_{2m} = j\mu_0 \sigma \omega K_d \dot{H}_{1m}, \quad (17)$$

где  $\lambda^2 = \alpha^2 + j\mu_0 \omega K_d = \alpha^2 (1 + \varepsilon_f)$ ;  $\varepsilon_f = \frac{\mu_0 \sigma \omega}{d^2} K_d$  — магнитное число Рейнольдса (МЧР).

Решение (17) имеет вид

$$\dot{H}_{2m} = C_1 \text{sh } \lambda y + C_2 \text{ch } \lambda y - \frac{j\varepsilon_f \alpha^2}{\lambda^2} H_{1zm}. \quad (18)$$

С учетом граничных условий для определения постоянных интегрирования  $C_1$  и  $C_2$ , комплексная амплитуда напряженности вторичного поля КЗВ

$$\dot{H}_{2m} = \left( -\frac{\varepsilon_f^2}{1 + \varepsilon_f^2} - j \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} \right) \dot{H}_{1m}, \quad (19)$$

а плотность индуцированного тока в КЗВ

$$\dot{\delta}_2 = \frac{\partial \dot{H}_{2m}}{\partial x} = \alpha \left( \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} + j \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} \right) \dot{H}_{1m}. \quad (20)$$

Усредненная по времени сила, действующая на элементарный объём  $dV$ , определяется из выражения

$$df_{хсп} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\dot{\delta}_2 \dot{B}_{1m}) = \frac{1}{2} \alpha \frac{B_{1m}^2}{\mu_0 k_d} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2}, \quad (21)$$

и, следовательно, общая электромагнитная сила, действующая на всё магнитное кольцо

$$F_x = \iiint_{x y z} f_{хсп} dx dy dz = \frac{1}{2} \frac{B_{1m}^2}{\mu_0 k_d} \alpha \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} 2bl_{cp} \Delta, \quad (22)$$

где  $\Delta$  – толщина КЗВ,  $l_{cp}$  – средний периметр КЗВ.

С учетом того, что  $\alpha = \pi/2b$ , интегральная демпфирующая сила

$$F_x = \frac{\pi}{2} \frac{B_{1m}^2}{\mu_0 k_d} \Delta l_{cp} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2}, \quad (23)$$

что показывает прямую зависимость исходной силы от геометрических соотношений для КЗВ, наличия МЧР, свойства первичного магнитного поля.

Полученное выражение позволяет анализировать динамическую работу КЗВ в ПЛУ с учетом демпфирующей силы для оценки метрологических характеристик, например, определить необходимое изменение значения МЧР, для получения требуемых метрологических характеристик ПЛУ. Следует отметить, что полученная формула соответствует известной формуле Клосса, что свидетельствует о справедливости результатов теоретических исследований и полученных расчетных соотношений [4, 5].

Преобразовательная характеристика ПЛУ с учётом демпфирующей силы КЗВ может быть определена на основании полученных в процессе математического моделирования уравнений механического равновесия для кольца

$$\rho_{\text{маг}} \frac{\pi D^2}{4} b \frac{d^2 x}{dt^2} = F_0 \sin \omega t + \frac{\pi(D+2\delta)B_{\delta}^2}{2\mu_0} b - mg - \frac{\pi(D+2\delta)B_{\delta}^2}{2\mu_0} x - \beta \frac{dx}{dt} - \frac{\pi}{2} \frac{B_{\delta}^2}{\mu_0 K_d} \Delta l_{cp} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} \sin \omega t. \quad (24)$$

Полученное уравнение движения ферромагнитного кольца имеет вид

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{4\beta}{\pi D^2 \rho_{\text{маг}} b} \frac{dx}{dt} + \frac{2B_{\delta}^2(D+2\delta)}{\rho_{\text{маг}} \mu_0 \pi D^2 b} x = \left[ \frac{2B_{\delta}^2(D+2\delta)}{\rho_{\text{маг}} \mu_0 D^2} - g \right] +$$

$$+ \left[ \frac{4F_0}{\rho_{\text{маг}} \mu_0 \pi D^2 b} - \frac{4B_{\delta}^2}{\rho_{\text{маг}} \mu_0 K_d} \frac{\Delta l_{cp}}{b D^2} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} \right] \sin \omega t. \quad (25)$$

После введения постоянных коэффициентов

$$A = \frac{4\beta}{\rho_{\text{маг}} \pi D^2 b}; B = \frac{2B_{\delta}^2(D+2\delta)}{\rho_{\text{маг}} \mu_0 \pi D^2 b}; C = \frac{2B_{\delta}^2(D+2\delta)}{\rho_{\text{маг}} \mu_0 D^2} - g;$$

$$K = \frac{4F_0}{\rho_{\text{маг}} \mu_0 \pi D^2} - \frac{4B_{\delta}^2}{\rho_{\text{маг}} \mu_0 K_d} \frac{\Delta l_{cp}}{\delta D^2} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} = A_{\text{вх}} - A_{\text{вх}} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2}$$

решения уравнения (25) выражается следующими соотношениями

$$\left\{ \begin{aligned} X_1 &= b + \frac{A_{\text{вх}}}{\omega_0^2 \sqrt{(1-\lambda^2)^2 + \gamma^2 \lambda^2}} \sin(\omega t + \varphi_0); \\ X_2 &= \frac{\frac{4B_{\delta}^2}{\rho_{\text{маг}} \mu_0 K_d} \frac{\Delta l_{cp}}{b D^2} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2}}{\omega_0^2 \sqrt{(1-\lambda^2)^2 + \gamma^2 \lambda^2}} \sin(\omega t + \varphi_0) = \\ &= \frac{A_{\text{вх}} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2}}{\omega_0^2 \sqrt{(1-\lambda^2)^2 + \gamma^2 \lambda^2}} \sin(\omega t + \varphi_0). \end{aligned} \right. \quad (26)$$

ЭДС, соответствующая каждому из решений (о.е.),

$$e_1^* = \frac{\lambda}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + \gamma^2 \lambda^2}} \cos(\omega t + \varphi_0); \quad (27)$$

$$e_2^* = \frac{\lambda}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + \gamma^2 \lambda^2}} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (28)$$

где базовые величины

$$e_1^{\text{баз}} = \frac{\pi B_{\delta}^2(D+2\delta)}{\omega_0} A_{\text{вх}}; \quad (29)$$

$$e_2^{\text{баз}} = \frac{4B_{\delta}^2}{\rho_{\text{маг}} \mu_0 K_d} \frac{\Delta l_{cp}}{b D^2} A_{\text{вх}}. \quad (30)$$

Мгновенный результирующий сигнал по принципу суперпозиции

$$e = \left[ e_1^* + e_2^* \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} \right] \times \frac{\lambda}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + \gamma^2 \lambda^2}} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (31)$$

действительная величина выходного электрического сигнала

$$e = e_1^* + e_2^* \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} = e_1^* + e_2^* K_i. \quad (32)$$

Анализ полученных выражений для различных случаев сигналов МЧР –  $\varepsilon_f$  показывает, что:

1) при  $\varepsilon_f = 0$

$$K_i = \frac{1}{\varepsilon_f + \frac{1}{\varepsilon_f}} = 0$$

и зависимость практически линейная;

2) при  $\varepsilon_f = \infty$

$$K_i = \frac{1}{\varepsilon_f + \frac{1}{\varepsilon_f}} = 0$$

и работа ПЛУ неустойчива;

3) при  $\varepsilon_f = 1$ , с учетом  $e^* = f(\varepsilon)$

$$K_i = \frac{1}{\varepsilon + \frac{1}{\varepsilon}} = \frac{1}{2}$$

и значение сигнала максимально

$$e = e^* + \frac{1}{2} e^* = 1,5 e^*.$$

Таким образом, применение КЗВ позволяет повысить крутизну преобразовательной характеристики и чувствительность ПЛУ в 1,5 раза.

Проведенные экспериментальные исследования зависимости от числа МЧР показали, что при использовании в исследуемом ПЛУ магнитного кольца  $F = 400$  А порог чувствительности преобразователя без диамагнитного кольца может достичь значения  $\beta = 2 \cdot 10^{-4}$  м/с<sup>2</sup>, а с использованием диамагнитного кольца –  $\beta = 4 \cdot 10^{-4}$  м/с<sup>2</sup>, при этом статическая погрешность коэффициента преобразования при измерениях не превосходит  $\Delta = 0,02$  % (рис. 4).

Экспериментальные исследования подтвердили результаты математического моделирования ПЛУ, приведенного в данной статье (рис. 5–10).

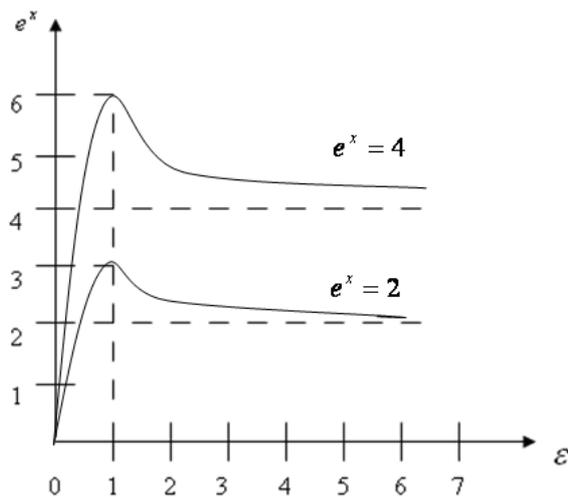


Рис. 4. Выходной сигнал ПЛУ в зависимости от МЧР



Рис. 5. Экспериментальные модели ПЛУ: 1–3 – ПЛУ различного типоразмера

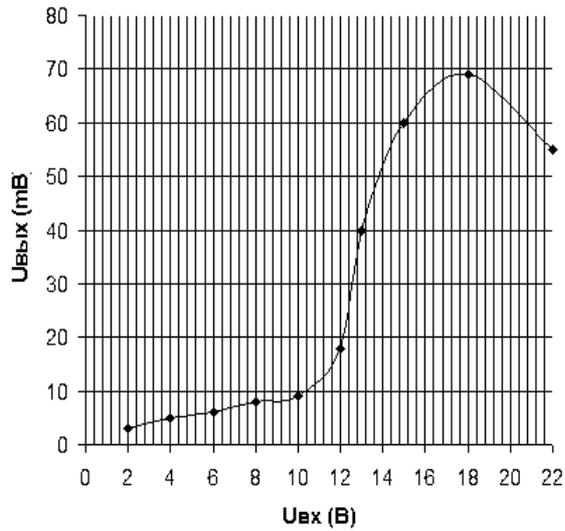


Рис. 6. Выходная характеристика ПЛУ

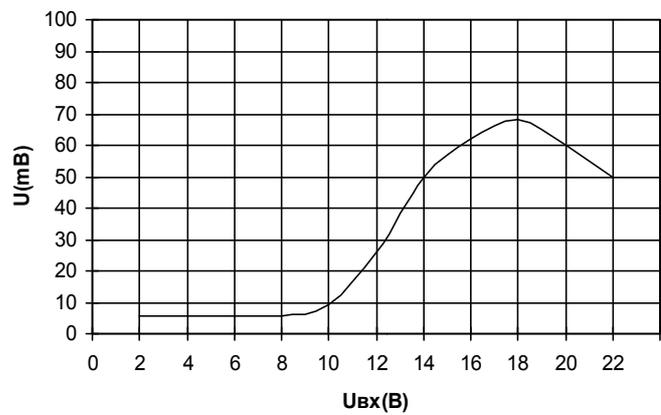


Рис. 7. Статическая характеристика ПЛУ

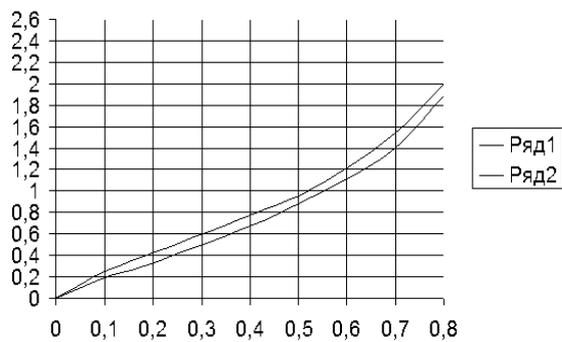


Рис. 8. Сравнительная характеристика ПЛУ в относительных единицах: ряд 1 – экспериментальная кривая, ряд 2 – теоретическая кривая

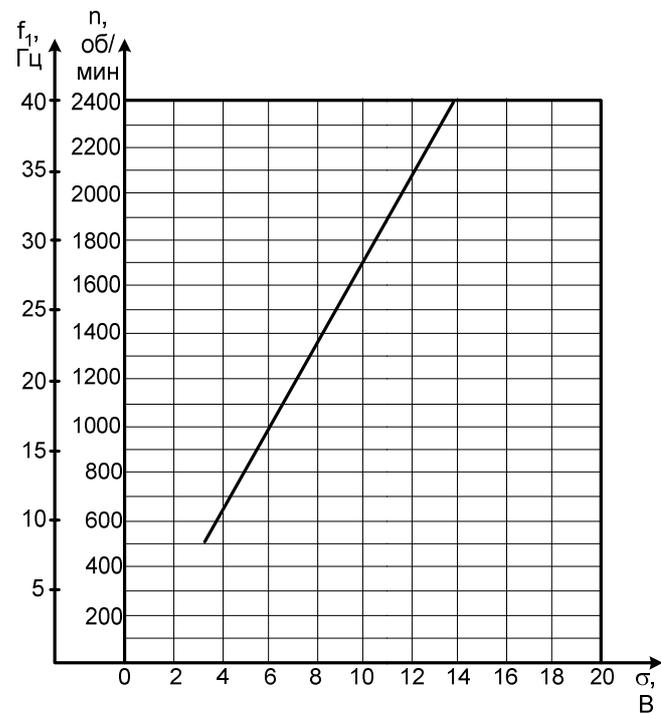


Рис. 9. Тарировочная кривая испытательной платформы:  $\sigma$  – подводимое напряжение к платформе;  $n$  – обороты приводного двигателя;  $f_1$  – частота внешнего возмущения



Рис. 10. Испытательный стенд ПЛУ: 1 – испытательная платформа; 2 – универсальный блок питания; 3 – осциллограф; 4 – милливольтметр; 5 – испытуемый ПЛУ

### **Заключение**

Расчетные формулы, полученные в процессе математического моделирования и приведенные в данной статье, дают возможность провести анализ влияния всех параметров ПЛУ как по отдельности, так и в их взаимосвязи на преобразовательные характеристики ПЛУ. Кроме того, указанные формулы обеспечивают возможность конструирования ПЛУ с наибольшей чувствительностью и крутизной преобразовательной характеристики с оптимальным соотношением конструктивных параметров. Выражения, полученные в ходе аналитических исследований, были эмпирически подтверждены проведенными экспериментальными исследованиями. Результаты математического моделирования, приведенного в данной статье, могут найти применения при исследовании электромеханических устройств с наличием КЗВ (индуктивные элементы, электромагнитная пушка, устройства контроля брака об-

моток электродвигателей и трансформаторов на замыкание и т. д.).

### **Литература**

1. А.с. 1642404 СССР. Преобразователь линейных ускорений / И.Х. Хайруллин, Ф.Р. Исмагилов, И.Ф. Янгиров, Р.К. Фаттахов. – Заявл. 27.03.89; опубл. 15.04.91, Бюл. № 14. – 3 с.
2. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 839 с.
3. Электромеханические аппараты автоматики / Б.К. Буль, О.Б. Буль, В.А. Азанов, В.Н. Шофа. – М.: Высш. шк., 1988. – 303 с.
4. Плахтиев, А.М. Измерительные преобразователи с распределенными параметрами / А.М. Плахтиев. – Ташкент: Изд-во. ФАН СССР, 1987. – 103 с.
5. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн / под. ред. И.Г. Арамановича. – М.: Наука, 1973. – 1984. – 831 с.

**Исмагилов Флюр Рашитович**, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика», Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; ifr@ugatu.ac.ru.

**Янгиров Ильгиз Флюсович**, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Электромеханика», Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; yangirov@yandex.ru.

**Максудов Денис Вилевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика», Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; md77@list.ru.

*Поступила в редакцию 16 июня 2014 г.*

---

**Bulletin of the South Ural State University  
Series "Power Engineering"  
2014, vol. 14, no. 3, pp. 25–32**

---

## **INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC FORCES ON CHARACTERISTICS OF ACCELERATION TRANSDUCER**

**F.R. Ismagilov**, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation, ifr@ugatu.ac.ru,

**I.F. Yangirov**, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation, yangirov@yandex.ru,

**D.V. Maksudov**, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation, md77@list.ru

The paper presents construction of linear acceleration transducer (LAT) that offers enhanced sensitivity and conversion transconductance due to supplementary use of short-circuited conducting ring in the named LAT. By mathematical modeling we obtained design formulae that allow of calculating conversion characteristic of LAT considering short-circuited turn. The paper covers special cases at problem solution and presents experimental verification of analytical studies with required accuracy. Design formulae obtained by mathematical modeling and given in the paper allow of analyzing the influence of all parameters of LAT both particularly and in their interrelation on conversion characteristic of LAT. Furthermore, obtained formulae allow of constructing LAT with the most possible sensitivity and conversion transconductance with optimum ratio of construction parameters. Expressions obtained during analytical studies received empirical confirmation by conducted experimental studies. Mathematical modeling results presented in the paper may find a use in studies of electromechanical

devices equipped with short-circuited turn (inductive elements, electromagnetic launcher, winding fault detectors of electrical motors and transformers etc).

*Keywords: magnetic Reynolds number, linear acceleration transducer, diamagnetic ring, short-circuited turn, threshold sensitivity, conversion transconductance.*

### References

1. Khayrullin I.H., Ismagilov F.R., Yangirov I.F., Fattakhov R.K. *Preobrazovatel' lineynykh uskoreniy* [Linear acceleration transducer], no. 1642404 SSSR .
2. Vol'dek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines], Energiya Publ, 1974. 839 p.
3. Bul' B.K., Bul' O.B., Azanov V.A., Shofa V.N. *Elektromekhanicheskie apparaty avtomatiki* [Electromechanical automation devices], Vyssh. shkola Publ., 1988. 303 p.
4. Platiev A.M. *Izmeritel'nye preobrazovateli s raspredelennymi parametrami* [Transmitters with distributed parameters], Tashkent, FAN SSSR Publ., 1987. 103 p.
5. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical Handbook for Scientists and Engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 831 p.

*Received 16 June 2014*