

## ОБОБЩЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ С ЛЕВИТАЦИОННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Я. Р. АБДУЛЛАЕВ, Г. С. КЕРИМЗАДЕ, Г. В. МАМЕДОВА, Н. М. ПИРИЕВА

*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,  
AZ 1010, Баку, Азербайджан,  
E-mail : gulaya68@mail.ru*

Для проектирования электромагнитных устройств с левитационными элементами определены обобщенные показатели: значения тока в режимах тока и усилий, подъемная сила, рабочий ход, электромагнитное давление, время трогания, электромагнитная жесткость и грузоподъемность. Получены аналитические выражения для обобщенных показателей, которые содержат безразмерные величины, что приводит к упрощению расчетов рассматриваемых показателей и созданию взаимосвязей параметров в явной форме.

**Ключевые слова:** электромагнитные устройства, левитационные элементы, обобщенные показатели, координата левитации, рабочий ход, грузоподъемность, подъемная сила, электромагнитная жесткость, электромагнитное давление, тепловая стойкость, время трогания, амплитуда колебаний

**Введение.** Электромагнитные устройства с левитационными элементами (ЭУЛЭ) совмещают в себе функции измерения, управления и стабилизации электрических и неэлектрических величин [1—6]; они относятся к слаботочным ЭУ. Разработаны электромагнитные устройства с левитационными элементами различных функциональных назначений: стабилизаторы переменного тока, датчики силы и давления, устройства для определения короткозамкнутых витков в обмотках тороидальных трансформаторов и дросселей, устройство для стабилизации натяжения длинномерного материала, коммутационный аппарат переменного тока, управляемый исполнительный механизм для светолучевой пайки, натяжное устройство для катушки катушек и т. д. [2].

ЭУЛЭ имеют простую конструкцию и обладают высокой стабильностью и точностью рабочих характеристик. На рис. 1 показаны прямая (а) и ступенчатая (б) магнитные системы с левитационными элементами. В состав ЭУ входят магнитопровод 1, обмотка возбуждения 2 и левитационный элемент 3. Обмотка возбуждения (ОВ) выполняется из нескольких секций и подключается к источнику переменного напряжения  $U_1$  последовательно. Левитационный элемент изготавливается из алюминия в виде короткозамкнутой сплошной рамки или короткозамкнутой обмотки из медных проводов (рис. 2, а, б и в соответственно). Магнитопровод собирается из Ш-образных электротехнических пластин.

**Постановка задачи.** Физическое моделирование магнитного поля в рабочем воздушном зазоре с показало, что при выполнении условий  $m_a = b/a = 2 \dots 6$  и  $m_c = b/c = 2 \dots 6$  магнитное поле в этом зазоре однородное и удельная магнитная проводимость  $\lambda$  вдоль высоты зазора магнитопровода не изменяется [5]. Значение удельной магнитной проводимости рабочего воздушного зазора зависит от  $m_a$  и  $m_c$  и составляет  $(6 \dots 20) \cdot 10^{-6}$  Гн/м.

Как показывает анализ [1—6], несмотря на общий принцип работы, ЭУЛЭ по назначению и массогабаритным характеристикам значительно отличаются друг от друга, что затрудняет их проектирование. При этом требуется наличие ряда обобщенных показателей, отражающих основные технические характеристики и параметры ЭУ. Цель настоящей статьи — расчет и анализ этих показателей и разработка рекомендаций по проектированию [7—9].

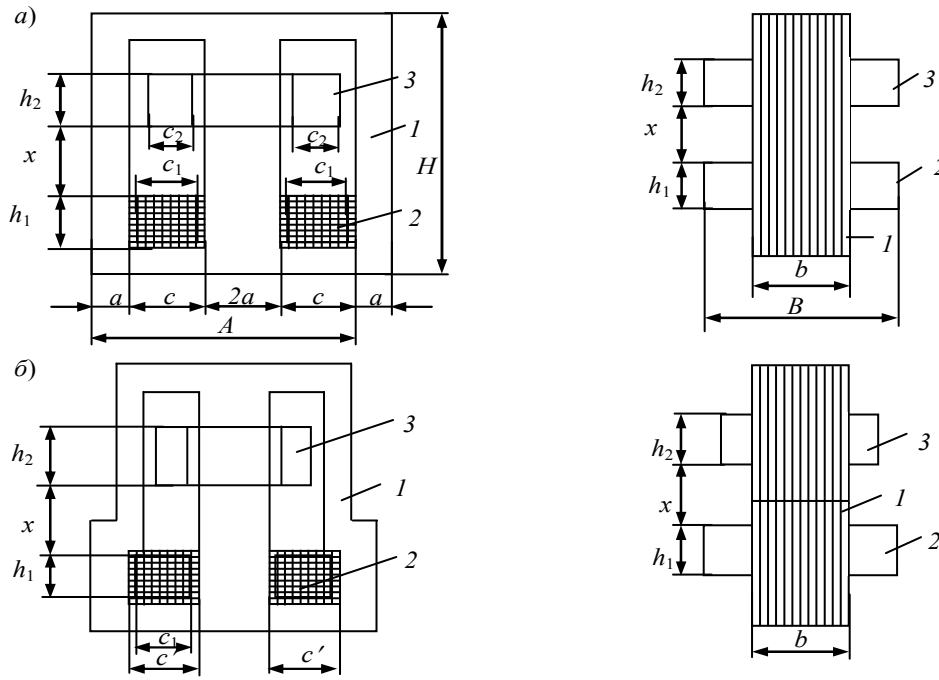


Рис. 1

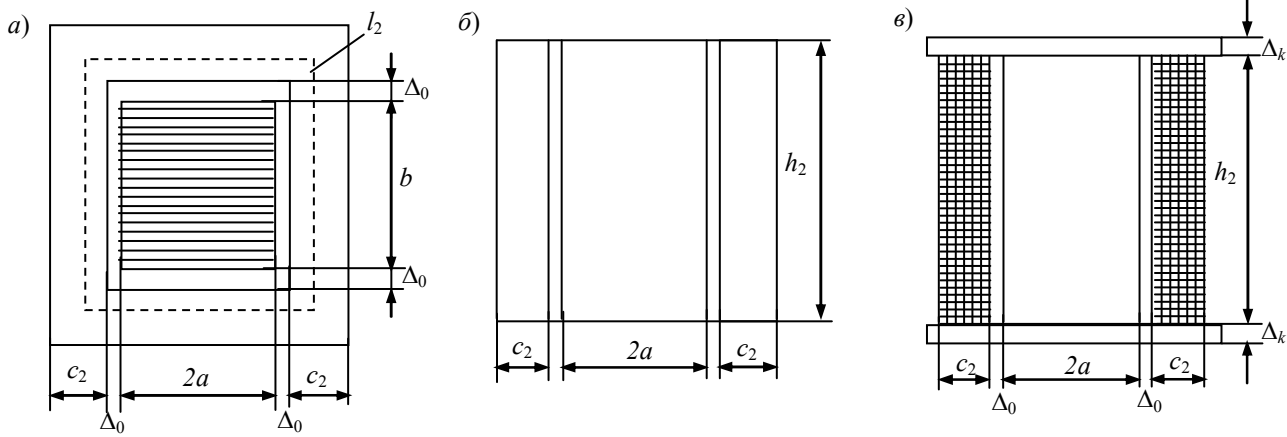


Рис. 2

**Статические режимы работы ЭУЛЭ.** ЭУЛЭ могут работать в режиме тока ( $I = \text{const}$ ) и в режиме усилий ( $P_x = \text{var}$ ). В режиме тока установившиеся значения токов в ОБ и ЛЭ остаются неизменными, если при этом внешняя сила  $P_x$  отсутствует, а напряжение  $U_1$  на зажимах ОБ изменяется от  $U_{\min}$  до  $U_{\max}$  [4]:

$$I_1 = \frac{U_1 \pm \Delta U}{\omega(L_1 \pm \Delta L)} = \text{const}; \quad I_2 = KI_1 \frac{W_1}{W_2}$$

с учетом силы тяжести ЛЭ  $P_T$ :

$$I_1 = \frac{1}{W_1} \sqrt{\frac{2P_T}{\lambda}} = \text{const}, \tag{1}$$

где  $L_1$  — индуктивность ОБ;  $\Delta U$  — приращение напряжения на зажимах ОБ;  $\Delta L$  — приращение индуктивности ОБ;  $\omega$  — частота источника питания;  $W_1, W_2$  — число витков ОБ и ЛЭ;  $K \approx 0,98$  (коэффициент электромагнитной связи между ОБ и ЛЭ).

В режиме усилий внешняя сила  $P_x$ , действующая на ЛЭ, изменяется от  $P_{\min}$  до  $P_{\max}$ , но при этом соблюдается условие  $U_1 = \text{const}$ . В этом случае по аналогии с выражением (1) имеем

$$I_1 = \frac{1}{W_1} \sqrt{\frac{2(P_T + P_x)}{\lambda}}. \tag{2}$$

**Подъемная сила.** Подъемной силой  $P_3$  определяются основные технические характеристики электромагнитных устройств со встроенными индукционными подвесами. В частности, в преобразователях усилителей и уплотнителях чем больше подъемная сила  $P_3$ , тем больше диапазон контролируемых внешних сил [7]. Подъемная сила определяется удельной магнитной проводимостью  $\lambda$  рабочего воздушного зазора и ампервитками ОВ:

$$P_3 = \frac{1}{2} \lambda (I_1 W_1)^2. \quad (3)$$

Например, при  $F_1 = I_1 W_1 = 2000$  А и  $\lambda = 11,387 \cdot 10^{-6}$  Гн/м имеем  $P_3 = 22,7$  Н. С увеличением параметров  $F_1$  и  $\lambda$  размеры обмотки возбуждения увеличиваются.

Значение удельной магнитной проводимости  $\lambda$  ограничено толщиной  $c_2$  ЛЭ или величиной рабочего воздушного зазора  $c$ . При перемещении ЛЭ происходит изменение индуктивности ОВ, из-за чего изменяются токи в ОВ и ЛЭ. Поэтому ампервитки ОВ зависят от координаты левитации  $x$ :

$$F_1 = \frac{k_u U_1}{\omega W_1 \lambda (h_0 + x)}, \quad h_0 = \frac{h_1}{3n_\lambda} + \frac{h_2}{3}, \quad (4)$$

где  $k_u$  — заданный коэффициент;  $n_\lambda = \lambda/\lambda_s = 1, 1 \dots 1,8$ ;  $\lambda_s$  — удельная магнитная проводимость ступенчатого участка воздушного зазора  $c'$  (см. рис. 1, б);  $h_1$  и  $h_2$  — высота ОВ и ЛЭ;  $h_0$  — эквивалентный размер обмотки.

Согласно (3) и (4) получим

$$P_3 = \alpha_F (h_0 + x)^{-2}, \quad (5)$$

где  $\alpha_F$  — параметр, не зависящий от перемещения ЛЭ:

$$\alpha_F = \frac{1}{2\lambda} \left( \frac{k_u U_1}{\omega W_1} \right)^2.$$

При воздействии внешней силы  $P_x$  на ЛЭ имеем

$$P_T + P_x = P_3 = \frac{\alpha_F}{(h_0 + x)^2}, \quad x = \sqrt{\frac{\alpha_F}{P_T + P_x}} - h_0, \quad P_{3\max} = \frac{\alpha_F}{h_0^2} = P_{\max} = P_T + P_x. \quad (6)$$

Выражения (6) позволяют предварительно оценить значения  $h_0$  и  $U_1$  при заданном значении внешней силы  $P_x = P_{\max}$ . Для электромеханических силовых исполнительных преобразователей с ЛЭ [6] важно увеличение подъемной силы  $P_{3\max}$ . Из последнего выражения следует, что этого можно достичь увеличением коэффициента  $\alpha_F$  или уменьшением величины рабочего воздушного зазора  $c$ .

**Рабочий ход ЛЭ.** Габаритные размеры и основные характеристики электромеханических преобразователей с ЛЭ зависят от величины вертикального перемещения ЛЭ — координаты левитации  $x$  — и рабочего хода подвижной части  $x_p$ , которые, в свою очередь, зависят от внешней силы  $P_x$ , действующей на ЛЭ. В работе [2] получены выражения для координаты левитации:

$$x = \frac{k_u U_1}{\omega W_1 \sqrt{2\lambda P_T}} - h_0, \quad (7)$$

при  $U_1 = U_{\min}$  и  $U_1 = U_{\max}$  соответственно —

$$x_{\min} = \frac{k_u U_{\min}}{\omega W_1 \sqrt{2\lambda P_T}} - h_0, \quad x_{\max} = \frac{k_u U_{\max}}{\omega W_1 \sqrt{2\lambda P_T}} - h_0,$$

откуда для режима тока получим

$$x_p = x_{\max} - x_{\min} = \frac{k_u \Delta U}{\omega W_1 \sqrt{2\lambda P_T}}. \quad (8)$$

Таким образом, с увеличением  $\Delta U$  рабочий ход возрастает, что приводит к увеличению высоты  $H$  магнитной системы (см. рис. 1, а) и времени стабилизации тока в ОВ. Для уменьшения рабочего хода требуется увеличить коэффициенты  $m_a$  и  $m_c$ . В работе [6] для режима усилий получено выражение

$$x_p = \frac{k_u U_1}{\omega W_1 \sqrt{2\lambda P_T}} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{n}} \right), \quad (9)$$

где  $n=1+P_x/P_T$ .

Поскольку точность характеристик датчиков с ЛЭ зависит от степени однородности магнитного поля рабочего зазора [3], то величину рабочего хода ЛЭ необходимо знать при проектировании этих датчиков. Из выражений (8) и (9) следует, что увеличение значений силы тяжести  $P_T$  и внешней силы  $P_x$  приводит к увеличению рабочего хода. При этом ЛЭ приближается к обмотке, где магнитное поле неоднородное.

**Электромагнитное давление.** Под электромагнитным давлением подразумевается подъемная сила, приходящаяся на единицу площади ЛЭ:

$$P_{эд} = \frac{P_3}{S_{bc}} = \frac{B^2 P_3}{2\mu_0} A,$$

где  $A$  — амплитуда колебаний ЛЭ,  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума,  $B \approx 0,2 \dots 0,4$  Тл,  $A \approx 1,1 \dots 1,2$ ,  $S_{bc} = 2c_2(c_2 + 2\Delta_0 + b)$ .

Полученные выражения позволяют учитывать механическую прочность ЛЭ на электромагнитное давление. При  $P_3 = 22,7$  Н,  $c_2 = 13,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $\Delta_0 = 1,1 \cdot 10^{-3}$  м,  $b = 59,4 \cdot 10^{-3}$  м имеем  $S_{bc} = 1663,2 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>,  $P_{эд} = 136,484 \cdot 10^2$  Н/м<sup>2</sup>.

**Минимальное и максимальное время трогания ЛЭ.** Минимальное и максимальное время трогания ЛЭ соответственно составляют [4]:

$$t_{\min} = 0 \dots T/4; \quad t_{\max} \approx 3T/4,$$

где  $T$  — период питающего напряжения.

Амплитуда колебаний ЛЭ зависит только от ускорения его падения  $g_3$  и частоты  $\omega$ :

$$A = \frac{g_3}{4\omega^2},$$

при этом переменной составляющей электромагнитной силы  $P_3$  можно пренебречь. Кроме того, переменная составляющая силы  $P_3$  значительно меньше силы тяжести  $P_T$ , поэтому в установленном состоянии вибрация ЛЭ отсутствует.

**Электромагнитная жесткость.** Электромагнитная жесткость  $C_3$  левитационного элемента определяется через градиент подъемной силы  $P_3$ : согласно выражению (5)

$$C_3 = \frac{dP_3}{dx} = -\frac{2\alpha_F}{(h_0 + x)^3}; \quad (10)$$

определяется параметр  $\alpha_F$  и из выражения (10) следует, что для увеличения электромагнитной жесткости необходимо уменьшить толщину рабочего воздушного зазора  $s$ . В зависимости от хода подвижной части значения электромагнитной жесткости могут составить от  $8,3 \cdot 10^2$  до  $15 \cdot 10^2$  Н/м.

**Грузоподъемность ЛЭ.** Грузоподъемность определяется как

$$K_\Gamma = P_{\max} / P_T,$$

где  $K_\Gamma$  — коэффициент грузоподъемности левитационного элемента.

Чем больше подъемная сила  $P_3$ , приходящаяся на единицу силы тяжести  $P_T$ , тем больше поднимается ЛЭ. Зависимость  $x=f(P_T)$  имеет экстремум. При  $P_x=0$  и  $P_T+P_x$  получим

$$\frac{I_{1\max}}{I_{1\min}} = \sqrt{\frac{P_{\max}}{P_T}}; \frac{P_{\max}}{P_T} = \left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}}\right)^2.$$

Как правило,  $(I_{1\max}/I_{1\min}) \leq 2,5$ , поэтому

$$K_\Gamma = \frac{P_{\max}}{P_T} \leq 6,25 \sqrt{\frac{2}{\lambda}} P_T; P_{\max} \leq 6,26 P_T.$$

С увеличением грузоподъемности рабочий ход  $x_p$  уменьшается. Для определения зависимости  $x_p$  от  $K_\Gamma$  найдем аналитическую связь между  $x_p$  и  $n$ . В режиме усилий при  $P_x=0$  и  $P_x=P_{\max}$

$$x_{\max} = \omega W_1^2 \lambda (h_0 + x_{\max}) = \frac{k_u U_1}{I_{\max}}; \quad x_{\min} = \omega W_1^2 \lambda (h_0 + x_{\min}) = \frac{k_u U_1}{I_{\min}},$$

откуда

$$x_{\max} - x_{\min} = \omega W_1^2 \lambda x_p = k_u U_1 \left( \frac{1}{I_{1\min}} - \frac{1}{I_{1\max}} \right), \quad x_p = \frac{k_u U_1}{\omega W_1^2 \lambda I_{\max}} \left( \frac{I_{\max}}{I_{\min}} - 1 \right);$$

$$\frac{I_{\max}}{\left( \frac{I_{\max}}{I_{\min}} - 1 \right)} = \frac{k_u U_1}{\omega W_1^2 \lambda x_p}, \quad \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \sqrt{n} = \sqrt{1 + K_\Gamma}.$$

С учетом приведенных выражений рабочий ход

$$x_p = \frac{k_u U_1}{\omega W_1^2 \lambda I_{1\max}} = (\sqrt{n} - 1).$$

В этом случае максимальное значение ампервитков  $F_{\max}$ , необходимое для удержания ЛЭ, определяется при  $x = x_{\min}$ :

$$F_{\max} = I_{1\max} W_1 = \sqrt{\frac{k_u U_1 I_{1\max}}{\omega \lambda x_p}} (\sqrt{n} - 1),$$

откуда видно, что с увеличением грузоподъемности значение ампервитков возрастает, что приводит к увеличению размеров обмотки.

**Заключение.** Для проектирования ЭУЛЭ установлены следующие показатели: режимы тока и усилий, подъемная сила и координата левитации, рабочий ход ЛЭ, электромагнитное давление на ЛЭ, электромагнитная жесткость, минимальное и максимальное время трогания ЛЭ и грузоподъемность ЛЭ. Для этих показателей получены аналитические выражения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаев Я. Р. Расчет вращающего момента обобщенного дифференциального преобразователя с подвижным экраном // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1979. Т. 22, № 2. С. 45—48.
2. Абдуллаев Я. Р. Электромеханическая жесткость индукционных подвесов // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1979. Т. 22, № 3. С. 35—38.
3. Абдуллаев Я. Р. Метод расчета выходной ЭДС датчиков с подвижными экранами // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1972. Т. 15, № 2. С. 9—13.

4. Абдуллаев Я. Р. Теория и применение многофункциональных линейных индукционных подвесов. Баку: Военное изд-во, 1996. С. 300.
5. Абдуллаев Я. Р. Теория магнитных систем с электромагнитными экранами. М.: Наука, 2000. С. 288.
6. Абдуллаев Я. Р., Мамедова Г. В., Керимзаде Г. С. Расчет электромеханических силовых исполнительных преобразователей с левитационными экранами // Электричество. 2007. № 3. С. 27—36.
7. Буль Б. К., Абдуллаев Я. Р., Гераськов В. Л. Электромагнитные устройства на принципе индукционной подвески // Электричество. 1975. № 8.
8. Сахаров П. В. Проектирование электрических аппаратов. М.: Энергия, 1981.
9. Хофман Д. Техника измерений и обеспечение качества. Справочник / Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1983.

#### Сведения об авторах

- Яшар Рухулла Абдуллаев** — д-р техн. наук, профессор; Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, кафедра электромеханики; E-mail: gulaya68@mail.ru
- Гюльшен Санан Керимзаде** — канд. техн. наук, доцент; Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, кафедра электромеханики; E-mail: gulaya68@mail.ru
- Гюляя Вейсал Мамедова** — канд. техн. наук, доцент; Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, кафедра электромеханики; E-mail: gulaya68@mail.ru
- Наджиба Малик Пириева** — Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, кафедра электромеханики; инженер; E-mail: gulaya68@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
электромеханики

Поступила в редакцию  
04.11.16 г.

**Ссылка для цитирования:** Абдуллаев Я. Р., Керимзаде Г. С., Мамедова Г. В., Пириева Н. М. Обобщенные показатели электромагнитных устройств с левитационными элементами // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 5. С. 447—453.

## GENERALIZED INDICATORS OF ELECTROMAGNETIC DEVICES WITH LEVITATION ELEMENTS

Ya. R. Abdullayev, G. S. Kerimzade, G. V. Mamedova, N. M. Piriyeva

Azerbaijan State University of Oil and the Industry,  
AZ 1010, Baku, Azerbaijan,  
E-mail : gulaya68@mail.ru

For design of electromagnetic devices with levitation elements (EU with LE) the generalized indicators are established: values of current in the modes of current and efforts, carrying power, the working course, electromagnetic pressure, time of start-off, electromagnetic rigidity and loading capacity. Analytical expressions for the generalized indicators which contain dimensionless quantities are derived to simplify calculations of the proposed indicators and create interrelations between the parameters in explicit form. Recommendations to design of various EU with LE are developed.

**Keywords:** electromagnetic devices, levitation elements, generalized indicators for design, levitation coordinate, working course, loading capacity, carrying power, electromagnetic rigidity, electromagnetic pressure, thermal firmness start-off time, amplitude of fluctuations

#### Data on authors

- Yashar R. Abdullayev** — Dr. Sci., Professor; Azerbaijani State University of Oil and Industry, Department of Electro-mechanics; E-mail: gulaya68@mail.ru
- Gulshen S. Kerimzade** — PhD, Associate Professor; Azerbaijani State University of Oil and Industry, Department of Electro-mechanics; E-mail: gulaya68@mail.ru
- Gulaya V. Mamedova** — PhD, Associate Professor; Azerbaijani State University of Oil and Industry, Department of Electro-mechanics; E-mail: gulaya68@mail.ru
- Nadjiba M. Piriyeva** — Azerbaijani State University of Oil and Industry, Department of Electro-mechanics; Engineer; E-mail: gulaya68@mail.ru

**For citation:** *Abdullayev Ya. R., Kerimzade G. S., Mamedova G. V., Piriyeva N. M.* Generalized indicators of electromagnetic devices with levitation elements // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 5. P. 447—453 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-5-447-453