

## ЭЛЕКТРОПРИВОД ПРУЖИННЫЙ ДЛЯ БОРЬБЫ С ГОЛОЛЕДОМ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

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

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Разработана оригинальная многофункциональная конструкция электропружинного двигателя (ЭПРД). Создана математическая модель ЭПРД, получены выражения для определения силовых приводных характеристик и чувствительности в зависимости от геометрических размеров и магнитных характеристик. Разработанная конструкция ЭПРД экономична, технологична и проста в эксплуатации относительно известных устройств по борьбе с гололедом воздушных линий (ВЛ).

*Ключевые слова:* гололед, воздушная линия, математическая модель, пружина, электропривод.

### Введение

В работе рассматривается один из вариантов борьбы с гололедом воздушных линий (ВЛ) в виде электромеханического устройства. Эта проблема является актуальной проблемой в современной энергетике.

### Решение задачи

Электропружинный двигатель (ЭПРД) (см. рисунок) содержит полый корпус 1, внутри которого имеется ось 5 по всей длине корпуса. На ось свободно одеты инерционное кольцо 4 с возможностью перемещения вдоль нее, а также электропроводящая цилиндрическая пружина 3, которая одним концом жестко закреплена на головке корпуса, а другим связана с кольцом. В головке корпуса установлены блоки питания и управления 2,

имеющие автономное питание с целью создания импульсного напряжения. При получении импульса напряжения по электропроводящей пружине протекает ток, причем имеющий одинаковые направления в соседних ветвях. Между витками возникает притягивающая электродинамическая сила, вследствие чего пружина сжимается. Когда импульс тока равен нулю, пружина разжимается с кольцом и на корпус двигателя действует импульс реактивной движущей силы. Далее процесс повторяется и движение двигателя стабилизируется. Конструкция проста, надежна, удобна в эксплуатации. Такой двигатель найдет в перспективе в современной энергетике. Двигатели такой конструкции найдут широкое также применение в двигателестроении, машиностроении, приборостроении, медицине.

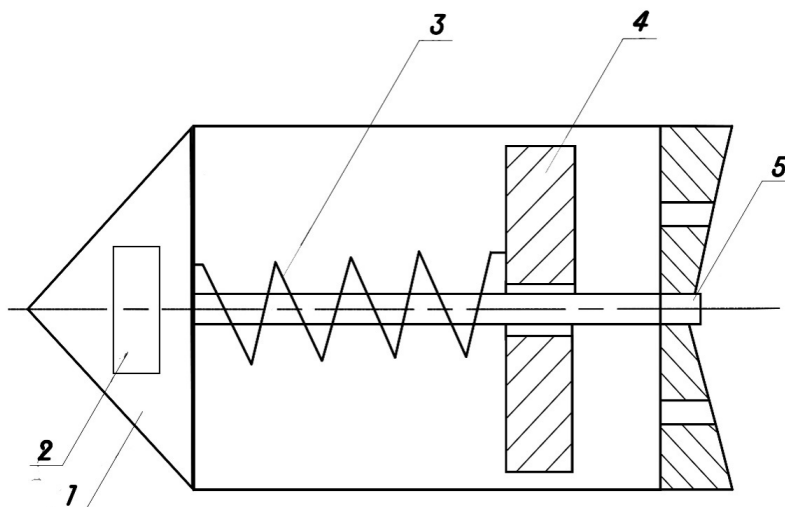


Рис. 1. Электропружинный двигатель

Математическая модель ЭПРД выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 s_w}{\partial r_w^2} + \frac{1}{r_w} \times \frac{\partial s_w}{\partial r_w} - \frac{1}{r_w^2} s_w &= \rho \frac{1-\mu^2}{E} \times \frac{\partial^2 s_w}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial^2 s_w}{\partial t^2} + 2n\xi \times \frac{\partial s_w}{\partial t} + \omega_0^2 s_w &= -2\pi A_{\text{вх}} \sin \omega t \times s_w(1) + \\ &+ \left\{ \frac{i^2}{2} \left( \left[ \frac{dL_{0w}}{dr_{0w}} + 2 \sum_1^N \sum_1^N \frac{dM_{0w,n}}{dr_{0w}} \right] + \left[ \sum_1^N K_{Lw} + 2 \sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} \right] \right) + B_0 i l \right\} s_w, \\ e_w = B_0 l_w \frac{\partial s_w}{\partial t} + iR + \frac{di}{dr} \left( \sum_1^N L_{0w} + 2 \sum_1^N \sum_1^N M_{0w,n} \right) &+ \frac{di}{dt} \left( \sum_1^N K_{Lw} s_w + \sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} s_w \right) + \\ &+ i \left( \sum_1^N K_{Lw} \frac{ds_w}{dt} + 2 \sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} \frac{ds_w}{dt} \right), \\ iR + \frac{di}{dr} \left( \sum_1^N L_{0w} + 2 \sum_1^N \sum_1^N M_{0w,n} \right) + \frac{di}{dt} \left( \sum_1^N K_{Lw} s_w + \sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} s_w \right) &+ i \left( \sum_1^N K_{Lw} \frac{ds_w}{dt} + 2 \sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} \frac{ds_w}{dt} \right), \\ s_w \Big|_{r_w=r_0} &= 0, \\ s_{w=N} \Big|_{r_w=r_0} &= 1, \end{aligned}$$

где  $s_w$  – радиальное перемещение  $w$ -го витка спирали;  $E$  – модуль упругости первого рода;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $n\xi$  – коэффициенты трения и демпфирования;  $\omega_0$  – частота собственных колебаний;  $\omega$  – частота вынужденных колебаний;  $r_w$  – радиус  $w$ -го витка;  $l_w$  – длина участка витка;  $B_0$  – индукция магнитного поля;  $s_w(1)$  – форма колебаний спирали магнитного поля;  $R$  – активное сопротивление спирали;  $e(t)$  – подводимое напряжение;  $L_{0w}$  и  $M_{0w}$  – индуктивность и взаимоиндуктивность спирали в статическом состоянии;  $K_{L0w}$ ,  $K_{Min}$  – некоторые конструктивные постоянные.

Система дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами представляет собой математическую модель обобщенной конструкции ЭПРД с пружинным вторичным элементом и позволяет исследовать характеристики ЭПРД.

В случае подключения электропроводящей механической пружины к синусоидальному источнику тока  $i = I_m \sin \omega t$  поставленная задача упрощается и выкладки становятся более наглядными. При этом уравнение колебания точки приведения системы будет иметь вид

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2n\xi\dot{x} + \omega_0^2 x &= \\ = \sum s_w(1) \left\{ \frac{I_m^2}{2} \left[ \left( \sum \frac{dL_{0w}}{dr_{0w}} + 2 \sum \frac{dM_{0w}}{dr_{0w}} \right) + \left( \sum K_{Lw} + 2 \sum \sum K_{Mw,n} \right) \right] \sin^2 \omega t + B_0 I_m l \sin \omega t \right\}. \end{aligned} \quad (1)$$

Решение полученного уравнения находится как сумма решений вида:

$$x_1 = \frac{\sum s_w(1) I_m^2}{4M_{\text{пр}} \omega_0^2} \left[ \left( \sum \frac{dL_{0w}}{dr_{0w}} + 2 \sum \frac{dM_{0w}}{dr_{0w}} \right) + \left( \sum K_{Lw} + 2 \sum \sum K_{Mw,n} \right) \right], \quad (2)$$

$$x_2 = \frac{\sum s_w(1) I_m^2}{4M_{\text{пр}} \omega_0^2 \sqrt{(1-4q^2) + 16D^2 q^2}} \left[ \left( \sum \frac{dL_{0w}}{dr_{0w}} + 2 \sum \frac{dM_{0w}}{dr_{0w}} \right) + \left( \sum K_{vw} + 2 \sum \sum K_{vwn} \right) \right] \cos(2\omega t + \varphi_2), \quad (3)$$

$$x_3 = \frac{\sum s_w(1) I_m B_0 l}{M_{\text{пр}} \omega_0^2 \sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}} \sin(\omega t + \varphi_3). \quad (4)$$

Суммарное результирующее усилие, развиваемое пружинным ЭПРД в режиме вибродвигателя, находится из второго закона Ньютона [1, 2] как произведение приведенной массы на ускорение точки приведения системы

$$F_{\Sigma} = M_{\text{пр}} \left( \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \frac{d^2 x_3}{dt^2} \right). \quad (5)$$

Общая формула для расчета характеристики электропружинного двигателя

$$F_{\Sigma} = \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \Sigma s_w(1) \left\{ \frac{4I_m^2 \left[ \left( \sum \frac{dl_{0w}}{dr_{0w}} + 2 \sum \sum \frac{dM_{0w}}{dr_{0w}} \right) + \left( \sum K_{hw} + 2 \sum \sum K_{mwn} \right) \right]}{\sqrt{(1-4q^2) + 16D^2q^2}} \cos(2\omega t + \varphi_3) - \frac{I_m B_0 l}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2q^2}} \sin(2\omega t + \varphi_3) \right\}. \quad (6)$$

Из полученного выражения видно, что электродинамическое усилие двигателя представляет собой сумму сил с частотой питающего источника и двойной частотой источника. ЭПРД с пружинным вторичным элементом представляет также интерес как генератор низкочастотных колебаний, поэтому необходимо, чтобы выполнялось неравенство  $F_{\Sigma}(2\omega) \ll F_{\Sigma M}(\omega)$  для исключения нежелательные вибрации с двойной частотой. Этого можно добиться исключительно варьированием геометрических размеров пружины – шага витка, поперечных размеров, а также увеличением индукции первичного магнитного поля. В случае необходимости генерации колебаний двойной частоты необходимо исключить постоянное магнитное поле. Из этих соображений усилие, развиваемое электропружинным двигателем, находится в общем случае из соотношения

$$F_{\Sigma M} = I_m B_0 l \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \frac{\Sigma u_w(1)}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2q^2}} \sin(\omega t + \varphi). \quad (7)$$

Необходимо рассмотреть предельные частные случаи для режима двигателя.

1. Аргумент функции Бесселя бесконечно малая величина. В этом случае соотношение для действующего усилия имеет вид

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m B_0 l \frac{R_1 R_0}{R_0^2 - \gamma_0^2 R_1^2} \sum_{w=1}^N \frac{\gamma_w^2 - \gamma_0^2}{\gamma_w} \frac{q^2}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2q^2}}, \quad (8)$$

или переходя к геометрическим размерам

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m B_0 l \frac{R_0}{R_0^2 - r_0^2} \sum_{w=1}^N \frac{r_w^2 - r_0^2}{r_w} \frac{q^2}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2q^2}}. \quad (9)$$

2. Аргумент функции Бесселя бесконечно большая величина. Действующее усилие в этом случае

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m B_0 l \frac{\sum \left[ \sin \left( l_0 \gamma_w - \frac{\pi}{4} \right) - A \cos \left( l_0 \gamma_w - \frac{\pi}{4} \right) \right]}{\sin \left( \frac{l_0 R_0}{R_1} - \frac{\pi}{4} \right) - A \cos \left( \frac{l_0 R_0}{R_1} - \frac{\pi}{4} \right)} \frac{q^2}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2q^2}}, \quad (10)$$

и для двухвитковой пружинной машины с бесконечно большими геометрическими размерами

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m B_0 l \frac{q^2}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2q^2}}, \quad (11)$$

что совпадает с формулой, полученной ранее для расчета классических электрических машин в режиме вибрационных колебаний с линейными геометрическими размерами [3, 4].

В соответствии с законом Ампера

$$2\pi INBr = F_{\Sigma}, \quad (12)$$

где  $N$  – число витков пружины;  $r$  – радиус витка пружины;  $B$  – индукция в пружине;  $I$  – ток в витках пружинного привода. Магнитная индукция, создаваемая в пружине, определяется выражением

$$B = \frac{F_{\Sigma}}{2\pi INr}, \quad (13)$$

а сила тока в витках механической пружины

$$I = \frac{U_{\text{вх}}}{\sqrt{R^2 + w^2 l^2}}, \quad (14)$$

где  $R$  – активное сопротивление цилиндрической пружины;  $U_{\text{вх}}$  – напряжение источника питания.

При подстановке (14) в (13)

$$B = F_{\Sigma} \frac{\sqrt{R^2 + w^2 l^2}}{2\pi N U_{\text{вх}}}. \quad (15)$$

Чувствительность ЭПРД

$$\beta = \frac{dB}{dt}. \quad (16)$$

Малое перемещение ЭПРД за один такт работы

$$kx = F_{\Sigma} \Rightarrow x = s = \frac{F_{\Sigma}}{k}, \quad (17)$$

где  $k$  – жесткость пружины

Время перемещения ЭПРД по воздушной линии за один такт

$$S = \frac{at^2}{2} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2S}{a}}, \quad (18)$$

из  $F_{\Sigma} = (M + m)a$  ускорение перемещения

$$a = \frac{F_{\Sigma}}{M + m}, \quad (19)$$

где  $M$  – масса установки;  $m$  – масса инерционного элемента.

Время работы пружинного привода

$$t = \sqrt{\frac{2(M + m)}{k}}, \quad (20)$$

а скорость движения ЭПРД по ВЛ

$$\vartheta = F_{\Sigma} \sqrt{\frac{1}{k(M + m)}}. \quad (21)$$

Таким образом, получены все необходимые соотношения для проектирования ЭПРД по техническим требованиям испытуемого объекта.

### Выводы

1. Разработана оригинальная многофункциональная конструкция ЭПРД.

2. Создана математическая модель ЭПРД, получены выражения для определения силовых приводных характеристик и чувствительности в зависимости от геометрических размеров и магнитных характеристик.

3. Разработанная конструкция ЭПРД экономична, технологична и проста в эксплуатации относительно известных устройств по борьбе с гололедом ВЛ.

### Литература

1. Герасимов, В.Г. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий / В.Г. Герасимов, В.В. Клюев, В.Е. Шатерников. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 265 с.

2. Пат. 2028835 Российская Федерация. Устройство для возбуждения крутильных колебаний / И.Х. Хайруллин, И.Ф. Янгиров, Ф.Р. Исмагилов, Т.И. Хайруллин. – Оpubл. 20.02.1995, Бюл. № 5. – 3 с.

3. Янгиров, И.Ф. Электромеханические преобразователи / И.Ф. Янгиров. – М.: Машиностроитель, 2005. – № 8. – С. 14–15.

4. Янгиров, И.Ф. Датчик перемещений и ускорений / И.Ф. Янгиров // Изобретатели машиностроению. – 2002. – № 1. – С. 46.

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

**Янгиров Ильгиз Флюсович**, канд. техн. наук, доцент, кафедра «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.

**Каланов Харис Халилович**, студент, кафедра «Электромеханика», Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа.

*Поступила в редакцию 28 марта 2017 г.*

## ELECTRIC SPRING DRIVE FOR FIGHT AGAINST ICE-COVERED AIR LINES

*F.R. Ismagilov*, *ifr@ugatu.ac.ru*,  
*I.F. Yangirova*, *yangirov@yandex.ru*,  
*D.V. Maksudov*, *md77@list.ru*,  
*Kh.Kh. Kalanov*

*Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation*

The original multifunctional EPRD design was developed. A mathematical model of the EPRP was created, expressions were obtained for determining the power drive characteristics and sensitivity depending on the geometric dimensions and magnetic characteristics. The developed design of the EPRP is economical, technological and easy to operate with respect to the known anti-ice devices for overhead lines.

*Keywords: ice, airline, mathematical model, spring, electric drive.*

### References

1. Gerasimov V.G. *Metody i pribory elektromagnitnogo kontrolya promyshlennykh izdeliy* [Methods and Devices of Industrial Products Electromagnetic Control]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 265 p.
2. Khayrullin I.Kh., Yangirov I.F., Ismagilov F.R., Khayrullin T.I. *Ustroystvo dlya vozvuzhdeniya krutil'nykh kolebaniy* [Device for Exciting Torsional Vibrations]. Patent RF, no. 2028835, 1995.
3. Yangirov I.F. [Electromechanical Transducers]. *Mashinostroitel'* [Mechanician], 2005, no. 8, pp. 14–15. (in Russ.)
4. Yangirov I.F. [Displacement and Acceleration Sensors]. *Izobretateli mashinostroeniya* [Inventors of Mechanical Engineering], 2002, no. 1, p. 46. (in Russ.)

*Received 28 March 2017*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Электропривод пружинный для борьбы с гололедом воздушных линий / Ф.Р. Исмагилов, И.Ф. Янгиров, Д.В. Максудов, Х.Х. Каланов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 29–33. DOI: 10.14529/power170204

### FOR CITATION

Ismagilov F.R., Yangirova I.F., Maksudov D.V., Kalanov Kh.Kh. Electric Spring Drive for Fight Against Ice-Covered Air Lines. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 29–33. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170204

---