

УДК 621.313.33

**В.В. Шапошников¹, Р.О. Токарев¹,
А.Д. Коротаев¹, Е.А. Чабанов^{1,2}**

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

²Волжский государственный университет водного транспорта
(Пермский филиал), Пермь, Россия

РАСЧЕТ ТЯГОВОГО УСИЛИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВОДА ПЛУНЖЕРНОГО НАСОСА

Использование цилиндрических линейных асинхронных двигателей в настоящее время очень распространено. Они используются в глубинных насосах плунжерного типа. Установка штанговых глубинных насосов сопряжена с значительными эксплуатационными затратами. Она оказывается экономически невыгодной при дебите менее $10 \text{ м}^3/\text{сут}$, поэтому эксплуатация таких скважин прекращается. Сегодня в России значительная часть скважин остается заброшенной из-за низкого дебита. Установки штанговых глубинных насосов также связаны с дополнительными проблемами: износ насосных и компрессорных труб и штанг, большие масса и габариты станков-качалок, которые затрудняют их транспортировку. Указанные недостатки обуславливают поиск технических решений. Одним из таких решений является применение глубинно-насосных установок плунжерного типа с приводом на основе цилиндрического линейного асинхронного двигателя. Для использования данного вида двигателя необходимо знать его тяговое усилие, расчет которого представлен в данной статье. Он осуществлен по формуле, выведенной для упрощенной расчетной модели цилиндрического линейного асинхронного двигателя в декартовой системе координат. Представленная модель получена с помощью введения некоторых допущений. В статье также представлено устройство и принцип действия цилиндрического линейного асинхронного двигателя. По полученным расчетным данным были построены зависимости тягового усилия, полезной мощности и скорости движения вторичного элемента от скольжения. Были получены характеристики при значениях толщины медного покрытия вторичного элемента 0,5, 0,75 и 1 мм и частоте питающей сети 50 Гц. Полученные результаты исследований были проанализированы, а также даны рекомендации по использованию цилиндрического линейного асинхронного двигателя с указанными начальными данными.

Ключевые слова: цилиндрический линейный асинхронный двигатель, бесштанговая глубинно-насосная установка, тяговое усилие, скольжение, полюсное деление, индуктор, вторичный элемент.

**V.V. Shaposhnikov¹, R.O. Tokarev¹,
A.D. Korotaev¹, E.A. Chabanov^{1,2}**

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Volga State University of Water Transport (Perm branch),
Perm, Russian Federation

CALCULATION OF TRACTION FORCE OF A CYLINDRICAL LINEAR ASYNCHRONOUS ENGINE FOR DRIVING A PLUNGER PUMP

The use of cylindrical linear asynchronous engines is currently very popular. They are used in plunger-type submersible pumps. The installation of sucker rod pumps involves significant operating costs. It turns out to be economically unprofitable at a flow rate of less than 10 m³ / day, therefore, the operation of such wells ceases. Today in Russia, a significant portion of wells remain abandoned due to low production rates. Installation of sucker rod pumps also have additional problems: wear of pump and compressor pipes and rods, large weight and dimensions of pumping units, which impede their transportation. These drawbacks cause the search for technical solutions. One of such solutions is the use of plunger-type deep-well pumping units with a drive based on a cylindrical linear asynchronous engine. To use this type of engine, it is necessary to know its tractive effort, the calculation of which is shown in this article. It is implemented according to the formula derived for a simplified design model of a cylindrical linear asynchronous engine in Cartesian coordinate system. The presented model was obtained by introducing some assumptions. The article also presents the structure and principle of operation of a cylindrical linear asynchronous engine. According to the calculated data, the dependencies of the tractive effort, useful power and speed of movement of the secondary element from sliding were built. Characteristics were obtained at the thickness of the copper coating of the secondary element 0.5 mm, 0.75 mm and 1 mm and the frequency of the supply network 50 Hz. The obtained research results were analyzed, and recommendations were made on the use of a cylindrical linear asynchronous engine with the specified initial data.

Keywords: cylindrical linear asynchronous engine, rodless deep-pumping unit, traction force, slip, pole division, inductor, secondary element.

Цилиндрические линейные асинхронные двигатели могут быть основой электроприводов с возвратно-поступательным движением как альтернатива приводам с механическим видом преобразования движения. Электроприводы линейного типа, в которых электромагнитное усилие передается подвижному элементу непосредственно, обладают лучшими регулировочными свойствами, их надежность гораздо выше, они более экономичны при обслуживании. Цилиндрические линейные асинхронные двигатели применяются при создании электроприводов многих производственных механизмов: электрических коммутационных аппаратов (автоматические выключатели высокого напряжения, отделители и разъединители в системах электроснабжения, в том числе метрополитенов); толкателей поступательного движения, используемых

в поточных линиях; плунжерных или поршневых насосных агрегатов, компрессорных установок; различных манипуляторов и т.п. Столь широкая область применения линейных электроприводов обусловлена указанными выше возможностями, поэтому поддерживается устойчивый интерес к их исследованию и разработке новых конструкций [1].

В частности, цилиндрический линейный асинхронный двигатель может успешно использоваться в нефтедобывающей промышленности для организации бесштанговой добычи нефти из глубоких скважин [2, 3, 4]. На данный момент для подобных целей пока используются малоэффективные станки-качалки, основными недостатками которых являются:

- повышенная степень изнашивания насосно-компрессорных труб и штанг, обусловленная взаимным трением их поверхностей;
- достаточно частые обрывы штанг и потому малый межремонтный ресурс (300–350 сут.);
- низкие регулировочные свойства штанговых насосных агрегатов и связанная с этим необходимость использования нескольких типоразмеров станков-качалок в силу их ограниченного количества;
- большие массогабаритные параметры станков-качалок и штанг, затрудняющие как их транспортировку, так и монтаж в месте установки.

Приведенные выше недостатки обуславливают проведение дополнительных исследований с целью поиска различных технических решений, которые бы позволили создавать бесштанговые глубинно-насосные установки. Многократные исследования позволили обосновать применение глубинных насосов плунжерного типа с приводом на основе цилиндрического линейного асинхронного двигателя вместо ставших классическими станков-качалок и штанг [5, 6, 7]. В этом случае исключается возможность использования штанги и качалки, таким образом предельно упрощается механическая часть. К таким электрическим двигателям питание подается на глубину 1,5–3,0 км с помощью кабеля, как это обычно делается в электробурах и центробежных погружных насосах [8].

На рис. 1 представлена типовая конструкция цилиндрического линейного двигателя. Индуктор двигателя 1 имеет вид полый трубы, внутри которой располагаются перемежающиеся между собой плоские дискообразные катушки 2 (обмотки индуктора) и металлические шайбы 3, набранные из листов электротехнической стали и являющиеся

частью магнитопровода. Катушки электрического двигателя специальным образом соединяются группами, образуя при этом обмотки отдельных фаз двигателя. Внутри индуктора располагается вторичный элемент 4, который также имеет трубчатую форму, выполненную из ферромагнитного материала.

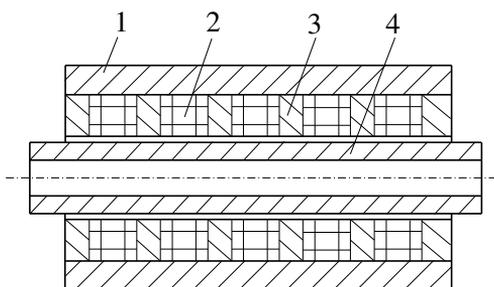


Рис. 1. Цилиндрический (коаксиальный) линейный двигатель: 1 – индуктор двигателя; 2 – обмотки индуктора; 3 – металлические шайбы; 4 – вторичный элемент

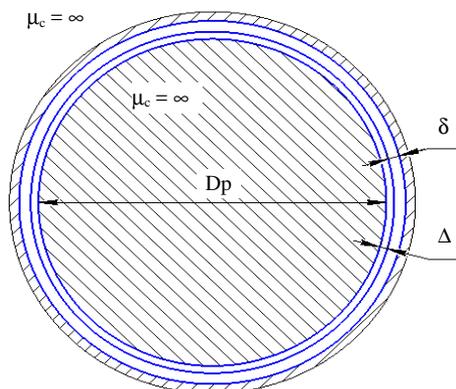


Рис. 2. Цилиндрический линейный асинхронный двигатель в цилиндрической системе координат

При подключении электрического двигателя к сети протекающий по обмоткам индуктора ток создает вдоль его внутренней поверхности бегущее магнитное поле. Это поле в силу малого воздушного зазора индуктирует в теле вторичного элемента токи, протекающие по его окружности. Взаимодействие токов вторичного элемента с магнитным полем индуктора двигателя создает на этом элементе электродинамическую силу, действующую вдоль трубы (вторичного элемента). Эта сила при закрепленном индукторе приводит вторичный элемент в движение в соответствующем направлении [9, 10].

Расчет такого двигателя с помощью основных уравнений электромагнитного поля целесообразно производить на базе расчетной модели в цилиндрической системе координат, показанной на рис. 2.

В этом случае даже одномерное решение в общем виде получается с помощью специализированных функций Бесселя, что сильно усложняет расчет. Предварительные, ориентировочные расчеты цилиндрического линейного асинхронного двигателя удобнее производить с помощью идеализированной модели в декартовой системе координат. Известно, что преобразование электромагнитной энергии

цилиндрического линейного асинхронного двигателя происходит непосредственно в зазоре, при этом относительная погрешность расчёта при переходе от цилиндрической системы координат к декартовой, в зависимости от варианта конструкции, не превышает 2,5 %, что вполне допустимо для предварительных расчётов.

1. Принятые допущения

1. Ферромагнитные сердечники индуктора с магнитной проницаемостью $\mu_c = \infty$, электропроводностью $\gamma_c = 0$ по направлению оси X имеют бесконечные размеры, а длина машины $L = 2p\tau$.

2. Ширина машины по направлению оси Y бесконечно велика.

3. Сердечники индуктора лишены пазов, а их влияние учитывается соответствующим увеличением зазора.

4. Первичная обмотка создает синусоидальную бегущую волну тока по оси X , первичный ток равномерно распределен по всему эквивалентному зазору δ' с плотностью $\dot{J}_1 = J_m \cos(\omega t - \alpha x)$ и направлен по оси Y .

5. Магнитная проницаемость зазора во всех зонах равна μ_0 , а индукция в зазоре имеет только одну составляющую, направленную по оси Z .

6. Проводящая среда вторичного элемента полностью заполняет зазор δ' , имеет эквивалентную электропроводность γ и движется с постоянной скоростью v в направлении оси X .

В основу математического исследования электромагнитных процессов цилиндрического линейного асинхронного двигателя положим упрощённую расчётную модель, изображённую на рис. 3, которая получена на основании принятых допущений [11, 12, 13].

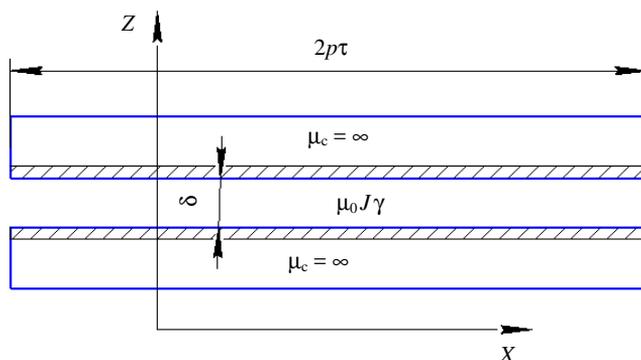


Рис. 3. Цилиндрический линейный асинхронный двигатель в декартовой системе координат

Расчёт интегральных характеристик производится на основании уравнений электромагнитного поля. При принятых допущениях напряженность электрического поля и плотность индуцированного во вторичном элементе тока \bar{J} имеет только одну составляющую, направленную по оси Y .

Дифференциальные уравнения, описывающие электромагнитное поле в зазоре идеализированной модели, могут быть получены из основных уравнений электродинамики [14]:

$$\text{rot}\bar{H} = \bar{J} + \bar{J}_1, \quad (1)$$

$$\text{rot}\bar{E} = -\frac{\partial\bar{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\bar{J} = \gamma[\bar{E} + \bar{u} \times \bar{B}], \quad (3)$$

$$\text{div}\bar{B} = 0, \quad (4)$$

$$\bar{B} = \mu_0\bar{H}, \quad (5)$$

$$\bar{E} = -\frac{\partial\bar{A}}{\partial t} - \text{grad}\phi, \quad (6)$$

где \bar{A} – векторный потенциал электромагнитного поля; ϕ – скалярный потенциал электромагнитного поля,

$$\bar{B} = \text{rot}\bar{A}. \quad (7)$$

Уравнение (7) с учётом (5) может быть записано в виде

$$\bar{H} = \frac{1}{\mu_0} \text{rot}\bar{A}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в (1), получим:

$$\text{rot rot}\bar{A} = \mu_0\bar{J} + \mu_0\bar{J}_1. \quad (9)$$

С учетом принятых в расчётной модели допущений $A_x = 0$, $A_z = 0$ и $A_y \neq 0$ составляющая магнитной индукции в зазоре по оси Z согласно (7) определяется следующим равенством:

$$B_z = -\frac{\partial A_y}{\partial x}. \quad (10)$$

При одномерном варианте расчёта электромагнитного поля $\text{div}\bar{A} = 0$, поэтому скалярный потенциал ϕ в уравнении (6) будет равен

нулю и потенциальная составляющая напряженности электрического поля $E_{\text{пот}} = -\text{grad } \phi$ также будет равна нулю. В этом случае вихревая составляющая напряженности электрического поля на основании (6) определяется выражением:

$$E_{\text{вих}} = -\frac{\partial A_y}{\partial t}. \quad (11)$$

Составляющая напряженности электромагнитного поля, обусловленная движением проводящей среды относительно магнитного поля согласно (7) и (9) определяется как

$$E_v = \bar{v} \times \bar{B} = -v \frac{\partial A_y}{\partial x}. \quad (12)$$

На основании (3), (11) и (12) плотность индуцированного во вторичной проводящей среде тока может быть записана в следующей форме:

$$J = \gamma \frac{\partial A_y}{\partial t} - \gamma v \frac{\partial A_y}{\partial x}. \quad (13)$$

При принятых допущениях выражение $\text{rot rot } \bar{A}$ в (9) запишем в виде:

$$\text{rot rot } \bar{A} = -\frac{\partial^2 A_y}{\partial x^2}. \quad (14)$$

Уравнение (9) с учётом (13) и (14) запишем следующим образом:

$$\frac{\partial^2 A_y}{\partial x^2} - \mu_0 \gamma v \frac{\partial A_y}{\partial x} - \mu_0 \gamma \frac{\partial A_y}{\partial t} = -\mu_0 J_1. \quad (15)$$

Уравнение (15) записано для мгновенных значений плотности тока первичной обмотки и векторного потенциала. Для записи этого уравнения в символической форме представим плотность тока и векторный потенциал в виде комплексных чисел:

$$\dot{J}_1 = J_m e^{-j\alpha x} e^{j\omega t}, \quad \dot{A}_1 = A e^{-j\alpha x} e^{j\omega t}. \quad (16)$$

Подставив (16) в уравнение (15), получим

$$\frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial x^2} - \mu_0 \gamma v \frac{\partial \dot{A}}{\partial x} - j\mu_0 \omega \gamma \dot{A} = -\mu_0 J_m e^{-j\alpha x}. \quad (17)$$

Частное решение A_δ уравнения (17) будем искать в виде векторного потенциала бегущего магнитного поля для бесконечно длинной машины при отсутствии продольного краевого эффекта [15, 16, 17, 18]:

$$\dot{A}_\delta = \dot{A}_m e^{-j\alpha x}. \quad (18)$$

Подставив (18) в (19), после некоторых преобразований получим:

$$A_m (\alpha^2 + j\mu_0\omega\gamma S) = \mu_0 J_m,$$

$$A_m = \frac{\mu_0 J_m}{\alpha^2 + j\mu_0\omega\gamma S} = \frac{\mu_0 J_m}{\alpha^2 (1 + j\varepsilon)}, \quad (19)$$

где ε_0 – магнитное число Рейнольдса, которое характеризует интенсивность электромагнитного процесса, $\varepsilon_0 = \frac{j\mu_0\omega\gamma S}{\alpha^2}$; S – скольжение,

$S = \frac{v_0 - v}{v_0}$; v_0 – скорость движения магнитного поля, $v_0 = 2\tau f_1$; α –

коэффициент полюсного деления, $\alpha = \frac{\pi}{\tau}$.

Выражение для расчёта мощностей и усилий выводятся аналогично [10]. Основные электромагнитные усилия и мощности, которые развиваются при отсутствии краевых эффектов, определяются следующим образом [16, 17]:

$$F_{эм} = c\delta' 2p\tau \frac{\mu_0 J_m^2}{\alpha} \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon^2}, \quad (20)$$

$$P_{эм} = c\delta' 2p\tau \frac{\mu_0 J_m^2}{\alpha^2} \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon^2}, \quad (21)$$

где c – полуширина двигателя.

Выражения (20) и (21) определяют электромагнитную мощность и тяговое усилие для плоского линейного асинхронного двигателя в декартовой системе координат [19, 20, 21, 22]. Для расчёта цилиндрического линейного асинхронного двигателя необходимо длину окружности цилиндрического вторичного элемента по середине воздушного зазора представить как ширину двигателя в декартовой системе координат:

$$2c = \pi(D_p + 2\Delta + r), \quad (22)$$

где D_p – диаметр вторичного элемента.

Эквивалентная электропроводность вторичного элемента, распределенная в зазоре, определяется следующим образом:

$$\gamma = \frac{\gamma_m \cdot \Delta}{\delta'}, \quad (23)$$

где γ_m – электропроводность материала вторичного элемента; Δ – толщина проводящего материала вторичного элемента.

Число витков фазы индуктора цилиндрического линейного асинхронного двигателя определяется по формуле

$$W_\phi = W_n \cdot n, \quad (24)$$

где W_n – число витков в пазу индуктора; n – число пазов фазы индуктора.

Плотность тока трехфазной обмотки вторичного элемента, равномерно распределённой в зазоре, определяется как

$$J_m = \frac{mW_\phi I \sqrt{2}}{2p\tau\delta'}, \quad (25)$$

где $m = 3$ – число фаз обмотки индуктора; I – действующее значение тока фазы обмотки; τ – длина полюсного деления цилиндрического линейного асинхронного двигателя.

Механическая мощность находится по формуле

$$P_2 = F_{эм} v, \quad (26)$$

где v – скорость движения вторичного элемента, $v = v_0(1 - S)$.

По формулам (20)–(26) производился расчёт интегральных характеристик цилиндрического линейного асинхронного двигателя.

Исходные данные для расчётов при использовании меди, которым покрывается вторичный элемент, указаны в таблице.

Исходные данные

Условные обозначения	Единицы измерения	Значения	Примечание
D_p	м	0,055	Диаметр вторичного элемента
I	А	30	Ток в сети
τ	м	0,03	Полюсное деление
δ	м	0,002	Ширина немагнитного зазора
Δ	м	0,0005	Толщина медного покрытия
W_n		20	Число витков в пазу
m		3	Число фаз
p		16	Число пар полюсов
n		32	Число катушек в фазе
μ_0	Гн/м	$12,56 \cdot 10^{-7}$	Магнитная проницаемость
γ_m	См/м	$0,58 \cdot 10^8$	Проводимость меди
f	Гц	50	Частота сети
S		1–0,1	Скольжение

По выведенным формулам были проведены расчёты и получены зависимости тягового усилия от скольжения (рис. 4), полезной мощности от скольжения (рис. 5) и скорости движения вторичного элемента от скольжения (рис. 6).

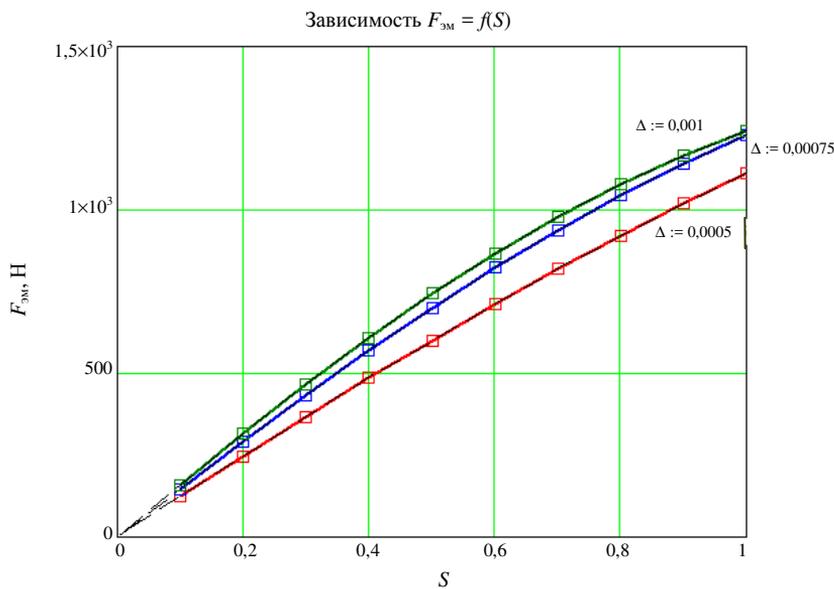


Рис. 4. Зависимость тягового усилия от скольжения

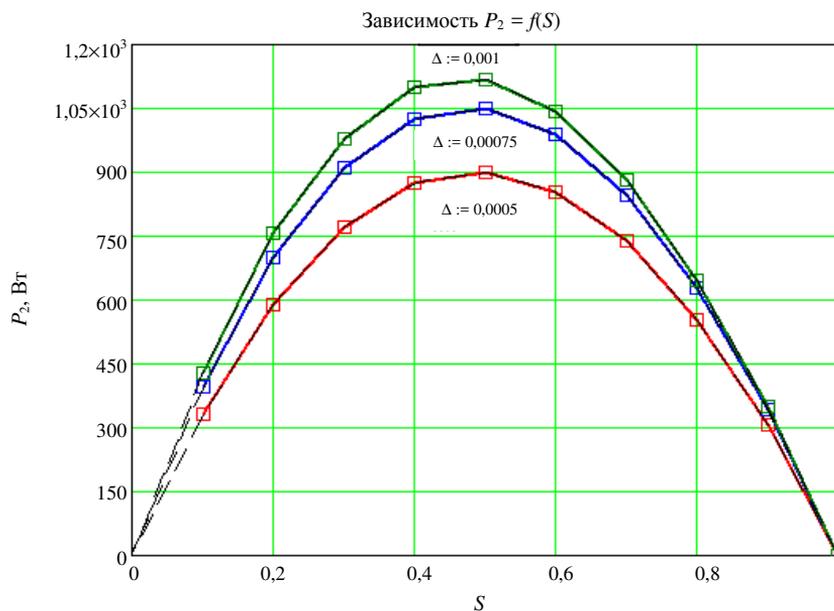


Рис. 5. Зависимость полезной мощности от скольжения

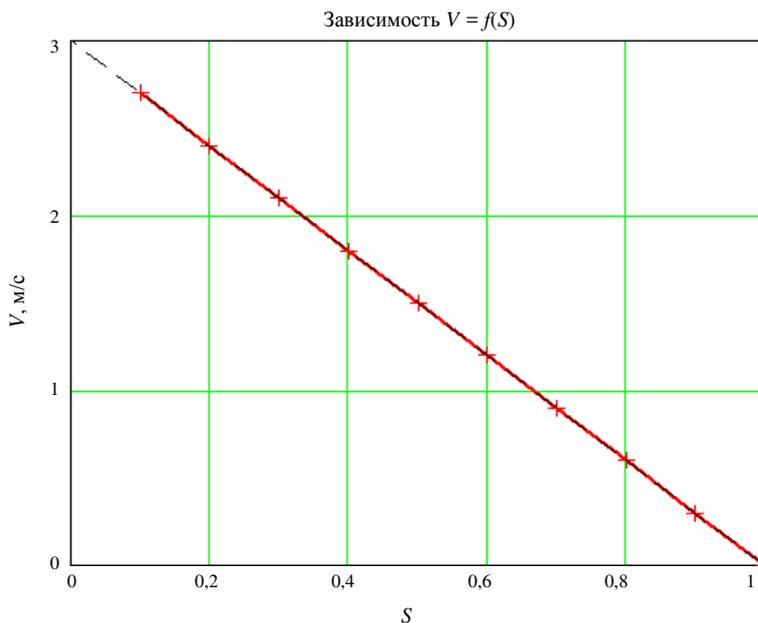


Рис. 6. Зависимость скорости движения вторичного элемента от скольжения

Анализ полученных результатов показывает, что двигатель должен работать в диапазоне скольжений от 0,8 до 0,9 для получения скоростей в пределах от 0,1 до 0,3 м/с, при этом значение тягового усилия для случая, когда вторичный элемент покрывается медью, будет от 140 до 150 кг/с. А значение тягового усилия для случая, когда вторичный элемент покрывается алюминием, будет от 100 до 120 кг/с, что значительно меньше, чем при использовании меди, из-за того, что проводимость алюминия меньше. Большие значения скольжения приводят к уменьшению КПД, к увеличению потерь, следовательно, к дополнительному нагреву двигателя. Использовать данный цилиндрический линейный асинхронный двигатель вполне возможно, но целесообразнее использовать синхронный или вентильный двигатель, у которых скольжение равно нулю [23, 24, 25].

Библиографический список

1. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
2. Семенов В.В., Огарков Е.М., Коротаев А.Д. Специальные асинхронные электродвигатели для нефтедобычи // Специальные асинхронные электродвигатели для нефтедобычи: монография /

ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг». – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 286 с.

3. Модернизация оборудования станков-качалок низкодебетных нефтяных скважин / Е.М. Огарков, А.Д. Коротаев, П.Н. Цылёв, А.М. Бурмакин // Научные исследования и инновации: научно-технический журнал. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – №4. – С. 59–65.

4. Ивановский В.Н., Дарищев В.И., Сабиров А.А.. Скважинные насосные установки для добычи нефти. – М.: Нефть и газ, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – С. 824.

5. Соколов В.В. Цилиндрические линейные асинхронные двигатели для привода погружных плунжерных насосов: дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2006. – 133 с.

6. Цилиндрический линейный вентильный электродвигатель для погружного бесштангового насоса/ А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. – 2015. – Т. 1. – С. 158–162.

7. Окунева Н.А. Разработка и исследование электропривода для нефтедобывающих насосов с погружным магнитоэлектрическим двигателем: дис. ... канд. техн. наук; Моск. энергет. ин-т. – М., 2008. – 204 с.

8. Кабиров М.М. Гафаров Ш.А. Скважинная добыча нефти. – СПб.: Недра, 2010. – 416 с.

9. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970. – 272 с.

10. Вольдек А.И. Электрические машины: учеб. для студ. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 840 с.

11. Shulakov N.V., Ogarkov E.M., Burmakin A.M. Equivalent circuit of linear induction motor // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 81. – № 6. – P. 282–286.

12. Klyuchnikov A.T., Korotaev A.D., Shutemov S.V. Modeling of a cylindrical linear ac electronic motor // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84. – № 11. – С. 606.

13. Klyuchnikov A.T. A way to calibrate equations that simulates an induction machine in relative units // Russian Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 83. – № 3. – С. 121–125.

14. Чирков Д.А., Коротаев А.Д., Ключников А.Т. Расчёт основных параметров цилиндрического линейного вентильного двигателя по схеме замещения // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. – 2016. – Т. 1. – С. 144–149.

15. Огарков Е.М. Теоретическое исследование концевого эффекта линейных асинхронных двигателей // Электрические машины и электромашинные системы: межвуз. сб. науч. тр. / Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1987. – С. 6–13.

16. Огарков Е.М. Исследование влияния продольных краевых эффектов на статические характеристики линейных асинхронных двигателей: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 1974. – 223 с.

17. Тиунов В.В., Огарков Е.М. Расчёт характеристик линейных индукционных машин с учётом несимметрии, вызываемой продольным краевым эффектом // Специальные системы электропривода: сб. науч. тр. – Пермь, 1973. – № 133. – С. 60–69.

18. Огарков Е.М., Тиунов В.В. Продольный краевой эффект линейных индукционных двигателей с учётом характера распределения поля в концевых зонах // Специальные системы электропривода: сб. науч. тр. / Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1973. – № 133. – С. 29–36.

19. Шутемов С.В. Исследование использования цилиндрического вентильного электродвигателя для погружного бесштангового насоса // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12–4. – С. 795–799.

20. Мирзин А.М., Коротаев А.Д., Шутемов С.В. Усилие тяжения цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами между статором и вторичным элементом // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6.

21. Klyuchnikov A.T., Korotaev A.D. The efficiency of the electric motor of a subsurface pump with reciprocating action and losses in a leading-in cable // Russian Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 87. – № 11. – P. 626–629.

22. Shulakov N.V., Shutemov S.V. A method for calculating the electromagnetic processes in a cylindrical linear electronic motor // Russian Electrical Engineering. – 2014. Vol. 85. – № 11. – С. 663–667.

23. Шулаков Н.В., Шутемов С.В. Перспективы использования цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода плунжерных нефтедобычных агрегатов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12–4. – С. 795–799.

24. Любимов Э.В., Шулаков Н.В., Шутемов С.В. Обоснование применения цилиндрического линейного вентильного двигателя в нефтедобычных агрегатах // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 3. – С. 94–100.

25. Петрушин А.Д., Шевкунова А.В., Шулаков Н.В., Шутемов С.В. Исследование эффекта тяжения цилиндрического линейного вентильного электродвигателя // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 28. – С. 62–75.

References

1. Veselovskii O.N., Koniaev A.Iu., Sarapulov F.N. Lineinye asinkhronnye dvigateli [Linear asynchronous engines]. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 256 p.

2. Semenov V.V., Ogarkov E.M., Korotaev A.D. Spetsial'nye asinkhronnye elektrodvigateli dlia neftedobychi [Special asynchronous electric engines for oil production]. Spetsial'nye asinkhronnye elektrodvigateli dlia neftedobychi. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2014. 286 p.

3. Ogarkov E.M., Korotaev A.D., Tsylev P.N., Burmakin A.M. Modernizatsiia oborudovaniia stankov-kachalok nizkodebetnykh neftianykh skvazhin [Modernization of the equipment for pumping low-well oil wells]. *Nauchnye issledovaniia i innovatsii: nauchno-tekhnicheskii zhurnal*. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2009, no.4, pp. 59-65.

4. Ivanovskii V.N., Darishchev V.I., Sabirov A.A.. Skvazhinnye nasosnye ustanovki dlia dobychi nefi [Well pumping installations for oil production]. Moscow: Neft' i gaz, Rossiiskii gosudarstvennyi universitet nefi i gaza imeni I.M. Gubkina, 2002. 824 p.

5. Sokolov V.V. Tsilindricheskie lineinye asinkhronnye dvigateli dlia privoda pogruzhnykh plunzhernykh nasosov [Cylindrical linear asynchronous engines for driving submersible plunger pumps]. Abstract of Ph.D. thesis. Ekaterinburg, 2006, 133 p.

6. Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., Shulakov N.V., Shutemov S.V. Tsilindricheskii lineinyi ventil'nyi elektrodvigatel' dlia pogruzhnogo besshtangovogo nasosa [Cylindrical linear valve engine for submersible rodless pump]. *Avtomatizatsiia v elektroenergetike i elektrotekhnike*, 2015, vol. 1, pp. 158-162.

7. Okuneeva N.A. Razrabotka i issledovanie elektroprivoda dlia neftedobyvaiushchikh nasosov s pogruzhnym magnitoelektricheskim dvigatelem [Development and research of electric drive for oil producing pumps with submersible magnetolectric engine]. Abstract of Ph.D. thesis. Moscow: Москский энергетический институт, 2008. 204 p.

8. Kabirov M.M. Gafarov Sh.A. Skvazhinnaia dobycha nefi [Downhole oil production]. Saint Petersburg, Nedra, 2010. 416 p.

9. Vol'dek A.I. Induktsionnye magnitogidrodinamicheskie mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom [Induction magnetohydrodynamic engines with liquid metal working fluid]. Leningrad, Energiia, 1970. 272 p.

10. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric machine]. 2nd ed. Moscow: Energiia, 1974, 840 p.

11. Shulakov N.V., Ogarkov E.M., Burmakin A.M. Equivalent circuit of linear induction motor. *Russian Electrical Engineering*, 2010, vol. 81, no. 6, pp. 282-286.

12. Klyuchnikov A.T., Korotaev A.D., Shutemov S.V. Modeling of a cylindrical linear ac electronic motor. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, no. 11, 606 p.

13. Klyuchnikov A.T. A way to calibrate equations that simulates an induction machine in relative units. *Russian Electrical Engineering*, 2012, vol. 83, no. 3, pp. 121-125.

14. Chirkov D.A., Korotaev A.D., Kliuchnikov A.T. Raschet osnovnykh parametrov tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia po skheme zameshcheniia [Calculation of the main parameters of a cylindrical linear valve engine according to the equivalent circuit]. *Avtomatizatsiia v elektroenergetike i elektrotekhnike*, 2016, vol. 1, pp. 144-149.

15. Ogarkov E.M. Teoreticheskoe issledovanie kontsevogo effekta lineinykh asinkhronnykh dvigatelei [Theoretical study of the end effect of linear asynchronous engines]. *Elektricheskie mashiny i elektromashinnye sistemy. Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov*. Perm: Permskii politekhnicheskii institut, 1987, pp. 6-13.

16. Ogarkov E.M. Issledovanie vliianiia prodol'nykh kraevykh effektov na staticheskie kharakteristiki lineinykh asinkhronnykh dvigatelei [Investigation of the effect of longitudinal edge effects on the static characteristics of linear asynchronous engines]. Abstract of Ph.D. thesis. Perm, 1974, 223 p.

17. Tiunov V.V., Ogarkov E.M. Raschet kharakteristik lineinykh induktsionnykh mashin s uchetom nesimmetrii, vzyvaemoi prodol'nym kraevym efektom [Calculation of the characteristics of linear induction machines with regard to asymmetry caused by the longitudinal edge effect]. *Spetsial'nye sistemy elektroprivoda. Sbornik nauchnykh trudov*. Perm: Permskii politekhnicheskii institut 1973, no. 133, pp. 60-69.

18. Ogarkov E.M., Tiunov V.V. Prodol'nyi kraevoi effekt lineinykh induktsionnykh dvigatelei s uchetom kharaktera raspredeleniia polia v kontsevykh zonakh [Longitudinal edge effect of linear induction engines, taking into account the nature of the field distribution in the end zones]. *Spetsial'nye sistemy elektroprivoda. Sbornik nauchnykh trudov*. Perm: Permckii politekhnicheskii institut, 1973, no. 133, pp. 29-36.

19. Shutemov S.V. Issledovanie ispol'zovaniia tsilindricheskogo ventil'nogo elektrodvigatel'ia dlia pogruzhnogo besshtangovogo nasosa [Study of the use of a cylindrical valve engine for a submersible shaftless pump]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2016, no. 12-4, pp. 795-799.

20. Mirzin A.M., Korotaev A.D., Shutemov S.V. Usilie tiazheniia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia s postoiannymi magnitami mezhdru statorom i vtorichnym elementom [Tension force of a cylindrical linear permanent magnet valve engine between the stator and the secondary element]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2013, no. 6.

21. Klyuchnikov A.T., Korotaev A.D. The efficiency of the electric motor of a subsurface pump with reciprocating action and losses in a leading-in cable. *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, no. 11, pp. 626-629.

22. Shulakov N.V., Shutemov S.V. A method for calculating the electromagnetic processes in a cylindrical linear electronic motor. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85, no. 11, pp. 663-667

23. Shulakov N.V., Shutemov S.V. Perspektivy ispol'zovaniia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia v kachestve privoda plunzhernykh neftedobychnykh agregatov [Prospects for the use of a cylindrical linear valve engine as a drive for plunger oil production units]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2016, no. 12-4, pp. 795-799.

24. Liubimov E.V., Shulakov N.V., Shutemov S.V. Obosnovanie primeneniia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia v neftedobychnykh agregatakh [The rationale for the use of a cylindrical linear valve engine in oil production units]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia*, 2018, no. 3, pp. 94-100.

25. Petrushin A.D., Shevkunova A.V., Shulakov N.V., Shutemov S.V. Issledovanie effekta tiazheniia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo elektrodvigatel'ia [Investigation of the effect of tension of a cylindrical linear valve engine]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnyeologii, sistemy upravleniia*, 2018, no. 28, pp. 62-75.

Сведения об авторах

Шапошников Владислав Валерьевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр. 29, e-mail: vladislav96gg@gmail.com).

Коротаев Александр Дмитриевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр. 29, e-mail: ceapb@mail.ru).

Токарев Роман Олегович (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр. 29, e-mail: ju11071996@yandex.ru).

Чабанов Евгений Александрович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр. 29), доцент кафедры «Технические дисциплины» Волжского государственного университета водного транспорта (Пермский филиал) (614060, Пермь, Гагарина бульвар, 33), e-mail: ceapb@mail.ru).

About the authors

Shaposhnikov Vladislav Valeryevich (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr. e-mail: vladislav96gg@gmail.com).

Korotaev Aleksandr Dmitrievich (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Electrical Engineering and Electromechanics of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ceapb@mail.ru).

Tokarev Roman Olegovich (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ju11071996@yandex.ru).

Chabanov Evgenii Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Electrical Engineering and Electromechanics of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr.), Associate Professor of Department of Technical Disciplines of Volga State University of Water Transport (Perm branch) (614060, Perm, 33, Gagarina bulvar, e-mail: ceapb@mail.ru).

Получено 17.01.2019